

12  
2025



# 生态与环境科学

## Ecology and Environmental Science

Volume 6·Issue 12·December 2025 ISSN2737-5072(Print) 2737-5080(Online)



生态与环境科学 Ecology and Environmental Science

Volume 6 · Issue 12 · December 2025 ISSN 2737-5072(Print) 2737-5080(Online)



Tel: +65 65881289

E-mail: contact@nassg.org

Add: 12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819



中文刊名：生态与环境科学

ISSN: 2737-5072 (纸质) 2737-5080 (网络)

出版语言：华文

期刊网址：http://journals.nassg.org/index.php/ees-cn

出版社名称：新加坡南洋科学院

Serial Title: Ecology and Environmental Science

ISSN: 2737-5072 (Print) 2737-5080 (Online)

Language: Chinese

URL: http://journals.nassg.org/index.php/ees-cn

Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

## 《生态与环境科学》征稿函

### Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge Infrastructure

### 版权声明/Copyright

南洋科学院出版的电子版和纸质版等文章和其他辅助材料，除另作说明外，作者有权依据Creative Commons国际署名—非商业使用4.0版权对于引用、评价及其他方面的要求，对文章进行公开使用、改编和处理。读者在分享及采用本刊文章时，必须注明原文作者及出处，并标注对本刊文章所进行的修改。关于本刊文章版权的最终解释权归南洋科学院所有。

All articles and any accompanying materials published by NASS Publishing on any media (e.g. online, print etc.), unless otherwise indicated, are licensed by the respective author(s) for public use, adaptation and distribution but subjected to appropriate citation, crediting of the original source and other requirements in accordance with the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) license. In terms of sharing and using the article(s) of this journal, user(s) must mark the author(s) information and attribution, as well as modification of the article(s). NASS Publishing reserves the final interpretation of the copyright of the article(s) in this journal.

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.  
12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819

Email: info@nassg.org

Tel: +65-65881289

Website: http://www.nassg.org



### 期刊概况：

中文刊名：生态与环境科学

ISSN: 2737-5072 (Print) 2737-5080 (Online)

出版语言：华文刊

期刊网址：http://journals.nassg.org/index.php/ees-cn

出版社名称：新加坡南洋科学院

### 出版格式要求：

- 稿件格式：Microsoft Word
- 稿件长度：字符数（计空格）4500以上；图表核算200字符
- 测量单位：国际单位
- 论文出版格式：Adobe PDF
- 参考文献：温哥华体例

### 出刊及存档：

- 电子版出刊（公司期刊网页上）
- 纸质版出刊
- 出版社进行期刊存档
- 新加坡图书馆存档
- 中国知网（CNKI）、谷歌学术（Google Scholar）等数据库收录
- 文章能够在数据库进行网上检索

### 作者权益：

- 期刊为 OA 期刊，但作者拥有文章的版权；
- 所发表文章能够被分享、再次使用并免费归档；
- 以开放获取为指导方针，期刊将成为极具影响力的国际期刊；
- 为作者提供即时审稿服务，即在确保文字质量最优的前提下，在最短时间内完成审稿流程。

### 评审过程：

编辑部和主编根据期刊的收录范围，组织编委团队中同领域的专家评审员对文章进行评审，并选取专业的高质量稿件进行编辑、校对、排版、刊登，提供高效、快捷、专业的出版平台。

# 生态与环境科学

Ecology and Environmental Science

主 编

匡廷云

Tingyun Kuang

编 委

李荣华 Ronghua Li

陈浩东 Haodong Chen

唐晓彬 Xiaobin Tang

- 1 毛竹扩鞭对自然保护区森林群落结构与生态环境影响的研究 / 雷琼 雷宗森 林黄昕 赵新鹏 雷祖培
- 4 智能控制结合高级氧化修复土壤微塑料污染 / 廖慧 冯涛
- 7 互花米草入侵对亚热带滨海湿地甲烷通量的影响 / 赵君惠
- 10 基于多参数趋势线分析的智慧水务工艺优化策略研究 / 王春华
- 14 2018年9月13—15日南疆西部一次暴雨天气过程分析 / 刘敏 高俊
- 17 GEP城市生态评估系统建设 / 张伟锋 汤宇
- 22 地质灾害应急处置与生态修复一体化研究 / 侯赤金
- 25 土壤氟化物赋存形态相关性研究进展 / 边归国 卢卫 谢殿荣 李玲玉
- 29 企业防雷安全管理与气象法规宣传的创新路径研究——以新疆兵团第十师为例 / 程琛
- 32 试析化工企业高浓度有机废水处理技术 / 王虎
- 35 城市黑臭水体治理中水质监测技术的应用与优化研究 / 孟源
- 38 火力发电厂湿法脱硫废水深度处理工艺探究 / 桑政军
- 41 智慧气象技术赋能公共气象服务精准化供给的实证研究 / 肖静
- 44 湿地生态系统退化原因及恢复重建技术 / 李超
- 47 城市大气颗粒物监测序列的趋势分析与控制策略 / 周雨蓉 金甜欣 胡姗姗 龚佳妮
- 50 探讨水环境保护工作中的水质监测质量管理措施 / 蒋小波
- 53 浅析农田土壤重金属污染监测技术 / 郑旭东
- 56 河北省辛集市彭六佐村生活污水处理方案设计 / 张慧贤
- 59 新建工程污泥离心脱水系统工艺参数调试研究 / 陈智威
- 62 不同土地利用类型下土壤污染风险比较 / 李晓萌
- 65 智慧遥感技术在矿山生态修复监测中的应用分析 / 郝利斌
- 68 工业集聚区复合污染治理协同路径研究 / 吴晋芳
- 71 探讨环境影响评价的发展方向 / 张英英
- 74 环境影响评价在工业项目决策中的实践与优化 / 杨兰兰
- 77 数字化技术在林业资源管理与可持续经营中的应用 / 李寅
- 80 城市地下水污染的修复治理路径探讨 / 韩外
- 83 高效液相色谱法测定饮用水中阿特拉津色谱条件的优化 / 李梦尧
- 86 生态保护红线约束下矿产开发环境影响评价研究 / 张佳 李文
- 89 印染废气中VOC排放特征及其环评模型构建 / 苏小浪
- 92 基于生态恢复目标的土壤污染损害鉴定方法优化 / 王灿 张宇婷
- 95 生物多样性损害鉴定评估的技术框架与案例实证 / 薛晓霞 侯志新 赵楠 薛俊霞 张嘉瑞
- 98 《易经》与生态学的对话——基于八卦模型的生态因子系统诠释 / 陈禹
- 103 土壤环境质量评价及其生态修复策略 / 徐克猛 周栋栋
- 106 生态养殖模式下三文鱼生长及繁殖性能研究 / 王子源 滕富强 王涛 黄书道 安丰太
- 109 双碳导向下生态环境治理创新与碳排放管理分析研究 / 姜姝
- 112 区域环境电磁辐射监测要点分析 / 谭福广
- 115 大气环境污染监测及环境保护方法分析 / 龙春娟
- 118 基于膜分离技术的工业水处理生产工艺优化研究 / 冯世镛
- 122 矿山废弃地水土保持生态重建技术与植被恢复策略 / 王建锋

- 1 Study on the effects of bamboo whip expansion on forest community structure and ecological environment in nature reserves  
/ Qiong Lei Zongsen Lei Huangxin Lin Xinpeng Zhao Zupei Lei
- 4 Intelligent control combined with advanced oxidation remediation for soil microplastic pollution  
/ Hui Liao Tao Feng
- 7 Effects of *Spartina alterniflora* Invasion on Methane Fluxes in Subtropical Coastal Wetlands  
/ Junhui Zhao
- 10 Process Analysis Model Based on Multi-parameter Trend Lines  
/ Chunhua Wang
- 14 Analysis of a Heavy Rainstorm Weather Process in Western Southern Xinjiang from September 13 to 15,2018  
/ Min Liu Jun Gao
- 17 GEP Urban Ecological Assessment System Construction  
/ Weifeng Zhang Yu Tang
- 22 Integrated Research on Geological Disaster Emergency Response and Ecological Restoration  
/ Chijin Hou
- 25 Progress in the study on the correlation between the occurrence forms of fluoride in soil  
/ Guiguo Bian Wei Lu Dianrong Xie Lingyu Li
- 29 Study on Innovative Approaches to Lightning Safety Management in Enterprises and the Dissemination of Meteorological Regulations: A Case Study of Xinjiang's 10th Division  
/ Chen Cheng
- 32 Analysis of High Concentration Organic Wastewater Treatment Technology in Chemical Enterprises  
/ Hu Wang
- 35 Application and Optimization of Water Quality Monitoring Technology in the Treatment of Urban Black and Odorous Water  
/ Yuan Meng
- 38 Research on the Deep Treatment Process of Wastewater from Wet Desulfurization in Thermal Power Plant  
/ Zhengjun Sang
- 41 Empirical Study on Empowerment of Public Meteorological Services by Smart Meteorological Technology  
/ Jing Xiao
- 44 Causes of Wetland ecosystem degradation and restoration and reconstruction techniques  
/ Chao Li
- 47 Trend Analysis and Control Strategy of Urban Atmospheric Particulate Monitoring Series  
/ Yurong Zhou Tianxin Jin Shanshan Hu Jiani Gong
- 50 Explore the quality management measures for water quality monitoring in water environmental protection work  
/ Xiaobo Jiang
- 53 Analysis of monitoring technology of heavy metal pollution in farmland soil  
/ Xudong Zheng
- 56 Design of Domestic Sewage Treatment Scheme in Pengliuzuo Village of Xinji City, Hebei Province  
/ Huixian Zhang
- 59 Research on Process Parameters of Centrifugal Dewatering System for New Construction Sludge  
/ Zhiwei Chen
- 62 Comparison of soil pollution risk under different land use types  
/ Xiaomeng Li
- 65 Application analysis of intelligent remote sensing technology in monitoring ecological restoration of mines  
/ Libin Hao
- 68 Research on the Collaborative Path of Composite Pollution Control in Industrial Agglomeration Areas  
/ Jinfang Wu
- 71 Exploring the development direction of environmental impact assessment  
/ Yingying Zhang
- 74 Practice and Optimization of Environmental Impact Assessment in Industrial Project Decision-making  
/ LanlanYang
- 77 The Application of Digital Technology in Forestry Resource Management and Sustainable Operation  
/ Yin Li
- 80 Exploration of Remediation and Management Approaches for Urban Groundwater Pollution  
/ Wai Han
- 83 Optimization of Chromatographic Conditions for Determination of Atrazine in Drinking Water by High Performance Liquid Chromatography  
/ Mengyao Li

- 86 Research on Environmental Impact Assessment of Mineral Development under the Constraint of Ecological Protection Red Line  
/ Jia Zhang Wen Li
- 89 Characteristics of VOC Emission from Dyeing Waste Gas and Construction of Environmental Assessment Model  
/ Xiaolang Su
- 92 Optimization of Soil Pollution Damage Assessment Methods Based on Ecological Restoration Goals  
/ Can Wang Yuting Zhang
- 95 Technical Framework and Case Study of Biodiversity Damage Identification and Assessment  
/ Xiaoxia Xue Zhixin Hou Nan Zhao Junxia Xue Jiarui Zhang
- 98 When Ecology Meets the Book of Changes-Interpretation of Ecological Factor System Based on Bagua Model  
/ Yu Chen
- 103 Soil Environmental Quality Assessment and Ecological Restoration Strategy  
/ Kemeng Xu Dongdong Zhou
- 106 Study on Growth and Reproductive Performance of Salmon under Ecological Culture Mode  
/ Ziyuan Wang Fuqiang Teng Tao Wang Shudao Huang Fengtai An
- 109 Innovation of Ecological Environment Governance and Analysis of Carbon Emission Management under the Guidance of Dual Carbon  
/ Shu Jiang
- 112 Analysis of Key Points of Environmental Electromagnetic Radiation Monitoring  
/ Fuguang Tan
- 115 Analysis of Atmospheric Environmental Pollution Monitoring and Environmental Protection Methods  
/ Chunjuan Long
- 118 Research on Optimization of Industrial Water Treatment Production Process Based on Membrane Separation Technology  
/ Shipu Feng
- 122 Ecological Reconstruction Technology and Vegetation Restoration Strategy of Soil and Water Conservation in Mine Waste Land  
/ Jianfeng Wang

# Study on the effects of bamboo whip expansion on forest community structure and ecological environment in nature reserves

Qiong Lei<sup>1</sup> Zongsen Lei<sup>1</sup> Huangxin Lin<sup>2</sup> Xinpeng Zhao<sup>3</sup> Zupei Lei<sup>4\*</sup>

1. Zhejiang Boao Municipal and Garden Engineering Co., Ltd., Taishun, Zhejiang, 325500, China

2. Taishun Office, Zhejiang Communications Investment Group Expressway Operation Management Co., Ltd., Taishun, Zhejiang, 325500, China

3. Taishun County Rural Development Co., Ltd., Taishun, Zhejiang, 325500, China

4. Zhejiang Wuyanling National Nature Reserve Management Center, Taishun, Zhejiang, 325500, China

## Abstract

As a typical fast-growing bamboo species in southern China, Moso bamboo possesses significant ecological and economic value. However, its rapid expansion through an advanced underground rhizome system has gradually invaded native communities such as broadleaf forests and mixed coniferous-broadleaf forests in nature reserves, leading to noticeable changes in forest community structure and degradation of ecological functions. Field investigations and literature analysis reveal that the expansion of Moso bamboo exhibits high concealment and strong resource competitiveness, significantly reducing tree species diversity and understory vegetation diversity during invasion, resulting in a trend toward homogeneity in community stratification. The expansion also alters soil water cycling and nutrient distribution, affecting soil organic matter accumulation and microbial community stability, thereby weakening ecosystem stability and service functions. To address this issue, this study proposes scientific ecological regulation and comprehensive management strategies based on practical reserve management experiences, providing theoretical foundations and practical references for maintaining forest community structures and improving ecological environment quality.

## Keywords

bamboo whip expansion; forest community structure; biodiversity; ecological environment; nature reserve

# 毛竹扩鞭对自然保护区森林群落结构与生态环境影响的研究

雷琼<sup>1</sup> 雷宗森<sup>1</sup> 林黄昕<sup>2</sup> 赵新鹏<sup>3</sup> 雷祖培<sup>4\*</sup>

1. 浙江博奥市政园林工程有限公司, 中国·浙江 泰顺 325500

2. 浙江交投集团高速公路运营管理有限公司泰顺所, 中国·浙江 泰顺 325500

3. 泰顺县农村发展有限公司, 中国·浙江 泰顺 325500

4. 浙江乌岩岭国家级自然保护区管理中心, 中国·浙江 泰顺 325500

## 摘要

毛竹作为中国南方典型的速生竹种, 具备重要的生态与经济价值。然而, 毛竹依赖发达的地下鞭根系统迅速扩张, 逐步入侵自然保护区的阔叶林、针阔混交林等原生群落, 导致森林群落结构发生明显改变, 生态功能出现退化。通过实地调查与文献分析发现, 毛竹扩鞭具有高度隐蔽性和强烈的资源竞争能力, 入侵过程中显著降低了树种和林下植被多样性, 使群落分层结构趋于单一。毛竹扩张还改变了土壤水分循环与养分分布, 影响了土壤有机质积累和微生物群落稳定性, 进而削弱了生态系统的稳定性和服务功能。针对这一问题, 本文结合保护区管理实际, 提出科学的生态调控与综合治理策略, 为维护森林群落结构和提升生态环境质量提供理论依据和实践参考。

## 关键词

毛竹扩鞭; 森林群落结构; 生物多样性; 生态环境; 自然保护区

【作者简介】雷琼(1990-), 女, 中国浙江泰顺人, 本科, 助理工程师, 从事园林研究。

【通讯作者】雷祖培, 男, 本科, 正高级工程师, 从事生态保护修复研究。

## 1 引言

自然保护区作为维护生物多样性、保护典型生态系统和珍稀物种的重要载体, 其生态完整性和原真性至关重要。然而, 随着毛竹在中国南方山区的广泛分布, 其扩鞭特性对

保护区森林群落结构与环境造成了新的挑战。毛竹依靠地下根状茎系统迅速向周边扩展,表现出极强的资源占据能力,使得原生树种及林下植物的生境不断缩减。毛竹扩张不仅是单一物种的数量扩张,更是对群落空间格局与生态过程的深刻改造。

学界对毛竹的研究多集中于经济价值、碳汇功能与人工林培育,而对毛竹扩鞭入侵自然保护区后对群落结构与生态系统功能的系统性研究仍显不足。本文试图通过多维度分析,探讨毛竹扩鞭对森林群落物种组成、群落结构稳定性以及土壤与生态服务的影响,并在此基础上提出管理对策,以期对自然保护区的科学管理提供参考。

## 2 毛竹扩鞭的生态学特征与扩展机制

### 2.1 毛竹根状茎系统的生物学特征

毛竹拥有极为发达的根状茎系统,这一结构是其实现大范围空间扩展和持续资源占据的生物学基础。毛竹根状茎通过节间的横向生长和分枝,可在地下形成错综复杂的网络,实现对空间的高效占据。每年春季,地下鞭根在适宜温度和水分条件下迅速生长,部分根系甚至可以穿透坚硬土层或石砾带,突破空间障碍,延伸至数米甚至十数米之外。通过根茎节点不断分化形成新竹鞭和竹笋,实现个体无性繁殖的高频更新,这使得毛竹在自然群落中具备超越大多数木本植物的更新速率和生态适应力。与主要依赖种子萌发和幼苗成长的乔木、灌木等植物相比,毛竹的无性繁殖优势不仅体现在生长速度快,更在于其对不良环境的适应能力和群体稳定性。这种根状茎系统的“克隆扩展”机制是毛竹成为群落空间优势种的根本原因,也是其入侵性和生态影响力极强的关键生物学特征。

### 2.2 扩鞭的空间格局与动力机制

毛竹扩鞭不仅仅是数量增长,更体现为空间格局上的高度适应性和动力性。其地下根状茎生长具有明显的定向性,常向着光照充足、水分充沛、养分富集的区域延伸。毛竹根状茎遇到物理障碍(如石块、树根等)时,表现出极强的绕行能力和再分枝特性,从而避免单一通路受限,实现多点突破和分布。扩鞭速度受多种环境因子调控,其中土壤肥力和含水量是最主要的驱动因素。坡地、林缘及次生林区,由于空间资源和养分相对富集,往往成为毛竹扩鞭的热点区域。野外监测数据显示,在适宜环境下,毛竹根状茎年平均扩展距离可达1.5至2米,远超本地乔木和灌木的天然更新或迁移速率。这种快速空间扩展不仅改变了原有的群落结构格局,也为后续毛竹形成优势群落奠定了基础。因此,毛竹扩鞭在空间层面上展现出高度的主动性与竞争力,是其对原生群落产生强烈替代效应的重要动力机制。

### 2.3 与森林群落原生物种的竞争关系

毛竹扩鞭对原生森林群落的物种构成和资源分配格局造成了深刻影响。毛竹通过地下根系与周围植物直接竞争水分和土壤养分,根系密布的土壤区域往往资源可利用度下降,致使阔叶乔木、灌木幼苗的存活率和生长速率明显降低。

毛竹地上茎秆的高密度分布遮蔽了林下大部分光照,抑制了林下草本及灌木的光合作用,进而导致这些植物的生长、开花和结实受到严重限制。随着时间推移,毛竹逐步占据了森林群落的空间与资源优势,原生优势种如壳斗科、木兰科等更新乏力,群落多样性显著下降,生态位出现单一化趋势。进一步而言,毛竹替代原生树种后,改变了森林的能量流动和物质循环过程,使整个生态系统的结构与功能趋于简化和低效。毛竹与原生物种的强烈竞争,实际上是推动群落结构转型和生态服务功能衰退的内在驱动力,也是自然保护区生态治理中最为棘手的问题之一。

## 3 毛竹扩鞭对森林群落结构的影响

### 3.1 物种多样性下降

毛竹扩鞭对自然保护区森林群落的物种多样性构成了系统性威胁。调查数据显示,随着毛竹的持续扩张,原生林地的乔木层物种数量出现显著下降,部分区域的乔木层物种数较未受影响的原生林减少30%以上。这一趋势主要源于毛竹在地下和地上空间的强烈资源竞争,导致原有优势乔木种如枫香、樟树、银杏等的幼苗难以获得充足的生长空间和必需的光照,进而阻碍了其更新过程。与此同时,林下草本层的物种也因毛竹形成的致密冠层遮蔽和土壤养分贫乏而急剧减少,部分耐阴性较弱的草本和蕨类植物出现局地消失现象。长期来看,毛竹主导的群落环境削弱了区域物种的生存多样性,造成了生物多样性保护功能的衰退。多样性指数的下降不仅体现在植物层面,还波及依赖多样化植物资源的昆虫、鸟类等动物群体,对自然保护区整体生态网络的稳定性产生连锁影响。因此,毛竹扩鞭的持续推进已成为影响自然保护区物种多样性维持和生态安全的核心风险因素之一。

### 3.2 群落分层结构的简化

原生森林群落通常呈现出复杂的垂直结构,包括乔木层、灌木层和草本层等多个层次,群落内不同植物类型通过空间互补与资源分异,共同维持生态系统的稳定性和高效性。毛竹扩鞭显著打破了这一结构平衡。在毛竹大规模扩张的区域,乔木层原有优势逐渐丧失,部分乔木因根系空间受限、生长势减弱和更新障碍而逐步退出群落主导地位。灌木层则因竹秆遮蔽和资源拮抗难以发育,种类和覆盖度迅速下降。草本层生境进一步碎片化,呈现出明显的斑块化和局部消亡趋势。最终,毛竹成为群落的主导组成,森林结构由多层次趋于单层化,空间异质性与生态功能高度简化。这种结构简化导致生态系统抵御外部干扰(如极端气候、病虫害等)的能力下降,能量流动和物质循环过程趋于单一,系统整体的稳定性和恢复力削弱。

## 4 毛竹扩鞭对生态环境的影响

### 4.1 土壤理化性质的改变

毛竹扩鞭入侵极大地重塑了森林土壤的理化属性。毛竹落叶中的木质素、鞣酸和有机酸类物质丰富,这些特定化学成分随落叶分解渗入土壤,影响了土壤的酸碱缓冲能力和

有机质的积累过程。研究表明,毛竹扩张区的土壤 pH 值普遍低于周边原生林地,酸化趋势明显,长期酸性环境抑制了部分阔叶树种幼苗和林下草本的生长。与此同时,毛竹根系分泌物对土壤微生物群落产生选择性抑制作用,进一步减缓有机残体的分解和养分释放速率。因此,毛竹扩鞭对土壤理化性质的深层次改变,是其导致森林群落结构单一化和生态功能弱化的重要机制。

#### 4.2 水文循环与土壤水分动态

毛竹扩鞭同样对森林水分循环与土壤水分分布造成深远影响。毛竹根系极其发达,具有较强的水分吸收和蒸腾能力。在高密度毛竹群落中,地下根系层级纵横交错,能够从较深土层大量抽取水分,显著降低了林下土壤的持水能力。竹叶结构又对降水有较强的拦截作用,导致地表水分渗透减少,土壤表层湿度下降。水分竞争的加剧使得阔叶乔木和灌木类植物面临更严峻的水分胁迫,部分物种出现生长停滞或生理衰退。相关研究还发现,持续的土壤水分亏缺破坏了保护区原有的水文平衡,诱发局部土壤干裂、地表径流加剧、地下水补给减少等连锁反应。极端气候条件下,毛竹扩鞭区更易发生季节性干旱甚至林下植物大面积枯萎。

#### 4.3 微生物群落与养分循环

毛竹扩鞭引发的土壤环境变化进一步波及微生物群落的多样性和功能。与原生阔叶林土壤相比,毛竹入侵区的微生物多样性指数显著下降,真菌/细菌比例失衡,细菌群落中以分解竹叶纤维素和木质素为主的功能类群占比升高,其他促进植物生长的有益微生物逐步减少。土壤微生物代谢功能趋于单一,氮循环中的硝化作用和碳循环的分解能力下降,导致养分释放和再利用效率降低。长期来看,微生物群落结构的

### 5 毛竹扩鞭的生态风险与保护区管理挑战

#### 5.1 生物多样性保护的困境

自然保护区建立的初衷在于维护原生生态系统的完整性与多样性,而毛竹扩鞭的入侵使这一目标面临新的威胁。毛竹凭借其地下根状茎的快速扩展与地上竹秆的高密度生长,逐步占据了森林群落的优势地位。伴随其扩张过程,原有阔叶林和针阔混交林中的乔木幼苗更新空间被挤压,林下灌木和草本植物因光照受限与水分、养分竞争而大幅减少。尤其是一些珍稀濒危树种,如分布范围有限的特有种,更容易在毛竹扩鞭主导的生境中丧失适宜的生长条件,进而面临局地性灭绝的风险。物种多样性下降不仅表现为种类数量的减少,还涉及种群结构的单一化与遗传多样性的衰退。这种趋势削弱了群落抵御病虫害、极端气候和外来干扰的能力,使保护区的生态稳定性与生态安全受到严重挑战。因此,从生物多样性保护的角度看,毛竹扩鞭入侵已成为制约自然保护区生态目标实现的重要生态困境。

#### 5.2 生态服务功能的弱化

森林生态系统通过涵养水源、保持水土、调节气候和提供碳汇等多重服务功能,成为维持区域生态安全与人类可

持续发展的关键保障。毛竹群落虽然具备较快的生物量累积能力,在碳固定和部分水土保持方面发挥了一定作用,但其功能结构与原生阔叶林存在明显差距。毛竹单一化群落在植被分层、根系深度和凋落物质分解方面均不及多样化的阔叶林,导致土壤有机质循环效率下降,水分调节能力削弱。此外,毛竹扩鞭还改变了林下光照与湿度环境,使得原本复杂的微生境被大幅简化,进而降低了系统对外界扰动的缓冲能力。随着时间推移,生态服务功能呈现出弱化趋势:涵养水源效果下降,水土保持功能减弱,区域碳汇能力趋向不稳定。更为关键的是,毛竹群落难以以为多样化的动物提供稳定的栖息环境,从而间接削弱了生态系统整体的服务供给水平。这种功能弱化直接挑战了自然保护区在生态安全与社会需求层面的双重使命。

### 6 结语

毛竹扩鞭对自然保护区森林群落结构与生态环境的影响呈现系统性与深远性。其入侵导致物种多样性下降、群落结构简化、土壤与水文循环失衡,并进一步威胁保护区的生态服务功能。治理毛竹扩鞭不能仅依赖单一措施,而需构建综合性的生态调控机制。建议结合人工干预与生态恢复技术,如定期清理扩张竹鞭、引入本土树种恢复群落多样性、加强土壤改良与水分调控,同时通过长期监测与科学评估实现动态管理。唯有如此,方能在保障自然保护区生态完整性的同时,合理利用毛竹资源,实现生态保护与可持续发展的双重目标。

#### 参考文献

- [1] 黄鸿青,张裕顺,吴兴毅.毛竹林扩鞭蔓延现状与基于生态保护视角的对策研究——以福建省建瓯市为例[J].福建林业,2017,(05):26-28.
- [2] 李赛花.延平区毛竹林扩鞭性增长对林业的影响[J].福建林业科技,2014,41(02):220-223.
- [3] 董晨玲.毛竹扩鞭成林新竹生长效果研究[J].竹子研究汇刊,2003,(04):30-33.
- [4] 董建文,张兴正,林德根.不同土壤管理措施的毛竹扩鞭效果研究[J].江西农业大学学报,2000,(01):37-40.
- [5] 薛云.池州市贵池区毛竹丰产栽培技术[J].现代农业科技,2015,(17):208-209.
- [6] 范莉.近自然状态下毛竹竹鞭空间扩张规律研究[J].广东蚕业,2024,58(09):26-28.DOI:CNKI:SUN:GDCY.0.2024-09-008.
- [7] 陈珺.毛竹入侵及去除对杉木林群落结构与碳储量的影响[D].浙江农林大学,2021.DOI:10.27756/d.cnki.gzjlx.2021.000199.
- [8] 徐道炜,戴云山自然保护区毛竹向杉木扩张对林分土壤质量及其凋落物分解的影响[D].福建农林大学,2018.
- [9] 黄鸿青,张裕顺,吴兴毅.毛竹林扩鞭蔓延现状与基于生态保护视角的对策研究——以福建省建瓯市为例[J].福建林业,2017,(05):26-28.DOI:CNKI:SUN:FJLT.0.2017-05-016.
- [10] 郭宝华.不同生产力水平毛竹林碳氮磷生态化学计量特征研究[D].中国林业科学研究院,2014.

# Intelligent control combined with advanced oxidation remediation for soil microplastic pollution

Hui Liao<sup>1</sup> Tao Feng<sup>2</sup>

1. Wuhan Zhongcheng Anhuan Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

2. Wuhan Zhongmao Environmental Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430064, China

## Abstract

The sustained development of plastic pollution, especially microplastic pollution, has become a major challenge for soil ecological environment. In recent years, with the development of intelligent management and advanced oxidation processes (AOPs), new ideas have been provided for us to control plastic pollution. This article mainly summarizes the use of these new methods to address plastic pollution in soil, and provides a comprehensive exploration and analysis of the measures for addressing this issue. By utilizing intelligent pollution detection and management equipment, as well as advanced oxidation methods, we also utilized a series of methods such as UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> to adjust the parameters of the oxidation method using intelligent systems, and obtained a microplastic oxidation degree of over 85%. Our results demonstrate that this method of integrating advanced oxidation and intelligent management systems can effectively improve the oxidation efficiency of plastic pollution in soil, and has broad application prospects.

## Keywords

intelligent governance; Advanced oxidation method; Microplastic pollution; Soil remediation; uv/h<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; Efficiency removal

# 智能控制结合高级氧化修复土壤微塑料污染

廖慧<sup>1</sup> 冯涛<sup>2</sup>

1. 武汉众诚安环科技有限公司, 中国·湖北 武汉 430000

2. 武汉仲茂环境科技有限公司, 中国·湖北 武汉 430064

## 摘要

塑料污染尤其是微塑料污染的持续发展已经成为土壤生态环境的一大难题,近年来,随着智能管理、高级氧化工艺(AOPs)的发展,为我们治理塑料污染提供了全新的思路。该文主要是总结利用这些全新的方式治理土壤中的塑料污染问题,并对该问题的治理措施做了全方面的探讨分析。通过利用智能污染检测和管理设备,并且借助高级氧化方法,在其中,我们也利用了UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>等系列方法,利用智能系统对氧化方法的参数进行调节,并得到的微塑料氧化度达到了85%以上。我们的结果证明,这种系统集成先进的氧化和智能管理系统的方法能够有效提升土壤中塑料污染的氧化效率,应用前景广泛。

## 关键词

智能治理; 高级氧化法; 微塑料污染; 土壤治理; uv/h<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; 去除效率

## 1 引言

面对日益严重的全球塑化污染,微塑料成为土壤污染中不可忽略的重要污染物质之一。这类污染物对于土壤生态、人类健康的破坏均不容乐观,它们的普遍存在不仅仅会使土壤质量受到影响,同时也会通过食物链进入人体内直接危害人类健康。因此,如何有效解决土壤中的微塑料污染是亟待解决的问题。传统的利用生物降解或是物理过滤的方法,虽然能够在一定程度上起到一定功效,却由于微塑料种类繁多、组成复杂使得传统方法难以达到理想的修复效果。

【作者简介】廖慧(1988-),女,中国湖北京山人,本科,工程师,从事环境规划与管理、污染治理、生态修复、碳管理等研究。

近年来,智能化管理与高级氧化工艺 AOPs 被认为是环境修复的新兴手段,对于修复土壤中微塑料污染开辟了新的途径。智能化管理能够实时、调控修复过程,而高级氧化工艺具有较强的氧化能力,两者的结合,也许将会在很大程度上提高修复效率。因此,本文提出结合智能化管理与高级氧化工艺实现土壤微塑料修复,旨在为解决此难题提供新的思路<sup>[1]</sup>。

## 2 微塑料污染的背景与现状

微塑料污染已成为世界各国环保问题的重点问题。随着大量塑料产品应用,塑料垃圾问题日渐严重。预计每年有 800 万 t 的塑料垃圾进入海洋中,而其中 90% 将逐渐分解为极其细小的微塑料,尺度多在 5mm 以下。这些微观塑料不仅给海洋生态系统造成巨大的负面影响,还能扩散到土壤、大气、水等各类生态系统中。

## 2.1 智能控制技术的应用背景

鉴于日益严重的微塑料污染，现存的环境保护方案存在很多局限性，因此新型的智能管理模式作为一项创新性环境管理模式被提出来。新型的环境管理模式可即时监测污染源并即时调整其状态，提高环境保护的有效性和精准性。智能环境管理模式可以利用传感器、人工智能 (Artificial Intelligence, AI)、数据挖掘等工具来追踪土壤中的微塑料数量，以及持续评价其污染程度。并可用于优化污染清除过程，自动设定每个清除过程的重要参数以减少人为因素，提高清除效率。例如利用机器学习构建的模型可以预测多种污染成分的传播趋势，为土壤的修复提供理论支撑，从而缩减修复成本，加快修复速率。

## 2.2 高级氧化技术 (AOPs) 概述

AOPs 是一种近年来被广泛采用的除污技术，特别是对污染水体和污染土壤中一些难降解的有机物有极强的氧化能力，通过形成高活性自由基氢氧根离子 ( $\cdot\text{OH}$ ) 来迅速降解这些难降解的有机污染物，常用于污水净化、空气净化、土壤修复等。在治理塑料微小颗粒污染方面，AOPs 也能很好地去除一些有毒性的物质，例如塑化剂、稳定剂等，还能对整个塑料的核心物质进行一定的破坏。据实验研究得知，在矿物质的作用下，AOPs 能在短时间内对塑料微粒的环境毒性进行有效地降解，这对于改善土壤生态环境、提升土壤质量来说有着至关重要的作用。AOPs 常用的工艺包括臭氧氧化技术、光催化氧化技术、Fenton 反应等，在实际中也在逐渐开展和完善。

## 3 土壤微塑料污染的特性与修复难点

### 3.1 土壤微塑料的物理化学特性

来自农业和工业废弃物及污染源的 MP 通常在土壤中出现。这些尺寸微小的塑料碎片可以表现为粒子、线状物或薄层状等形状，其性质取决于外形。物理化学性质来看，MP 大多具有轻质、表面化学组分复杂 (如含有重金属或农药残留) 等特点，这可能会提高它们在土壤中的影响程度与迁移能力。同时，微塑料在土壤中具有高的稳定性，如聚乙烯 (PE) 和聚丙烯 (PP) 等强韧性塑料制品，在土壤中可存在几年甚至几百年。因此，如果土壤受到 MP 的污染后，它们可能会在土壤中长期储存和累积，进而会导致土壤的透水能力以及通气能力下降，使土壤结构遭到破坏<sup>[2]</sup>。

### 3.2 微塑料对土壤生态系统的影响

土壤中的微塑料会对土壤生态系统产生不同层次、多方面的影响。第一，微塑料会破坏土壤微生物群落的组成以及作用。研究证明，随着土壤中微塑料含量的增长，一些有益于土壤的生物受到了遏制，使得微生物种类下降，从而导致土壤营养物质循环以及有机物分解的障碍出现。与此同时，土壤中的微塑料也会直接影响植物生长。植物主要靠根部从土壤中吸收水分以及营养物质，而在土壤中存在微塑

料会阻碍根部发育的环境，缩小根部水分吸收面积，从而限制植物生长的发育。有部分植物种类能够通过根部摄取微塑料，然后再将微塑料传递到食物链当中，导致动物、植物健康的风险增加。而据相关研究结果，在土壤中微塑料含量超过一定阈值的情况下，农作物的产量降低幅度为 15%~30%。

## 3.3 微塑料污染的修复难点

对土壤中微塑料进行修复，首先面临的挑战就是微塑料类型与大小的多样性和复杂性，由于微塑料形状多变，且尺寸有别，因此微塑料在土壤中的运动与降解与清除难度增加。其现有的解决方案如物理筛分技术、化学溶蚀技术和生物修复技术都各有缺陷，物理筛分技术主要适用大型微塑料，而对于微米级大小的微塑料无法适用；化学溶蚀技术虽对部分塑料成分有破坏作用，但却可能存在二次污染问题；此外，化学溶蚀技术条件下塑料成分耗时较长，很难推广运用；生物修复技术具有较为绿色环保的优点，但由于在微塑料消解过程中其消化分解速率相对缓慢，同时在微塑料消化过程中，其微粒表面可能受到环境中污染物的制约，对其消化效率产生一定的影响。此外，现有的土壤微塑料污染修复技术还没有成熟，还需要对各种技术的综合利用以及技术优化继续开展研究<sup>[3]</sup>。

## 4 智能控制与高级氧化技术相结合的修复策略

### 4.1 智能控制系统的构建与工作原理

#### 4.1.1 土壤微塑料污染的实时监测

不同种类污染源、不同塑料种类和不同污染物浓度对土壤中微塑造成分有影响。红外光谱传感器、激光粒度仪、超声传感器等仪器可用于土壤中微塑成分数量快速测定。研究表明，利用光谱传感器可以在 5 分钟内完成土壤样品中微塑成分的有效测量，并且其对微塑成分种类有一定的区分能力，如对聚乙烯 (PE) 这一种类的微塑料，应用传感器的准确率不低于 90%。通过实况数据的搜集和分析，实现了智能管理系统对土壤中微塑成分的内部把握，为之后的清理提供信息支撑。

#### 4.1.2 智能控制系统的参数调节与反馈机制

智慧控制能够根据实时的监测数据自动调节参数，优化修复过程中各因素的性能。智慧管控平台可以根据污染数据判断最佳修复指标，并可根据环境、污染条件的变化适当调整反应氧化物浓度、反应时长、处理温度等变量。例如，当发现土壤中纳米颗粒较多时，此系统会自动增浓 AOPs 法中氧化剂浓度和延长反应时间以提高去除率。另外，智慧管控系统也具有逆过程的操作功能，当修复效果不达到预期时，能够主动改参或切换修复模式，从而实现高效持续修复。

### 4.2 高级氧化技术在土壤微塑料修复中的应用

#### 4.2.1 UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 高级氧化技术原理

UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 技术是最常用的 AOPs 技术。基本过程是 UV

照射过氧化氢( $H_2O_2$ ),分解出具有强氧化性的羟基自由基( $\cdot OH$ ),可将土壤中微塑料迅速降解,经试验检测得出若环境适宜,可以短期将土壤中的微塑料污染降低到极点。对于土壤中含微塑料样品(10%),用UV/ $H_2O_2$ 技术可在2小时内使微塑料含量降低60%以上。可以将塑料制品中的增塑剂、染料等污染源有效去除,且可以在低温下实现有效地去除<sup>[4]</sup>。

#### 4.2.2 AOPs 技术在土壤微塑料降解中的优势

AOPs 技术存在很多的优势,尤其是应用于土壤的微塑料去除方面具有显著的成效。首先,该技术可以对土壤中的各种类型的微塑料进行有效地降解,其中就包括聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚苯乙烯(PS)等各种常见的塑料种类。研究指出,采用AOPs技术可以有效降低微塑料聚集体形成与生态风险的关联性。其次是良好的环境适应性,适用于不同类型的土壤环境当中,包括砂土、黏土等。第三是AOPs技术能够彻底降解塑料制品中的有毒有害污染物,比如塑化剂、抗氧化剂等,杜绝产生二次污染。在一项研究结果中,通过AOPs技术能够使土壤中微塑料的降解率达到80%以上,而采用人工筛分的方式可以达到30%~40%的去除率。

## 5 实验研究与数据分析

### 5.1 实验设计与设备选择

在本次研究规划设计中,以多种类型的土壤(如砂性土和黏性土)和多种类型的微塑料类型(如聚乙烯/聚丙烯微塑料)作为恢复性的试验对象,并采用AOPs技术中的UV/ $H_2O_2$ 技术来对环境污染进行处理,同时通过智能管理平台来对环境污染情况进行检测和参数调控。本次仪器设备主要包括紫外光源模块、 $H_2O_2$ 模块、信号采集装置等,其中紫外光源功率设置为30W, $H_2O_2$ 的浓度也设置为5%,从而可以保证我们在实验过程中可以迅速产生高密度的羟基自由基。

### 5.2 修复效果与降解率评估

从我们实验数据中了解到,通过UV/ $H_2O_2$ 方式去除沙质土及壤土中聚乙烯MP的过程中,在两小时的条件下,前者去除率达到70%,而后者略低,为50%左右,而在此种情况下通过智能化监控设备对持续调控过程进行持续监测后,在此过程中壤土的去除率会得到较好的改善。在此次研

究中,在该智能化控制装置下可以自动按照土壤内部MP情况自动设定制备紫外光照射时间的长短、 $H_2O_2$ 溶液浓度的增减,从而起到最佳的修复作用。实践表明,在该智能化控制装置下修复效率有10%~20%的提高<sup>[5]</sup>。

### 5.3 智能控制系统对修复效率的影响

通过试验证明,采用智能管理系统对提升修复成效也起着重要的作用,相比于采用传统手动参数配置的修复方式来说,采用该智能管理系统可在实时检测数据的指导下动态调整修复参数,能提升15%~30%分解速度的同时,有效节约耗能成本以及化学材料的浪费,从而实现降低成本的目的。通过采用自动化操控以及优化修复参数的方式,运用该智能管理系统可为我们提供高效又经济、环保地解决微粒子在土壤问题上的矛盾。

## 6 结论

本文从智能化控制技术和高级氧化技术出发分析对土壤受到微塑料污染的修复效果,测试结果表明,智能化的检测手段能够实时监控并调节高级氧化过程中关键性影响因素,对高级氧化过程的修复能力起到显著的提升效果;采用UV/ $H_2O_2$ 等高级氧化方法,在土壤中的微塑料的降解率达到85%以上,并且该过程具有较好的通用性。此外,智能化控制还提高了修复过程的精确性和稳定性,降低了人为参与环节以及人为操作失败的概率。尽管本文还有待完善的环节,但是实验结果清楚表明,集成的智能化控制和高级氧化技术是一个充满希望的手段,能在更大范围内的土壤修复工作中发挥作用,为人类对抗土壤污染中的微塑料的介入提出新的途径。

### 参考文献

- [1] 王浩宇;陈宇杰;刘慧彤.智能控制技术在土壤污染修复中的应用研究[J].环境科学与技术,2023(5):112-118.
- [2] 张昊天;李志鹏;高敏娜.高级氧化技术在水体微塑料降解中的效果与应用[J].环境污染与防治,2023(8):204-210.
- [3] 邱博文;黄晓红;李嘉雯.高级氧化与智能控制联合修复土壤污染的机理探讨[J].土壤与水分保持,2023(6):58-63.
- [4] 杨鹏飞;吴若涵;张天硕.基于智能控制系统的土壤微塑料污染修复技术研究[J].生态环境与安全,2024(2):71-77.
- [5] 赵宇轩;陈子澄;林智颖.高级氧化技术对土壤微塑料污染修复的应用进展[J].土地资源管理,2024(3):150-156.

# Effects of *Spartina alterniflora* Invasion on Methane Fluxes in Subtropical Coastal Wetlands

Junhui Zhao

College of Life and Environmental Sciences, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang, 325035, China

## Abstract

To investigate the impact of *Spartina alterniflora* invasion on methane ( $\text{CH}_4$ ) emissions in subtropical coastal wetlands, this study compared the emission fluxes from three habitats: *S. alterniflora* marshes, native salt marshes, and bare mudflats. The results showed that the  $\text{CH}_4$  emission flux from the *S. alterniflora* habitat ( $1.74 \pm 0.22 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ) was significantly higher than those from the native salt marsh and bare mudflat. This increase is primarily attributed to the invasion-induced elevation of soil organic carbon content, increased availability of substrates such as methyl compounds, and the restructuring of microbial communities, which collectively enhance  $\text{CH}_4$  production. Correlation analysis indicated that  $\text{CH}_4$  emissions in different habitats are driven by distinct environmental factors. This study reveals the stimulatory effect of *S. alterniflora* invasion on  $\text{CH}_4$  emissions in coastal wetlands, providing a basis for assessing its influence on the carbon cycle.

## Keywords

methane; flux; coastal wetlands; *Spartina alterniflora*

# 互花米草入侵对亚热带滨海湿地甲烷通量的影响

赵君惠

温州大学生命与环境科学学院, 中国·浙江温州 325035

## 摘要

为探究互花米草入侵对亚热带滨海湿地甲烷( $\text{CH}_4$ )排放的影响,本研究对比分析了互花米草、本地盐沼及光滩3种生境的排放通量。结果显示,互花米草生境的 $\text{CH}_4$ 排放通量( $1.74 \pm 0.22 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )显著高于本地盐沼,光滩最低。其排放机制主要源于互花米草入侵通过增加土壤有机碳含量、甲基化合物等可利用底物以及重塑微生物群落,从而促进了 $\text{CH}_4$ 的生成与排放。相关性分析表明,不同生境的 $\text{CH}_4$ 排放受不同环境因子驱动。本研究揭示了互花米草入侵对滨海湿地 $\text{CH}_4$ 排放的增强效应,为评估其碳循环影响提供了依据。

## 关键词

甲烷; 排放通量; 滨海湿地; 互花米草

## 1 引言

全球湿地面积虽仅占陆地总面积的5-8%<sup>[1]</sup>,却是大气甲烷( $\text{CH}_4$ )的重要自然排放源,其年均排放量约占全球总排放量的30%(约194 Tg)<sup>[2,3]</sup>。滨海湿地作为其重要组成部分, $\text{CH}_4$ 年排放量达5-28 Tg,在全球 $\text{CH}_4$ 循环中具有关键作用<sup>[4]</sup>。由于地处陆海生态交错带,滨海湿地生态系统结构脆弱,极易受环境变化与生物入侵等压力的影响<sup>[5]</sup>,自1979年,为促淤造陆而引入后,该植物凭借其快速生长、高繁殖力以及对高盐度与潮汐淹没等逆境的强耐受性,迅速在滨海湿地失控扩散<sup>[6]</sup>。截至2020年,其入侵面积已超过 $5.5 \times 10^4 \text{ ha}$ <sup>[7]</sup>,范围覆盖自辽宁至海南的多个沿海省份,其中

江苏、上海、浙江、福建、等亚热带滨海湿地入侵程度最为严重,占总入侵面积的91.64%<sup>[8]</sup>。互花米草的广泛入侵已引发严重的生态后果,不仅排挤本地优势群落,还通过改变土壤理化性质进而影响土壤微生物活动,进而调控滨海湿地 $\text{CH}_4$ 产生与排放。然而,目前关于互花米草入侵在亚热带滨海湿地 $\text{CH}_4$ 排放特征的影响有待进一步研究。

本研究选取中国亚热带滨海湿地福建、浙江、上海和江苏等省(市)的典型滨海湿地作为研究对象,通过对比3种生境下(本地盐沼、互花米草、光滩)的 $\text{CH}_4$ 排放通量,解析其排放特征及驱动机制。结合对土壤有机碳、总氮、温度等环境因子的观测,进一步识别影响 $\text{CH}_4$ 排放的关键驱动因素,并探讨其与湿地生态功能之间的内在联系。

【作者简介】赵君惠(2001-),女,中国浙江温州人,硕士在读,从事湿地生态学研究。

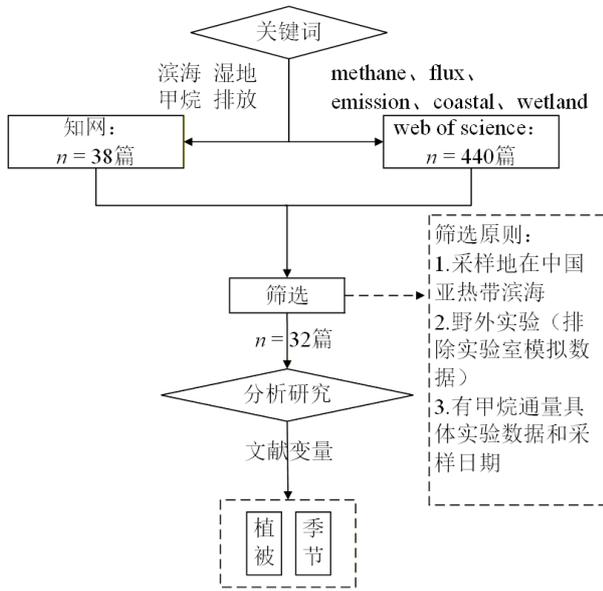


图1 文献筛选与研究流程图

## 2 互花米草入侵对 CH<sub>4</sub> 排放通量的影响

互花米草入侵显著提高了亚热带滨海湿地 CH<sub>4</sub> 排放通量。互花米草生境中, CH<sub>4</sub> 排放通量 (1.74 ± 0.22 mg · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>), 显著高于本地盐沼 (0.73 ± 0.07 mg · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>) 和光滩 (0.27 ± 0.04 mg · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>) (p < 0.001, 表 1), 表现为互花米草 > 本地盐沼 > 光滩, 与以往的研究相符<sup>[9,10]</sup>。

表 1 三种湿地类型 CH<sub>4</sub> 排放通量的单因素方差分析

生境	通量 (mg · m <sup>-2</sup> · h <sup>-1</sup> )	F	p	R <sup>2</sup>
本地盐沼	0.73 ± 0.07b			
互花米草	1.74 ± 0.22a	25.40	< 0.001	0.09
光滩	0.27 ± 0.04b			

本研究通过 Spearman 相关性分析发现, 互花米草生境 CH<sub>4</sub> 排放通量与 SOC 存在弱相关性 (p < 0.05, 表 2), 互花米草生境的土壤有机碳 (SOC) 含量为 9.65 ± 0.55 g/kg, 显著高于本地盐沼和光滩。在中国北部湾滨海湿地的研究表明, 互花米草生境的 SOC 含量较高, 为微生物生成 CH<sub>4</sub> 提供了更多可利用底物<sup>[11]</sup>。以上影响主要是由于互花米草入侵导致其凋落物的分解以及根系分泌物输入大量有机物质<sup>[12,13]</sup>。此外, 还包括富含甲基化合物 (如三甲胺), 这些“非竞争性”底物不容易被其他微生物 (如硫酸盐还原菌) 消耗, 几乎专性地被产甲烷菌利用, 从而通过甲基营养型途径产生 CH<sub>4</sub><sup>[14]</sup>。另一方面, 互花米草的入侵通过重塑产甲烷菌群落<sup>[15]</sup>, 促使产甲烷菌的丰度增加, 从而促进 CH<sub>4</sub> 的生成<sup>[13]</sup>。在九段沙湿地的研究亦证实了以上观点, 互花米草入侵显著改变了土壤功能微生物, 导致温室气体排放的增加<sup>[10]</sup>。值得注意的是, 互花米草的根、茎、叶鞘及叶片都具备发达的通气组织<sup>[16]</sup>, 促进了 CH<sub>4</sub> 的运输。

表 2 CH<sub>4</sub> 排放通量与环境因子间的 Spearman 相关系数

生境	SOC (g/kg)	TN (g/kg)
本地盐沼	0.10	0.17*
互花米草	0.27*	-0.09
光滩	0.71**	0.72**

光滩生境的 CH<sub>4</sub> 排放通量较低, 且与土壤总氮 (TN) 呈显著负相关 (p < 0.01, 表 2)。光滩生境的总 TN 含量为 0.49 ± 0.03 g/kg, 显著低于互花米草 (0.76 ± 0.05 g/kg) 和本地盐沼 (0.67 ± 0.05 g/kg)。以上影响主要是由于光滩生境极易受潮汐影响, 潮汐作用导致该地区土壤的氧化还原条件频繁变化, 而氮素的形态 (如硝态氮和铵态氮) 及其转化过程 (如硝化作用和反硝化作用) 与这些氧化还原条件密切相关。在有氧条件下, 氮的氧化过程 (如硝化作用) 会消耗氧气, 但总体上, 高溶解氧环境有利于 CH<sub>4</sub> 的氧化<sup>[17]</sup>。此外, 在干湿交替的环境中, 氮的输入可能改变土壤微生物群落的组成及其功能, 从而影响 CH<sub>4</sub> 的产生与消耗平衡。这可能进一步解释了光滩低 CH<sub>4</sub> 排放的原因之一。

光滩生境的低 CH<sub>4</sub> 排放也可能与其缺乏植被覆盖有关。首先, 光滩生境缺乏植物覆盖, 不能有效地截取氮等营养盐, 降低了产甲烷菌可利用底物的供应, 从而减少了 CH<sub>4</sub> 的排放<sup>[18]</sup>。其次, 缺乏植被使得土壤中产甲烷菌产生的 CH<sub>4</sub> 难以通过植被的通气组织有效输送到大气中<sup>[17]</sup>。这两个因素共同作用, 可能导致光滩的 CH<sub>4</sub> 排放显著低于其他湿地生境。

## 3 总结与展望

本研究深入探讨了互花米草入侵对亚热带滨海湿地的 CH<sub>4</sub> 排放的影响及其环境调控机制, 通过分析 3 种生境的 CH<sub>4</sub> 排放通量数据, 发现互花米草的 CH<sub>4</sub> 排放显著高于本地盐沼和光滩, 揭示了不同植被覆盖、土壤有机碳、总氮等多种因素对 CH<sub>4</sub> 排放的复杂影响。未来的研究可进一步细化不同湿地类型的 CH<sub>4</sub> 排放机制, 探索更多的生物学和环境因子对排放的综合作用。

### 参考文献

- Saengerkerdsub S, Ricke S C. Ecology and characteristics of methanogenic archaea in animals and humans [J]. Crit Rev Microbiol, 2014, 40(2): 97-116.
- Saunois M, Martinez A, Poulter B, et al. Global Methane Budget 2000–2020 [M]. 2024.
- 李思琦, 臧昆鹏, 宋伦. 湿地甲烷代谢微生物产甲烷菌和甲烷氧化菌的研究进展 [J]. 海洋环境科学, 2020, 39(03): 488-496.
- Rosentreter J A, Borges A V, Deemer B R, et al. Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources [J]. Nature Geoscience, 2021, 14(4): 225-230.
- Chapman D, Purse B V, Roy H E, et al. Global trade networks determine the distribution of invasive non - native species [J]. Global Ecology and Biogeography, 2017, 26(8): 907-917.

- [6] Yang W, Cai A, Wang J, et al. Exotic *Spartina alterniflora* Loisel. Invasion significantly shifts soil bacterial communities with the successional gradient of saltmarsh in eastern China [J]. *Plant and Soil*, 2020, 449: 97-115.
- [7] Liu J-q, Wang W-q, Shen L-d, et al. Response of methanotrophic activity and community structure to plant invasion in China's coastal wetlands [J]. *Geoderma*, 2022, 407: 115569.
- [8] Zheng X, Javed Z, Liu B, et al. Impact of *Spartina alterniflora* Invasion in Coastal Wetlands of China: Boon or Bane? [J]. *Biology*, 2023, 12(8): 1057.
- [9] Liang W, Chen X, Chen Z L, et al. Unraveling the impact of *Spartina alterniflora* invasion on greenhouse gas production and emissions in coastal saltmarshes: New insights from dissolved organic matter characteristics and surface-porewater interactions [J]. *Water Research*, 2024, 262: 122120.
- [10] He C, Wang X, Wang D, et al. Impact of *Spartina alterniflora* invasion on soil bacterial community and associated greenhouse gas emission in the Jiuduansha wetland of China [J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 168: 104168.
- [11] Huang X, Duan Y, Tao Y, et al. Effects of *Spartina alterniflora* Invasion on Soil Organic Carbon Storage in the Beihai Coastal Wetlands of China [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9
- [12] Liao Q, Yuan F, Fan Q, et al. Plant- and microbial-mediated soil organic carbon accumulation in *Spartina alterniflora* salt marshes [J]. *CATENA*, 2024, 237: 107777.
- [13] Jiang Y, Shao Y, Huang J, et al. Changes in sediment greenhouse gases production dynamics in an estuarine wetland following invasion by *Spartina alterniflora* [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2024, 15
- [14] Yuan J, Liu D, Ji Y, et al. *Spartina alterniflora* invasion drastically increases methane production potential by shifting methanogenesis from hydrogenotrophic to methylotrophic pathway in a coastal marsh [J]. *Journal of Ecology*, 2019, 107(5): 2436-2450.
- [15] Cao M, Cui L, Sun H, et al. Effects of *Spartina alterniflora* Invasion on Soil Microbial Community Structure and Ecological Functions [J]. *Microorganisms*, 2021, 9(1): 138.
- [16] Maricle B R, Lee R W. Aerenchyma development and oxygen transport in the estuarine cordgrasses *Spartina alterniflora* and *S. anglica* [J]. *Aquatic Botany*, 2002, 74(2): 109-120.
- [17] Määttä T, Malhotra A. The hidden roots of wetland methane emissions [J]. *Global Change Biology*, 2024, 30(2)
- [18] Song H, Liu X. Anthropogenic Effects on Fluxes of Ecosystem Respiration and Methane in the Yellow River Estuary, China [J]. *Wetlands*, 2016, 36(1): 113-123.

# Process Analysis Model Based on Multi-parameter Trend Lines

Chunhua Wang<sup>1,2,3</sup>

1. Zhejiang Youkong Cloud Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China
2. Jimo Environmental Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai, 200050, China
3. Shanghai Hongying Hengyuan Industrial Co., Ltd., Shanghai, 200050, China

## Abstract

To address the problems of traditional sewage treatment processes relying on empirical regulation and delayed parameter response, and to improve the accuracy and efficiency of process analysis in smart water systems, this study takes a sewage treatment plant in Hangzhou as the research object and constructs a process analysis model based on multi-parameter trend lines. Firstly, a dual-source data collection system of “PLC online monitoring + laboratory offline supplementation” is designed, real-time data transmission is realized through the Modbus-RTU protocol, and data quality is guaranteed by the logic of “threshold judgment + fluctuation detection”. Secondly, a three-level biological treatment parameter model of “basic data → intermediate parameters → target indicators” is built based on process principles to automatically calculate core process indicators such as sludge retention time (SRT) and food-to-microorganism ratio (F/M). Finally, a multi-parameter optional trend line analysis system is established to realize the collaborative analysis of “water quality-flow-load” and full-chain fault diagnosis. Case application shows that the model can accurately identify process abnormalities such as organic load shock and sludge bulking, with a diagnosis accuracy of 92%. After the model is put into use, the effluent compliance rate of the sewage treatment plant is increased to 100%, the operation and maintenance (O&M) abnormal response time is shortened from 24 hours to 1 hour, and the O&M cost is reduced by 10%. The research results provide an engineering solution for the process optimization of smart water systems and can be promoted to the O&M management of sewage treatment plants with different process types.

## Keywords

smart water; multi-parameter trend line; process analysis model; sewage treatment; operation optimization

# 基于多参数趋势线分析的智慧水务工艺优化策略研究

王春华<sup>1,2,3</sup>

1. 浙江优控云科技有限公司, 中国·浙江 杭州 310000
2. 极膜环境科技(上海)有限公司, 中国·上海 200050
3. 上海鸿影衡源实业有限公司, 中国·上海 200050

## 摘要

为解决传统污水处理工艺依赖经验调控、参数响应滞后的问题,提升智慧水务系统工艺分析的精准性与高效性,本研究以杭州某污水厂为研究对象,构建基于多参数趋势线的工艺分析模型。首先设计“PLC在线监测+化验室离线补充”双源数据采集体系,通过Modbus-RTU协议实现实时数据传输,并采用“阈值判断+波动检测”逻辑保障数据质量;其次基于工艺原理构建“基础数据→中间参数→目标指标”三级生物处理参数模型,自动计算污泥龄(SRT)、有机负荷(F/M)等核心工艺指标;最终搭建多参数可选趋势线分析体系,实现“水质-流量-负荷”协同分析与全链条故障诊断。案例应用表明,该模型可精准识别有机负荷冲击、污泥膨胀等工艺异常,诊断准确率达92%;模型投用后,污水厂出水达标率提升至100%,运维异常响应时间从24h缩短至1h,运维成本降低10%。研究成果为智慧水务工艺优化提供了工程化解决方案,可推广至不同工艺类型污水厂的运维管理中。

## 关键词

智慧水务; 多参数趋势线; 工艺分析模型; 污水处理; 运行优化

【作者简介】王春华(1977-),男,中国四川安岳人,本科,环境工程工程师,一级建造师,从事污水处理、给水、海水淡化研究。

## 1 引言

### 1.1 研究背景与意义

全球城市化加速与人口增长加剧了水资源供需矛盾,

智慧水务融合物联网、大数据、人工智能等技术，成为水资源高效管理的核心路径。国家及地方政策持续加码智慧水务建设，推动技术落地与模式创新。工艺分析模块作为智慧水务的核心环节，通过整合污水处理全流程数据、挖掘参数关联规律，可为精细化运维、工艺优化提供决策支撑，直接影响水务系统运行稳定性与资源利用效率。

## 1.2 研究目标

本研究旨在构建多参数可选趋势线工艺分析模型，实现污水处理工艺的精准优化与高效运维。

## 1.3 研究方法

案例研究法：以杭州某倒置 A<sup>2</sup>O 工艺污水厂为研究对象，获取连续运行数据，支撑模型验证；

数据驱动法：融合统计学与数据挖掘技术，开展数据清洗、相关性分析及趋势预测。

## 2 数据采集与整理分析

作为项目总负责人，牵头设计“在线监测+离线化验”双源数据体系，构建全流程数据管理机制，为模型提供高质量数据支撑。

### 2.1 双源数据采集体系设计与实施

#### 2.1.1 PLC 在线仪表数据采集

采集范围：依托水厂现有的进出水在线监测仪表、工艺段过程仪表。

数据传输与集成：采用 PLC 作为数据采集核心，通过 Modbus-RTU 协议实现仪表与 PLC 的实时通讯。

数据质量初控：在 PLC 采集环节，设计“阈值判断+波动检测”双重初控逻辑，编写 PLC 程序实现：①当仪表数据超出合理范围时，自动标记为可疑数据并触发设备状态自检；②当数据短时间内波动幅度 > 20% 时，自动调取相邻仪表数据进行交叉验证，初步剔除传感器故障或干扰导致的异常值，为后续预处理奠定基础。

#### 2.1.2 化验室离线数据采集

化验参数：考虑到在线仪表对部分关键参数（如 BOD<sub>5</sub>、总氮、总磷、污泥沉降比 SV30、MLSS）的测量精度不足，采用化验室进行数据分析。

数据上传与整合流程：为解决传统化验数据“纸质记录”问题，开发“化验数据在线上报系统”，设计 Excel 报表模板，要求化验人员完成检测后 1 小时内填写报表并上传至系统。

### 2.2 生物处理参数建模

采用“基础数据→中间参数→目标指标”三级逻辑，编写程序实现关键参数自动计算，核心模型如下：

#### 2.2.1 污泥龄（SRT）计算

基于 MLSS 在线数据与污泥排放量在线数据，采用“质量平衡法”构建模型。

#### 2.2.2 负荷参数计算

针对有机负荷（F/M）、硝化负荷、反硝化负荷，分别

构建基于在线与离线数据的计算模型：

1) 有机负荷（F/M）：以在线 COD 数据与离线 BOD<sub>5</sub> 数据作为进水有机物浓度，结合在线及化验室的 MLSS 数据，计算有机负荷。

2) 硝化负荷：以在线进水 TN 数据、进水流量、出水氨氮数据，模拟系统硝化负荷。

3) 反化负荷：以在线进水 TN 数据、进水流量、出水 TN 数据、污泥排放量，模拟系统反硝化负荷。

上述模型设置每小时自动计算并存储负荷数据，形成负荷参数趋势序列，用于后续工艺负荷匹配分析。

4) 指标去除率计算：基于“进水在线数据+出水在线、离线数据”，构建 COD、BOD、氨氮、总氮、SS 等指标的去除率计算模型。去除率的实时计算与历史回溯，当去除率低于设定阈值（如 COD 去除率 < 85%）时，自动关联对应时段的 DO、MLSS、出水水质趋势数据，辅助工艺问题诊断。

5) 碳氮比：基于 COD、BOD 及 TN，计算污水进水碳氮比。

### 2.3 数据存储架构

采用“InfluxDB+MySQL”混合存储：时序数据库存储实时数据与计算结果，按“时间戳+点位”双索引支持毫秒级查询；关系数据库存储仪表校准记录、模型参数等溯源信息，1h 定时同步确保数据一致性。

## 3 多参数趋势线分析

### 3.1 案例污水处理厂概况

杭州市某污水处理厂，采用“水解池+多点进水倒置 A<sup>2</sup>O+纤维滤池”工艺，设计处理能力 8 万吨/日（一期 4 万吨/日），出水水质优于浙江省地方排放标准。具备完善的在线监测与运维基础。

### 3.2 多参数趋势线绘制与分析

#### 3.2.1 进水水质与负荷波动分析

多参数曲线关联分析逻辑：进水水质与负荷波动分析的核心是“水质-流量-负荷”三者曲线的协同验证，通过建立参数间的定量关系，实现负荷波动的动态追踪与风险预警。

有机负荷波动分析：进水 COD - 进水流量 - 有机负荷（F/M）曲线关联逻辑：有机负荷 F/M，kgBOD<sub>5</sub>/kgMLSS·d 由进水有机物总量（COD 浓度 × 进水流量，需通过 COD 与 BOD<sub>5</sub> 的换算系数（如 0.6）修正）与生物系统 MLSS 总量决定，三者曲线需满足“进水 COD 或流量升高时，有机负荷同步升高，且不超过生物系统耐受上限（0.12kg/(kg MLSS·d)）”。

典型正常曲线特征：进水 COD 曲线稳定在 110-300mg/L，进水流量曲线维持在 1500-1666m<sup>3</sup>/h（对应日处理量 4 万吨），有机负荷曲线小于 0.1kg/(kg MLSS·d)。出水 COD 曲线同步稳定在 5-27mg/L（低于限值 40mg/L），无明显偏移。

异常曲线特征：有机负荷超出设定上限值 0.12kg/kg

MLSS·d (超耐受上限, 根据运行经验可调整), 可诊断为“有机负荷冲击”, 减少进水量。查看有机负荷与 MLSS 曲线, 污泥浓度是否骤降, 减少排泥, 增加 MLSS。

硝化负荷波动分析: 进水总氮 - 进水流量 - 硝化负荷曲线关联逻辑: 硝化负荷  $\text{kgNH}_4^+-\text{N}/\text{kgMLSS}\cdot\text{d}$  由进水总氮总量 (总氮浓度  $\times$  进水流量) 与 MLSS 总量决定, DO 直接影响好氧区硝化反应效率, 三者曲线需满足进水氨氮或流量升高时, 硝化负荷同步升高, 且不超过硝化菌耐受上限 (阈值  $0.05\text{kg}/\text{kg MLSS}\cdot\text{d}$ )。

典型正常曲线特征: 进水总氮曲线稳定在  $15\text{--}50\text{mg/L}$ , 进水流量曲线维持在  $1500\text{--}1666\text{m}^3/\text{h}$ , 硝化负荷曲线稳定在  $0.03\text{--}0.05\text{kg}/(\text{kg MLSS}\cdot\text{d})$ 。

出水氨氮曲线同步稳定在  $0.04\text{--}1.5\text{mg/L}$  (低于限值  $2.0\text{mg/L}$ ), 无明显偏移。

异常波动诊断场景: 若进水总氮曲线上升、进水流量增长, 硝化负荷曲线升至  $0.05\text{kg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$  (超耐受上限), 同时好氧区 DO 曲线维持在  $2.0\text{mg/L}$  (未同步升高), 可诊断为“硝化负荷过高导致硝化效率下降风险”, 需提前调控曝气量, 避免出水氨氮超标。

反硝化负荷波动分析: 进水总氮 - 出水总氮 - 出水硝态氮 - 进水流量 - 反硝化负荷曲线关联逻辑: 反硝化负荷 ( $\text{kgNO}_3^--\text{N}/(\text{kgMLSS}\cdot\text{d})$ ) 由去除总氮总量 (去除总氮浓度  $\times$  进水流量)、排泥量与 MLSS 总量决定, 直接影响缺氧区反硝化反应效率。

典型正常曲线特征: 进水总氮曲线稳定在  $15\text{--}50\text{mg/L}$ , 进水流量曲线维持在  $1500\text{--}1666\text{m}^3/\text{h}$ , 反硝化负荷曲线稳定在  $0.045\text{--}0.07\text{kg}/\text{kg MLSS}\cdot\text{d}$ , 温度低于  $20^\circ\text{C}$  稳定在  $0.045\text{ kg}/\text{kg MLSS}\cdot\text{d}$  以内, 温度高于  $20^\circ\text{C}$  稳定在  $0.07\text{kg}/\text{kg MLSS}\cdot\text{d}$  以内。出水总氮曲线同步稳定在  $2\text{--}10\text{mg/L}$  (低于限值  $10\text{mg/L}$ ), 无明显偏移。

异常波动诊断场景: 若进水总氮曲线上升、进水流量增长, 出水总氮曲线上升, 出水硝态氮曲线上升, 可诊断为“反硝化负荷过低”, 需要查看缺氧池 DO 及进水碳氮比。应对策略为调整好氧池 DO, 使回流至缺氧区 DO 降低, 加大缺氧池碳源投入, 减少排泥量从而增大 MLSS。

### 3.2.2 生物池多参数分析

针对生物池运行状态诊断需覆盖泥龄、SV30、DO、ORP、MLSS、硝态氮、温度、有机负荷、硝化负荷、反硝化负荷、各指标去除率的需求, 本方案在原有基础上新增 4 项核心参数, 建立“参数联动 - 状态判定 - 故障溯源 - 调控优化”的全链条诊断体系, 既符合规范要求 (有机负荷  $0.05\text{--}0.1\text{kgBOD}_5/(\text{kgMLSS}\cdot\text{d})$ 、总氮  $\leq 10\text{mg/L}$ 、总磷  $\leq 0.3\text{mg/L}$ ), 又能更全面捕捉生物池运行异常。

生物池运行状态诊断 10 参数体系与监测标准: 结合 AAO 工艺功能分区特性, 明确 10 项核心参数的监测要求、规范适配标准及功能定位, 为多参数协同分析奠定基础。

生物池正常运行状态的 10 参数协同特征: 10 项参数需呈现“环境 - 污泥 - 负荷 - 反应”的协同稳定特征, 具体关联逻辑如下:

a) 环境 - 污泥参数协同: 保障微生物生存基础

温度 - 泥龄联动: 温度稳定在  $20\text{--}30^\circ\text{C}$  时, 泥龄 (SRT) 维持  $11\text{--}15\text{d}$ , MLSS  $2.7\text{--}3.0\text{g/L}$ ; 温度降至  $15\text{--}20^\circ\text{C}$  时, SRT 需延长至  $16\text{--}25\text{d}$ , MLSS 提升至  $3.0\text{--}4.0\text{g/L}$ , 补偿低温导致的微生物活性下降。

DO-ORP-SV30 联动: 好氧池 DO  $2.0\text{--}4.0\text{mg/L}$ , 厌氧池 ORP  $-200\text{--}300\text{mV}$ , 缺氧池 DO  $< 0.5\text{mg/L}$ , SV30 稳定在  $28\%\text{--}32\%$ , 污泥无膨胀风险, 微生物代谢环境最优。

有机负荷 - COD 去除率联动: 有机负荷  $0.05\text{--}0.1\text{kg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$  时, COD 去除率稳定在  $87\%\text{--}96\%$ 。

硝化负荷 - 氨氮去除率联动: 硝化负荷  $0.02\text{--}0.05\text{kg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ , 氨氮去除率  $\geq 92\%$ , 出水氨氮  $< 1.5\text{mg/L}$ 。

### 3.2.3 低温导致硝化效率下降 (氨氮、总氮超标)

异常参数特征:

单参数异常: 温度曲线降至  $12\text{--}13^\circ\text{C}$ , 出水氨氮、总氮升高。

多参数关联验证: 泥龄 (SRT) 未调整;

连锁反应: 出水氨氮、硝态氮升高, 出水氨氮、TN 超标。

异常调整: 低温时 MLSS 低浓度报警, 建议调整 MLSS 浓度, 出水硝态氮呈上升趋势报警, 建议投加碳源。

### 3.2.4 污泥膨胀导致除磷脱氮双重失衡

异常参数特征:

单参数异常: SV30 呈上升趋势, MLSS 曲线呈下降趋势;

多参数关联验证: 好氧池 DO 曲线降至  $1.0\text{--}1.2\text{mg/L}$  (DO 曲线呈下降趋势, 丝状菌耗氧增加), 有机负荷升至  $0.12\text{kg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$  (超规范基准区), 总磷去除率降低, 二沉池出水总磷呈升高趋势;

连锁反应: COD 去除率下降。

故障定位: 有机负荷超标引发丝状菌大量繁殖, 导致污泥膨胀, DO 被过度消耗, 同时 PAOs 碳源不足, 除磷脱氮效率同步下降。

### 3.2.5 泥龄过短导致硝化菌流失

异常参数特征:

单参数异常: 泥龄 (SRT) 缩短至  $10\text{--}12\text{d}$ ;

多参数关联验证: 硝化负荷  $0.05\text{kg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$  (正常), 但氨氮去除率降低, 出水氨氮升至  $4.5\text{--}5.0\text{mg/L}$ , 好氧池 MLSS 降至  $2.0\text{--}2.7\text{g/L}$ 。

连锁反应: 缺氧池硝态氮降低, 总氮去除率降低。

故障定位: 泥龄短于硝化菌世代周期 ( $15\text{--}20\text{d}$ ), 导致硝化菌无法稳定增殖, 大量随排泥流失, 硝化效率骤降。

## 3.3 多参数模型运行效果

模型自 2022 年 10 月投用以来, 实现三大成效: ① 全流程可视化, 整合 23 类核心参数, 打破数据孤岛; ② 运维

成本降低 10%，线上巡检替代人工踏看，异常响应时间从 24h 缩至 1h；③出水达标率提升至 100%，COD、TN 等指标波动幅度减少，有效抵御水质冲击。

## 4 结论与展望

### 4.1 研究结论

1) 构建了“在线 + 离线”双源数据体系与生物系统参数计算模型，数据有效率提升至 95%，为趋势线分析提供可靠支撑。

2) 开发的多参数可选趋势线模型，实现“水质 - 流量 - 负荷”协同分析，精准诊断污泥膨胀、硝化效率下降等问题，诊断准确率达 92%。

3) 案例应用表明，模型可使污水厂出水稳定达标，运维效率显著提升，为智慧水务工艺优化提供工程化解决

方案。

### 4.2 研究不足与展望

当前模型依赖人工设定阈值，智能化程度有待提升。下一步将融合机器学习算法，基于历史数据构建负荷预测模型，实现曝气量、排泥量等参数的自动调控；同时拓展模型适用场景，适配不同工艺类型污水厂的个性化需求。

### 参考文献

- [1] 两部委发布“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划到2025年县城污水处理率达到95%以上[J].城市道桥与防洪, 2021,(08):351.
- [2] 张芸蓓, 马民, 宫玲, 等. A/A/O污水处理工艺脱氮效果模拟及优化[J]. 给水排水, 2022, 58(1): 88-94.
- [3] 倪杰.基于深度学习的污水处理故障诊断方法[D].沈阳化工大学,2023.DOI:10.27905/d.cnki.gsgghy.2023.000566.

# Analysis of a Heavy Rainstorm Weather Process in Western Southern Xinjiang from September 13 to 15, 2018

Min Liu Jun Gao

Xinjiang Airport (Group) Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

## Abstract

This study integrates conventional meteorological observations, FY-2G infrared cloud imagery, and Doppler radar data to demonstrate that the recent torrential rainfall was jointly influenced by the Central Asian low-pressure trough and the East Xinjiang low-pressure trough. The Central Asian trough first intensified and moved southward before weakening and shifting northward, while the sustained East Xinjiang trough primarily caused prolonged precipitation in western southern Xinjiang. Within this weather system, the vertical configuration of low-level convergence and high-level divergence provided deep and persistent moisture and energy for the rainstorm's formation. Concurrently, intense vertical upward motion served as a critical driving mechanism for the storm's sustained intensification. Furthermore, the evolution patterns of infrared cloud imagery and Doppler radar data offer valuable insights into the precipitation intensity and distribution patterns.

## Keywords

rainstorm; circulation background; satellite image; radar echo

## 2018年9月13—15日南疆西部一次暴雨天气过程分析

刘敏 高俊

新疆机场(集团)有限责任公司, 中国·新疆乌鲁木齐 830000

## 摘要

本文结合常规气象观测资料、FY-2G红外云图以及多普勒雷达数据进行分析,结果表明:此次暴雨是由中亚低槽、东疆低槽共同影响造成的,中亚低槽先加深南下、后减弱北收以及东疆槽的维持是南疆西部较长时间降雨的主要原因。在此次天气系统中,低层辐合与高层辐散相配合的垂直配置,为暴雨的产生输送了深厚且持久的水汽与能量;同时,强烈的垂直上升运动,则为暴雨的持续增强提供了关键的驱动机制。此外,红外云图和多普勒雷达的演变特征对降水的强度以及落区具有一定的指示作用。

## 关键词

暴雨; 环流背景; 卫星云图; 雷达回波

## 1 引言

南疆西部地区位于中国边陲,三面环山,一面敞开,北面有天山西段横卧,西有帕米尔高原,南有昆仑山,东面有塔克拉玛干沙漠,由于远离海洋,降水较少,属于典型的温带大陆性干旱气候。累年年降水量和我国东部地区相比明显偏少,但降水强度较大,一日降水量有时甚至能突破年年降水量的平均值,极易诱发多种次生灾害,不仅制约经济的发展,也给公共安全造成了显著的潜在威胁。尽管国内诸多学者已对暴雨天气过程开展了广泛研究,然而其研究区域多集中于西南、华南与东部沿海一带,伍志方等<sup>[1]</sup>、何立富等<sup>[2]</sup>对广州和华南地区暴雨研究广泛,针对西北地区尤其是南疆西部地区暴雨的分析却比较少。早些年观测资料相对匮乏,

杨莲梅等<sup>[3]</sup>对南疆西部暴雨的机理分析,旨在揭示其大尺度环流配置与关键天气影响系统的作用;张云惠等<sup>[4]</sup>与秦贺等<sup>[5]</sup>的研究表明,对中亚低涡的分布特征和不同移动路径背景下对南疆西部地区的影响也有所不同,但超过一半的强降水过程都与中亚低涡或塔什干低涡有关。本文利用常规观测资料、NCEP/NCAR再分析资料、FY-2G红外云图及多普勒雷达等多源数据,针对2018年9月13-15日南疆西部一次极端大暴雨过程展开成因分析,旨在提高气象人员对南疆西部极端暴雨形成机制的认识,并为南疆强降水天气预报提供更为有效的科学参考。

## 2 降水概况

本次天气过程中,共有28个观测站的累计降雨量达到暴雨标准(24.0mm),降水量超过40mm共有9站,降水最大值出现在莎车县霍什拉甫乡尧玛村(降水主要集中在13日夜间,为61.2mm),降水量为72.3mm,本次降水过

【作者简介】刘敏(1987-),女,中国新疆乌鲁木齐人,本科,工程师,从事航空气象研究。

程自西向东推进，其主体降水带主要位于偏北及偏南区域，至16日，此次天气过程基本结束。

### 3 环流形势及主要影响系统特征分析

暴雨前期 500hPa 欧亚范围两槽一脊的环流形势，东欧至乌拉尔山脉为径向环流较大的低涡系统，西西伯利亚至东疆为深厚的槽区，13 日夜间（图 1a），里海高压脊的维持以及乌拉尔山低涡东移南压，导致中亚地区出现风场的辐合切变，形成中亚低槽进而影响我区，典型的“东西夹攻”降水机制就此建立。西南暖湿气流与早已进入盆地西部、受地形影响抬升的东灌冷空气交汇，并在我区西部率先出现降水。14 日（图略）里海高压脊发展旺盛，推动中亚低槽加

深南下，不断发展，扩大了对我区的影响范围并造成我区大范围的降水。15 日（图略），里海高压脊坍塌，中亚低槽减弱东移北收，伴随着东疆槽的移出以及低槽过境，降水趋于结束。至 16 日，我区受乌拉尔山高压脊的控制，天气转好。

13 日 08 时（图 1b），地面图中冷高压主要影响西西伯利亚至贝加尔湖一带，该高压主体位于北疆以北地区，中心强度 1032.5hPa，我区位于地面冷高压外围底部，显著的南北气压梯度（> 25hPa）构成了“北高南低”的环流形势，这种配置为冷空气向南侵入盆地提供了有利的动力条件。13 日白天冷高主体东移加强，南北气压梯度加大，冷空气由东向西进入盆地，这支偏东急流受地形作用与西南暖湿气流汇合形成降水。

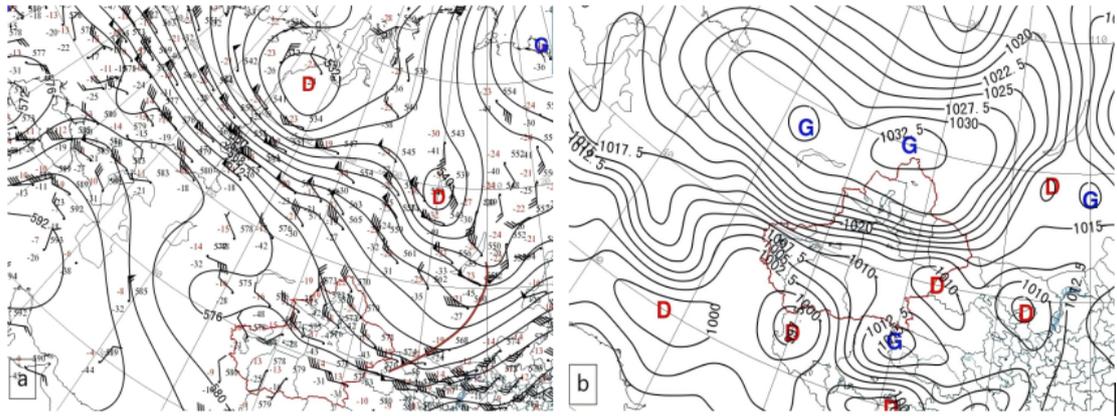


图 1 2018 年 9 月 13 日 20 时 500hPa 位势图 (a) 和 13 日 08 时地面图 (b)

### 4 物理量场及云图分析

#### 4.1 散度

图 2 中 600hPa 有辐合上升运动中心，925hPa-500hPa 气层有辐合上升运动，高层 200hPa 有强辐散中心，这种垂

直方向上具有明显的中低层辐合、高层辐散的典型特征。分析表明，这一配置中的辐合辐散中心耦合区，与实际的暴雨落区高度对应，高层强烈的辐散抽吸作用促进并维持低层辐合运动，从而为暴雨区的水汽和能量供给提供了持续的动力条件。

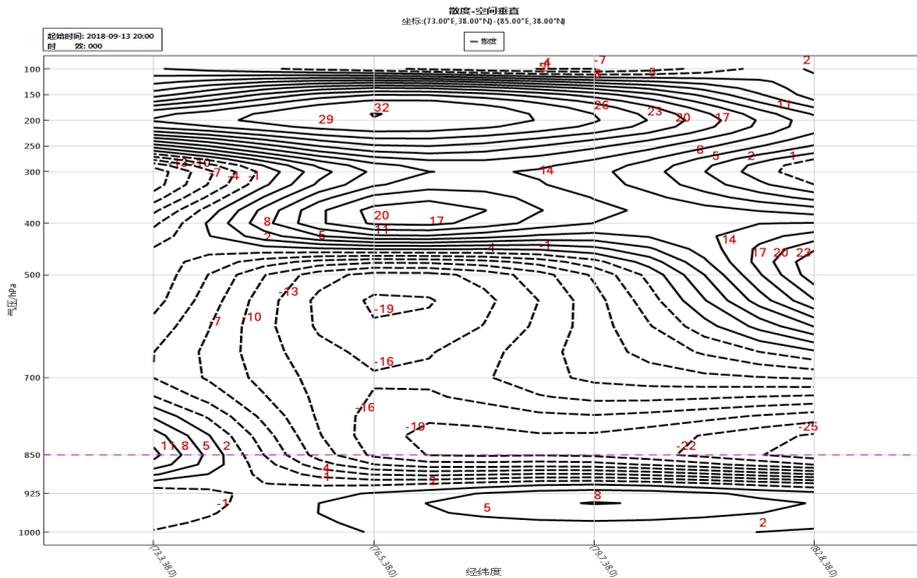


图 2 2018 年 9 月 13 日 20 时沿 38° N 散度空间垂直剖面图 (单位:  $10^{-5} s^{-1}$ )

## 4.2 垂直速度

垂直速度分布图中(图略),最大垂直速度中心位于E76.5°,中心强度达 $-5.2 \times 10^{-2}$  hPa/s,强降水就出现在垂直上升运动最剧烈的地方,从而促使不稳定能量得以释放,也是暴雨发生和维持的一个根本原因。

## 4.3 卫星云图

从红外卫星云图演变特征(图略)可以看出,此次暴雨过程中,中尺度云团基本位于喀什至偏南莎车山区及浅山区一带。喀什市15日位于云团中心,为中雨。莎车县霍什拉甫乡尧玛村一带位于逗点云系后部边缘,也是云顶温度梯

度最大的地方,成为暴雨出现的重要原因之一。其它各县位于降水云团边缘处,仅出现小雨。

## 5 多普勒雷达分析

图3显示,本次降水过程以层积混合型回波为主要特征。较弱的回波(约30dBZ)缓慢向西北移动,喀什市07时起开始出现降雨。虽然处于弱回波带上,但不断有对流单体生成和发展,数量较多,强度偏强,11:51在喀什附近监测到最强回波强度为65dBZ,该时次降水量为1.7mm。此回波形势维持至18时,随着回波的逐渐松散,降水趋于结束。

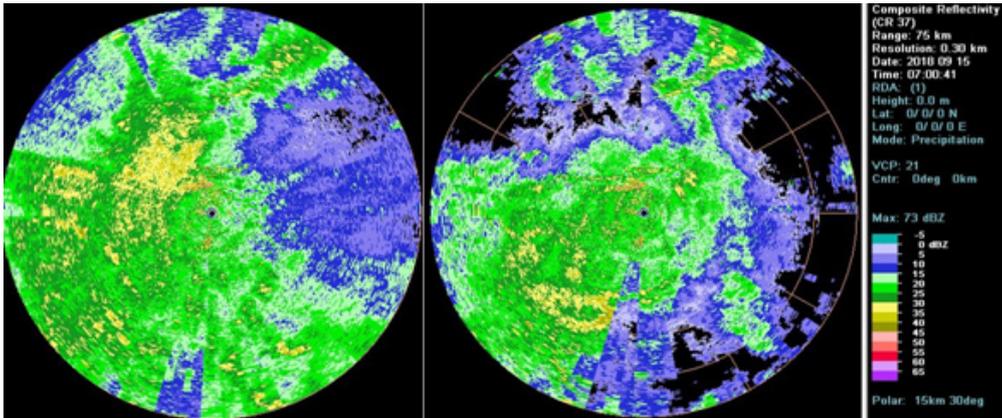


图3 雷达回波特征图

## 6 结论

(1) 2018年9月13-15日喀什地区降水过程中,大尺度环流呈现典型“东西夹攻”特征。此次天气主要由中亚低槽的阶段性演变(先加深南压,后减弱北收)与稳定维持的东疆槽共同影响所致。

(2) 低层辐合、高层辐散的高低空配置加强了垂直上升运动,而较强的垂直速度也为暴雨的形成和维持提供了动力条件,有利于地面中小尺度天气系统的发展;强而深厚的上升运动与暴雨落区也较吻合。

(3) 卫星云图特征较好的监测了降水的强度与落区,霍什拉甫乡大暴雨落区位于云顶亮温梯度最大处。

(4) 本次降水过程以层积混合型降水回波为主。雷达

回波的强度变化对降水的强度及起止时间都有较好的指示意义。

## 参考文献

- [1] 伍志方,蔡景就,林良勋,等.2017年广州“5·7”暖区特大暴雨的中尺度系统和可预报性[J].气象,2018,44(4):485-499.
- [2] 何立富,陈涛,孔期.华南暖区暴雨研究进展[J].应用气象学报,2016,27(55):559-569.
- [3] 杨莲梅,张云惠,汤浩.2007年7月新疆三次暴雨过程的水汽特征分析[J].高原气象,2012,31(4):963-973.
- [4] 张云惠,杨莲梅,肖开提·多莱特,等.1971-2010年中亚低涡活动特征[J].应用气象学报,2012,23(3):312-321.
- [5] 秦贺,杨莲梅,张云惠.近40年来塔什干低涡活动特征的统计分析[J].高原气象,2013,32(4):1042-1049.

# GEP Urban Ecological Assessment System Construction

Weifeng Zhang Yu Tang

Shanghai Diting Information Technology Co., Ltd., Shanghai, 200062, China

## Abstract

In the context of the continuous advancement of ecological civilization construction, the traditional economic accounting system centered on Gross Domestic Product (GDP) has become insufficient to fully reflect the crucial role of natural ecosystems in supporting human well-being and sustainable economic and social development. This paper focuses on the GEP urban ecological assessment system, integrating domestic and international GEP accounting theories and system development practices, and systematically analyzes the system's construction concepts and practical value from multiple dimensions, including design philosophy, system framework, key technologies, and functional design. It provides high-precision data support for regional ecological planning, major decision-making, and ecological civilization assessment and evaluation, and has significant practical significance for promoting high-quality development guided by ecological priority and green growth.

## Keywords

Gross Ecosystem Product (GEP); Urban Ecological Assessment System; Accounting for the Value of Ecological Products

# GEP 城市生态评估系统建设

张伟锋 汤宇

上海地听信息科技有限公司, 中国·上海 200062

## 摘要

在生态文明建设持续向纵深推进的背景下,传统以国内生产总值(GDP)为核心的经济核算体系,已难以全面彰显自然生态系统在支撑人类福祉提升与经济社会可持续发展中的关键作用。本文以GEP城市生态评估系统为研究对象,结合国内外GEP核算理论与系统开发实践进展,从设计理念、系统框架、关键技术、功能设计等多个维度,系统剖析该系统的建设思路与实践价值。为区域生态规划编制、重大决策制定及生态文明考核评价提供高精度数据支撑,对推动以生态优先、绿色发展为导向的高质量发展具有重要现实意义。

## 关键词

生态系统生产总值(GEP);城市生态评估系统;生态产品价值核算

## 1 引言

党的十八大以来,中国明确将“资源消耗、环境损害、生态效益”纳入经济社会发展评价体系;十九大进一步深化“绿水青山就是金山银山”的发展理念,为GEP核算与评估系统建设提供了坚实政策指引。在国际层面,不丹的“国民幸福总值(GNH)”、欧盟的“环境经济账户体系(SEEA)”等实践探索,也展现出突破GDP单一核算维度的发展趋势<sup>[1]</sup>。在此背景下,生态系统生产总值(GEP)应运而生,其核心目标在于量化生态系统供给的物质产品、调节服务及文化服务的总价值量<sup>[2]</sup>。依托GEP构建城市生态评估系统,既是支撑生态文明建设落地实施的技术载体,也是破解“生态保护成效难量化、生态价值贡献难彰显”问题的关键路径,兼具理论创新性与实践指导价值<sup>[3]</sup>。

## 2 系统设计理念与技术

### 2.1 设计理念

系统以“生态文明导向、科学精准核算、实用便捷服务”为核心设计理念,具体内涵如下:

**生态文明导向:**紧密围绕“绿水青山就是金山银山”理念,将生态产品价值核算作为核心目标,助力城市实现生态保护与高质量发展的协同推进;

**科学精准核算:**基于国内外成熟的GEP核算理论与方法<sup>[4,5]</sup>,结合城市生态系统的独特性,筛选适配的功能量与价值量核算模型,保障核算结果的科学性与准确性;

**实用便捷服务:**系统具备指标详情查询、核算结果下载等功能,支持多维度数据统计与空间分析,可为政府部门、科研机构、企业等不同用户提供“即查即用”的便捷服务,有效降低使用门槛。

【作者简介】张伟锋(1978-),中国浙江湖州人,硕士,高级工程师,从事生态环境领域大数据分析与应用研究。

## 2.2 系统开发技术

### 2.2.1 GEP 核算模型预算法

系统采用“七步法”标准化核算流程，设置 22 个质量控制节点，确保核算全过程的规范性与可控性<sup>[3]</sup>。构建涵盖物质产品、调节服务、文化服务三大类 12-17 项指标的核算体系，针对不同指标分别采用市场价值法、替代成本法、影子价格法、旅行费用法等适配核算方法<sup>[6]</sup>。集成水量平衡法、改进 USLE 模型、NEP 模型等核心功能量核算模型，结合本地化参数库与不确定性分析技术，实现生态系统服务功能量与价值量的精准量化，兼顾核算方法的科学性与区域适用性。

### 2.2.2 基于 OpenLayers 的 WebGIS 技术

网络地理信息系统（WebGIS）的界面地图功能基于 OpenLayers（简称 OL）开发，该技术是专为 WebGIS 客户端打造的 JavaScript 开发包<sup>[7]</sup>。其不仅支持 WMS、WFS、GoogleMaps 等专业地图服务及普通图片作为地图数据源，还兼容 XML、GML、GeoJson、Json、KML、WFS 等多种数据格式，同时提供缩放、平移、标记、测量等丰富的地图显示、操作与分析工具，便于用户自定义地图应用的功能与外观<sup>[8]</sup>。此外，该技术具备出色的跨平台兼容性，可在各类设备和浏览器中稳定运行，加之高度的可定制性与扩展性，成为各类地图应用开发与研究的优选工具。

### 2.2.3 数据库与云计算技术

数据库技术：采用关系型数据库（如 MySQL）存储

统计数据、核算参数等结构化数据，运用地理数据库（如 PostGIS）存储矢量图、栅格图等空间数据，确保数据的高效查询与快速调用<sup>[9]</sup>；

云计算技术：针对多年遥感数据、高分辨率栅格数据等海量数据的处理需求，采用阿里云、华为云等云计算平台提供算力支持，有效缩短核算周期，提升系统响应速度。

## 3 平台功能设计与实现

### 3.1 系统总体架构

本项目的系统框架主要包括：数据层、模型服务层和应用层。

数据层：包括各类生态系统基础数据；

模型服务层：包括农林牧渔、水资源、生态能源、洪水调蓄、水源涵养、交通降噪、海岸防护、气候调节、固碳、空气净化、水质净化、土壤保持、防风固沙、病虫害控制、休闲旅游、景观价值等十余项生态系统服务功能量及价值量评估核算模型；

应用层：包括了生态价值评估、数据预处理、GIS 空间展示、可视化统计分析、统计报表自动生成、数据资源管理等功能模块。

### 3.2 系统功能架构

GEP 城市生态评估系统功能架构主要包括数据管理、数据预处理及价值核算三个模块。



图 1 GEP 城市生态价值评估系统框架图



图 2 GEP 城市生态评估系统功能架构

### 3.2.1 数据管理模块

数据管理针对上传数据、结果数据、过程数据等内容的传输与存储,确保用户数据的安全以及使用时的便捷性,同时,数据管理模块需要负责多源数据的传输、存储与管理,确保数据安全与便捷使用。系统数据来源包括:

**基础地理与遥感数据:**如行政区边界矢量图、生态系统分类栅格图、遥感反演的植被覆盖度数据等,用于明确核算区域范围与生态系统类型分布<sup>[6]</sup>;

**监测数据:**如气象站监测的降雨量、水文站监测的径流量、环境监测站的污染物浓度数据等,为功能量核算提供基础参数支撑<sup>[10]</sup>;

**统计数据:**如农业局的作物产量数据、文旅局的旅游人次数据、统计局的GDP与居民收入数据等,为价值量核算提供数据保障<sup>[3]</sup>;

**实地调查与文献数据:**如野外调查获取的土壤氮磷含量数据、文献记载的单位污染物治理成本等,补充监测数据的不足<sup>[4]</sup>。

模块支持数据“上传—存储—读取—下载”全流程管理,用户可通过个人电脑上本地数据,也可下载系统核算结果与基础数据,满足个性化需求。

### 3.2.2 数据预处理模块

作为价值核算的前置环节,负责对原始数据进行清洗、转换与分析,确保数据符合核算模型要求。例如:

**洪水调蓄价值核算前,**需对径流数据进行“异常值剔除—趋势分析—空间插值”处理,生成研究期累计径流量栅格图<sup>[10]</sup>;

**土壤保持价值核算前,**需基于土壤流失方程,对土壤质地、坡度、植被覆盖度等数据进行标准化处理,计算潜在与实际土壤侵蚀量<sup>[4,11]</sup>。

预处理结果将直接传输至价值核算模块,为后续核算提供“标准化数据源”,避免因数据格式不统一导致的核算误差<sup>[3]</sup>。

### 3.2.3 价值核算模块

价值核算模块是系统的核心功能模块,基于预处理数据,按照“生态产品清单—功能量核算—价值量核算—GEP汇总”的逻辑流程,实现各类生态产品价值的核算<sup>[12]</sup>。该模块涵盖物质产品、调节服务、文化服务三大类共20余项核算科目(表1),每类科目均对应明确的功能量指标与价值量核算方法<sup>[3,5]</sup>。

表 1

服务类别	核算项目		功能量指标	核算方法
物质产品	农业产品	野生农业产品	野生农业产品产量	统计调查
		集约化种植农业产品	集约化种植农业产品产量	
	林业产品	野生林业产品	野生林业产品产量	
		集约化种植林业产品	集约化种植林业产品产量	
	畜牧业产品	放牧畜牧业产品	放牧畜牧业产品产量	
		集约化养殖畜牧业产品	集约化养殖畜牧业产品产量	
	渔业产品	野生渔业产品	野生渔业产品产量	
		集约化养殖渔业产品	集约化养殖渔业产品产量	
		淡水资源	工业、农业、居民生活用水量	
		生态能源	秸秆、薪柴、水电发电、潮汐能量	
	其他	其他物质产品产量		
调节服务		水源涵养	水源涵养量	水量平衡法 水量供给法
		土壤保持	土壤保持量	修正通用土壤流失方程 (RUSLE)
		防风固沙	固沙量	修正风力侵蚀模型 (REWQ)
		海岸带防护	海岸带防护长度	统计调查
		洪水调蓄	植被:调蓄水量	水量平衡法
		湖泊:可调蓄水量	湖泊调蓄模型	
		水库:防洪库容	水库调蓄模型	
		沼泽:滞水量	沼泽调蓄模型	
	空气净化	净化二氧化碳量	污染物净化模型	
	净化氮氧化物量			
	净化工业粉尘量			

续表 1

服务类别	核算项目	功能量指标	核算方法
调节服务	水质净化	净化 COD 量	污染物净化模型
	净化总氮量		
	净化总磷量		
	碳固定	固定二氧化碳量	固碳机理模型
	氧气提供	氧气提供量	释氧机理模型
	授粉服务	作物增产量	作物增产评估模型
文化服务	休闲旅游	游客总人数	统计调查
	景观价值	受益土地与房产面积	

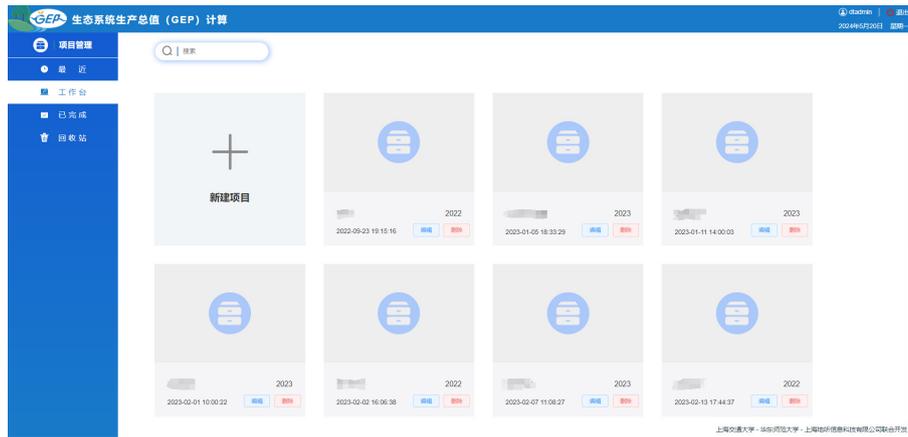


图 4 GEP 项目管理界面

### 3.2 系统功能详细设计

#### 3.2.1 GEP 核算项目管理

GEP 核算项目管理模块实现了核算项目从创建、编辑、运行到归档的全生命周期规范化管理，以保障核算流程的有序性与数据安全性。系统通过专属登录验证机制构建授权访问体系，仅允许合规用户进入系统主界面，有效规避非授权操作风险。同时，系统主界面划分工作台、最近、已完成、回收站四大功能栏目，通过四大功能的建设，实现项目的集中展示与新建、编辑、删除等操作，达成核算项目“可追溯、可管控、可恢复”的管理目标，为后续 GEP 核算工作奠定流程基础。

#### 3.2.2 GEP 功能量在线计算

GEP 功能量在线计算模块覆盖物质产品、调节服务、文化服务三大类生态系统的多维度功能量核算体系，依托科学适配的计算方法，实现各类生态系统服务功能量的精准量化<sup>[12]</sup>。本系统整合径流分析、洪水调蓄、空气净化、水源涵养、气候调节、水质净化、碳固定、土壤保持、文化服务（休闲旅游）、物质产品十大分析子模块（图 5），例如土壤保持模块采用修正通用土壤流失方程（RUSLE），水质净化采用到污染物净化模型和污染物平衡模型等，均为当前生态系统服务功能量核算的主流模型<sup>[4,11]</sup>。

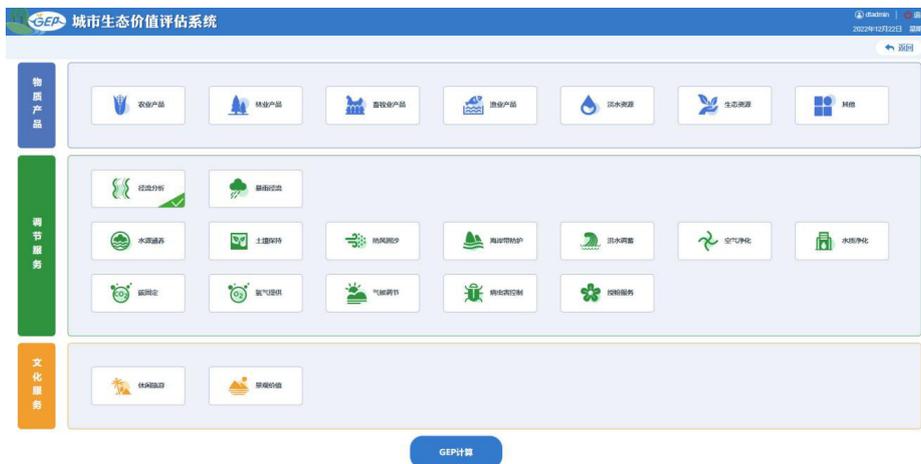


图 5 GEP 功能量在线计算界面

### 3.2.3 GEP 价值计算

系统采用市场价值法、替代成本法、模拟市场法等主流生态经济评估方法<sup>[5,13]</sup>，将物质产品（如农林牧渔产品、淡水资源）的产量、调节服务（如水源涵养量、固碳量）的功能量、文化服务（如休闲旅游人数）的规模转化为货币单

位，实现核算区域生态产品价值的统一量化，为生态产品价值实现机制的探索提供核心数据支撑<sup>[3,12]</sup>。

用户在 GEP 计算页面勾选目标生态系统清单项目（如农业产品、洪水调蓄、休闲旅游等），输入各子模块已核算的功能量数据后，系统自动完成价值量换算与累加。



图 6 GEP 统计分析模块

### 3.2.4 GEP 总值统计与分析

GEP 总值统计与分析将 GEP 核算结果以多维度、多分类、多图表等形式进行呈现。模块在计算完成后自动展示核算项目的 GEP 总值，并按物质产品、调节服务、文化服务三大一级指标分类统计各类生态产品的价值占比；同时通过可视化图表（如饼图、柱状图）清晰呈现细分指标的价值量详情，为生态保护决策与区域发展规划提供直观的数据支撑，这一呈现方式借鉴了现有生态系统服务价值评估研究的可视化表达方法<sup>[10, 13]</sup>。

## 4 结论

GEP 城市生态评估系统通过整合数据管理、数据预处理、价值核算三大模块，构建了科学、精准、实用的城市生态产品价值核算体系，填补了城市尺度 GEP 评估的技术空白。系统以多源数据为基础，以 GIS、遥感、数据库技术为支撑，实现了物质产品、调节服务、文化服务三类生态产品价值的全流程核算，可为区域发展规划、生态保护决策、生态文明考核提供重要支撑。

### 参考文献

[1] 欧阳志云, 朱春全, 赵景柱. 生态系统生产总值 (GEP) 核算 [J]. 生态学报, 2013, 33 (15): 4551-4559.  
 [2] 傅伯杰, 吕一河, 陈利顶. 生态系统服务的价值评估与尺度效应 [J]. 地理学报, 2008, 63 (10): 1031-1039.\*  
 [3] 国家发展和改革委员会, 生态环境部. GB/T 38582-2020 生态

系统生产总值 (GEP) 核算技术规范 —— 编制说明与应用指南 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.

[4] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 中国陆地生态系统服务功能及其价值评估 [J]. 生态学报, 1999, 19 (5): 607-613.  
 [5] 谢高地, 张钰铨, 鲁春霞. 生态系统服务价值评估的研究进展与展望 [J]. 自然资源学报, 2006, 21 (2): 194-203.  
 [6] 李德仁, 张良培, 夏桂松. 遥感大数据与地理信息服务 [J]. 测绘学报, 2014, 43 (5): 449-456.\*  
 [7] McClendon H. A High-Performance, Feature-Rich Library for Creating Interactive Maps on the Web[C]// Proceedings of the 18th International Symposium on Web Mapping. New York: ACM Press, 2012: 45-52.\*  
 [8] 李京, 陈云浩, 宫阿都. 基于 WebGIS 的城市生态环境监测与评估系统设计 [J]. 环境科学研究, 2003, 16 (4): 57-60.  
 [9] 张康聪. 地理信息系统导论 [M]. 5 版. 北京: 科学出版社, 2010.  
 [10] 张亚立, 韩宝龙, 孙芳芳. 城市生态系统服务价值核算方法与应用 —— 以深圳市为例 [J]. 生态学报, 2023, 43 (17): 7023-7034.  
 [11] 吕一河, 傅伯杰, 陈利顶. 生态系统服务功能的尺度特征与尺度转换 [J]. 生态学报, 2009, 29 (11): 6180-6189.  
 [12] 张彪, 谢高地, 肖玉. 生态系统生产总值 (GEP) 核算: 概念、方法与案例 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.  
 [13] 赵景柱, 肖寒, 吴刚. 生态系统服务价值评估研究进展 [J]. 应用生态学报, 2000, 11 (2): 305-310.

# Integrated Research on Geological Disaster Emergency Response and Ecological Restoration

Chijin Hou

Yunnan Geological Engineering Second Survey Institute Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650218, China

## Abstract

The integration of geohazard emergency response and ecological restoration technologies is a key area for addressing the challenges posed by geohazards. As natural disasters occur more frequently, scientific emergency response and effective ecological restoration methods have become increasingly important. Emergency response technologies, through real-time monitoring, early warning systems, and rapid response mechanisms, effectively reduce the losses caused by disasters. Ecological restoration technologies help restore the post-disaster environment by rehabilitating natural ecosystems and improving soil and hydrological conditions. However, the combination of geohazard emergency response and ecological restoration technologies still faces many challenges, such as technical integration, data sharing, and resource optimization.

## Keywords

Geohazards; Emergency Response; Ecological Restoration; Technology Integration; Post-disaster Recovery

## 地质灾害应急处置与生态修复一体化研究

侯赤金

云南地质工程第二勘察院有限公司, 中国·云南昆明 650218

## 摘要

地质灾害应急处置与生态修复一体化技术是应对地质灾害挑战的关键领域。随着自然灾害频发,科学的应急处置和有效的生态修复手段愈加重要。应急处置技术通过实时监测、预警系统和快速反应机制,有效减少灾害造成的损失。生态修复技术则通过恢复自然生态系统、改善土壤和水文条件,帮助灾后环境恢复。然而,地质灾害应急处置与生态修复技术的结合仍面临许多挑战,如技术整合、数据共享、资源优化等问题。

## 关键词

地质灾害; 应急处置; 生态修复; 技术一体化; 灾后恢复

## 1 引言

地质灾害是自然环境变化引发的一类突发性、破坏性强的灾害,给人民生命财产安全和生态环境带来了严重威胁。近年来,随着全球气候变化和人类活动加剧,地质灾害的发生频率和影响范围逐渐扩大。因此,如何有效应对地质灾害并进行及时修复,成为了当前科研和工程技术领域的重要课题。传统的灾害应急处置往往集中在灾害发生后的即时响应与损害控制,但随着灾后生态环境的逐步恶化,单一的应急处置无法满足长远的恢复需求。生态修复技术通过改善环境质量、恢复生态功能,逐步成为灾后恢复中的必要手段。

## 2 地质灾害应急处置的技术原理与方法

### 2.1 地质灾害的分类与技术特征

地质灾害主要包括滑坡、泥石流、崩塌、地震等多种

类型,每种灾害的形成机制和影响因素具有独特性。滑坡通常发生在陡峭的山坡或丘陵地带,受降水、震动等因素影响,导致土体或岩体的位移。泥石流是一种由强降雨或雪融水激发的泥沙流动,具有较强的破坏性。崩塌则多发生在岩体的自然破碎或人为扰动后,表现为大规模的岩石崩落。地震灾害则以其突发性和破坏力著称。每种地质灾害的技术特征包括其发生的自然条件、空间分布、强度和持续时间。应急处置技术的设计必须针对不同类型的灾害特点进行特定的技术准备和应急响应措施,确保灾害发生后能够最大程度地减轻损失。

### 2.2 地质灾害应急处置的关键技术

地质灾害应急处置技术涉及多个环节,包括灾害评估、现场监测、救援部署等。在灾后评估中,利用遥感技术、无人机和地质勘探设备快速获取灾害区域的实时信息,帮助确定灾害范围和受灾程度。现场监测技术通过使用地震监测仪、位移传感器等设备实时监控灾区的动态变化,提前预警次生灾害的发生。救援技术包括高效的机械设备和救援机器

【作者简介】侯赤金(1987-),男,中国云南保山人,本科,高级工程师,从事地质工程相关研究。

人,可以在极端环境下迅速展开抢险工作。防护技术则通过加固基础设施、修复水土流失等手段,减少灾害带来的长期影响。通过综合应用这些技术,可以实现对灾害的及时反应与有效应对,尽可能减少人员伤亡和财产损失<sup>[1]</sup>。

### 3 地质灾害监测与预警技术

#### 3.1 地质灾害监测技术的应用与发展

地质灾害监测技术随着科技的发展不断进步,已从传统的地面监测转向更加智能化和实时化的监测系统。现代监测技术包括基于遥感技术的卫星影像分析、无人机航拍、地质雷达等手段,可以迅速覆盖大范围灾区,获取实时数据。随着传感器技术的发展,监测设备的精度和灵敏度大幅提高。位移传感器、裂缝监测仪等设备可实现对灾区动态变化的实时监测,尤其是在滑坡和崩塌等灾害发生前的预测分析中,发挥了重要作用。此外,数据传输和存储技术的进步使得灾害数据可以迅速上传至云平台,进行大数据处理和分

#### 3.2 预警系统的原理与实现方式

地质灾害预警系统的核心原理是通过监测数据的实时分析,提前预测灾害的发生时间、规模和可能影响范围,尽早发出预警信息。预警系统的实现依赖于多个关键技术,其中包括数据采集、传输、处理与分析技术。在预警系统中,传感器负责数据的实时收集,监测平台进行数据分析,计算灾害发生的概率与可能影响。通过人工智能、大数据技术对历史数据进行深度学习,预警系统的准确性得到了显著提高。预警系统不仅能提前发出警报,还能通过地理信息系统(GIS)精确模拟灾害的扩展,帮助制定有效的应急响应方案。

#### 3.3 监测与预警数据的处理与分析技术

监测与预警数据的处理与分析技术是提升预警精度和响应速度的关键。在处理过程中,首先通过传感器收集大量的现场数据,包括位移、振动、降水量等信息。这些数据通过无线传输系统上传至数据中心,利用大数据处理技术进行实时分析。通过对监测数据的时空分析,结合气象、地质等多源数据,能够准确识别灾害的趋势和潜在风险。此外,数据分析技术还包括基于机器学习和深度学习的算法模型,这些模型能够在复杂的环境下进行自我优化,逐步提高预警系统的准确性。最终,经过处理的数据通过预警系统实时传递给灾区和相关部门,指导现场应急响应。

### 4 生态修复技术与方法

#### 4.1 生态修复的基本原理与技术要求

生态修复是指通过人为干预或自然恢复手段,改善受损生态系统的结构与功能,使其恢复到可持续发展的状态。其基本原理在于通过调整生态系统中各要素的相互关系,恢复生态系统的平衡性与多样性。生态修复的技术要求包括精准评估修复区域的生态损害程度,确定合适的修复目标,选择符合区域特点的修复方法。修复过程中,不仅要注重物种

的恢复和土壤、水体的改良,还要考虑生态过程的恢复,如水循环、养分循环等。有效的生态修复要求采用综合手段,结合生态学、地质学、环境学等多学科知识,通过系统的规划和科学的设计,实现生态系统的全面恢复。实施过程中还需确保修复后的生态系统能够长期稳定,自我维持,并且对周边环境产生积极的影响。

#### 4.2 常用的生态修复技术手段

生态修复技术手段繁多,针对不同的环境问题,采取的修复方法也有所不同。生物修复技术是最常用的一种,通过引入或促进特定植物、微生物等生物体的生长,利用其自然能力改善土壤质量、去除污染物,恢复生态平衡。土壤修复技术则通过改善土壤结构、增加有机质含量等手段,恢复土壤的生产力和生态功能。水体修复技术则多通过构建湿地、植被带等,利用自然水净化能力,去除水体中的污染物质,恢复水生态系统的自净功能。此外,工程修复手段如河道治理、坡面加固等,常用于应对因水土流失、滑坡等地质灾害带来的生态破坏。混合修复方法通常结合生物、化学、物理等手段,以实现综合治理,促进生态环境的长期可持续恢复<sup>[2]</sup>。

#### 4.3 生态修复过程中关键技术问题的解决

生态修复过程中存在一些技术难题,其中最为关键的问题是修复效果的持续性与稳定性。修复后的生态系统可能因外界环境变化、气候波动或人为干扰而导致恢复过程不稳定,因此,需要设计长期的监测机制,确保修复工作达到预期效果。另一个挑战是如何选择合适的修复物种和技术,尤其是在不同地区或不同类型的生态破坏中,修复方案的效果可能存在差异。针对这一问题,科学家们已经开发出基于区域特征的修复方案,通过物种多样性、生态工程技术等手段提升修复效果的持久性。土壤污染和水源污染等环境问题在生态修复中也常常带来困难,因此,采用综合性技术手段,如重金属去除、生物吸附等方法,有助于提高修复效率。在技术实施过程中,修复材料的选择、工艺的优化以及修复过程中生态系统的动态监控,都是确保修复效果的关键因素。

### 5 地质灾害应急处置与生态修复一体化的技术实现

2014年,云南省昭通市发生了一起大规模滑坡灾害,滑坡区域涉及约6平方公里的面积,灾害发生时伴随着强降雨,造成了较为严重的人员伤亡与财产损失。此次滑坡灾害的应急处置与生态修复工作,结合了先进的技术手段,形成了地质灾害应急处置与生态修复一体化的技术应用模式。本文将分析此案例中应用的技术实现及其效果。

#### 5.1 灾后应急处置技术的应用

灾后第一时间内,云南省地质灾害应急响应队伍启动了应急响应程序,首先利用卫星遥感与无人机航拍技术对滑坡区域进行全面监测。卫星遥感影像数据帮助快速确定了灾

区的范围,而无人机提供的高分辨率图像则有助于获取更详细的地形信息。通过遥感影像的处理与分析,初步估算滑坡体积约为120万立方米,直接影响到3个村庄,涉及人口约2000人。紧接着,应用地质雷达与传感器监测滑坡体的活动,发现滑坡体内部土壤水分含量过高,达到了38%,且滑坡体的表面与内层之间存在明显的滑动层,进一步验证了滑坡体极易发生二次滑坡的风险。在此基础上,利用滑坡稳定性数值模拟技术进行动态分析,准确计算了滑坡体未来可能滑动的范围和影响区域,为应急响应指挥部门提供了重要决策依据。

## 5.2 生态修复技术的实施

滑坡灾后,除了应急处置,生态修复的工作也紧急启动。根据灾后环境评估,滑坡区域的土壤水分过高、植被严重破坏、生态功能丧失,造成了严重的水土流失和生态退化。为了有效恢复生态系统,采用了多项生态修复技术。首先,利用生态工程技术,对滑坡体进行加固与植被恢复。通过种植本地耐旱植物与固沙植物,如红柳、沙棘等,快速恢复滑坡体的植被覆盖度,减少土壤的流失。同时,应用土壤改良技术,施用有机肥料与水保持剂,增强土壤的保水能力和透气性。为进一步修复滑坡区域的水文环境,修复工程中还包括了人工湿地的建设,使用植物与微生物共同作用净化水体,恢复区域水资源的生态功能。根据监测数据,在工程实施后的两年内,滑坡区域的植被恢复率提高了65%,土壤侵蚀量减少了40%。通过这些技术的实施,滑坡灾后区域逐步恢复了原有的生态功能,水土流失得到了有效控制。

## 5.3 技术融合与协同作用

在此次灾后恢复过程中,地质灾害应急处置与生态修复技术的融合发挥了重要作用。传统的地质灾害应急处置技术侧重于应急反应和灾后救援,但随着环境修复需求的增加,单一的应急处置技术已无法满足灾后长远恢复的需要。通过将生态修复技术与灾害应急处置相结合,实现了灾后恢复的可持续性。此次灾害应急处置与生态修复一体化应用的技术创新点在于,将遥感监测、无人机巡查、传感器数据收集与实时数据分析结合在一起,通过大数据与云计算平台对各类数据进行整合与分析,不仅为灾后应急响应提供了精准的决策支持,还为生态修复提供了科学的规划依据。技术的融合实现了从灾害发生到生态恢复全过程的闭环管理。在此

过程中,实时监控系統不仅对灾区的动态变化提供了监测支持,也为生态修复提供了依据,从而使得灾后环境恢复得更加高效、精准。

## 5.4 数据分析与效果评估

灾后两年内,通过对滑坡区域的持续监测与数据分析,生态修复成效得到了显著提升。根据生态修复后的数据,滑坡体的地表稳定性显著提高,土壤含水量下降了18%,土壤侵蚀率降低了60%。此外,监测数据显示,恢复后的植被覆盖度已接近灾前水平,达到了70%以上。通过生态修复手段,区域内的生物多样性得到了逐步恢复,原生植被种类数量增加了30%。在水文环境方面,滑坡区域的水质也得到了显著改善,水体的悬浮物浓度降低了50%,有效提升了该区域的水质净化能力。

## 6 结语

通过地质灾害应急处置与生态修复技术的有机结合,能够有效应对灾害带来的环境破坏,保障灾后区域的可持续恢复。本文探讨了应急处置与生态修复一体化的技术架构、协同作用及技术融合创新方法,提出了基于大数据、人工智能等新兴技术的集成应用,为地质灾害后的应急响应和环境修复提供了新的思路。随着技术的不断进步,一体化技术的实施将更加精准、高效,能够在灾后第一时间启动环境修复工作,并通过长期监测与修复手段,逐步恢复灾区生态功能,增强灾后区域的韧性。未来,随着技术手段的进一步发展,地质灾害应急处置与生态修复一体化的技术体系将更加完善,为提高灾害防控能力和环境恢复能力提供坚实的技术支撑。

## 参考文献

- [1] 陈国鑫,肖中浪.贵州省金沙县地质灾害应急管理研究[J].城市与减灾,2025,(01):36-41.
- [2] 王杰刚,史航,陈彦和,刘松源,王继承.某大型水电站全阶段蓄水期间应急处置举措浅析[A].建造安全韧性绿色的国家水网之“结”[C].中国大坝工程学会、巴西大坝委员会、西班牙大坝委员会、美国大坝委员会:2024:620-626.
- [3] 伍运霖,刘天翔,程强,王丰.复杂山区陡立山体崩塌灾害及应急抢险处置[J].路基工程,2024,(05):20-25.
- [4] 侯建盛,张俊,邓铎.新时期我国重大地震和地质灾害应急管理与实践[J].中国应急救援,2024,(04):4-9.

# Progress in the study on the correlation between the occurrence forms of fluoride in soil

Guiguo Bian<sup>1</sup> Wei Lu<sup>2</sup> Dianrong Xie<sup>3</sup> Lingyu Li<sup>3</sup>

1. Fujian Provincial Department of Ecology and Environment, Fuzhou, Fujian, 350003, China

2. Fujian Provincial Ecological Environment Monitoring Center Station, Fuzhou, Fujian, 350000, China

3. Fujian Southeast Geological Brigade, Quanzhou, Fujian, 360021, China

## Abstract

Through a statistical analysis of domestic research on the various speciation forms of fluorine in soils and the correlations among them. It indicates that an increase in soil pH can promote the release of adsorbed fluoride and its transformation into water-soluble fluoride. Rising concentrations of aluminum ions and hydrogen ions can also induce partial conversion of residual fluoride into water-soluble forms. Other forms of fluorine can only be converted into one another through the intermediary action of exchange-state fluorine. Under conditions of decreased redox potential or oxygen deficiency, Fe-Mn-bound fluoride may release free fluoride. The proportion of residual fluorine in perfluorinated compounds is substantial, exhibiting a highly significant positive correlation between the two.

## Keywords

Soil; Fluoride; Form; Correlation

## 土壤氟化物赋存形态相关性研究进展

边归国<sup>1</sup> 卢卫<sup>2</sup> 谢殿荣<sup>3</sup> 李玲玉<sup>3</sup>

1. 福建省生态环境厅, 中国·福建 福州 350003

2. 福建省生态环境监测中心站, 中国·福建 福州 350000

3. 福建省闽东南地质大队, 中国·福建 泉州 360021

## 摘要

通过统计分析国内关于土壤中氟化物各种赋存形态, 以及各种赋存形态之间的相关性研究成果, 研究成果表明: 土壤pH升高可使吸附态氟释放转化为水溶态氟; 铝离子和氢离子浓度的上升也可使土壤残余态氟部分转化为水溶态; 其他形态氟通过交换态氟中间链接作用才可实现相互转换; 在氧化还原电位下降或缺氧的条件下, 铁锰态氟可释放出游离态的氟; 残余态氟占全氟中的比例很大, 两者间形成非常显著的正相关性。

## 关键词

土壤; 氟化物; 形态; 相关性

## 1 引言

土壤中氟化物主要产生于自然来源和人类使用含氟物质的工业企业造成的污染。在工业生产过程中, HF、磷灰石( $\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$ )、萤石( $\text{CaF}_2$ )和冰晶石( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ )等通过燃烧方式排放到环境中, 造成氟污染<sup>[1][2]</sup>。电解铝厂、使用萤石的钢厂、水泥厂场内或周边土壤氟化物浓度可达

649-11839.3 mg/kg<sup>[3][4][5][6][7]</sup>, 某化工厂区内表层土壤中全氟辛烷磺酰基化合物(PFOS)浓度为1.03-48.20 mg/kg<sup>[8]</sup>。

土壤中氟化物具有多种赋存形态, 研究较多的是水溶态、可交换态、铁锰结合态、有机束缚态、残余态, 其中前4种形态统称为可提取态。在五种赋存形态中, 水溶态和交换态氟具有较强的环境可移动性和生物有效性; 铁锰结合态氟在土壤中的生物有效性较弱; 在pH值较高的条件下, 有机质的分解可导致有机酸和其他有机质络合的氟释放, 转化为铁锰态或水溶态的; 残余态移动性和生物有效性最差, 基本上是以原生或次生矿物形态。

研究表明<sup>[9][10]</sup>, 土壤中氟的水溶态、可交换态、铁锰结合态及有机态在合适的条件下可产生互换。正因土壤中各种形态的氟在一定的条件可以转化, 所以具有一定的内在关联。潘自平、时雯雯指出, 水溶态氟与残余态、有机束缚态、

【基金项目】福建省生态环境厅2024年度重点科技项目(项目编号: 2023S047)。

【作者简介】边归国(1952-), 男, 中国福建福州人, 本科, 教授级高级工程师, 从事土壤污染调查、风险评估、修复效果评估研究。

可交换态、铁锰氧化物结合态氟含量呈正相关<sup>[11][12]</sup>。孟昱等<sup>[13]</sup>指出,土壤氟的赋存形态之间的转变与土壤理化性质的变化密不可分,因为土壤中的许多物质与氟之间发生一系列复杂的化学反应和物理反应。于群英<sup>[14]</sup>则认为,土壤胶体表面电荷的变化使吸附态氟释放转化为水溶态氟。张永利等<sup>[15]</sup>研究发现,土壤pH值升降致使粘土矿物和腐殖质的电荷数量改变,而络合物和氟离子之间的吸附能力也随之发生变化,导致水溶态、可交换态、有机结合态等形态之间相互转化。刘金华等报道<sup>[16]</sup>,在土壤各形态之间相互转换过程中,交换态发挥重要的中间链接作用,其他形态氟首先过渡为交换态氟,然后再转换为其他形态氟。虽然,土壤氟的赋存形态之间的相关性研究多有报道,但赋存形态之间相关性机理的研究并不多见。根据土壤不同氟化物形态之间相关性机理的研究报道,进一步探索其相关性的成因,为深入开展相关研究提供借鉴和参考。

## 2 土壤氟化物赋存形态之间相关性

土壤氟化物有水溶态、可交换态、铁锰结合态、有机结合态、残余态五种赋存形态,各种赋存形态之间具有一定的相关性。

### 2.1 水溶态与其他赋存形态之间相关性

#### 2.1.1 与可交换态

与可交换态具有相关性的为浙江省8个市县15种土壤(相关系数 $r=0.7775$ ,  $P < 0.05$ )<sup>[9]</sup>、吉林省农安等七个县市地氟病区( $r=0.2884$ ,  $P < 0.05$ )<sup>[16]</sup>、广东省潮安县茶园土壤( $r=0.355$ ,  $P < 0.05$ )<sup>[17]</sup>。具有显著相关性的为甘肃省白银市农田土壤( $r=0.819$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[18]</sup>、贵州省金沙、纳雍和威宁高氟病区茶园土壤( $r=0.459$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[19]</sup>、内蒙古达里诺尔湖表层沉积物( $r=0.89$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[20]</sup>。

#### 2.1.2 与铁锰结合态

与铁锰结合态具有相关性的为湖北、四川等十二个省市林地土壤( $r=0.615$ ,  $P < 0.05$ )<sup>[13]</sup>、河北省廊坊等四城市小麦-玉米农田( $r=0.55$ ,  $P < 0.05$ )<sup>[10]</sup>、贵州省金沙、纳雍和威宁等茶园土壤( $r=0.240$ ,  $P < 0.05$ )<sup>[19]</sup>、内蒙古达里诺尔湖表层沉积物( $r=0.68$ ,  $P < 0.05$ )<sup>[20]</sup>。具有显著相关性的为甘肃省白银市农田土壤( $r=0.930$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[18]</sup>。

#### 2.1.3 与有机束缚态

与有机束缚态具有负相关性的为新疆乌鲁木齐粉(砂)质土( $r=-0.904$ ,  $P < 0.05$ )<sup>[21]</sup>。具有显著相关性的为湖北、四川等十二个省市林地土壤( $r=0.684$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[13]</sup>、河北省廊坊等四城市小麦-玉米农田( $r=0.667$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[10]</sup>、甘肃省白银市农田土壤( $r=0.765$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[18]</sup>、内蒙古达里诺尔湖表层沉积物( $r=0.93$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[20]</sup>。

#### 2.1.4 与残余态

与残余态具有相关性的为广东省潮安县茶园土壤( $r=0.226$ ,  $P < 0.05$ )<sup>[17]</sup>、贵州省金沙、纳雍和威宁高氟病区茶园土壤( $r=0.226$ ,  $P < 0.05$ )<sup>[19]</sup>。具有负相关性的新疆乌鲁木齐粉(砂)质土( $r=-0.900$ ,  $P < 0.05$ )<sup>[21]</sup>。与残余态具有显

著相关性的为甘肃省白银市农田土壤( $r=0.573$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[18]</sup>、贵州省织金县氟病区土壤( $r=0.642$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[22]</sup>。

### 2.1.5 与总氟

与总氟具有相关性的为广东省潮安县茶园土壤( $r=0.359$ ,  $P < 0.05$ )<sup>[17]</sup>、贵州省金沙、纳雍和威宁等茶园土壤( $r=0.229$ ,  $P < 0.05$ )<sup>[19]</sup>。具有负相关性的新疆乌鲁木齐粉(砂)质土( $r=-0.900$ ,  $P < 0.05$ )<sup>[21]</sup>。与总氟具有显著相关性的为甘肃省白银市农田土壤( $r=0.598$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[18]</sup>、内蒙古达里诺尔湖表层沉积物( $r=0.94$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[20]</sup>、贵州省织金县氟病区土壤( $r=0.642$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[22]</sup>。

## 2.2 交换态与其他赋存形态之间相关性

### 2.2.1 与铁锰结合态

与铁锰结合态具有相关性的仅为浙江省8个市县15种土壤( $r=0.5753$ ,  $P < 0.05$ )<sup>[9]</sup>。具有显著相关性的为湖北、四川等十二个省市林地土壤( $r=0.818$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[13]</sup>、吉林省农安等七个县市地氟病区( $r=0.5318$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[16]</sup>、甘肃省白银市农田土壤( $r=0.759$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[18]</sup>、内蒙古达里诺尔湖表层沉积物( $r=0.75$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[20]</sup>。

### 2.2.2 与有机束缚态

与有机束缚态具有相关性的为浙江省8个市县15种土壤( $r=0.5529$ ,  $P < 0.05$ )<sup>[9]</sup>、吉林省农安等七个县市地氟病区( $r=0.3332$ ,  $P < 0.05$ )<sup>[16]</sup>。具有显著相关性的为湖北、四川等十二个省市林地土壤( $r=0.684$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[13]</sup>、甘肃省白银市农田土壤( $r=0.745$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[18]</sup>、内蒙古达里诺尔湖表层沉积物( $r=0.90$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[20]</sup>。

### 2.2.3 与残余态

与残余态有显著相关性的为吉林省农安等七个县市地氟病大田( $r=0.4718$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[16]</sup>、甘肃省白银市农田土壤( $r=0.573$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[18]</sup>。

### 2.2.4 与总氟

与总氟有相关性的为吉林省农安等七个县市地氟病大田( $r=0.2952$ ,  $P < 0.05$ )<sup>[16]</sup>、有显著相关性的为内蒙古达里诺尔湖表层沉积物( $r=0.82$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[20]</sup>。

## 2.3 铁锰态与其他赋存形态之间相关性

### 2.3.1 与有机束缚态

与有机束缚态有相关性的为湖北、四川等十二个省市林地土壤( $r=0.575$ ,  $P < 0.05$ )<sup>[13]</sup>、河北省廊坊等四城市小麦-玉米农田( $r=0.584$ ,  $P < 0.05$ )<sup>[10]</sup>、广东省潮安县茶园土壤( $r=0.339$ ,  $P < 0.05$ )<sup>[17]</sup>。有显著相关性的为浙江省8个市县15种土壤( $r=0.7186$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[9]</sup>、甘肃省白银市农田土壤( $r=0.83$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[18]</sup>、贵州省金沙、纳雍和威宁茶园土壤( $r=0.757$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[19]</sup>、内蒙古达里诺尔湖表层沉积物( $r=0.83$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[20]</sup>、新疆乌鲁木齐粉(砂)质土( $r=0.946$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[21]</sup>、贵州省织金县氟病区土壤( $r=0.754$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[22]</sup>。

### 2.3.2 与残余态

与残余态有相关性的为新疆乌鲁木齐粉(砂)质土

( $r=0.908$ ,  $P < 0.05$ )<sup>[21]</sup>。有显著相关性的为吉林省农安等七个县市等地氟病区( $r=0.9193$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[16]</sup>、甘肃省白银市农田土壤( $r=0.908$ ,  $P < 0.05$ )<sup>[18]</sup>、内蒙古达里诺尔湖表层沉积物( $r=0.83$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[20]</sup>。

### 2.3.3 与总氟

与总氟有相关性的为内蒙古达里诺尔湖表层沉积物( $r=0.58$ ,  $P < 0.05$ )<sup>[20]</sup>、新疆乌鲁木齐粉(砂)质土( $r=0.908$ ,  $P < 0.05$ )<sup>[21]</sup>。有显著相关性的为吉林省农安等七个县市等地氟病大田( $r=0.6242$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[16]</sup>、甘肃省白银市农田土壤( $r=0.673$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[18]</sup>。

## 2.4 有机态与其他赋存形态之间相关性

### 2.4.1 与残余态

与残余态有相关性的为新疆乌鲁木齐粉(砂)质土( $r=0.908$ ,  $P < 0.05$ )<sup>[21]</sup>。有显著相关性的为甘肃省白银市农田土壤( $r=0.661$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[18]</sup>、贵州省金沙、纳雍和威宁等茶园土壤( $r=0.312$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[19]</sup>。

### 2.4.2 与总氟

与有相关性的为新疆乌鲁木齐粉(砂)质土( $r=0.909$ ,  $P < 0.05$ )<sup>[21]</sup>。有显著相关性的为甘肃省白银市农田土壤( $r=0.686$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[18]</sup>、贵州省金沙、纳雍和威宁等茶园土壤( $r=0.320$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[19]</sup>、内蒙古达里诺尔湖表层沉积物( $r=0.90$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[20]</sup>。

## 2.5 残余态与其他赋存形态之间相关性

与总氟有显著相关性的为湖北、四川等十二个省市林地土壤( $r=0.997$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[13]</sup>、浙江省8个市县15种土壤( $r=0.9989$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[9]</sup>、河北省廊坊等四城市小麦-玉米农田( $r=0.996$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[10]</sup>、吉林省农安等七个县市等地氟病大田( $r=0.9705$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[16]</sup>、广东省潮安县茶园土壤( $r=0.999$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[17]</sup>、甘肃省白银市农田土壤( $r=0.999$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[18]</sup>、新疆乌鲁木齐粉(砂)质土( $r=1$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[21]</sup>、贵州省织金县氟病区土壤( $r=1$ ,  $P < 0.01$ )<sup>[22]</sup>。

## 3 相关性成因分析

### 3.1 水溶态

水溶态氟具有生态活性,可以被植物、动物和人类吸收利用,并对人体健康产生影响。李静等<sup>[23]</sup>报道,土壤中水溶态氟含量在0.5-2.5mg/kg属于正常范围,当水溶态氟含量高于2.5mg/kg时就易导致地氟病发生。李张伟<sup>[17]</sup>、吴卫红<sup>[24]</sup>、Arnesen<sup>[25]</sup>等认为,水溶态主要包括 $F^-$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ 、 $[HF]^0$ 、 $Al-F$ 络合物( $Al$ 、 $Al$ 、 $AlF^{2+}$ 、 $Al$ 、 $Al$ )、 $Fe-F$ 络合物( $FeF^{2+}$ 、 $Fe$ 、 $Fe$ 、 $Fe$ )、 $[MnF]^+$ 、 $[ZnF]^+$ 等形态。吴卫红<sup>[9]</sup>和刘金华<sup>[16]</sup>许多报道指出水溶态与交换态之间具有显著甚至非常显著的相关性,主要是水溶态与交换态之间在合适的条件下可以发生互换。当土壤受到氟污染情况下,在水溶性氟的含量上升时,交换态氟的含量也同步上升。陈怀满<sup>[26]</sup>研究发现,土壤pH升高时吸附态氟为 $OH^-$ 所置换使吸附态氟释放转化为水溶态氟。此外,游离状态的铝离子、氢离子浓度的上升也可使土壤中残余态氟部分溶解并转

化为水溶态氟。

### 3.2 交换态

刘璇<sup>[27]</sup>和WANG<sup>[28]</sup>研究表明,在碱性的土壤中,吸附在阳离子上的可交换态氟易于与 $OH^-$ 发生交换,在可交换态氟含量减少的同时,部分转化为水溶态氟。陈怀满<sup>[26]</sup>研究发现,当土壤pH升高时,水溶态氟含量相应增加,这是因为土壤胶体表面电荷的改变使吸附态氟得以释放并转化为水溶态氟。刘金华等报道<sup>[16]</sup>,交换态氟与有机结合态氟、全氟含量呈现显著正相关关系,说明交换态氟在土壤各形态氟相互转换过程中发挥重要的中间链接作用,其他形态氟首先过渡为交换态氟,然后再转换为其他形态氟。

### 3.3 铁锰结合态

李张伟<sup>[17]</sup>指出,Fe-Mn氧化物结合态氟是氟与Fe-Mn氧化物结合包裹于Fe-Mn结核表面,具有较强离子键结合的赋存形态。如果在氧化-还原电位下降或缺氧的条件下,可能在氧化-还原过程中释放出游离态的氟。孟昱<sup>[13]</sup>认为,氧化物与可交换态氟含量呈显著负相关,这说明随着土壤锰氧化物含量增加,可交换态氟含量越低。

### 3.4 有机态

李张伟<sup>[17]</sup>介绍,有机态与铁锰结合态之间在合适的条件下可以发生互换,但其相关性的机理还需要深入研究<sup>[16]</sup>。吴卫红<sup>[9]</sup>报道,土壤中的水溶态氟、可交换态氟、铁锰结合态氟及有机态氟在合适的条件下可以发生互换,但是目前这方面的相关研究报道并不多见。值得关注的是乌鲁木齐粉(砂)质土有机态与水溶态呈显著负相关性<sup>[21]</sup>,其成因尚无定论。

### 3.5 残余态

残余态与铁锰结合态同属于活性不强的形态,因此与残余态氟和全氟之间呈现非常显著的正相关性。由于残余态氟占全氟中的比例高达90%以上,相对于其他形态基本上高出2到3个数量级,所以两者间形成非常显著的正相关性。孟昱<sup>[13]</sup>报道,锰氧化物与可交换态氟含量呈显著负相关,主要是由于氟可与铝、锰及铁的氢氧化物、水合氧化物、氧化物产生共沉淀或发生吸附作用,最终形成非生物有效性的残余固定态氟。艾尼瓦尔<sup>[21]</sup>研究乌鲁木齐粉(砂)质土残余态与水溶态呈负相关,说明有一部分吸附态氟逐渐转化为难溶的残余态<sup>[29]</sup>。锰氧化物与铁锰氧化物态、可交换态和水溶态氟含量显著负相关关系,表明随着锰氧化物含量的增加,铁锰氧化物态、可交换态和水溶态氟三种形态氟的含量降低,可能形成更多的残余态氟。刘璇<sup>[27]</sup>研究发现,在碱性环境下的氧化物及氢氧化物吸附的氟离子易被氢氧根离子取代,促使铁锰结合态氟转化为水溶态氟。上述显著的正相关和负相关的二种截然不同的结果,吴卫红<sup>[9]</sup>和易春瑶<sup>[10]</sup>认为土壤中五种形态的氟化物在合适条件下可相互转换,而土壤的理化性质则是决定相关性和相互转换的主要因素。

### 3.6 总氟

李静<sup>[23]</sup>和余正兴<sup>[30]</sup>指出,我国正常土壤总氟含量

在 200-800mg/kg 之间, 超过 800 mg/kg 则易导致人体地氟病。张宇琦<sup>[1]</sup>研究表明: 大部分土壤中残余态氟含量占土壤全氟含量的 90%-95% 以上, 比例较小的内蒙古岱海 92.10%<sup>[31]</sup>、西南地区 93.88%<sup>[32]</sup> 相关性不强, 安徽 97.6%<sup>[14]</sup> 等地具有显著相关性, 而潮州 99.05%<sup>[17]</sup>、浙江 99.32%<sup>[9]</sup>、乌鲁木齐 99.66%<sup>[21]</sup> 等呈极显著相关性。

## 4 结论与展望

1) 水溶态氟与交换态氟均具有较强的生物活性, 在合适的条件下两者可以相互转换, 尤其是土壤 pH 值和有机质含量发生变化时, 这种转化更加明显, 相关性较好。

2) 交换态氟在土壤各形态氟之间发挥重要的中间链接作用, 其他形态氟首先过渡为交换态氟, 然后再转换为其他形态氟。

3) 残余态氟所占总氟的比例达到 90% 以上, 两者间存在着非常显著的正相关性。

4) 土壤中氟化物赋存形态之间相关性的机理研究并不多见。

基于氟化物赋存形态与土壤理化性质之间相关性研究, 深入开展氟化物赋存形态之间的相互转化、相关性机理分析是今后研究的重要方向, 可为治理和修复土壤氟化物的污染提供有力的技术支持。

## 参考文献

- [1] 张宇琦, 徐惠风, 文波龙, 等. 环境中的氟及其环境效应与污染治理[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(1): 164-174.
- [2] 李凤嫣, 蒋天宇, 余涛, 等. 环境中氟的来源及健康风险评估研究进展[J]. 岩矿测试, 2021, 40(6): 793 - 807.
- [3] 韩伟, 叶渊, 李彦希, 等. 高氟地区电解铝厂场地氟污染特征及其风险评估[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(4): 727-733.
- [4] 朱文江, 吴卫, 顾准. 上海某钢厂的氟污染对生态环境的影响[J]. 上海农学院学报, 1989, 7(4): 279-284.
- [5] 张国滨, 龙泉, 赵平易. 典型有机氟化工企业土壤污染风险源和污染途径分析[J]. 四川环境, 2021, 40(6): 225-232.
- [6] 郑芳芳. 乐东三平萤石矿废弃地土壤氟化学形态与空间分布特征研究[D]. 海口: 海南师范大学, 2017.
- [7] 边归国. 中国不同种类土壤氟化物的赋存形态研究现状[J]. 青海环境, 2024, 34(3): 134-143.
- [8] 孙燕, 朱静. 湖北某氟化工企业土壤污染风险评估[J]. 土壤科学, 2024, 12(1), 9-16.
- [9] 吴卫红, 谢正苗, 徐建明. 不同土壤中氟赋存形态特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2002, 23(2): 104-108.
- [10] 易春瑶, 汪丙国, 靳孟贵. 华北平原典型区土壤氟的形态及其分布特征[J]. 环境科学, 2013, 34(8) : 3195-3204.
- [11] 潘自平, 邵茂艳, 黄彬彬, 等. 仁怀市高粱基地土壤氟分布特征及赋存形态研究[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(21): 57-61.
- [12] 时雯雯, 周金龙, 尹立河, 等. 新疆和田高氟区土壤氟形态分布与风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(5): 1077-1091.
- [13] 孟昱, 任大军, 张晓晴, 等. 林地土壤氟的形态分布特征及其影响因素[J]. 环境科学与技术, 2019, 42 (9): 98-105.
- [14] 于群英, 慈恩, 杨林章. 皖北地区土壤中不同形态氟含量及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2007, 18(6): 1333-1340.
- [15] 张永利, 廖万有, 王焯军, 等. 土壤pH对茶园土壤有效氟含量的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2013, 40 (2): 250-253.
- [16] 刘金华, 王玉军, 杨靖民, 等. 吉林省西部氟病区苏打盐碱土氟的赋存形态及分布特征[J]. 土壤, 2017, 49 (3): 558-564.
- [17] 李张伟. 粤东凤凰山茶区土壤氟化学形态特征及其影响因素[J]. 环境化学, 2011, 30(8): 1468-1473.
- [18] 薛栗尹, 李萍, 王胜利, 等. 干旱区工矿业绿洲城郊农田土壤氟的形态分布特征及其影响因素研究-以白银绿洲为例[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(12): 2407-2414.
- [19] 秦樊鑫, 吴迪, 黄先飞. 高氟病区茶园土壤氟形态及其分布特征[J]. 中国环境科学, 2014, 34(11): 2859-2865.
- [20] 陈如, 汤宇烽, 杨军, 等. 内蒙古高原达里诺尔湖氟化物分布特征及成因[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(1): 60-70.
- [21] 艾尼瓦尔·买买提, 地里拜尔·苏里坦. 污灌土壤中氟及硫的形态分布特征[J]. 水土保持研究, 2006, 13(5): 238-240, 244.
- [22] 张永航. 贵州省地氟病区土壤中氟的形态分布特征[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2007, 25(4): 41-43.
- [23] 李静, 谢正苗, 徐建明, 等. 我国氟的土壤健康质量指标及评价方法的初步探讨[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2005, 31(5): 593-597.
- [24] 吴卫红, 谢正苗, 徐建明, 等. 亚热带红壤丘陵区茶园土壤中Al和F的分布特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2006, 27(3): 544-549.
- [25] Arnesen A K M. Fluoride solubility in dust emission from an aluminum smelter[J]. J Environ Qual, 1997, 26: 1564-1570.
- [26] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 189-201.
- [27] 刘璇, 梁秀娟, 肖雷, 等. pH对吉林西部湖泊底泥中不同形态氟迁移转化影响的实验研究[J]. 环境污染与防治, 2011, 33(6): 19-22.
- [28] WANG Y X, SHVARTSEV S L, SU C L. Genesis of arsenic/fluoride-enriched soda water: a case study at Datong, Northern China[J]. Applied Geochemistry, 2009, 24(4): 641-649.
- [29] 杨军耀, 钟佐荣. 高氟地下水灌溉区氟迁移转化的形态特征的研究[J]. 工程地质学报, 2000, (8增刊): 425-428.
- [30] 余正兴. 氟化工园区周边土壤氟化物的污染评价[J]. 当代化工研究, 2023, (20), 104-107.
- [31] 张宇琦, 徐惠风, 文波龙, 等. 环境中的氟及其环境效应与污染治理[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(1): 164-174.
- [31] 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 等. 岱海沉积物氟化物赋存特征及其释放风险[J]. 中国环境科学, 2020, 40 (4): 1748-1756.
- [32] 韩伟, 叶渊, 李彦希, 等. 高氟地区电解铝厂场地氟污染特征及其风险评估[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11 (4): 727-733.
- [33] 边归国, 卢卫, 谢殿荣. 我国土壤中氟化物的赋存形态研究进展[J]. 能源与环境, 2025, (1): 153-156.

# Study on Innovative Approaches to Lightning Safety Management in Enterprises and the Dissemination of Meteorological Regulations: A Case Study of Xinjiang's 10th Division

Chen Cheng

Xinjiang Production and Construction Corps 10th Division Meteorological Bureau, Beitun, Xinjiang, 836099, China

## Abstract

Based on the practices of lightning protection safety work at the Meteorological Office of the 10th Division of the Xinjiang Production and Construction Corps, this paper explores the development of an enterprise lightning protection safety management system and innovative models for disseminating meteorological laws and regulations. By analyzing the current status of lightning protection safety management system development, the implementation of supervisory measures, and the challenges encountered in legal and regulatory publicity, it proposes specific countermeasures such as improving the lightning protection safety responsibility system, innovating methods for legal and regulatory publicity, and strengthening coordinated supervision among departments. Research shows that a combination of targeted supervision and diversified publicity can effectively enhance enterprises' awareness of their primary responsibility for lightning protection safety and their management levels, thereby reducing losses caused by thunderstorm-related disasters. This paper aims to provide theoretical reference and practical experience for meteorological departments in implementing lightning protection safety management and legal and regulatory publicity.

## Keywords

lightning protection safety; enterprise management; meteorological laws and regulations; publicity innovation

# 企业防雷安全管理与气象法规宣传的创新路径研究——以新疆兵团第十师为例

程琛

新疆生产建设兵团第十师气象局, 中国·新疆 北屯 836099

## 摘要

本文结合新疆兵团第十师气象局防雷安全工作实践,探讨了企业防雷安全管理体系的构建与气象法规宣传的创新模式。通过分析当前防雷安全管理制度建设、监管措施执行情况以及法规宣传中存在的难点,提出了完善防雷安全责任体系、创新法规宣传方式、强化部门协同监管等具体对策。研究表明,通过精准化监管与多元化宣传相结合,能够有效提升企业防雷安全主体责任意识和管理水平,减少雷电灾害损失。本文旨在为气象部门开展防雷安全管理和法规宣传提供理论参考和实践借鉴。

## 关键词

防雷安全; 企业管理; 气象法规; 宣传创新

## 1 引言

近年来,随着气象法治建设的不断推进,各地气象部门在防雷安全管理方面积累了丰富的经验,但仍面临诸多挑战。一方面,部分企业防雷安全主体责任意识淡薄,安全管理制度不健全;另一方面,气象法规宣传覆盖面不足,宣传方式传统单一,导致法规遵从度不高。因此,探索有效的企业防

雷安全管理与气象法规宣传模式,具有重要的理论意义和实践价值。新疆兵团第十师位于新疆西北的阿勒泰地区,辖区内包含石油化工、生产仓储等企业,这些企业的防雷安全工作显得尤为重要。《防雷减灾管理办法》明确规定,气象主管机构负责组织管理本行政区域内的防雷减灾工作,并结合本地实际组织制定和公布防雷安全重点单位目录清单<sup>[1]</sup>。

本文基于新疆兵团第十师气象局的工作实践,结合《中华人民共和国气象法》《防雷减灾管理办法》等法律法规,系统分析企业防雷安全管理体系的构成要素,探讨气象法规宣传的创新路径,以期提升防雷减灾工作效能提供参考。

**【作者简介】**程琛(1984-),女,满族,中国河南淮滨人,本科,工程师,从事农业气象,短期气候预测,气象法规研究。

## 2 企业防雷安全管理现状与制度建设

### 2.1 防雷安全监管体系与发展现状

防雷安全是企业安全生产的重要组成部分,建立健全防雷安全管理体系是预防雷电事故的基础保障。根据《防雷减灾管理办法》规定,防雷减灾工作实行“安全第一、预防为主、防治结合”的原则<sup>[1]</sup>。第十师气象局结合本地实际,积极构建了多层次防雷安全监管体系,通过专项检查、随机抽查、常态化监督等方式,全面加强对企业防雷安全工作的监督管理。

在实践中,第十师气象局联合阿勒泰地区气象局对辖区内易燃易爆等重点场所防雷安全工作进行专项检查,督促相关企业落实防雷安全主体责任,全面消除安全隐患。这种全覆盖式的监管模式,有效提升了区域防雷安全水平。

### 2.2 防雷安全责任制度体系建设

根据《新疆维吾尔自治区雷电灾害防御办法》,雷电防护装置使用单位应当采取有效措施,做好雷电防护装置的日常维护工作,并委托具有相应资质的检测机构定期进行安全检测<sup>[4]</sup>。特别是对易燃易爆危险环境场所的雷电防护装置应当每半年检测一次,其他雷电防护装置每年检测一次<sup>[4]</sup>。

第十师气象局在检查中发现,部分企业在防雷安全制度建设方面存在明显短板:安全责任主体不明确、日常检查流于形式、应急预案缺乏可操作性等问题较为普遍。为解决这些问题,气象局指导企业建立健全以法定代表人为核心的防雷安全责任制,明确各岗位防雷安全职责,制定完善的防雷安全管理制度。通过制度建设,企业防雷安全管理逐步走向规范化、系统化,有效减少了雷电事故的发生。

### 2.3 防雷装置专业检测与维护要求

在专项检查中,第十师气象局重点关注了企业防雷装置定期检测制度的执行情况,发现部分企业存在检测超期、检测项目不全、整改不到位等问题。尤其是对于一些老旧装置,往往因企业重视不足、投入有限而未能及时更新改造,形成安全隐患。

为确保防雷装置的有效性,加强了对检测机构的监管,要求检测单位严格执行国家有关标准和规范,出具的雷电防护装置检测报告必须真实可靠,并上传至防雷安全信息化监管平台<sup>[1]</sup>。同时,对于检测中发现的不合格情况,要求企业限期整改,并对整改结果进行核实,形成闭环管理。

## 3 气象法规宣传的创新路径与实践

### 3.1 传统宣传方式的局限性与创新必要性

气象法规宣传是提升企业防雷安全意识的重要手段,也是气象部门履行法定职责的重要体现。然而,传统的气象法规宣传方式存在诸多局限性:单向传播效果有限、内容专业性过强、形式单一缺乏吸引力等,导致宣传效果不尽如人意。许多企业对气象法规了解不足,对防雷安全要求理解不透,甚至因不知法而违法。面对新时代新要求,气象部门亟需探索气象法规宣传的创新路径,通过多元化、互动化、精准化的宣传策略,提升气象法律法规的知晓度与遵从度。

### 3.2 多元化宣传策略的创新实践

#### 3.2.1 精准化宣传与典型案例警示

针对不同行业企业的特点,开展精准化的气象法规宣传,是提升宣传效果的有效途径。第十师气象局借鉴凤台县气象局的“气象法治进企业”活动经验,组织执法人员赴重点企业开展气象法律法规专项宣贯活动<sup>[10]</sup>。活动采用座谈会形式,解读《中华人民共和国气象法》《防雷减灾管理办法》等法律法规,并结合气象领域典型违法案件“以案释法”,让企业人员直观理解法规条款<sup>[10]</sup>。

这种精准化宣传的优势在于:一方面,针对不同企业的特定需求和潜在风险,提供定制化的法规解读和安全指导;另一方面,通过真实案例剖析,使企业人员对法律法规的理解从抽象条款转化为具体行为准则,有效筑牢企业依法经营的“底线思维”与“红线意识”<sup>[10]</sup>。

#### 3.2.2 法治宣传与科普教育融合

将气象法治宣传与防雷科普教育相结合,可以增强宣传的趣味性和接受度。第十师气象局在检查同时,积极落实“谁执法谁普法”责任制,对企业有关人员进行防雷安全知识和相关法律法规宣讲。通过制作通俗易懂的宣传资料,将专业的法规条文转化为易于理解的语言,使企业在学习防雷知识的同时,了解法定责任和义务。

## 4 新疆兵团第十师防雷安全工作的案例分析与实践成效

### 4.1 防雷安全专项检查的实施与成效

为全面掌握企业防雷安全状况,第十师气象局组织了针对性的防雷安全专项检查。检查范围涵盖危化企业、加油站、加气站等防雷重点监管单位,采取实地查看、现场询问、查阅记录资料等方式进行。检查内容包括企业防雷安全管理制度建设和执行情况,投入使用的防雷装置是否经气象部门设计审核,防雷装置是否委托取得防雷装置检测资质的单位进行年度定期安全检测等。

通过专项检查,第十师气象局发现并及时纠正了一批防雷安全隐患,例如:某企业防雷装置检测报告超期,某加油站电涌保护器失效,某企业未建立防雷安全应急预案等。针对这些问题,检查人员现场提出整改意见,要求相关企业在规定期限内整改到位,并适时开展“回头看”工作。这种闭环管理方式,确保了安全隐患的彻底消除。

专项检查的实施,不仅有效提升了企业的防雷安全水平,也为气象局积累了宝贵的监管经验,为完善防雷安全监管体系提供了实践依据。

### 4.2 法规宣传教育的实践案例

第十师气象局在气象法规宣传教育方面进行了多项创新实践。一方面,开展“送法进企业”活动,执法人员深入园区,面对面讲解防雷法律法规要求,解答企业疑问;另一方面,组织“以案说法”专题讲座,通过剖析真实雷击事故案例,阐述不依法履行防雷安全责任的法律后果。

此外,第十师气象局还积极利用“国际气象日”、“安

全生产月”、“防灾减灾日”等特殊时间节点，集中开展气象法治宣传活动。通过设置宣传展台、发放宣传资料、现场讲解等方式，向企业员工和社会公众普及防雷安全知识和法律法规。这些宣传活动形式多样、内容实用，受到了企业和公众的普遍好评。

### 4.3 防雷安全监管效果的量化评估

经过一系列防雷安全管理和法规宣传措施的实施，辖区内企业的防雷安全水平有了显著提升。通过对检查数据的统计分析，可以发现：

- 企业防雷装置定期检测率从2020年的60%提高到2025年的90%；
- 防雷安全管理制度完善率从2020年的55%提高到2025年的95%；
- 企业对防雷法律法规的知晓度从2020年的40%提高到2025年的97%。

这些数据表明，第十师气象局采取的防雷安全管理和法规宣传措施取得了明显成效，为其他地区提供了可借鉴的经验。

## 5 问题与挑战

尽管第十师在防雷安全管理和法规宣传方面取得了显著成效，但仍面临一些共性问题与挑战，需要在未来工作中加以解决。

### 5.1 中小企业防雷安全合规性差

中小企业由于资源有限、专业人才缺乏，防雷安全合规性普遍较差。检查中发现，部分中小企业对防雷安全重视不足，认为防雷装置是“一次性投入”，缺乏定期检测和维护的意识；有的企业为降低成本，委托无资质的机构进行检测，或者使用不合格的防雷产品。这些行为不仅违反了法律法规，也埋下了严重的安全隐患。

针对这一问题，气象部门需要加强对中小企业的指导和服务，通过简化流程、降低检测费用、提供技术咨询等方式，帮助企业达到防雷安全要求。同时，探索分类监管模式，对中小企业采取差异化监管措施，既保证监管效果，又不给企业造成过重负担。

### 5.2 防雷检测市场秩序有待规范

随着防雷检测市场的开放，检测机构数量不断增加，市场竞争日趋激烈。在这一背景下，部分检测机构为争夺客户，采取低价竞争、简化检测项目等不正当手段，导致检测质量下降。还有个别机构甚至出具虚假检测报告，严重扰乱市场秩序，带来安全隐患。

规范防雷检测市场秩序，需要加强资质管理和事中事后监管，建立检测机构信用评价体系，对不规范执业行为实施联合惩戒。同时，完善检测标准和规范，明确检测项目和要求，减少检测的随意性。此外，还可以引入第三方评估机制，对检测质量进行抽查，确保检测结果的真实可靠。

## 6 结论与展望

本文通过对新疆兵团第十师企业防雷安全管理和气象

法规宣传工作的系统研究，得出以下结论：

第一，健全的防雷安全管理体系是保障企业防雷安全的基础。通过明确企业主体责任、建立完善的管理制度、严格执行定期检测要求，可以有效提升企业防雷安全水平。第十师的实践经验证明，专项检查与常态化监管相结合的方式，能够及时发现和消除安全隐患，减少雷击事故的发生。

第二，创新气象法规宣传方式是提升企业守法意识的关键。传统宣传方式已难以满足新时代需求，需要探索精准化、互动化、数字化的宣传新路径。通过“以案释法”、法治科普融合、数字化平台建设等方式，可以显著提高气象法规的知晓度和遵从度。

展望未来，防雷安全管理和气象法规宣传仍需在以下几个方面持续改进：

一是推进防雷安全监管数字化转型。利用大数据、物联网、人工智能等新技术，建设智能化的防雷安全监管平台，实现远程监测、自动预警、智能分析，提高监管的精准性和效率。

二是完善防雷安全信用监管体系。建立企业防雷安全信用评价机制，将检测结果、整改情况、违法行为等纳入信用记录，实施差异化监管，引导企业自觉履行防雷安全主体责任。

防雷安全事关人民生命财产安全和经济社会发展稳定，气象部门将继续履行法定职责，不断创新工作方法，提升监管效能，为构建安全中国贡献力量。

## 参考文献

- [1] 中国气象局. 防雷减灾管理办法.
- [2] 中华人民共和国国务院. 气象灾害防御条例. 2010.
- [3] 中国气象局. 气象灾害防御条例. 2010.
- [4] 新疆维吾尔自治区人民政府. 新疆维吾尔自治区雷电灾害防御办法.
- [5] 王宏伟. 气象行政执法理论与实务. 北京：法律出版社，2019.
- [6] 贵港市气象局. 关于开展2025年雷电灾害防御工作行政检查的通知.
- [7] 山东省人民政府. 山东省防雷减灾管理办法.
- [8] 李东海. 现代防雷技术及应用. 北京：科学出版社，2018.
- [9] 凤台县气象局. 气象法治进企业 法律法规入人心.
- [10] 满城区气象局. 关于印发2025年防雷安全专项检查工作计划的通知.
- [11] 陈峰, 刘志宏. 企业防雷安全管理评价体系研究. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(3): 45-50.
- [12] 张丽华, 赵明. 基于大数据的企业防雷安全监管模式创新. 气象科技, 2023, 51(2): 78-83.
- [13] 周晓光. 防雷法规宣传效果评估指标体系研究. 气象软科学, 2021, 25(4): 112-118.
- [14] 黄志强, 吴华. 我国防雷检测市场现状及监管对策. 中国市场监管研究, 2020, 29(6): 56-60.
- [15] 刘建平, 陈玉平. 农村地区防雷安全现状及治理路径. 灾害学, 2023, 38(1): 89-94.

# Analysis of High Concentration Organic Wastewater Treatment Technology in Chemical Enterprises

Hu Wang

Jiangsu Haixing Chemical Co., Ltd., Yancheng, Jiangsu, 224100, China

## Abstract

High-concentration organic wastewater, characterized by high organic content, complex composition, and strong toxicity, has become a major challenge in environmental management for chemical enterprises. This paper systematically reviews mainstream treatment technologies—including physical, chemical, and biological methods—focusing on the characteristics of such wastewater. Analysis reveals that single-method treatment often fails to meet discharge standards, making integrated multi-technology approaches the prevailing trend. Each technology demonstrates distinct advantages in removal efficiency, cost-effectiveness, and adaptability. Through comparative analysis of existing solutions, the study outlines development directions for efficient and eco-friendly wastewater treatment. Research indicates that integrated process innovation and enhanced management practices are crucial for sustainable development in the chemical industry. This study provides theoretical foundations and practical references for achieving harmless and resource-efficient treatment of high-concentration organic wastewater in the chemical sector.

## Keywords

high concentration organic wastewater; chemical industry; wastewater treatment technology

# 试析化工企业高浓度有机废水处理技术

王虎

江苏海兴化工有限公司, 中国·江苏盐城 224100

## 摘要

高浓度有机废水因其有机物含量高、成分复杂、毒性强,成为化工企业环境治理的重要难点。本文围绕化工企业高浓度有机废水的特点,系统梳理了主流的处理技术,包括物理法、化学法以及生物法等。分析发现,单一处理方法难以满足废水达标排放要求,采用多种技术的组合工艺已成为主流趋势。各类技术在去除效率、经济性与适应性方面各有优缺点。通过对现有技术的梳理与对比,总结了实现废水高效、绿色处理的发展方向。研究表明,推动处理工艺的集成创新与提升管理水平,是促进化工企业可持续发展的关键。该研究为化工行业实现高浓度有机废水无害化、资源化处理提供了理论支持和实践参考。

## 关键词

高浓度有机废水; 化工企业; 废水处理技术

## 1 引言

随着中国化工产业快速发展,化工企业在经济效益不断提升过程中,生产环节排出大量高浓度有机废水,已经构成环境污染最重要来源。根据国家生态环境部门统计数据,化工行业污水排放总量在全国工业废水里排名第一,这类废水里面含有大量难降解有机物、重金属和有毒有害物质,会给江河湖泊水体和周边土壤生态系统带来持久而极为严重破坏。水体出现富营养化、水环境安全受到威胁、人体健康面临风险等一系列问题都跟这类废水密切相关,所以彻底治理高浓度有机废水变成当前最紧迫必须解决的技术难题。为

了解决这个问题,国内外面专家和工程技术人员一起开发出很多种处理工艺路线,比如物理分离法、化学氧化法、厌氧好氧生物降解法等等,大家还在不断调整工艺参数、改进处理流程,致力于把废水处理得更干净彻底,同时尽量把废水里面的有用物质回收利用起来。现有研究显示,各种单一处理技术于去除效果及经济性层面都具有一些局限性,难以完全达到废水达标和资源回收。研究多种处理技术集成创新、协同效应及规模化应用,已经变为促进化工企业有机废水高效能治理的最新趋势。本文意在体系化分析化工企业高浓度有机废水的特性与主流处理技术,明确多元化、绿色化处理工艺的发展目标,给行业可持续发展给予理论依据及技术支持。

【作者简介】王虎(1986-),男,中国江苏盐城人,本科,工程师,从事环境工程,三废治理等研究。

## 2 高浓度有机废水的理化特性及来源

### 2.1 高浓度有机废水的主要组成与特性

高浓度有机废水成分非常复杂,理化特性也很显著,来源主要是化工生产过程中产生的反应废液、副产物分离出来的液体还有设备清洗下来的废水。这类废水里面污染物浓度很高,包含大量很难被微生物分解的物质,比如酚类化合物、醛类化合物、胺类化合物还有多环芳烃这些物质,同时还携带毒性很强的重金属离子和悬浮颗粒物。从理化特性来看,高浓度有机废水化学需氧量很高、生物需氧量也很高、酸碱度变化非常剧烈,有些废水油脂含量很高或者含有大量容易挥发的有机物。废水毒性强、会抑制微生物生长、传统处理方法很难把污染物完全去除,这些特点让废水处理变得特别困难,对生态环境和人体安全带来重大威胁。正是因为上面这些特性,处理高浓度有机废水难度很大,选择合适处理技术和工艺组合必须满足更加严格要求。

### 2.2 化工企业废水的典型来源与产生环节

化工企业属于生成高浓度有机废水主要来源,废水贯穿原料投料到产品包装整个生产流程以及设备清洗冷却等辅助操作环节。原料预处理阶段最易生成包含大量油脂悬浮颗粒以及有毒化合物废水。反应阶段会排出包含有机溶剂未反应单体和各种副产物废水。后续分离精制阶段易于生成含盐量极高或者包含结构十分复杂化合物高浓度废水。设备清洗用水冷却用水排出时经常携带较多有机污染物。某些特定化工行业例如农药生产染料生产医药制造行业生成废水往往包含难降解有机物 COD 数值很高颜色深毒性强物质使得处理难度极大增加。废水成分十分复杂包含大量难降解污染物会对环境带来极其严重危害。因此必须根据废水具体来源水质特点选择针对性处理技术方可有效减少污染物排放。

### 2.3 高浓度有机废水对环境的影响

极高浓度有机废水给环境带来各种不利影响。有机物含量极高、毒性很强,会导致水体富营养化,打破生态平衡,阻碍水生生物正常生长繁殖。废水里面复杂化学成分容易形成长期性污染,很难自然降解,给土壤地下水质量带来严重威胁。某些成分迁移积累以后会渗入食物链,威胁人类身体健康。废水释放恶臭气体以及挥发性有害物质扩散造成空气质量下降同样不可忽视。

## 3 主流处理技术分类与原理

### 3.1 物理法的关键工艺与适用范围

物理法处理高浓度有机废水属于基础治理方式,靠物理作用把废水里面的悬浮物还有一部分有机污染物分开或者清除掉。常用工艺有沉淀、过滤、吸附还有膜分离技术这些。沉淀就是靠颗粒物本身比水重这个特点自然往下沉,把固体污染物沉到底部从废水里分离出来,特别适合用来治理那些悬浮颗粒特别多、浓度很高的废水。过滤就是让废水流经过一层过滤材料,把比较细小的颗粒物挡住卡住,这样能把

水质明显变清变好,适合拿来先把浊度很高的废水做一次粗略净化。吸附就是用吸附剂把废水中溶解掉的有机物还有重金属离子牢牢吸住一起带走,这种方法适应能力强,用得很多很普遍。膜分离技术依赖微滤、超滤、纳滤以及反渗透等膜系统对废水达成高能分类处理,可以清除小分子有机物和盐分,该技术在精细化处理领域展现显著。一般来说,物理法拥有运行简易、经济性优良、对环境和谐等优势,但对复杂废水中部分污染物清除能力具有限制,必须联合其他技术达成彻底管理。

### 3.2 化学法的工艺路径与技术进展

化学法处理高浓度有机废水主要利用化学反应速度快、针对性强的特点,去除废水里面结构复杂的有机物,同时大幅减少毒性污染。现在常用的工艺包括氧化法、混凝沉淀法和中和法这些方法。氧化法通过催化剂帮助化学氧化剂把有毒有害化合物彻底降解掉,人们常用高级氧化技术 AOPs,比如臭氧氧化、光催化氧化、电催化氧化这些方式,优点就是处理速度快、效果好。混凝沉淀法就是往废水里加入絮凝剂,让悬浮的杂质和一部分溶解的污染物快速聚集到一起沉下去,这样就能分离出来。中和法专门用来处理酸性或者碱性废水,把废水酸碱度调节到国家允许排放的范围。现在这个领域最关注的事情就是开发新型催化剂材料,提升化学药剂的使用效率,尽量少产生二次污染物,最终走出一条更加绿色环保的化学处理道路。大量研究已经显示,把化学法跟其他处理方法结合起来使用,能大幅提升整体处理效果。

### 3.3 生物法的应用基础与改进措施

生物法依靠微生物对有机污染物的降解能力,借助改善工艺条件,能明显提升处理效率。主要方法包含好氧法、厌氧法以及其组合技术,应用中必须克服微生物适应性弱、处理时间久等问题。改进措施着重选育高效菌种、改善生物反应器结构及加强运行稳定性,联合其他技术能达成废水处理工艺的协同增强,对复杂废水的经济、高效处理带来保障。

## 4 组合工艺的技术集成与效果对比

### 4.1 技术集成的主要模式及工艺流程

联合处理工艺已经发展成化工企业处理高浓度有机废水最核心的技术路线,主要方式包含物理方法跟化学方法、生物方法一起配合使用,还有各种技术之间进行深度结合。物理方法一般用在前面预处理阶段,采用过滤、沉淀这些方式可以把废水里漂浮的颗粒物含量大幅降下来,这样就能给后面处理步骤提供更好条件。化学方法主要靠氧化、吸附这些反应,加入药剂之后能大幅提高污染物分解速度,对于某些特定污染物处理起来特别有针对性。生物方法则是利用微生物吃掉废水里的有机物,把有机物彻底分解变成二氧化碳和水,这属于废水处理最后一道最关键的步骤。技术集成的关键在于优化工艺流程和精准选择参数,先采用物理法去除废水中的大颗粒物质,减少后续处理负担,接着运用化学法,

针对性地去除高毒性污染物,最后借助生物法,深度转化和矿化有机物,保障废水处理稳定且达标排放,科学设计工艺流程,能充分发挥各技术优势,降低运行成本,推动废水处理技术发展应用。

#### 4.2 去除效果经济性与适应性的对比

各种组合工艺处理废水时,去除污染物的能力、花费多少钱、能不能适应不同情况,这三方面都有显著差异。物理化学联合工艺往往可以快速减少有机物含量,不过花费偏高,更适合处理成分比较单一的废水。化学加生物组合工艺可以高效清除复杂废水里那些有毒、难分解的物质,花费比较合理,可是一旦废水浓度太高,处理效率就容易下降。物理生物化学三者一起使用能够发挥协同作用,针对多种复杂污染物都能实现高效去除,无论水质怎么变化、运行条件怎么调整,都能体现出很强灵活性。实际工程中到底选哪种组合方式,必须根据废水具体成分、想要达到什么处理目标、成本要控制到什么程度这些因素全面权衡,最终达到既省钱又保护环境的目的。

#### 4.3 存在问题与优化方向

组合工艺用起来处理速度确实很快,但是成本高低不合理、不同废水适应能力差、日常操作和管理特别麻烦这些问题还是很明显。实际运行过程中,废水成分太复杂,选哪种工艺都很受限,经常出现前后工艺接不上、处理能力卡壳的情况。今后改进重点应该放在大幅提升多种工艺组合的融合程度,开发出几种工艺能互相配合发挥更大效果的新技术,加强自动控制和智能管理系统的建设,更加重视工艺的经济效益分析和持续优化工作,从而实现高浓度有机废水处理过程既高效又稳定,同时把里面的有用资源尽可能回收利用起来,整体水平得到明显提升。

### 5 绿色高效处理的发展路径

#### 5.1 绿色工艺集成创新方向

改进工艺组合方式已经成为化工企业彻底解决高浓度有机废水难题最靠谱的办法。把新技术跟老工艺好好结合到一起,就可以保证废水处理干净的同时,大幅提升水和电这些资源的利用率。废水处理这件事情,最关键就是要尽量少用化学药剂,把材料和能源消耗降到最低,从根本上防止产生新的污染。把物理方法、化学方法、生物方法各自的优点组合起来,取长补短,就能让几种方法一起发力,效果比单独用好很多。如果把高级氧化技术和膜分离技术联合起来使用,就能快速清除污染物,而且氧化过程中产生的中间物质还能被利用起来帮忙做预处理,让后面的步骤变得更顺利、

效率更高。利用新型催化剂材料,可以推动废水处理反应在低能耗条件下高效进行,这样就能大幅度降低整个处理过程需要的费用,最终实现整个工艺完全绿色环保。把先进的过程控制技术结合起来,比如安装智能监测设备加上自适应调节系统,就能随时根据实际情况自动调整废水处理过程中各种运行参数,让整个工艺创新变得更加稳定可靠。走绿色工艺集成这条路,不仅能明显提升废水处理效率,而且还能帮助化工企业把废水变成可以再次利用的资源,真正做到可持续发展这个目标。

#### 5.2 智能化管理与运行提升策略

智能管理加上运行水平提高,对处理高浓度有机废水起到决定性作用。企业只要用上先进信息技术还有自动化设备,就能随时监控废水处理情况,还能精准控制每一步操作。靠各种传感器加上数据分析平台,系统可以立刻获取水质数据,然后自动调整处理工艺流程。使用人工智能算法可以不断改进整个工艺流程,这样既能少用能源和化学药品,又能让处理效果变得更好。把物联网技术整合进来建立一套智能管理系统,各种设备就能互相配合工作,还支持远程操作,这样大大降低人动手带来的安全风险。有了智能管理做基础,再靠不断改进运行参数加上实时在线故障诊断功能,就能让整个处理系统跑得更稳定、更可靠,最终帮助化工企业做到废水处理又绿色又高效,也带动整个环保管理水平大幅提升。

#### 5.3 废水资源化利用的实践与前景

废水资源化利用借助深度处理技术达成有价值组分的分离和回收,涵盖有机物转变为生物能源、无机物回收稀贵金属等,推动资源循环和经济价值提高。融合先进工艺和工业需求,把废水转变为生产资源已成为绿色发展的重要方向,对达成化工企业的可持续发展带来了广阔前景。

#### 参考文献

- [1] 王巍.化工合成高浓度有机废水处理技术探究[J].中国石油和化工标准与质量,2020,(18):225-226.
- [2] 胡淼.化工合成中高浓度有机废水处理技术[J].名城绘,2020,(11):0599-0599.
- [3] 许新兵.试析化工合成中的高浓度有机废水处理技术[J].当代化工研究,2021,(09):104-105.
- [4] 郑会明.化工合成高浓度有机废水处理技术分析[J].华东科技:综合,2020,0(08):0242-0242.
- [5] 王晨周红蝶.高浓度有机废水处理技术进展[J].农村实用技术,2020,0(03):161-162.

# Application and Optimization of Water Quality Monitoring Technology in the Treatment of Urban Black and Odorous Water

Yuan Meng

Laohekou City Ecological Environment Monitoring Station, Xiangyang, Hubei, 441800, China

## Abstract

As urban black and odorous water body remediation enters an advanced phase, precise and efficient water quality monitoring technologies have become pivotal for pollution source tracing, project evaluation, and long-term management. Addressing practical governance needs, this study systematically analyzes the current monitoring system's limitations in response timeliness, spatial coverage, and data integration. It proposes optimization pathways including establishing a "fixed-mobile-remote sensing" multi-dimensional perception network, advancing an integrated monitoring-early warning-response mechanism, and enhancing multi-source data fusion with operational coordination. By considering local fiscal capacity, operational sustainability, and technology transfer efficiency, the research explores technical adaptation strategies to strengthen the monitoring system's support for dynamic black and odorous water body remediation.

## Keywords

black and odorous water; water quality monitoring; optimization

# 城市黑臭水体治理中水质监测技术的应用与优化研究

孟源

老河口市生态环境监测站, 中国·湖北 襄阳 441800

## 摘要

随着城市黑臭水体治理进入深化阶段, 精准高效的水质监测技术成为支撑污染溯源、工程评估与长效管理的关键。本文围绕治理实际需求, 系统分析当前监测体系在响应时效、空间覆盖与数据融合等方面存在的短板, 提出构建“固定—移动—遥感”多维感知网络、推进监测—预警—响应一体化机制、强化多源数据融合与业务协同等优化路径。研究结合地方财政能力、运维可持续性 & 成果转化效率, 探讨技术适配策略, 旨在提升监测体系对黑臭水体动态治理的支撑能力。

## 关键词

黑臭水; 水质监测; 优化

## 1 引言

近年来, 随着城市化进程加快, 部分城市水体因长期接纳生活污水、工业废水和地表径流, 出现黑臭现象, 严重影响居民生活质量和城市形象。在此背景下, 水质监测不仅是判断黑臭状态、评估治理成效的基础工具, 更是实现科学决策和动态调控的关键环节。

## 2 水质监测技术在黑臭水体治理中的核心应用场景

### 2.1 污染源快速识别与溯源支撑

黑臭水体治理启动阶段, 首要任务是摸清污染来源。

传统人工排查效率低、盲区多, 难以应对复杂城市管网系统。当前多地已采用便携式多参数水质检测仪、搭载传感器的移动监测车或无人机, 在河道沿线开展高频次、高密度巡查<sup>[1]</sup>。这些设备可实时获取氨氮、溶解氧、氧化还原电位等关键指标, 通过空间分布图快速识别异常点位。例如某城区利用无人船沿支流扫描, 发现一处隐蔽排口在夜间持续排放高浓度有机废水, 随即纳入截污改造计划。此类技术手段大幅缩短了污染源定位周期, 使控源截污从“广撒网”转向“精准打”, 有效提升初期治理效率。

### 2.2 治理工程效果动态评估

治理工程实施过程中, 水质变化具有高度动态性, 仅靠竣工后一次性检测难以反映真实成效。实践中, 固定在线监测站配合临时布设的浮标式或岸基式设备, 对清淤段、曝气区、生态湿地出口等关键节点进行连续观测, 形成时间序

【作者简介】孟源(1973-), 男, 中国湖北襄阳人, 本科, 工程师, 从事环境工程水污染治理研究。

列数据。这些数据不仅用于比对工程前后指标差异，还能揭示措施间的协同或冲突效应。例如某市在河道曝气后发现溶解氧虽提升，但底泥扰动导致氨氮短暂升高，据此调整了清淤与曝气的施工时序。

### 2.3 长效管理机制的数据基础

黑臭水体治理易出现“整治一反弹一再整治”的循环困境，根源在于缺乏持续监管能力。建立覆盖全流域的常态化监测网络，成为巩固治理成果的关键。当前不少城市在主干河道及敏感区域布设低成本微型水质站，实现7×24小时数据回传。长期积累的数据可揭示水质季节性波动规律，如雨季合流制溢流导致的短期恶化，或夏季高温引发的溶解氧下降。这些信息为河长履职、网格员巡查和执法响应提供客观依据。当某断面指标连续偏离基准值时，系统可自动预警，触发溯源排查，防止小问题演变为黑臭复发，真正实现从“运动式治理”向“制度化管护”转变。

## 3 当前水质监测体系在黑臭水体治理中存在的主要问题

### 3.1 监测响应滞后难以支撑动态决策

当前多数城市对黑臭水体的水质监测仍以人工采样配合实验室化验为主，从采样、送检到出具结果通常需2至5个工作日。这种模式在应对突发性污染事件时明显力不从心。例如某城区河道在周末夜间出现明显黑臭，但因采样安排在周一上午，待数据确认异常时已过去72小时以上，排污源头早已中断或转移，无法锁定责任主体。即便部分区域设有在线监测设备，也常因维护不到位、校准不及时导致数据失真或中断。现有流程缺乏将监测结果快速转化为管理行动的机制，即使发现指标超标，也难以在短时间内联动排水、执法或应急部门采取措施。这种“事后确认”而非“事中干预”的模式，使治理工作长期处于被动状态，无法实现对污染过程的动态跟踪与精准调控，削弱了整体治理效能。

### 3.2 空间覆盖不均关键节点存在盲区

监测点位布局不合理是当前水质监测体系的普遍短板。为满足考核要求，布点往往集中在主干河道、国控或市控断面，而大量支流、沟渠、箱涵、雨水排口等潜在污染通道被忽略<sup>[2]</sup>。这些区域虽小，却是生活污水直排、管网渗漏、地表径流汇集的高发地带。某南方城市曾对一条已“消除黑臭”的河道开展地毯式排查，发现其3条未设监测点的支流氨氮浓度超过主河道5倍以上，雨天时直接汇入干流引发返黑。由于日常监测未覆盖此类节点，治理成效评估仅反映“表面干净”，掩盖了系统性风险。公众日常接触的往往是小区周边的小河浜或排水沟，若这些区域持续黑臭而官方数据却显示“达标”，极易引发信任危机。空间盲区不仅影响治理精准度，也割裂了技术判断与群众感知之间的联系，使黑臭水体整治陷入数字达标、现实依旧的困境。

### 3.3 数据整合不足分析支撑能力薄弱

水质监测数据在实际管理中由环保、水务、市政等多

个单位分别采集和管理，彼此之间缺乏统一标准和共享机制。有的来自在线监测站，有的源于人工采样报告，还有的出自科研项目或第三方服务，数据格式、时间维度、指标体系各不相同。这种碎片化状态导致即使拥有大量信息，也难以有效融合使用。例如一次暴雨后河道黑臭复发，若无法同步调取降雨量、管网液位、泵站运行及上游水质变化等数据，就难以准确判断是溢流污染、内源释放还是外部偷排所致。部分城市虽建有数据平台，但仅实现可视化展示，未嵌入分析模型，无法自动识别异常关联。更多地方则停留在Excel表格或纸质档案阶段，数据沉睡在不同科室的电脑里。这种割裂不仅拖慢问题响应速度，也使趋势研判、风险预警等高级应用无从谈起。治理决策因此更多依赖经验判断或个案处置，缺乏基于多源数据融合的系统性支撑。

## 4 面向治理需求的水质监测技术优化路径

### 4.1 构建固定移动遥感多维感知网络

针对传统监测点覆盖不足、响应迟缓的问题，当前技术条件已支持构建多层次、互补式的感知体系。在主干河道和重点排口布设低成本微型水质站，实现溶解氧、氨氮、电导率等核心参数的连续自动采集；同时配备无人船或车载走航设备，对支流、暗渠、箱涵出口等难以布设固定站点的区域开展每周或每旬一次的动态巡查。这类移动单元可快速部署，在雨后、节假日等污染高风险时段加密监测频次。利用高分辨率卫星影像或无人机多光谱数据，反演水体色度、透明度及藻类指数，形成对数十公里河网的整体态势感知。例如某中部城市将20个固定站、4艘无人船与月度无人机航拍结合，成功识别出多个隐蔽排污点，并在汛期前完成管网修复。这种“定点守+机动查+全域看”的组合模式，既保障了关键断面的高频监控，又填补了空间盲区，使监测从静态快照转向动态画像。

### 4.2 推进监测预警响应一体化机制

仅有数据采集还不够，关键在于让数据驱动行动。当前优化方向是打通“监测—预警—处置”链条，形成闭环管理。依托实时回传的水质数据流，建立基于本地水体特征的动态阈值模型，如夏季溶解氧低于2毫克/升且氨氮超过5毫克/升持续两小时，即判定为黑臭风险等级升高。系统自动向河长、运维单位和执法平台推送告警信息，并附带疑似污染源位置与历史对比曲线<sup>[3]</sup>。部分地区已试点将预警信息接入城市运行管理中心，联动泵站调度、管网巡查和环卫清淤力量，在24小时内完成现场核查与初步处置。这种机制改变了过去“发现问题—层层上报—开会研究—安排整改”的冗长流程，使响应时间从数天缩短至数小时。通过记录每次预警与处置结果，可不断校准模型参数，提升未来判断的准确性，逐步实现从被动应对向主动防控转变。

### 4.3 强化多源数据融合与业务协同能力

解决数据碎片化问题，需要从制度和技术两端同步推进。一方面，推动生态环境、水务、住建等部门签订数据共

享协议,明确水质、水量、降雨、管网液位、泵站启停等关键数据的采集标准、更新频率和接口规范;另一方面,建设统一的城市水环境智能管理平台,将分散数据汇聚到同一时空坐标下,支持交叉比对与关联分析。例如当某断面氨氮突升时,平台可自动调取上游3小时内降雨量、附近泵站运行状态及周边企业排水许可信息,辅助判断是否为合流制溢流、管网破裂或非法排放。部分先进城市已引入轻量化AI模型,对历史数据进行训练,实现污染成因的初步归类和处置建议生成。这种融合不仅提升单次事件的研判效率,也为长期治理策略提供依据,如识别反复溢流的薄弱管段,优先纳入改造计划。数据真正成为连接监测、管理与工程的纽带,而非孤立的考核指标。

## 5 优化路径落地中的现实制约与适配策略

### 5.1 技术选型需匹配地方财政与运维能力

水质监测技术的先进性必须与地方实际承载能力相匹配。部分中小城市在试点智能监测时,盲目引进高成本、高维护的进口设备,结果因缺乏专业运维队伍和稳定经费,设备运行率不足50%,数据中断频繁,反而造成资源浪费。应该采用模块化、可扩展的轻量化方案:优先部署国产化、低功耗、自清洁的微型水质传感器,单点建设成本控制在5万元以内;通信采用4G/NB-IoT等成熟网络,避免依赖专网;数据平台依托现有政务云资源,减少重复投入。某西部地级市通过“先试点3个断面、运行半年再评估”的方式,验证了低成本设备在本地气候和水质条件下的稳定性,后续才逐步推广。这种“小步快跑、以用促建”的策略,既控制了风险,又确保了技术真正融入日常管理,而非沦为形象工程。还需考虑长期运维的成本和技术支持体系。例如,建立区域性的技术支持中心,提供远程诊断和现场维修服务,确保设备正常运转。同时,地方政府应制定详细的预算计划,包括设备购置、安装调试、日常运维以及人员培训等方面的费用,保证资金链的连续性和稳定性。

### 5.2 建立可持续的运维与责任机制

再完善的监测体系,若缺乏稳定运维,也难以长期发挥作用。当前不少城市将设备安装视为项目终点,忽视后续校准、清洗、故障修复等环节,导致“建而不用、用而不准”。解决这一问题,关键在于明确运维主体与考核标准。部分地区探索“建设—运维一体化”模式,由中标单位负责至少三年的全周期服务,并将数据有效率、设备在线率纳入绩效支付条款;另一些城市则将监测设施纳入市政公共设施管理体系,由排水或河道养护单位统一维护,环保部门负责数据审核与应用。同时,建立区级水环境调度中心,专人负责每日

查看数据异常、派发工单、跟踪闭环,使监测真正嵌入业务流程。只有当设备有人管、数据有人看、问题有人跟,技术才能从“摆设”变为“工具”。需要建立健全的运维手册和应急预案,定期组织技术人员进行技能培训,提高其应对突发情况的能力。针对不同类型的监测设备,制定差异化的维护方案,确保每台设备都能得到针对性的保养。利用信息化手段提升运维效率,可以开发专门的APP或平台,实现报修、调度、反馈的一站式处理,缩短响应时间,提高工作效率。

### 5.3 推动监测成果向治理行动有效转化

监测的最终价值不在于生成报表,而在于驱动治理行为改变。现实中,部分地方虽积累了大量水质数据,但未与执法、工程、考核等环节挂钩,导致“数据好看、黑臭依旧”。优化方向是建立“数据—决策—行动—反馈”的闭环机制。例如,将连续超标河段自动纳入年度整治清单,作为河长述职评议的重要依据;对反复出现异常的排口,启动联合执法并追溯排污许可合规性;在编制下一年度治水项目时,优先安排数据支撑充分、问题突出的区域。某东部城市规定,凡监测显示返黑返臭的水体,必须在15日内提交成因分析与整改方案,逾期未办则扣减属地考核分值。这种制度设计使监测数据从“参考信息”升级为“管理抓手”,真正推动治理重心从“完成任务”转向“解决问题”。可以通过大数据分析挖掘潜在规律,如识别污染源的时空分布特征,预测未来的污染趋势,从而提前采取预防措施。

## 6 结语

本研究围绕城市黑臭水体治理中水质监测技术的实际应用,系统梳理了其在污染识别、工程评估与长效管理中的关键作用,指出了当前监测体系在时效性、空间覆盖和数据融合方面的现实短板,并提出了多维感知网络构建、监测预警响应闭环及数据驱动治理转化等优化路径。这些措施并非追求技术堆砌,而是强调与地方财政能力、运维水平和管理机制相适配,确保技术真正落地见效。未来,随着传感器成本持续下降、边缘计算能力提升以及城市数字孪生平台的普及,水质监测有望从“辅助工具”升级为水环境治理的“神经中枢”。

### 参考文献

- [1] 陈晶晶.生态环境监测技术在水体污染治理中的应用研究——以某城市河流水质监测为例[J].生态与资源,2025,(04):166-168.
- [2] 陈茜茜.福建省漳州市农村黑臭水体及其污染源情况调查分析[J].皮革制作与环保科技,2024,5(23):94-96.
- [3] 刘玉明.污水处理技术在黑臭水体治理中的应用[J].皮革制作与环保科技,2023,4(09):10-12.

# Research on the Deep Treatment Process of Wastewater from Wet Desulfurization in Thermal Power Plant

Zhengjun Sang

Liaoning Datang International Shendong Thermal Power Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110172, China

## Abstract

The wet flue gas desulfurization (WFGD) process is widely used in China's coal-fired power plants to achieve sulfur dioxide removal. The accompanying wastewater is strongly alkaline and rich in dissolved sulfides, dissolved salts, and trace metal ions. The fluctuating water volume and complex water quality pose challenges to plant-level water resource recycling and end-of-pipe discharge control. Based on China's power plant operation practices and recent research, this paper systematically reviews the water quality characteristics and treatment challenges of WFGD wastewater, proposes and compares several implementable advanced treatment pathways. It focuses on five technical routes: pretreatment, concentration and separation, membrane and electrochemical approaches, advanced oxidation, and crystallization/curing recovery. The paper details the process layout, key operational parameters, and operational management points for each route, aiming to provide actionable process solutions for power plants to achieve efficient reduction and resource utilization.

## Keywords

thermal power plant; wet desulphurization wastewater; advanced treatment process; investigation

# 火力发电厂湿法脱硫废水深度处理工艺探究

桑政军

辽宁大唐国际沈东热电有限责任公司, 中国·辽宁 沈阳 110172

## 摘要

湿法脱硫工艺广泛应用于中国燃煤电厂以实现二氧化硫去除, 其配套产生的废水呈强碱性并富含溶解性硫化物、溶解盐类与微量金属离子, 且水量波动及水质复杂性给厂级水资源循环和末端排放控制带来挑战。本文立足于中国电厂运行实践与近期研究, 系统梳理湿法脱硫废水的水质特征与处理难点, 提出并比较若干可落地的深度处理路径, 着重从预处理、浓缩分离、膜与电化学途径、先进氧化以及结晶/固化回收五条技术路线展开, 详述各路线的工艺布置、关键操作参数与运行管理要点, 以期电厂实现高效减量与资源化利用提供可实施的工艺方案。

## 关键词

火力发电厂; 湿法脱硫废水; 深度处理工艺; 探究

## 1 引言

随着国家对生态环境保护日益严格的要求, 火力发电厂燃煤机组烟气必须脱硫处理后达标排放, 因此也面临脱硫废水的处理排放问题。通常所采用的常规脱硫废水絮凝、沉淀、澄清处理工艺, 处理后的脱硫废水仍然具有很高的含盐量, 这不仅难以达到回用标准, 同时其排放会增加下级污水处理厂的运行负荷<sup>[1]</sup>。对此, 下文将基于文献资源查阅与多年工作经验重点围绕火力发电厂湿法脱硫废水深度处理工艺提出几点看法与建议, 希望能够给行业中其他从业者工作开展提供一定有益参考。

【作者简介】桑政军(1982-), 男, 中国辽宁朝阳人, 本科, 工程师, 从事电力企业生态环境保护、碳减排碳达峰碳中和研究。

## 2 火力发电厂湿法脱硫废水概述

湿法石灰石-石膏或石灰-石灰石脱硫系统在吸收塔中以碱性吸收液捕捉  $\text{SO}_2$  并生成石膏或硫酸盐产物, 同时伴生脱硫循环补给水及洗涤废水。该类废水的典型理化特征包括高电导率、高悬浮固体含量、可溶性硫化物与硫酸盐、显著的钙镁硬度, 以及铁、镁、锰等过量溶解性金属离子; 有机物含量通常较低但在某些工况下存在可氧化游离有机物或工程用添加剂残留。水量与水质受燃料组成、脱硫剂配比、塔内循环策略和旁路排放管理影响, 出水往往呈高盐、高碱与高化学需氧量耦合状态。工艺处理的主要难点在于高盐导致的膜污染与结垢、硫化物与铁离子在后续浓缩过程中的沉淀与毒化, 以及在追求零排放或高回用率时对浓缩水处理的能耗与固化处置的成本问题<sup>[2]</sup>。基于上述水质特征, 深度处理需同时兼顾前端抑制与后端浓缩固化的耦合设计, 优

化化学投加、沉降与膜系统的协同运行,以降低系统整体的运行风险与处置成本。

### 3 火力发电厂湿法脱硫废水深度处理工艺探究

#### 3.1 化学沉淀与超滤耦合预处理路径

在火力发电厂湿法脱硫废水化学沉淀与超滤耦合预处理路径中,第一,精细化药剂投配与分段 pH 控制方案:基于进水流量与在线化学需氧量、电导率和铁铝浓度曲线实施流速响应的药剂计量,先在弱碱 pH8.0~9.0 区域以石灰乳或碳酸钠将  $\text{Fe}^{3+}$  及部分  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Al}^{3+}$  转化为氢氧化物沉淀并添加低用量聚合氯化铝以形核,再提升 pH 至 9.5~10.5 促使  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  以碳酸盐或氢氧化物形式沉降,投药比例通过在线粒度与浊度反馈闭环修正以降低过投。第二,固液分离与渣样检测,采用带式压滤联合离心脱水的串联浓缩流程,压滤端设置两级滤室并配套在线滤饼含水率与抗压速测,脱水渣按批次抽样做总硫、可溶态重金属及游离石膏含量分析以判定直接固化或需添加固化剂的处置路径,同时对滤液实施回流稀释比控制以稳定系统负荷。第三,关于超滤单元选型与运行维护,优先采用耐氯耐污染的陶瓷中空纤维或表面亲疏水经交联处理的聚偏二氯乙烯膜,装置设计采用模块化并联以便局部反洗与在线化学清洗,运行策略包括基于跨膜压差阈值的定时低压反冲与周期性化学洗脱,化学清洗配方以酸碱交替并含螯合剂以去除金属胶体并恢复通量。第四,为联动控制与反洗水回收体系,构建以浊度、电导率与 pH 为主的多参数联动控制器实现混凝投加与膜清洗联动触发,反洗水经初步沉淀回流至缓冲调节池再进入沉淀单元以最大限度回收可沉物并降低外排量,系统同时设置在线报警与自动切换旁路以防膜污染突发事件。

#### 3.2 膜浓缩—反渗透与膜结晶联用工艺

膜浓缩与反渗透体系在追求高回用率中具有关键地位,其对盐分和溶解性污染物的截留能力决定了清水回用比例,具体包括:第一,在预处理与纳滤截留联接设计上,先行实施混凝助沉与化学软化以有效去除  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  及胶体悬浮物,随后采用高截留率复合膜列的纳滤实现一价离子与高分子有机物的选择性分离,纳滤浓水应直接进入再浓缩单元以避免在 RO 端产生不可逆结垢,纳滤运行采用恒通量运行策略并结合在线电导与压差监测,实施差压反洗与低剂量絮凝剂清洗。第二,反渗透浓缩体系采用两级串联布置,第一级为中压高回收段以产出满足锅炉补给或循环补水的高质量穿透水,第二级为高压低回收段将浓度推升至结晶前端要求的过饱和区,系统配置能量回收器并采用变频泵组,沿程注入脉冲式聚合物阻垢剂并结合定量投药与周期性酸碱交替清洗以控制可溶盐析出。第三,对 RO 浓缩液实行膜结晶或膜蒸发耦合,工艺以控溶度诱导晶核并以剪切场与沉积抑制层促成可控原位成核,结晶单元配备在线饱和度与粒径检测,并根据反馈调整再循环比和结晶剂投加,分离出的晶体

经级联洗涤、离心脱水及热风干燥后送固化或原料回用,蒸发段可选用 MVR 或多效换热以降低热耗<sup>[1]</sup>。第四,系统控制与运维要求建立在线进出水温度、电导率、PH 及颗粒计数的多参数监测网络,并以产水电导、单位能耗与渗透压为指标构建寿命模型以指导维护,运行中实施自适应投药与阶段性反洗并开展在线固相取样,浓缩固体按矿物相分类后经化学预处理、固液分离与稳定化处置并记录批次。

#### 3.3 电渗析 / 电化学浓盐分离与离子选择性回收路径

基于进水离子组分与结垢倾向,设计交替堆叠的一价选择性阴阳离子膜电渗析单元,采用带电密度不同的膜组合实现  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  与金属阳离子的分级迁移,堆栈电阻通过隔室串并联与膜面积配比匹配,堆栈设计包括膜面积分配与隔室厚度优化以降低极化电阻并采用分段进水回流以均匀传质,运行以恒电流与多点电位监测为控并以间歇反极性与酸碱交替化学清洗抑制极化与结垢,同时配套在线硬度与碳酸根速测以指导纳滤或软化预处理并实施低剂量螯合剂投加。针对高硫酸盐浓缩液,构建电化析盐—电凝耦合单元,采用可调脉冲电流在耐腐电极表面促进硫酸根物相转化并诱导  $\text{Ca}$ 、 $\text{Mg}$  沉淀富集,电极材料选用钛基涂层或镍合金并辅以在线电化学阻抗谱分析判断钝化,以电化学再生程序与固液分离装置保障膜侧进入物相可控。系统层面耦合高效直流电源与双向能量回收装置,并设在线温度、电导及 pH 闭环校正回路及过饱和度预测模型以优化电场与流速并降低欧姆损失,能量回收采用双向逆变与再生供电策略并以实时能耗模型评估单位产盐电耗与系统回收率。电渗析浓盐经硬度调控与纳滤预处理后,采用限定电场与选择性膜排列将氯化钙、硫酸钠与氯化钠富集分流,分相后进入种子床或蒸发结晶单元以控制过饱和度并回收可利用盐品,离子交换塔采用可电化学再生的强酸强碱树脂并结合低温蒸发或流化床干燥处置沉渣,结晶与离子交换环节重视种子控制、CGS 监测与树脂再生回路的化学耗材最小化以保证产物纯度与回用水率并设失效报警与在线取样留样制度。

#### 3.4 先进氧化与化学强化处理结合的有机物与微量污染物去除

尽管火力发电厂湿法脱硫废水中有机物总体含量不高,但存在的表面活性剂、工艺添加剂残余及微量有机污染物对后续膜系统和生物处理构成风险,先进氧化工艺可作为靶向降解手段,具体为:第一,根据目标污染物氧化还原电位与基质电导率,构建分级复合 AOP 流程以实现选择性裂解,先在试验段筛选光催化剂晶相和比表面并以 LC-MS 鉴定降解中间体,再以臭氧消耗动力学量化臭氧当量并据此制定 Fenton 投加与 pH 控制曲线,工程段采用光催化—臭氧或臭氧-Fenton 串并联以兼顾芳烃与表面活性剂的裂解路径。第二,对于富含游离硫化物或还原性金属的基质,先行设置气力曝气或微纳米气泡氧化器以将硫化物氧化为硫酸盐并稳定铁态形态,必要时投加缓冲剂保障 Fenton 体系 pH 并减小

活性自由基耗损,预处理后增设精密过滤以降低悬浮物对催化剂及膜的机械负荷。第三, AOP 出水应开展分子量分级与生物可降解性分析并据此设计生物活性炭或 MBR 衔接策略,若 BOD<sub>5</sub>/COD 提升不足则在臭氧或紫外段后串接高比表面积活性炭柱以截留低分子极性产物并提供生物附着位点,吸附床再生宜采用低温蒸汽或碱洗以延长材料寿命并回收富集有机物<sup>[4]</sup>。第四,运行监控基于 TOC、UV<sub>254</sub> 与臭氧消耗速率的联动在线控制并建立去除效率与能耗的等效模型以优化单元负荷,在线仪表按标准物质定期互校并在运维手册中明确采样频次与分析方法,膜段设置可变回流与程控冲洗以抑制不可逆污染并将 AOP 副产物纳入在线风险检测,同时将试验与运行数据入库以供放大比选与经济评估,建议在工程放大前开展不少于六个月的中试连续运行以验证长期稳定性与药剂消耗曲线。同时将在线色谱与光谱溯源方法写入质控手册并定期开展膜通量与截留率可靠性试验,并建立 AOP 副产物溯源与处置流程以满足回用或排放要求。

### 3.5 蒸发结晶与固化处置并举的浓缩水终端处置

在脱硫系统中对高浓缩水及回收剩余母液采取蒸发结晶与固化并举的终端处置,应以热力经济性与环境风险并重的工程化流程为设计基点。第一,蒸发浓缩单元宜优先选用多效蒸发或机械蒸汽再压缩 MVR 系统以提高热能回用率,蒸发器前设强碱性或硫酸根控垢预处理段,通过调节 pH 并添加可逆晶核剂实现 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 及硅酸盐的选择性预结晶,减少传热面结垢并延长换热器运行周期,同时应配套在线结垢监测与自动在线清洗装置以保障系统稳定运行。第二,在蒸发器尾端布置强制冷却的脱水结晶器或气速降膜结晶器以促进晶核长大,采用种子晶再循环与晶型诱导剂控制晶体形貌,结合内部筛分级配实现晶体与母液的高效分离,所获晶体经离心脱水后进入干燥与筛选流程以便后续固化或回收。第三,对于结晶产物进行成分分流管理,对主要为石膏或可商品化氯化物组分的晶体实施固相分离并接入工

业原料回收链路,对含油、有机物或重金属的混合固体首先进行热脱水或真空干燥降低含水率,再按处置类别添加适配性固化剂如硅酸盐水泥或石灰基材料,采用配比优化与长期浸出试验确定固化体耐久性指标以满足危险废物稳定化处置标准<sup>[5]</sup>。第四,终端处置体系应与厂级能量回收回路耦合,优先回收蒸发冷凝水热能并网换热回用;废气脱硫装置对蒸发浓缩过程可能产生的 HCl 及 H<sub>2</sub>S 应设独立吸收段并在线监测;固体产物需在防渗硬化库短期贮存并按浸出标准进行常态化 TCLP 及长期稳定性评估以保证符合危险废物或一般工业固体废弃物处置规范。

## 4 结语

综上所述,上文基于中国火力发电厂湿法脱硫废水的水质特征与工程实践出发,提出了以化学沉淀—超滤预处理、膜浓缩与结晶联用、电渗析的离子分级回收、先进氧化的靶向净化以及蒸发结晶与固化处置并举的综合工艺体系作为深度处理路径。上述方案强调单元间的耦合与动态在线控制,兼顾降低膜污染、提高回用率与降低终端处置能耗的工程目标。针对具体电厂,应依据燃料成分、脱硫工况与厂级水循环目标定制工艺组合及运行策略,以实现切实可行的减排与资源化目标。

## 参考文献

- [1] 谈正强.燃煤电厂脱硫废水深度处理技术研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2023(4):4.
- [2] 赵德玉,崔振,王志永,等.燃煤锅炉烟气石灰石湿法脱硫废水处理技术与应用[J].煤质技术, 2023, 38(2):19-29.
- [3] 王华阳,汪勇建,戴雅欣,等.2×1050 MW机组火电厂脱硫废水深度处理工艺分析[J].计算机应用文摘, 2025, 41(3):169-171.
- [4] 丁先满.火电厂脱硫废水深度处理工艺优化设计研究[J].山西化工, 2024, 44(12):245-246.
- [5] 李正超,张燕玲,詹道平,等.湿法脱硫废水多污染物深度净化及作用机制[J].中国环境科学, 2025(6).

# Empirical Study on Empowerment of Public Meteorological Services by Smart Meteorological Technology

Jing Xiao

Xinjiang Uygur Autonomous Region Meteorological Service Center, Urumqi, Xinjiang, 830002, China

## Abstract

Against the backdrop of digital and intelligent convergence, smart meteorology has emerged as a pivotal direction for the transformation of public meteorological services. The integration of artificial intelligence, big data, cloud computing, and the Internet of Things (IoT) is driving meteorological services from information dissemination to intelligent provision, achieving refined predictions, real-time processing, and personalized services. This paper examines the application mechanisms and outcomes of smart meteorology systems in disaster warning, agricultural meteorology, and urban management. The study reveals that smart meteorology significantly enhances service accuracy and social response efficiency through a “data-driven—model optimization—service iteration” model. To achieve high-quality development in meteorological services, it is essential to strengthen data sharing, improve platform infrastructure, and optimize public interaction mechanisms.

## Keywords

smart meteorology; public meteorological service; precision supply; big data; artificial intelligence

## 智慧气象技术赋能公共气象服务精准化供给的实证研究

肖静

新疆维吾尔自治区气象服务中心, 中国·新疆 乌鲁木齐 830002

## 摘要

在数字化与智能化融合的背景下, 智慧气象成为公共气象服务转型的关键方向。人工智能、大数据、云计算和物联网的应用推动气象服务由信息发布向智能供给升级, 实现预测精细化、处理实时化与服务个性化。本文基于智慧气象体系视角, 探讨其在灾害预警、农业气象和城市管理中的应用机制与效果。研究表明, 智慧气象通过“数据驱动—模型优化—服务迭代”模式显著提升了服务精准度与社会响应效率。为实现气象服务高质量发展, 需强化数据共享、完善平台建设并优化公众交互机制。

## 关键词

智慧气象; 公共气象服务; 精准化供给; 大数据; 人工智能

## 1 引言

气象服务是公共治理体系的重要组成部分, 其科学性与及时性直接影响社会经济安全与公众福祉。传统气象服务模式以单向发布为主, 缺乏精细化与互动性, 难以满足不同群体的差异化需求。随着信息技术的跨界融合, 智慧气象技术应运而生, 推动气象服务从“以部门为中心”向“以用户为中心”转型。智慧气象不仅是技术革新的产物, 更是气象服务体系数字化、智能化升级的核心路径。当前, 智慧气象已在灾害防御、农业生产、交通管理和城市运行中发挥显著效能。通过气象大数据分析与AI预测模型, 气象部门能够实现更高分辨率的预报、更精准的风险研判与更个性化的服务推送。然而, 实践中仍存在数据资源整合不足、技术应用

标准不统一、公众参与度不高等问题, 制约了智慧气象服务的可持续发展。本文从智慧气象技术赋能公共气象服务的角度出发, 构建实证研究框架, 探讨其精准化供给机制、应用成效及优化路径, 为我国智慧气象体系建设提供理论依据与实践参考。

## 2 智慧气象技术体系的构建与发展逻辑

### 2.1 智慧气象的内涵与特征

智慧气象是气象信息化的高级阶段, 其核心在于以数据智能为驱动力, 实现“感知—分析—预测—服务”的全链条闭环。与传统气象相比, 智慧气象具备数据多源融合、预测动态更新、服务智能决策和反馈自学习等特征。其本质是通过多维信息的智能挖掘与动态建模, 实现气象服务的自适应与个性化供给。智慧气象强调“以人为本”的服务理念, 运用AI算法与云平台将复杂气象数据转化为可操作的信息产品, 为公众与政府部门提供科学决策支持。

【作者简介】肖静(1977-), 女, 本科, 工程师, 从事公共气象服务研究。

## 2.2 技术融合驱动下的系统演进

智慧气象体系的形成源于多学科技术的深度融合。物联网技术实现了气象观测的实时化与网格化；大数据分析推动了预测模型从经验型向数据驱动型转变；人工智能算法（如神经网络与深度学习）使气象预报的时空分辨率大幅提升；云计算与边缘计算为气象数据的存储、分发与处理提供了弹性支撑。这些技术的协同作用构成了智慧气象系统的基础框架，使气象服务具备动态学习与持续优化的能力。

### 2.3 智慧气象体系的核心架构

智慧气象体系可分为数据采集层、智能分析层与服务应用层。数据采集层整合卫星遥感、雷达探测、地面观测与公众众包信息，形成高密度、多维度的数据源。智能分析层利用机器学习与模式识别技术进行数据清洗、模式重构与结果优化，实现高精度气象预测。服务应用层面向公众、政府与行业用户，通过移动端、社交媒体与专用接口提供定制化气象服务，形成多层次、互动式的服务生态，实现气象服务的“千人千面”。

## 3 智慧气象赋能精准化气象服务的机制分析

### 3.1 数据智能化支撑精准供给

数据智能化是智慧气象体系运行的根基。通过整合地面观测、卫星遥感、雷达监测与社会感知终端数据，可构建覆盖多维时空的气象信息库。人工智能算法在此基础上可挖掘潜在的气象变化规律，实现更高精度的预测分析。例如，在短时强对流天气预警中，卷积神经网络（CNN）通过识别雷达回波特征与卫星云图动态变化，能够提前捕捉暴雨或冰雹形成信号，有效提升预警准确率与时效性。数据驱动的分析模式打破了传统依赖单一观测点的局限，使气象信息获取实现了从静态监测到动态迭代的转变。随着气象数据采集的实时化和自动化水平不断提高，智慧气象系统能够实现多源数据的自学习与自优化，为公共气象服务提供持续、精准的智能供给。

### 3.2 模型智能化提升服务精度

智慧气象的核心创新在于模型的智能化升级。传统数值天气预报依赖物理方程组推算，受计算资源与初始条件约束，预测周期长且实时性不足。人工智能模型通过机器学习与深度学习算法，对历史气象数据进行模式识别与非线性建模，可在不完全依赖物理方程的前提下实现快速预测。例如，基于LSTM（长短期记忆网络）的气象预测模型在处理气温、湿度、风速等时间序列数据时，能有效捕捉复杂的时空关联关系，在暴雨与台风路径预测中展现出优异的精度。通过多模型融合与参数动态调整，智慧气象系统可在分钟级到季节级的不同时间尺度上实现高分辨率预报，为政府决策与社会应用提供精准数据支持。

### 3.2 服务智能化推动需求匹配

智慧气象的服务智能化体现了从“气象信息供给”向“用

户需求驱动”的根本转变。通过用户画像构建与行为数据分析，系统可识别不同群体的气象信息需求，实现分层化、场景化推送。例如，农业用户可接收基于作物生长模型的精准气象建议，交通部门可实时获取道路积水预警指数，公众可收到个性化的出行气象提示。智慧气象服务平台借助云计算与移动终端，实现信息推送的实时更新与双向反馈，用户的交互数据反过来又可用于优化服务模型。此种智能匹配机制使气象服务从“被动传播”走向“主动响应”，实现由宏观预测到微观应用的精准衔接，进一步提升气象服务的社会效益与用户体验。

## 4 智慧气象技术的实证应用与成效分析

### 4.1 灾害预警体系的智能化升级

在极端气候事件频发的背景下，智慧气象技术成为提升防灾减灾能力的重要手段。基于人工智能与多源数据融合的智慧气象系统，能够实现气象灾害的早期识别与精准预警。以长江中下游流域为例，系统综合利用卫星遥感、雷达监测与地面观测数据，通过深度学习算法构建降雨时空分布模型，实现对暴雨、台风、洪涝等灾害的动态追踪。该模型可提前6小时预测降水中心移动路径，预警精度较传统方法提升约20%。预警结果通过智能推送系统实时传递至应急管理等部门与公众终端，实现信息的快速响应与高效传达。实证数据显示，智慧气象系统的应用使预警误差率降低20%以上，公众避险反应时间缩短30%，显著提升了区域防灾减灾效能，标志着气象服务从“事后响应”向“事前防范”的智能转型。

### 4.2 农业气象服务的精准化供给

智慧气象技术的引入为农业生产的精细化与可持续发展提供了重要支撑。通过融合气象数据、遥感信息与农情监测数据，系统可为不同作物与地区提供定制化气象服务。例如，在华中地区水稻种植中，智慧气象平台通过实时监测气温、湿度、光照与降雨量等参数，利用作物生长模型动态评估农田生态环境，生成智能化种植与管理建议。农户可依据系统反馈调整灌溉频率、施肥时间与病虫害防控计划，从而降低气候异常带来的农业风险。研究表明，采用智慧气象指导的农田管理，使农作物平均产量提升7%—10%，水资源利用效率提高15%以上。此外，气象数据的共享与分析还能为农业保险与风险评估提供量化依据，推动气象服务在农业领域从“经验支持”向“数据决策”的转型，实现农业生产的高效、绿色与智能化发展。

### 4.3 城市运行管理中的智能应用

智慧气象技术在城市治理与公共服务领域的深度应用，正成为提升城市韧性与管理效率的重要路径。基于气象大数据、物联网与云计算的城市气象平台，可实现天气监测与城市运行系统的实时联动。在交通管理方面，智慧气象系统通过对降雨、能见度与路面温度的监测，提供动态交通调度建

议,减少恶劣天气引发的交通事故。在能源调度方面,系统结合气象预测与电力负荷模型,实现新能源发电的精细化调控,优化能源分配与储能管理。例如,北京市智慧气象平台融合PM2.5监测数据与气象扩散条件预测,提前发布空气质量等级预警,协助交通与环保部门实施分级治理措施,减少污染事件的社会影响。智慧气象的嵌入式应用不仅增强了政府的决策能力与城市风险管理水平,也推动了气象服务从信息提供向社会治理支撑的价值升级,实现了城市运行的科学化与精细化管理。

## 5 智慧气象服务精准化供给的优化路径

### 5.1 强化数据治理与标准化体系建设

数据治理是智慧气象体系建设的基础环节,也是实现气象服务精准化供给的关键保障。当前气象数据来源多样,包括卫星遥感、地面观测、雷达监测与公众众包信息,若缺乏统一标准,极易导致数据碎片化与重复建设。应构建统一的国家级气象数据标准体系,对数据的元数据描述、分类编码、接口格式与安全权限进行系统规范,实现跨部门、跨区域、跨行业的数据共享与互联互通。在此基础上,应引入数据质量控制机制,通过自动化检测、模型比对与人工校核确保数据的真实性与完整性。同时,建立全生命周期的数据安全审计机制,明确数据访问、传输与存储的权限分级,防范数据泄露与滥用风险。完善的数据治理体系不仅能提高气象数据的可信度与利用率,还能为人工智能算法训练与智能模型构建提供高质量的数据支撑,从而推动智慧气象服务的科学化与制度化发展。

### 5.2 完善智慧服务平台与应用生态

智慧气象服务平台是实现技术赋能与服务集成的核心载体,其建设水平直接决定公共气象服务的智能化程度。应构建集数据采集、处理、分析与服务发布于一体的综合平台,形成“数据中心—算法引擎—服务终端”三层架构。基于云计算和人工智能中台,可实现气象模型的高性能计算、实时更新与多任务并行处理。平台应支持多场景扩展与行业定制,如农业生产调度、城市交通管控、能源供需预测与灾害应急响应等,形成多元应用生态。同时,应鼓励社会资本与科研机构参与气象服务创新,推动“政产学研用”协同发展,通过开放接口与数据共享机制,构建共建、共治、共享的气象服务体系。通过持续优化算法性能与服务模块,智慧平台可实现“气象数据资源—应用需求场景—社会公共服务”的高效联动,进一步提升公共气象服务的精准性与可持续性。

### 5.3 优化公众参与与交互反馈机制

公众是智慧气象服务的最终受益者,也是气象服务精准化的重要参与者。建立高效的公众交互与反馈机制,能实现信息传播的双向流动与服务优化的动态循环。应依托移动客户端、社交媒体、语音助手等渠道,提供个性化气象服务与实时互动功能,使公众能即时反馈天气状况与服务体验,从而形成气象数据的社会共建机制。通过采集和分析用户行为数据,可持续优化服务算法与信息呈现方式,实现“以用户为中心”的智慧服务迭代。同时,应在社会层面加强气象科学普及与素养教育,提高公众对气象风险的认知与防范能力。学校教育、社区活动及媒体传播应成为气象知识传播的重要阵地。通过公众参与、政府引导与科技支撑的协同作用,构建“技术赋能—公众共创—反馈优化”的互动体系,既能增强气象服务的社会黏性,也能促进智慧气象体系的自我完善与长效运行。

## 6 结语

智慧气象技术的快速发展,为公共气象服务的精准化供给提供了新的路径与实践范式。其通过数据融合、模型优化与智能匹配,实现了气象服务的智能化、个性化与社会化转型,极大提升了气象服务的公共价值与社会效益。实证研究表明,智慧气象不仅提高了灾害预警与风险防控能力,还推动了农业生产、城市管理与民生服务的数字化升级。未来,应持续完善数据治理体系,加强技术创新与跨部门协作,构建统一、开放、智能的气象服务生态系统。通过技术赋能与制度创新的协同推进,智慧气象将在公共服务体系中发挥更加关键的支撑作用,助力气象事业高质量发展与社会治理现代化进程。

### 参考文献

- [1] 刘娜,基于智能网格预报产品的白山市智慧气象平台开发.吉林省,吉林省白山市气象局,2022-07-20.
- [2] 李玉华,褚希,车军辉,等.“锄禾问天”智慧气象为农服务系统的设计与开发[J].中国农学通报,2021,37(10):107-112.
- [3] 王兴,朱彬,卞浩瑄,等.“互联网+”背景下我国智慧气象服务模式优化研究[J].中国管理信息化,2019,22(23):135-138.
- [4] 黄川容,孙朝锋,吴立,等.基于互联网+的设施农业智慧气象服务应用与探索[C]//中国气象学会.第35届中国气象学会年会 S14 大数据、互联网、融媒体时代气象服务的创新与变革——第八届气象服务发展论坛.福建省气象服务中心,2018:31-37.
- [5] 姜慧慧.通辽市公众气象服务供给问题研究[D].南京信息工程大学,2022.

# Causes of Wetland ecosystem degradation and restoration and reconstruction techniques

Chao Li

Pingyin County Bureau of Industry, Information Technology and Science and Technology, Jinan, Shandong, 250400, China

## Abstract

Wetlands, as one of the three major ecosystems on Earth, possess the dual characteristics of both terrestrial and aquatic ecosystems and are hailed as the “kidneys of the Earth”, “gene banks of species” and “climate regulators”. It plays an irreplaceable ecological role in conserving water sources, purifying water quality, regulating flood water, maintaining biodiversity and regulating regional climate. However, with the global population growth and the acceleration of industrialization, wetland ecosystems are facing an unprecedented degradation crisis. Problems such as sharp reduction in area, functional decline, and decreased biodiversity are becoming increasingly prominent, posing a serious threat to regional ecological security and sustainable development. Therefore, systematically analyzing the driving factors of wetland ecosystem degradation and exploring scientific and effective restoration and reconstruction techniques have become one of the core topics in current ecological research, which holds significant theoretical value and practical significance for maintaining ecological balance and ensuring ecological service functions.

## Keywords

Wetland ecosystem Causes of degradation; Recovery and reconstruction technology

## 湿地生态系统退化原因及恢复重建技术

李超

平阴县工业和信息化和科技局, 中国·山东 济南 250400

## 摘要

湿地作为地球上三大生态系统之一,兼具陆地生态系统与水生生态系统的双重特性,被誉为“地球之肾”“物种基因库”和“气候调节器”。它在涵养水源、净化水质、调蓄洪水、维护生物多样性、调节区域气候等方面发挥着不可替代的生态功能。然而,随着全球人口增长与工业化进程加速,湿地生态系统正面临着前所未有的退化危机,面积锐减、功能衰退、生物多样性减少等问题日益突出,对区域生态安全和可持续发展构成严重威胁。因此,系统剖析湿地生态系统退化的驱动因素,探索科学有效的恢复重建技术,已成为当前生态学研究的核心议题之一,对于维系生态平衡、保障生态服务功能具有重要的理论价值与实践意义。

## 关键词

湿地生态系统;退化原因;恢复重建技术

## 1 引言

湿地被誉为“地球之肾”,在涵养水源、蓄洪抗旱、固碳增汇及维系全球生物多样性中发挥着不可替代的作用,与人类生存发展及全球生态平衡密切相关。联合国可持续发展目标中,75个具体目标与湿地保护直接关联,凸显其全球战略价值。本文聚焦湿地退化核心成因与恢复重建关键技术,结合近年来自然修复、智能化调控等前沿实践,为推动湿地生态系统功能恢复、实现生态保护与经济社会协调发展提供理论依据与实践范式。

【作者简介】李超(1984-),男,中国山东平阴人,硕士,工程师,从事水处理研究。

## 2 湿地生态系统退化的主要原因

### 2.1 自然驱动因素

#### 2.1.1 气候变暖影响

全球气候变暖是导致湿地生态系统退化的重要自然因素之一。气温升高导致湿地蒸发量显著增加,尤其是内陆干旱、半干旱地区的湿地,水分收支失衡问题更为突出。例如,我国西北干旱区的博斯腾湖,近50年来因区域气温上升1.2℃,年蒸发量增加约150毫米,湖泊水位持续下降,周边沼泽湿地面积减少近30%。同时,气候变暖改变了降水的时空分布格局,部分地区出现降水集中、暴雨频发的现象,加剧了湿地土壤侵蚀和水土流失;而另一些地区则面临持续干旱,导致湿地干涸、植被死亡。

#### 2.1.2 水文情势变化

水文情势是维持湿地生态系统结构与功能的核心要素,

包括水量、水位、水流速度和水文周期等。自然状态下,湿地水文情势会因降水、融雪、地形演变等因素发生周期性变化,但这种变化通常在湿地生态系统的承载范围内。然而,长期的自然水文变异,如持续干旱、河流改道等,会导致湿地水量减少、水位下降,进而引发湿地面积萎缩、土壤沙化、水质恶化等一系列问题。

### 2.1.3 地质地貌演变

地质地貌的长期演变会改变湿地的空间格局和水文条件,导致湿地生态系统退化。例如,河流携带的泥沙在入海口或湖泊沉积,会逐渐抬高湿地地表高程,使湿地由水生环境向陆生环境演替,即“湿地陆地化”过程。我国洞庭湖湿地因长江和湘、资、沅、澧四水携带的大量泥沙沉积,年均淤积量达1.28亿吨,湿地地表高程年均上升3-5毫米,部分浅水区逐渐演变为沼泽,进而向草原、农田转化。

## 2.2 人为驱动因素

### 2.2.1 围垦开发与土地利用变化

人口增长带来的粮食需求和经济发展压力,使得围垦湿地、改变土地利用类型成为导致湿地退化的最直接、最主要的人为因素。在我国,20世纪50年代至90年代,为扩大耕地面积,大规模的围湖造田、围海造地工程导致湿地面积锐减。据统计,我国湖泊湿地面积从20世纪50年代的83500平方公里减少到20世纪末的70988平方公里,减少了15%以上;滨海湿地面积在过去50年间减少了50%以上,其中渤海湾湿地因围垦开发,面积减少近70%。围垦开发直接破坏了湿地的水文连通性,改变了湿地的水文周期和生态环境,导致湿地植被死亡、生物栖息地丧失。

### 2.2.2 环境污染加剧

工业废水、农业面源污染和生活污水的大量排放,是导致湿地水质恶化、生态功能衰退的重要原因。

工业废水中含有大量重金属、有机物、酸碱物质等污染物,直接排入湿地后,会破坏湿地土壤和水体的化学平衡,抑制微生物活性,影响水生植物的生长,甚至导致动植物死亡。例如,我国太湖流域因周边工业发达,大量含氮、磷的工业废水和生活污水排入太湖,导致太湖湿地富营养化严重,蓝藻频繁爆发,不仅破坏了湿地的水质净化功能,还导致鱼类等水生生物大量死亡。

农业面源污染则主要来自化肥、农药的流失和畜禽养殖废弃物的排放,这些污染物通过地表径流进入湿地,导致湿地水体氮、磷含量超标,引发富营养化,改变湿地的植被结构,例如导致浮游植物大量繁殖,抑制沉水植物生长。生活污水中的有机物和病原体则会降低湿地水质,影响湿地的生态服务功能。

### 2.2.3 过度开发利用

对湿地资源的过度开发利用,包括过度捕捞、过度放牧、滥采湿地植物等,直接破坏了湿地的生物群落结构,导致生物多样性减少,生态系统功能衰退。在渔业资源开发方面,过度捕捞导致湿地鱼类资源枯竭,破坏了湿地的食物链

结构,影响了以鱼类为食的鸟类、兽类等生物的生存。在畜牧业方面,湿地周边的过度放牧导致湿地植被被破坏,土壤裸露,引发水土流失和沙漠化<sup>[1]</sup>。

## 3 湿地生态系统恢复重建技术

### 3.1 物理修复技术

#### 3.1.1 水文连通性修复技术

水文连通性是维持湿地生态系统健康的核心,因此恢复湿地的水文连通性是湿地恢复重建的首要任务。该技术主要通过疏通河道、拆除阻隔工程、修建生态水渠等方式,恢复湿地与河流、湖泊等水体的自然连通,保障湿地的水量补给和水文周期。例如,我国太湖流域通过拆除部分水闸、疏通入湖河道,恢复了太湖与周边河网的水文连通,增加了太湖湿地的水量补给,改善了湿地的水质和生态环境。对于因水库、堤坝等水利工程导致的湿地水量不足问题,可通过生态调度的方式,合理调控下泄水量,保障湿地的生态需求。

#### 3.1.2 土壤物理改良技术

湿地土壤是湿地生态系统的重要组成部分,其理化性质直接影响湿地植被的生长和微生物的活性。针对湿地土壤沙化、盐渍化、污染等问题,可采用物理改良技术改善土壤结构和理化性质。对于沙化湿地,可通过铺设秸秆、泥炭等覆盖物,增加土壤有机质含量,减少水土流失,提高土壤保水保肥能力。例如,我国毛乌素沙地周边的湿地,通过铺设麦秸秆和泥炭,结合种植沙棘、沙柳等耐旱植被,有效改善了土壤沙化状况,湿地植被覆盖率显著提高。

对于盐渍化湿地,可采用挖沟排盐、淋洗脱盐等技术,降低土壤盐分含量。例如,我国黄河三角洲滨海湿地,通过修建排盐沟和灌溉系统,利用淡水淋洗土壤,结合种植耐盐植被,有效缓解了土壤盐渍化问题。

对于受污染湿地,可采用土壤翻耕、客土置换等技术,去除或稀释土壤中的污染物,改善土壤环境质量。

#### 3.1.3 地形重塑技术

地形是影响湿地水文条件和植被分布的重要因素,不合理的地形会导致湿地排水不畅、水量分布不均,加剧湿地退化。地形重塑技术主要通过挖湖堆丘、平整土地、修建浅滩等方式,恢复湿地的自然地形地貌,优化湿地的水文条件和生境类型。例如,我国杭州西溪国家湿地公园在恢复重建过程中,通过挖湖堆丘、整理河港水道,重塑了湿地的自然地形,形成了湖泊、河流、沼泽等多种生境类型,为动植物提供了多样化的栖息环境。

对于滨海湿地,可通过修建防波堤、人工沙滩等设施,抵御海浪侵蚀,恢复滨海湿地的地形地貌。例如,我国厦门滨海湿地通过修建人工防波堤和沙滩,结合种植红树林,有效恢复了滨海湿地的生态功能,提高了湿地的抗干扰能力<sup>[2]</sup>。

### 3.2 化学修复技术

#### 3.2.1 污染物净化技术

化学修复技术主要用于治理湿地水体和土壤中的污染

物,通过添加化学药剂,与污染物发生化学反应,实现污染物的去除或转化。针对湿地水体中的重金属污染,可采用投放螯合剂(如EDTA)、吸附剂(如活性炭、沸石)等化学药剂,通过螯合、吸附作用去除水体中的重金属离子。例如,我国湘江流域湿地因重金属污染严重,通过投放沸石和活性炭,结合湿地植物的吸收作用,水体中铅、镉等重金属含量显著降低。

针对湿地水体富营养化问题,可采用投放混凝剂(如明矾、聚合氯化铝)等化学药剂,促进水体中氮、磷等营养物质的沉淀,减少浮游植物的生长。例如,我国滇池湿地在治理过程中,通过投放聚合氯化铝等混凝剂,结合水生植物净化,有效降低了水体中的氮、磷含量,缓解了富营养化问题。

### 3.2.2 土壤化学改良技术

针对湿地土壤的酸化、碱化、养分失衡等问题,可采用添加化学改良剂的方式改善土壤理化性质。对于酸性湿地土壤,可添加石灰、白云石等碱性改良剂,提高土壤pH值,改善土壤养分有效性。例如,我国南方酸性红壤地区的湿地,通过添加石灰,土壤pH值从4.5提高到6.0左右,植被生长状况显著改善。

对于碱性湿地土壤,可添加硫磺、石膏等酸性改良剂,降低土壤pH值,缓解土壤盐渍化。例如,我国西北干旱区的盐碱化湿地,通过添加石膏和硫磺,土壤盐分含量降低了30%以上,植被覆盖率明显提高。此外,还可通过添加有机肥、复合肥等化学肥料,补充土壤养分,改善土壤肥力,促进湿地植被的生长和恢复。

### 3.3.1 植被重建技术

植被是湿地生态系统的重要组成部分,具有涵养水源、净化水质、提供栖息地等功能,因此植被重建是湿地恢复重建的核心内容。植被重建技术应遵循“适地适树、乡土优先”的原则,选择适应性强、生态功能好的乡土植物,避免引入外来物种。根据湿地的类型和退化程度,可采用直播、移栽、扦插等多种种植方式。例如,在沼泽湿地的恢复中,可选择芦苇、香蒲等挺水植物,采用分株移栽的方式进行种植;在湖泊湿地的恢复中,可选择苦草、黑藻等沉水植物,采用种子直播或幼苗移栽的方式进行种植。

### 3.3.2 微生物修复技术

微生物在湿地生态系统的物质循环和能量流动中发挥着重要作用,能够通过降解有机物、转化污染物等方式净化湿地环境。微生物修复技术主要通过接种功能微生物、改善

微生物生存环境等方式,提高湿地微生物的活性和数量,增强湿地的净化功能。例如,针对湿地水体中的有机物污染,可接种芽孢杆菌、假单胞菌等降解性微生物,加速有机物的降解;针对湿地土壤中的重金属污染,可接种具有吸附、转化作用的微生物(如某些真菌、细菌),降低重金属的毒性。

此外,还可通过添加微生物菌肥、改善土壤通气性等方式,为微生物提供良好的生存环境,促进微生物的生长繁殖。例如,我国太湖流域湿地通过接种复合微生物菌剂,结合种植水生植物,水体中COD(化学需氧量)的去除率提高了20%-30%,水质得到明显改善。

### 3.3.3 动物多样性恢复技术

动物是湿地生态系统的重要组成部分,其种类和数量是衡量湿地生态系统健康状况的重要指标。动物多样性恢复技术主要通过改善栖息地环境、人工增殖放流、建立迁徙通道等方式,为动物提供良好的生存和繁殖条件,促进动物种群的恢复和增长。例如,针对湿地鱼类资源减少的问题,可通过人工增殖放流的方式,投放本土鱼类的鱼苗,补充鱼类资源。我国长江中下游湿地通过开展“四大家鱼”增殖放流活动,鱼类资源量显著增加,湿地的食物链结构得到改善。针对候鸟栖息地破坏的问题,可通过恢复湿地植被、修建觅食台、禁止捕猎等方式,为候鸟提供充足的食物和安全的栖息环境。例如,我国洞庭湖湿地通过恢复芦苇沼泽、投放鱼类等措施,每年吸引的越冬候鸟数量增加了30%以上,包括白鹤、东方白鹳等珍稀物种的种群数量显著恢复<sup>[1]</sup>。

## 4 结论

湿地生态系统的退化是自然因素与人为因素共同作用的结果,其中人为因素是主导力量,围垦开发、环境污染、过度利用、水利工程建设等人类活动直接破坏了湿地的结构与功能,加速了湿地退化进程。湿地生态系统的恢复重建是一项复杂的系统工程,需要综合运用物理、化学、生物和生态工程等多种技术手段,针对不同类型和退化程度的湿地,制定科学合理的恢复方案,同时加强生态监测与管理,保障恢复效果的稳定性和持续性。

## 参考文献

- [1] 陈可心,吴富勤,王勇,等.生态系统结构和功能多样性及其在退化湿地保护与修复中的应用[J].安徽林业科技,2025,51(04):3-8.
- [2] 李良安.若尔盖湿地退化对植物多样性与碳汇功能的影响[D].甘肃农业大学,2024.
- [3] 宿少锋,林之盼,王小燕,等.海南红树林湿地生态系统退化程度评价指标体系构建研究[J].林业资源管理,2022,(06):54-60.

# Trend Analysis and Control Strategy of Urban Atmospheric Particulate Monitoring Series

Yurong Zhou Tianxin Jin Shanshan Hu Jiani Gong

Zhejiang Qiusi Environmental Monitoring Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

## Abstract

Urban particulate matter (PM) is one of the major contributors to air pollution and has significant negative effects on human health. By monitoring the concentration, sources, and distribution of particulate matter, valuable data can be provided to support the improvement and management of urban air quality. This paper focuses on the trend analysis and control strategies of urban atmospheric particulate matter monitoring sequences, emphasizing the definition and classification of urban particulate matter, the development of monitoring methods, the trend changes of monitoring data, and the impact of pollution sources. The implementation effect evaluation of control strategies for urban particulate matter is discussed, and improved management pathways are proposed to provide scientific support for enhancing air quality and governance efficiency.

## Keywords

Urban particulate matter; Monitoring data; Trend analysis; Control strategies; Pollution source control

## 城市大气颗粒物监测序列的趋势分析与控制策略

周雨蓉 金甜欣 胡姗姗 龚佳妮

浙江求实环境监测有限公司, 中国·浙江 杭州 310000

## 摘要

城市大气颗粒物 (PM) 是导致空气污染和对人类健康产生负面影响的重要因素之一。通过监测大气颗粒物的浓度变化、来源与分布, 能够为城市空气质量的改善和治理提供数据支持。本文围绕城市大气颗粒物监测序列的趋势分析与控制策略展开研究, 重点分析了城市大气颗粒物的定义与分类、监测方法的发展、监测数据的趋势变化、污染源的影响等内容, 讨论了城市大气颗粒物控制策略的实施效果评估, 并提出了改进的管理路径, 为提高空气质量和治理效率提供科学依据。

## 关键词

城市大气颗粒物; 监测数据; 趋势分析; 控制策略; 污染源控制

## 1 引言

随着城市化进程的加速, 城市大气颗粒物 (PM) 污染日益严重, 对空气质量和人类健康构成了巨大的威胁。颗粒物的来源复杂, 包括工业排放、交通污染和建筑施工等, 且其浓度受气象条件、季节变化以及城市发展水平的影响。大气颗粒物监测已成为城市环境管理的重要组成部分, 通过监测可以获得颗粒物浓度变化的时空分布数据, 为制定有效的污染治理措施提供支持。本文通过分析城市大气颗粒物的监测序列数据, 探讨其趋势变化, 并结合污染源控制和技术创新, 提出了切实可行的控制策略。此外, 文章还对控制策略的实施效果进行了评估, 并对未来改进路径提出了建议, 为改善城市空气质量提供理论依据。

## 2 城市大气颗粒物监测序列概述

### 2.1 大气颗粒物的定义与分类

大气颗粒物 (PM) 指的是悬浮在空气中的固体或液体颗粒, 广泛存在于自然和人工环境中。其成分复杂, 主要包括尘土、煤烟、汽车尾气、工业废气等。根据颗粒的直径, 通常将其分为 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>0.1</sub> 等几类。PM<sub>10</sub> 指的是直径小于 10 微米的颗粒, PM<sub>2.5</sub> 则是直径小于 2.5 微米的颗粒, 这些细小颗粒能够深入肺部, 甚至进入血液循环, 造成呼吸系统及心血管健康问题。大气颗粒物还根据其来源可分为一次性颗粒物和二次颗粒物, 一次性颗粒物直接来源于污染源, 如工业排放, 二次颗粒物则是通过大气中的化学反应形成的<sup>[1]</sup>。

### 2.2 城市大气颗粒物监测的意义与目的

城市大气颗粒物监测旨在通过持续的空气质量检测, 获取污染物浓度变化的数据, 为城市管理提供科学依据。大气颗粒物的浓度变化直接影响空气质量, 进而影响居民的健

【作者简介】周雨蓉 (1999-), 女, 中国浙江诸暨人, 本科, 从事生态环境监测与分析研究。

康。监测数据不仅可以反映城市空气污染的时空变化特征，还能揭示污染源的主要成分和来源途径。通过监测结果，相关部门可以及时采取防控措施，如调整交通管制、优化工业布局、加强环保政策等，从而减少污染物排放，改善空气质量。监测结果还可为公众健康风险评估提供依据，帮助政府制定和完善环境保护政策，促进城市的可持续发展。

### 2.3 城市大气颗粒物监测方法与技术发展

城市大气颗粒物的监测技术经历了从传统的人工采样到现代自动化监测的转变。早期的颗粒物监测主要依靠沉降式采样法，采用玻璃纤维滤膜对空气中的颗粒物进行收集，经过过滤后测量颗粒物的质量。然而，随着技术的发展，现代大气监测更多依赖于自动化设备，如微量采样器、激光粒度分析仪和光散射法等。这些先进设备能够实时采集和分析空气中的颗粒物数据，提高监测的准确性和效率。同时，随着大数据和物联网技术的应用，城市大气颗粒物监测已逐步实现数据远程传输和智能化管理，监测数据的采集、传输和处理更加高效，能够为城市空气质量管理提供实时支持。

## 3 城市大气颗粒物监测数据的趋势分析

### 3.1 数据收集与分析方法

城市大气颗粒物的监测数据收集通常通过固定监测点与流动监测相结合的方式。固定监测点一般设置在城市的不同区域，确保覆盖各类典型的空气污染情况。流动监测则通过便携式监测设备，在不同时间和空间范围内进行监测，获取更广泛的空气质量数据。数据分析方法方面，常用的有时间序列分析、趋势分析、相关性分析等。通过统计分析，能够揭示颗粒物浓度变化的规律，并为预测未来空气质量提供依据。此外，数据分析还需结合气象数据进行综合分析，以消除气象因素对颗粒物浓度波动的干扰，从而提高分析结果的准确性。

### 3.2 历史趋势与季节性变化分析

通过对多年监测数据的积累与分析，可以揭示城市大气颗粒物浓度的历史趋势。一般来说，城市颗粒物浓度呈现出明显的季节性变化，冬季由于采暖、燃煤等活动的增加，颗粒物浓度通常较高，夏季则较为低谷。历史数据分析能够揭示不同季节颗粒物的来源及变化规律，为进一步采取针对性措施提供依据。通过趋势分析，可以发现污染物浓度随时间的变化趋势，如是否存在长期上升或下降的趋势，是否与某些社会经济活动或气象条件相关，从而为政策制定和污染控制提供数据支持。

### 3.3 各类污染源对颗粒物浓度变化的影响

城市大气颗粒物的浓度变化受到多种污染源的影响，主要包括交通排放、工业废气、建筑施工以及自然源如扬尘等。交通排放特别是在早晚高峰时段，对城市颗粒物浓度有较大的贡献。工业排放、建筑施工及道路扬尘等也在特定季节或特定区域对颗粒物浓度产生显著影响。通过对不同污染源的分析，能够明确污染物的主要来源，为制定更加精确的

治理策略提供依据。例如，若发现交通污染是主要来源，便可以通过提高公共交通的使用率或推广电动车等措施来减轻交通污染。

## 4 城市大气颗粒物的控制策略研究

### 4.1 污染源控制策略

控制城市大气颗粒物污染的核心在于源头控制，关键的污染源包括交通、工业、建筑施工和扬尘等。对于交通污染，主要的控制策略是提高车辆排放标准，推广电动汽车和混合动力车辆，以及加强公共交通建设，减少私人车辆的使用，从而有效减少颗粒物排放。此外，提升交通管理水平，例如优化交通信号、实施交通疏导等，也能在一定程度上减少交通高峰时段的排放。工业污染源的控制则依赖于对高污染企业的严格监管，推动清洁生产技术的应用，实施高效的废气处理设施，减少颗粒物的产生。对于建筑施工扬尘的控制，必须加强施工现场的环保管理，采取防尘网、防尘喷雾等措施，并在施工过程中加强环境监测。扬尘治理可以通过使用低扬尘的建筑材料和优化施工工艺来减少污染<sup>[1]</sup>。此外，通过规划和政策引导，避免污染源集中在特定区域，有助于实现整体减排效果。

### 4.2 环境政策与法规的作用

环境政策与法规的执行是大气颗粒物控制的法律保障。通过制定并严格执行大气污染防治法、大气污染物排放标准等法规，政府能够对各类污染源进行有效监管。政策层面，应当不断提升排放标准，特别是交通和工业领域的排放限制，推动企业提高环保投资和技术改造。政策引导应兼顾经济发展和环境保护，特别是推动绿色低碳产业发展，支持环保技术的研发和应用。同时，政府可通过经济手段促进污染控制，如排污收费、环境税收等，鼓励企业进行污染治理。对于违反排放标准的企业，政府应加大处罚力度，提高违法成本，以形成强有力的环境约束力。此外，环境政策的执行需要强化监管机制，包括加强环境监察和检查，建立更加透明的环境信息公开系统，鼓励社会公众参与监督，确保政策的有效落实和执行。

### 4.3 技术创新与治理方法的应用

在控制城市大气颗粒物的过程中，技术创新和先进治理方法的应用具有重要作用。首先，随着环境监测技术的发展，实时在线监测技术的应用使得颗粒物的检测更加精确和及时。通过部署空气质量监测网络，结合大数据和人工智能技术，能够精准分析颗粒物浓度变化趋势，并及时进行调控。此外，排放源的治理技术也是关键，采用高效的除尘设备，如静电除尘、布袋除尘器等，可以有效降低工业废气中的颗粒物排放。另一方面，交通领域的污染控制技术也在不断创新，如低排放车辆的普及、智能交通系统的优化等，这些都能有效减少交通污染源的颗粒物排放。建筑施工中的扬尘治理技术也不断发展，现代建筑工地广泛使用水雾降尘、除尘网等技术，有效控制施工期间的颗粒物排放。此外，创新型

治理技术如催化氧化技术、绿色建筑材料的应用也能在源头上减少颗粒物的生成。通过不断引入新技术,提升颗粒物治理的效率,才能实现大气污染的有效控制。

## 5 城市大气颗粒物控制策略的实施与评估

### 5.1 实施效果评估方法

对城市大气颗粒物控制策略的实施效果进行评估,能够为优化政策和治理措施提供依据。效果评估方法通常包括基于监测数据的对比分析法、回归分析法和模型预测法等。通过对颗粒物浓度数据进行对比分析,能够直接反映实施控制措施前后的变化趋势。回归分析法则通过建立颗粒物浓度与污染源、气象条件、政策执行等因素之间的数学模型,量化不同因素对污染浓度的贡献度,从而评估控制措施的具体影响。同时,评估过程中应综合考虑各类污染源的贡献,结合技术手段、政策措施和社会参与等多重因素,全面分析治理效果。数据驱动的评估方法也可以利用大数据分析,结合实时监测数据,评估短期和长期控制效果。此外,评估过程中还应定期跟踪大气质量变化,及时调整治理策略,确保效果的持续性和稳定性。

### 5.2 政策执行中的挑战与对策

政策执行中面临的一大挑战是监管力度不足,许多地方存在监管盲区,导致污染排放超标的现象屡见不鲜<sup>[3]</sup>。对于企业而言,由于环保成本较高,部分企业不愿意主动进行污染治理。为应对这些问题,政府应加强对企业的监督和检查,确保环保法规的执行。对不符合排放标准的企业,应严格按照法规处罚,并通过环保技术改造、财政补贴等手段,鼓励企业进行自我整改。同时,环保部门应加大执法力度,确保政策得到有效执行。另一个挑战是公众的环保意识不足,部分市民缺乏环保意识,未能积极参与到污染控制中。为此,政府和社会组织应加强环保宣传,普及环保知识,提高公众的环保意识。通过政府、企业与公众的共同努力,能够有效解决政策执行中的挑战,确保颗粒物控制策略的成功实施。

### 5.3 城市大气颗粒物监测与管理体的优化路径

优化城市大气颗粒物监测与管理体,是提升城市空

气质量的关键。首先,应增强监测系统的覆盖面,特别是在交通密集区和污染源集中的工业区,增加空气质量监测站点,确保数据的代表性与准确性。监测设备应不断更新,以适应新的环境变化和监测需求,同时利用遥感技术、无人机等先进手段,实现对大气污染的动态监测<sup>[4]</sup>。此外,大数据和云计算技术的应用能够提高数据处理的效率,通过对污染数据的实时分析,为决策者提供及时的政策依据。在管理体系方面,应建立完善的信息共享平台,加强政府部门间的协作,形成跨部门协同治理的合力。利用现代科技手段,推动政府、企业与公众的互动合作,实现全社会共治。通过构建智能化、系统化的监测与管理体系,可以不断优化颗粒物控制策略,提升治理效果。

## 6 结语

城市大气颗粒物的治理是提升空气质量、保障公众健康的重要任务。通过对颗粒物污染源的有效控制、政策法规的严格执行以及技术创新的应用,可以显著减少污染排放,改善空气质量。然而,治理工作面临的挑战仍然不容忽视,包括污染源控制的复杂性、政策执行中的困难以及公众参与的不足。因此,未来的治理策略需要更加综合和系统化,推动政府、企业与公众的协同合作。同时,随着监测技术和数据分析方法的不断发展,城市大气颗粒物的管理将更加精确和高效。通过持续改进控制策略、加强政策执行和促进技术创新,城市大气颗粒物污染问题有望得到更好的解决,为城市居民创造一个更加清洁、健康的生活环境。

## 参考文献

- [1] 陈均玉.西藏七城市大气颗粒物理化特性、来源解析及其生态风险评价研究[D].导师:布多.西藏大学,2025.
- [2] 贾世铭.典型寒冷地区大气颗粒物中EPFRs的污染特征及其变化趋势研究[D].导师:马万里.哈尔滨工业大学,2025.
- [3] 李健,邱阳,杨健,邵茂华,焦艳杰,李永亮.佳木斯市大气颗粒物(PM10、PM2.5)中重金属含量分布特征研究[J].青海环境,2024,34(04):203-210.
- [4] 李笑寒,穆森,张祥,席子茵,姜博,王森,邱玲,高天.北方城市绿地对大气颗粒物浓度的削减作用对比研究[J].生态学报,2024,44(10):4051-4063.

# Explore the quality management measures for water quality monitoring in water environmental protection work

Xiaobo Jiang

Shaoyang Environmental Research and Information Center, Shaoyang, Hunan, 422000, China

## Abstract

With the continuous deepening of water environmental pollution prevention and control work in our country, unprecedented high requirements have been put forward for the quality of water quality monitoring work. Water quality monitoring data is not only the fundamental basis for objectively evaluating the status of the water environment and identifying major pollution problems, but also the direct foundation for formulating governance plans, assessing governance effectiveness and implementing environmental law enforcement. However, in practical work, water quality monitoring involves numerous links and complex technologies. From the layout of monitoring points, sample collection, preservation and transportation, laboratory analysis to data processing and reporting, any oversight in any link may lead to distortion of the final data and subsequently cause decision-making deviations. Therefore, systematically exploring and strengthening the quality management measures for water quality monitoring, and establishing a scientific, strict and sustainable quality assurance system, has become a key task that urgently needs to be deepened and implemented in the current field of water environmental protection. Its significance is self-evident.

## Keywords

water environment protection; water quality monitoring; principles; quality management measures

## 探讨水环境保护工作中的水质监测质量管理措施

蒋小波

邵阳市环境研究与信息中心, 中国·湖南邵阳 422000

## 摘要

随着中国水污染防治工作的不断深入,对水质监测工作的质量提出了前所未有的高要求。水质监测数据不仅是客观评价水环境状况、识别主要污染问题的根本依据,更是制定治理规划、评估治理成效以及实施环境执法的直接基础。然而,在实际工作中,水质监测涉及环节众多、技术复杂,从点位布设、样品采集、保存运输、实验室分析到数据处理与报告,任何一个环节的疏漏都可能导致最终数据的失真,进而引发决策偏差。因此,系统性地探讨并强化水质监测的质量管理措施,构建一套科学、严密、可持续的质量保障体系,已经成为当前水环境保护领域一项亟待深化与落实的关键任务,其重要性不言而喻。

## 关键词

水环境保护工作;水质监测;原则;质量管理措施

## 1 引言

水质监测质量管理工作是水环境保护事业极为关键的技术基础。这项工作的核心是借助一系列系统化举措保证监测数据的准确与可靠,为环境管理决策提供可信的科学依据。为达成此目标,监测机构要着力构建一个全面覆盖且高效运行的质量管理体系架构,清晰界定各级人员的职责与工作标准。在此前提下,需对从现场采样至实验室分析的整个过程实施严格的技术控制,保证每个操作环节都规范且受控。

【作者简介】蒋小波(1983-),男,中国湖南隆回人,本科,工程师,从事水污染防治研究。

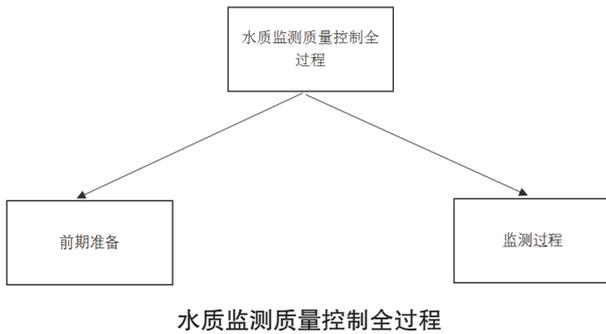
## 2 水质监测质量管理原则

### 2.1 科学规范原则

科学规范原则乃是整个质量管理体系得以稳固构建的基础支撑,其明确规定监测活动务必依托成熟完善的技术标准以及统一的操作规程来开展。监测人员开展样品采集与分析工作时,要严格依照国家所颁布的标准方法执行,任何偏离规范的行为都可能引入不确定因素<sup>[1]</sup>。实验室应当按照规定的周期对仪器设备实施校准与维护操作,以此保证仪器设备始终处于可发挥最佳效能的工作状态。借助插入标准样品、开展平行样测定等一系列内部质量控制手段,监测人员可对数据的精密度与准确度进行有效评估,保障最终生成的每一个数据都有可靠的科学价值。

## 2.2 全流程管理原则

全流程管理原则着重把质量控制理念融入监测工作的各个环节,构建起无缝对接的闭环管理。该流程起始于精心设计监测方案,包括选取有代表性的采样点位、规范样品保存与运输,接着是实验室内的精确分析,最后拓展至数据审核与报送。管理部门要清晰界定各阶段质量控制节点及责任主体,像采样环节着重防止样品沾污与变质,分析环节保证操作一致性,数据审核阶段设立多级校核机制来剔除异常值。这种覆盖“从现场到报告”整个过程的管理模式,较大提升了监测数据的溯源性,让不同时期、不同点位获取的数据能开展有价值的比较,为了解水环境变化长期趋势提供了有力支撑。



## 2.3 质量导向原则

质量导向原则促使管理机构在内部培育一种全员参与且持续改进的质量文化,把质量控制成效归入工作绩效的考核范围。借助常态化的技术培训以及质量监督,引导每一位技术人员牢固树立起对数据真实性的敬畏心理。唯有将质量意识内化于心并外化于行,水质监测工作方可超越单纯的数据产出,切实成为水环境管理、污染溯源与治理决策的可靠信标,在水环境保护的重大事业里发挥其不可替代的支撑作用。

## 3 强化水质监测质量管理的重要意义

水质在线自动监测系统是以物联网、自动化控制、信息处理技术为核心构建的综合性监测体系,在逐步完善数据传输以及预警管控等多种功能的基础上,实现对河流、湖泊、水库、湿地等各类水体开展全天候监测,给生态环保和防控污染等提供有效的参考依据,助力“绿水青山”生态目标推进。

### 3.1 环境管理决策的基石

水质在线自动监测系统有效解决传统监测中监测网络不完善、预警能力薄弱、溯源难度大及管理效率低等问题,充分体现数据资源的可参考价值。精确且可靠的监测数据是环境管理决策的科学基础,管理部门要凭借这些高质量数据去客观评定流域整体的水质状况,精确找出主要污染区域以及特征污染物。要是基础数据出现偏差或者不准确,那么依据这些数据制定的治理规划、排放标准以及投入的大量治理

资金都会面临成效不佳的风险,甚至可能致使决策方向产生根本性错误<sup>[2]</sup>。水质监测的质量直接决定了环境管理的效能,只有在真实、准确、全面的数据基础上,各项管理措施才能精准实施,水资源配置与污染治理工作才能沿着正确方向推进。

### 3.2 水污染防治的指向标

水污染防治的过程中应明确具体标准,结合当前的政策方针加以分析。当监测数据拥有高度准确性以及代表性的时候,环保部门就如同具备了敏锐的嗅觉一般,可及时追踪到隐蔽的排污源头,清楚地掌握污染物在时空方面的分布状况以及迁移转化规律。此系统让原本或许会被忽视的污染线索变得清晰可见,为跨区域的污染责任界定提供了可靠的依据,引导治理行动从粗放式管控转变为精准化治理。它可锁定现有的污染问题,还可借助趋势分析对潜在的环境风险发出预警,切实达成从事后被动处置朝着事前主动预防、事中有效控制的根本转变,大幅提升水污染防治的整体效率。

### 3.3 提升环境监管公信力

水质监测所获取数据的质量,与政府环境信息的透明度以及权威性有着直接的关联,当公众能够确信发布的水环境信息是经过严格质控、客观公正的,那么他们对于环境治理的信任感以及参与度就会相应地得到提高。这种信任构成了现代环境治理体系的社会基础,它让严格的环境执法更易于获得公众的理解,促使企业更加自觉地去履行环保责任,最终形成政府、企业、公众三方良性互动的共治格局<sup>[3]</sup>。从这一角度而言,保障监测数据的质量已然超出了单纯的技术领域,成为维系环境治理体系有效运行、推动生态文明建设的关键纽带。

## 4 水环境保护工作中的水质监测质量管理措施

### 4.1 完善质量管理体系架构

首先要构建全面且完备的质量管理体系,这就需要监测机构打造一个权责清晰、运行高效的组织架构。在这个架构里,从机构负责人一直到现场采样员以及实验室分析员,每个岗位都要明确界定其质量职责,形成纵向管理通畅、横向协作顺利的运行机制。机构应系统地编制包含全部监测活动和质量要素的体系文件,像纲领性的质量手册、规范操作的程序文件以及指导具体技术的作业指导书等,让每项工作环节都有明确的技术依据和行为准则。这套体系架构还得把人员资质管理、仪器设备检定维护、实验室环境控制、试剂与标准物质采购等支撑性要素都纳入规范化管理轨道,借助系统性的资源保障和技术支持,从源头上消除质量管理漏洞,为整个监测工作提供坚实可靠的制度基础。

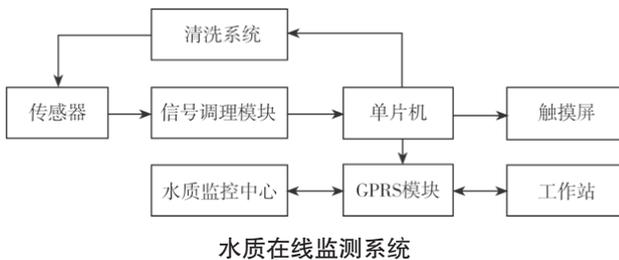
### 4.2 强化监测过程技术控制

在现场采样阶段的时候,工作人员务必要严格依照技术规范来操作,科学合理地设置监测断面以及点位,精确地把握采样的时间以及频次,规范地使用采样设备,并且采取

有效的样品固定、保存以及运输措施，以此来保证样品从源头直至实验室的特性稳定且完整。当进入到实验室分析阶段时，就需要借助恒温恒湿的环境控制、定期检定以及期间核查等方式来保证仪器性能，规范地使用有证标准物质，同时严格开展方法验证与确认等工作，保障分析条件始终处于受控状态。技术人员还应当常态化地开展空白试验、平行样测定、加标回收实验等内部质量控制程序，这些措施好似为数据质量安装了多重保险，可及时发现并纠正分析过程中的偏差，保证最终所获得的监测数据可真实反映水环境的客观状况。

#### 4.3 严格监测数据质量管控

质量管控需要构建一个严密的管理链条，这个链条要覆盖数据从产生、记录、审核、存储到应用的整个过程<sup>[4]</sup>。在数据源头方面，要推行监测原始记录的标准化以及电子化采集，以此强化数据溯源能力，避免关键信息出现遗漏或者被篡改的情况。对于监测结果而言，要严格执行多级审核制度，这个制度包括分析人员自校、质量监督员审核以及技术负责人最终确认，依靠综合运用统计质量控制技术来识别异常数据，对于存疑结果要追溯到原始记录以及仪器状态，坚决维护数据的原始性和真实性。应当着重建设集中统一的实验室信息管理系统，达成监测数据的自动化采集、结构化存储、智能化检索以及可视化分析，这样做可提升数据管理效率，还可以为挖掘数据价值、识别长期趋势以及潜在风险提供技术支撑。



#### 4.4 健全质量监督改进机制

有效的监督并非仅存于定期的内部审核以及管理评审活动中，而更应渗透至日常工作的方方面面，借助实施密码考核、实验室间比对、飞行检查、原始记录抽查等多样监督手段，主动辨别体系运行以及技术操作中的不符合项。针

对所发现的问题，要深入剖析根本原因，采取具针对性的纠正措施与预防措施，达成闭环管理。机构还需着重培育一种精益求精、持续改进的质量文化，凭借构建激励机制、开展案例教学、组织技术比武等途径，激发全体员工参与质量改进的主动性与创造性<sup>[5]</sup>。将实践中的经验教训系统转化为体系文件优化和 workflows 再造的具体行动，从而推动水质监测质量管理工作不断突破自我，实现从合规性到卓越性的持续提升，最终为水环境保护决策与治理提供经得住时间与实践检验的科学依据。

## 5 结语

综上所述，强化水质监测质量管理是一项涉及体系、技术、数据和机制的综合性系统工程。此项工作需从顶层设计着手，构建权责清晰、标准明确的质量管理体系框架，为所有监测活动提供坚实制度保障。在技术层面，要把精细化控制措施贯穿于采样与分析全过程，就像为数据质量设置多道防线，最大程度减少误差产生。对于监测所得数据，需借助严格审核流程与信息化管理手段，保证其从产生到应用的全周期都处于受控状态，维护数据原始性与真实性。质量管理并非一劳永逸，它依赖充满活力、能不断自我审视与优化的监督改进机制。只有将这些措施有机结合，才能真正筑牢水质监测工作的质量根基，让每组数据都有价值、能应用，为中国水环境保护与治理实践提供持续强大技术支撑。

## 参考文献

- [1] 平飞, 平建华, 冷伟, 梅雪梅, 陈纯, 朱泽军, 朱雪芹. 某电源产业园区浅层地下水特征分析及在线监测预警指标的确定[J]. 中国环境监测, 1-11.
- [2] 张陈德, 刘钟翼, 蒋崇珊, 李佳, 李桂菊. 基于Kalman滤波和神经网络的气田采出水含油量在线高精度测量方法[J]. 天津科技大学学报, 1-8.
- [3] 唐邑昕. 湿地水质多参数在线检测系统防伪机制研发及检测设备质量标准研究[J]. 中国品牌与防伪, 2025, (12): 213-215.
- [4] 吴泽钊. 基于水质达标的农村供水系统改造工艺优化设计及实施效果分析[J]. 数字农业与智能农机, 2025, (09): 69-72.
- [5] 高静, 金乃夫, 张大奕. 场地地下水污染数字化精准监测与风险智慧评估管控技术应用[J]. 中国环保产业, 2025, (08): 34-36.

# Analysis of monitoring technology of heavy metal pollution in farmland soil

Xudong Zheng

Hebei PONY Testing Technology Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

## Abstract

With the advancement of modern society, accelerated urbanization, and industrialization, issues such as industrial waste emissions, excessive use of pesticides and fertilizers, and domestic waste pollution have led to increasingly severe heavy metal contamination in farmland soil, severely hindering crop growth. Therefore, relevant authorities should enhance soil heavy metal monitoring, adopt appropriate monitoring technologies, and develop feasible remediation plans to ensure smooth agricultural production. This article analyzes key technical aspects of farmland soil heavy metal pollution control, proposes targeted soil remediation solutions, optimizes soil restoration techniques, thereby improving soil quality, ensuring food security, and promoting the sustainable development of modern agriculture.

## Keywords

farmland soil; heavy metal pollution; monitoring technology

## 浅析农田土壤重金属污染监测技术

郑旭东

河北谱尼测试科技有限公司, 中国·河北 石家庄 050000

## 摘要

随着现代化社会发展, 城市化进程加快, 工业化水平提高, 工业三废排放、滥用农药化肥、生活垃圾污染等, 导致农田土壤中的重金属污染越来越严重, 非常不利用农作物的健康成长。因此, 相关部门要强化土壤重金属污染监测力度, 选择合适的监测技术, 制定可行性的污染修复方案, 促进农业生产顺利进行。文章主要对农田土壤重金属污染技术要点进行分析, 并提出针对性的土壤污染防治方案, 优化土壤修复技术, 从而改善农田土壤质量, 保障粮食安全, 促进现代化农业产业的可持续发展。

## 关键词

农田土壤; 重金属污染; 监测技术

## 1 引言

农田土壤重金属污染严重威胁食品安全, 且对人体健康造成极大威胁。而且重金属污染的隐蔽性、持久性较强, 还会产生生物累积性, 治理难度较大。因此, 要重视农田土壤重金属污染监测工作, 明确污染物种类和含量, 制定科学合理的治理措施, 改良土壤质量, 促进农业生产安全性。

## 2 农田土壤重金属污染监测必要性

农田土壤重金属污染源主要为: 工业废弃物排放、农业生产中农药化肥的过量使用、生活垃圾污染等。农田土壤重金属污染会严重影响农作物健康生长, 一旦农作物吸收重金属污染物, 并通过食物链间接进入到人体内, 会对人体健康造成严重风险。如食用镉超标的大米、蔬菜, 会损伤神

经系统等<sup>[1]</sup>。因此要做好农田土壤重金属污染监测工作, 详细了解污染程度、种类、含量, 提出针对性的修复方案, 减少食品安全问题, 有效提高农产品质量安全, 减少人体安全风险。

## 3 农田土壤重金属污染监测技术要点

### 3.1 光谱技术

土壤会对太阳光反射出不同波长的光线, 且各类化学元素在不同波长下的吸收特征、反射谱线存在一定差异性, 以此为依据分析土壤中的化学成分, 且结合光谱数据确定土壤中的重金属元素浓度, 这是一种非侵入式的光谱技术, 不需要采集样本, 且保障监测数据的实时采集, 保障监测结果时效性。在具体应用中, 可以使用便携式光谱仪器, 测速测量土壤光谱数据, 并与现有光谱数据库对比, 进而明确重金属含量。该方法的灵敏性较强, 但是费用高, 而且 X 射线会危害日天健康, 要结合实际情况, 合理使用。

【作者简介】郑旭东(1995-), 男, 中国甘肃天水人, 本科, 中级, 从事环境检测研究。

### 3.2 实验室监测方法

该方法精度较高，且不会对周边环境造成太大干扰。其中，光学仪器监测法应用中，需要利用原子荧光仪、吸收分光设备等，监测被测样品中的重金属含量，该方法方便操作，适合低浓度检测，适应性较广，但是容易受到光干扰，对复杂样品辨识不到位。电化学仪器监测法，就是利用样品溶液中电流、电位、电导等物理量的精准测量，明确分析样品中的重金属含量，常用的方法有极谱分析法、伏安监测法<sup>[2]</sup>。该方法成本较低，但是预处理流程繁琐，容易受到外界环境影响，监测结果容易受到大分子颗粒、有机物表面活性剂的影响。

### 3.3 酶抑制技术

重金属离子可以与酶活性因子产生甲硫基反应，进而改变酶活性因子结构和性质，且可以降低酶活力，然后借助专业仪器设备实现土壤中重金属的有效监测。此外，还能够观察显色剂的颜色变化、电导率等，然后利用放大光电信号绘制曲线图，对重金属含量与酶系统的关系进行直观展现，进而精准反应农田土壤重金属污染程度。

### 3.4 免疫分析技术

在该技术应用中，可以利用络合物综合重金属离子，同时预留空间结构，这样使其可以更便捷的产生氧化还原反应。此外在具体应用中，需要保障载体蛋白可以接收综合金属离子化合物，这样才能产生免疫原。同时还可以选择具备特异性抗体综合金属离子化合物，进而保障免疫分析结果准确性。该方法灵敏性较强，在重金属污染监测中发挥了重要作用<sup>[3]</sup>。

### 3.5 激光诱导击穿光谱技术

该技术应用中，需要通过超短脉冲激光在被测样品表面聚焦，并形成等离子体，将其与等离子体光谱比较分析，获得样品具体成分和含量。该方法适应性强，对外界环境要求不高，精准度高，在复杂环境中较为适用。该技术系统包含激光器、会聚透镜系统、光学采集系统、光谱仪、中枢计算机等部分构成，主要架构如图1所示。该方法应用中，能够精准测量土壤中汞、铅等重金属元素含量，方便操作，监测效率较高，但是容易受到现场气候环境、样品物化性质等因素的干扰，且该技术的复现性较差，容易出现结果偏差，影响最终治理方案的可行性。

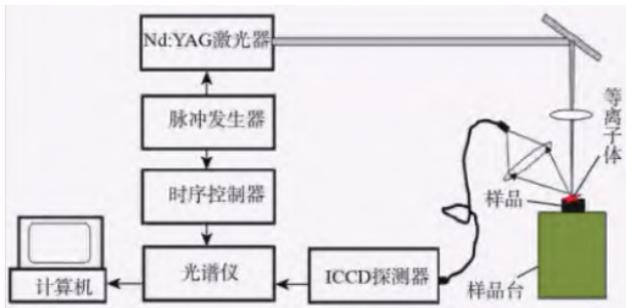


图1 激光诱导击穿光谱系统架构

### 3.6 电感耦合等离子体发射光谱法

这是一种多元素同步检测方法，即通过高温等离子体激发样品中的重金属，使其处于跃迁状态，并释放特征光谱。在具体应用中，需要对样品进行消解等预处理，将其转化为溶液态，然后利用雾化器将其转化为气溶胶；将其引入到等离子体炬管中，创建高温条件，使其激发释放特征光谱信号；通过分光系统对不同金属元素的特征波长进行分析，结合光强明确重金属元素种类和含量。该技术适合在高污染样品检测中进行使用。

### 3.7 高光谱分析技术

该方法可以精准检测土壤中重金属物质含量和种类，属于无损检测方法，为后续重金属污染防治方案的制定提供依据。在具体应用中，需要利用地物光谱仪采集样本的光谱数据，并结合相关技术规范要求，按照污染程度进行合理分类，包含无污染、轻度污染、重度污染、强度污染、严重污染等层级，然后把实际测量数据与不同层级标准值比较分析，帮助工作人员精准了解土壤污染程度、发展情况等，为后续差异化防治处理提供保障<sup>[4]</sup>。高光谱分析监测体系如图2所示。

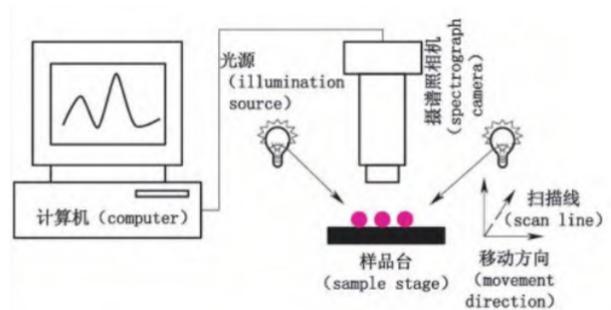


图2 高光谱分析监测体系

## 4 农田土壤重金属污染防治措施

### 4.1 注重源头控制

为了减少农田土壤重金属污染，需要做好源头控制工作，加大污染监测力度，做好污染排查和分析，定位重金属污染来源，为源头防控提供方向指引；要跟踪农民对农药化肥的使用情况，严控化学药剂的使用，促进农业生产技术引导，如推广农业有机肥，减少化学农药化肥使用量，使用降解农业地膜，引进农业灌溉用水净化工程，优化微生物修复、底泥疏浚等修复技术，优化三废治理，减少农业重金属污染的发生几率。

### 4.2 科学应用修复技术

生物修复技术，即利用生物的习性对重金属污染进行适应、抑制和改良，常用的生物有蚯蚓、鼠类等，此外还可以利用植物积累、吸收重金属，达到清除土壤中重金属物质的目的。该方法方便操作，成本低，但是周期较长，效果不稳定，需要进一步深入研究。其中，生物修复技术包含植物

修复技术和动物修复技术。植物修复技术就是通过植物对重金属污染物富集、稳定和挥发,进而降低重金属污染。其中,植物超积累方法应用中,需要利用特定超积累植物吸收土壤中的重金属,并将其富集到地面上部,收割植物体达到净化土壤的目的。常用的超积累植物有:蜈蚣草富集砷、印度芥吸收镉。植物固定技术应用中,需要通过植物根系分泌物对重金属物质进行诱导,使其与土壤颗粒结合,并固定在植物根部周围,实现风险迁移。植物挥发技术应用中,利用植物生理作用把汞等挥发态化合物重金属转化为气态,并将其释放到大气中。此外,向污染土壤中培养微生物群落,并利用微生物新陈代谢功能产生有机酸络合,进而对重金属污染物进行固定和净化,但该方法治理周期较长,修复效果受限较多。

物理治理方法,即利用深耕、去土、换土、电解法、热处理法等方式受到污染的重金属物质。该方法制适合小面积推广应用。其中,电解法就是利用电解、电迁移、电渗与电泳等作用,移走阳极、阴极的重金属元素。热处理法,就是加热被污染的土壤,收集土壤中易挥发的污染物,并对其科学处理,但是该方法费用较高,且降低土壤肥力。换土就是移除污染土体,并回填清洁土壤。土壤改良技术就是在轻度污染农田中掺入洁净土壤进而稀释污染物浓度。电动力学修复技术,即通过电场定向迁移重金属离子,该技术方便使用,不会破坏土体结构,适合大范围推广。在实际引用中,需要向土壤中设置阳极、阴极,施加低电压直流电,充分发挥电流在土方孔隙中产生电渗、电迁移、电泳效应等,在此驱动下引导重金属离子向电场方向移动,使其在电极处沉淀、螯合,或者与化学试剂反应形成化合物<sup>[5]</sup>。

化学修复技术,即在受到污染的土壤中添加改良剂、抑制剂等,以便对土壤性质进行改良,促进重金属元素产生氧化、还原、吸附等作用,这样能够有效清除土壤中的重金属污染物,该方法效果好,但是容易产生二次污染。其中,稳定化固定技术应用中,需要向受到污染的土壤中添加固化材料或者稳定剂,如石灰、磷酸盐、有机螯合剂等,使其与土壤中的重金属产生络合、沉淀、离子交换反应,通过物理

包封、化学键合作用,形成难溶性化合物,这样能够降低生态毒性,有效抑制重金属迁移性和生物活性。该方法主要针对镉、铅、砷等重金属处理中进行应用,该方法治理效果好,不会改变土壤结构,但是药剂消耗量大、长期稳定性不足,存在次生环境风险。化学淋洗技术,即利用特定溶剂与重金属污染物产生溶解-络合作用,并在液固分离作用下达清除重金属污染物的目的。当前常用的淋洗剂为生物表面活性剂。

### 4.3 推广清洁生产理念

为了有效抑制农田土壤重金属污染,需要加大宣传力度,引导农民科学使用农药、化肥,组织开展清洁生产培训,有效预防土壤污染。要对工业、城市废渣、废水进行科学处理,严禁随意排放、丢弃,一旦发现需要严厉处罚,实现防治结合,有效控制土壤污染出现概率。

## 5 结论

综上所述,为了有效防控农田土壤重金属污染,保障我国食品安全和生态环境安全,需要采取科学合理的监测技术,如电化学分析技术、光谱技术、激光诱导击穿光谱技术、高光谱分析技术等,构建完善的监测网络,结合监测结果制定科学合理的土壤污染修复方案,如生物修复技术、化学修复技术、物理修复技术等,实现污染土壤的有效性修复和治理,促进农业产业的可持续发展。

### 参考文献

- [1] 湛琛. 农田土壤重金属污染监测与修复技术研究 [J]. 中国资源综合利用, 2025, 43 (08): 131-133.
- [2] 李云霞. 农田土壤重金属污染监测技术 [J]. 农业工程技术, 2024, 44 (05): 47-48.
- [3] 郭冰茹. 农田土壤重金属污染监测技术研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2023, 4 (12): 59-61.
- [4] 陈慧. 我国农田土壤重金属污染现状及监测技术分析 [J]. 农业灾害研究, 2022, 12 (01): 133-135.
- [5] 季晓春. 关于农田土壤重金属污染监测技术发展趋势研究 [J]. 农业与技术, 2015, 35 (13): 30+54.

# Design of Domestic Sewage Treatment Scheme in Pengliuzuo Village of Xinji City, Hebei Province

Huixian Zhang

Hebei PONY Testing Technology Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

## Abstract

Rural wastewater management constitutes a vital component of rural ecological environment construction and a crucial element in building a healthy, sustainable society. Currently, China is undergoing a critical phase of accelerating development model transformation, optimizing economic structures, and shifting growth drivers, which imposes higher demands on rural ecological environment construction. Therefore, guided by the Scientific Outlook on Development, establishing a healthy, sustainable society requires prioritizing and strengthening rural wastewater management. This study, conducted in the context of new rural construction and aligned with the national initiative to build beautiful villages, focuses on Pengliuzuo Village in Xinji City, Shijiazhuang, Hebei Province. Addressing the wastewater treatment challenges and pollution issues caused by sewage in the village, this research proposes a scientifically sound wastewater treatment solution. The A<sup>2</sup>/O<sup>+</sup> constructed wetland process is selected for wastewater treatment in Pengliuzuo Village, with the treated water being reused for village landscaping and livestock farming, thereby achieving the regeneration and reuse of rural water resources.

## Keywords

domestic sewage; scheme design; constructed wetland

# 河北省辛集市彭六佐村生活污水处理方案设计

张慧贤

河北谱尼测试科技有限公司, 中国·河北 石家庄 050000

## 摘要

农村污水治理是农村生态环境建设的重要组成部分,也是构建一个健康、具有可持续性的社会的重要一环。当前,我国正处于加快转变发展方式、优化经济结构、转换增长动力的攻关期,对农村生态环境建设提出了更高的要求。因此,以科学发展观为指导,构建一个健康的、具有可持续性的社会,就必须重视和加强农村污水治理工作。本次设计是基于新农村建设的背景下,结合国家大力推进美丽乡村建设的指导思想,以河北省石家庄市辛集市彭六佐村为研究点,针对彭六佐村产生的污水处理问题以及污水造成的一些污染问题,为彭六佐村设计科学合理的污水处理方案。确定A<sup>2</sup>/O<sup>+</sup>人工湿地工艺为彭六佐村进行污水的处理,处理后的水回用到村庄的绿化、畜禽养殖等,实现了农村水资源的再生利用。

## 关键词

生活污水; 方案设计; 人工湿地

## 1 区域污水概况

辛集市位于河北省的中南部,位于石家庄地区的东南部,辛集市彭六佐村位于河北省石家庄市辛集市的西南部。彭六佐村村民的收入来源有农业种植、畜禽养殖、工厂做工等多方面,该村的生活污水主要是由洗衣,洗菜,洗澡,冲洗厕所等所产生的污水。生活污水中重要的成分比较简单,主要是日常生活产生的废料和人的排泄物,其主要成分是悬浮物、有机物和氮磷营养元素,通常情况下来说,一般是不含有毒有害物质的。但是,随着化学药物和洗涤剂、杀虫剂、

老鼠药等的广泛使用,是不能排除有毒有害物质存在的可能。

彭六佐村产生的污水没有专门进行收集处理,一般污水是排放到河沟或污水排放到房前屋后。然后,排放的这些污水顺着村落地势的变化,流入农田,也可能下渗污染地下水。污水流入农田污染耕地,使农田生长的植物受到一定的损害。污水下渗污染地下水后,会危害当地村民的身体健康。而且随着农村生活水平的提高,污水量变大,变得复杂,对周边环境造成了不少的影响。没有清新的空气,没有干净的路面,有的是蝇蚊满天飞,有的是污水横流。而且污水直接散排到路面,在冬天天气寒冷的时候冻结,严重影响村民的出行。因此,彭六佐村急需对该村产生的污水进行处理,改善村庄的环境,让村民的居住环境得到有效改善,村庄农田不再遭受污水的污染,也避免了地下水因污水下渗而造成污

【作者简介】张慧贤(1992-),女,中国河北石家庄人,本科,工程师,从事环境监测研究。

染的问题。

## 2 污水处理工艺的选择

从彭六佐村规划来看,该村居民整体居住相对比较集中,依据村内的地势特点,以及为了后续方便管理,考虑采用在道路上规划有污水收集管线,该村庄产生的所有生活污水和废水经过污水管网收集后汇流进入污水处理设施(A<sup>2</sup>O+人工湿地),再进行一系列的污水回用处理(消毒),经过处理达标后用于农田灌溉、畜禽养殖、村内绿化等。为使处置设施与周边环境和谐,应对处理处置设施进行相关村庄的绿化改造。结合该村回用水的使用对象及污水处理工艺的出水水质,考虑我国目前农村污水回用处理的现有技术水平,本设计建议采用直接过滤法这种工艺。

由于彭六佐村的人口较多,发展相对较落后,生活用水量较少,产生的污水量也小,但水质相对稳定,水量排放变化不明显。本次设计采用集中式污水处理模式,将村落中的污水收集起来,进行集中处理再排放。

## 3 回用水处理工艺的选择

采用直接过滤法可以节省土地,操作成本低廉,管理简便,但是其适应性有限,需要进行严格的操作和维护,而且水质的变化也相对较小。然而,由于当前农村的经济状况,加上我国农村生活污水的处理水平仍然相对落后,因此,这种方案是最佳的选择。经过处理的再生水可以用于村庄绿化和农业灌溉。

在污水回用的过程中,减少悬浮物质的含量,是有效防止管线或装置发生淤积、堵塞的第一步。因此,在回用污水处理的过程中,通常采用过滤法,以确保出水的质量。在再利用前,可以将其作为最终守门工序,也可以将其作为再利用水处理流程中间的一个处理单元。目前,国内外已有多多种滤池形式,但其过滤工艺均是基于砂床滤料的过滤原理。本工艺选用运行稳定、工艺简单的砂滤工艺。

## 4 污水处理设计流程

目前,传统的污水处理工艺和A<sup>2</sup>O+人工湿地工艺都能够满足农村地区的污水处理需求。为了确保污水处理后的水质符合标准,本设计建议采用更经济、易于操作、适合当地气候的生物处理工艺,同时也应该遵守一些基本原则,遵循客观规律、优先选择与自然环境相协调的治理技术、与当地经济社会发展水平相适应、采用先进的工艺技术、避免二次污染,防止对环境造成危害。

### 4.1 设计流程

村庄生活污水中的杂质、悬浮物、漂浮物等,会通过沟渠或者管道进入到格栅井中,由于有了格栅井的拦截,使得污水中的一些大颗粒的污染物,比如泥土、砂石等,会被拦截下来。接下来污水会进入到沉砂池中,沉砂池是一个通过物理原理的砂水分离作用的池子,将污水中粒径较大的无

机颗粒物分离出去,之后污水进入到调节池,在调节池中,水量和水质经过一定的调节后,污水就会进入到后续的生化系统中。之后首先进入厌氧池中,对污水进行处理,去除其中的有机物,提高污水的可生化性;缺氧池主要发挥反硝化作用,将污水中的硝态氮转化为氮气;好氧池是在缺氧池上通过污泥排放进行反硝化作用,将硝态氮转化为氮气为前提,将产生的污泥排放出去,从而达到去除磷的作用。由于污水中含有大量的有机物和氨氮,在好氧池中通过污泥排放,从而达到除磷的目的。通过以上的处理之后,好氧池排出的污水便进入到了人工湿地系统。人工湿地去除污水中的污染物,主要通过人工湿地吸附、过滤、生物降解以及植物吸收等的作用。经过人工湿地的处理污水,经过滤池,采用砂滤的处理方法,进入消毒池,消毒处理后达标排放。

污水的处理过程中会产生一些污泥,将好氧池产生的这些污泥进行回收,回收起来的污泥可以制成农业肥加以利用,具有一定的经济效益。污水处理系统的格栅、沉砂池、厌氧水解池、人工湿地等处理单元都需要运行维护,管理人员要定期进行人工维护和清理。

### 4.2 污水终端站点位置的选择

污水终端站点位置的选择应该符合彭六佐村村庄的总体规划,厂址位置应尽量不影响村庄规划景观的要求。设计时应考虑尽量使该村规划区域内产生的生活污水流动,污水流至污水处理厂尽量是依靠重力自流的方式,减少外力的投入,从而减少投资费用。污水处理厂的位置应该位于彭六佐村村庄区域排水走向的下游,而且所选的位置应该比较空旷,适合于污水处理的工作进行,其地形地址不应该受到洪涝灾害的影响。污水处理厂的建立应该做到占地面积少,尽量少拆迁,土地获得容易,并且有 $\geq 100\text{m}$ 的卫生防护距离。

### 4.3 系统设计

辛集市彭六佐村地势总体上西边高、东边低,北边高、南边低,水从西北方向流向东南方向,本次设计以全村污水的900户人家,3500人作为研究样品,污水处理厂根据地势建立在彭六佐村的东南边。

在彭六佐村,其村落呈长方形状,东西长约650米,南北宽约300米,占地面积约为5.3万平方米。道路的布局排列比较整齐,管道的布置也比较容易。支管从各户厨房,院落排水管道接出,再接入主管。主管沿沟渠布线,最终污水汇入污水集水池内。进入集水池中的水依次通过沉砂池、调节池、厌氧池、缺氧池、好氧池、人工湿地各池的处理,最后经过消毒池消毒后,出水符合标准而排放。

由于村落较大,为了节省土地面积,在不影响村民的日常生活的情况下,可以将污水管道埋设于道路下面。村民排出的污水,经下水道系统,以重力自流的方式,流入至所设的污水处理设施。在收集污水的时候,既要考虑到管道高度差的设定,又要考虑到冬天天气寒冷时对管道和设备的影响,为了避免出现管道的冻裂,污水处理设备因为低温而无

法运转等问题,必须设置有伴热层,以便在管道、设备等方面起到保温作用。

#### 4.4 设备结构及计算

##### 4.4.1 沉砂池

$$\text{有效容积 } V=Qt=18.72\text{m}^3 \quad (4-1)$$

式(4-1)中水力停留时间 $t$ 取3小时,得沉砂池有效容积为 $18.72\text{m}^3$ ,根据沉砂池的容积,取沉砂池的总高度 $H$ 为 $2\text{m}$ ,其中超高 $0.4\text{m}$ ,有效水深 $h$ 为 $1.6\text{m}$ ,则沉砂池的面积为 $A=V/h=18.72/1.6=11.7\text{m}^2$ 。设沉砂池的长 $L$ 为 $4\text{m}$ ,宽 $B$ 为 $3\text{m}$ 。

其中格栅

间隔:  $5\text{mm}$ ;

倾斜角度:  $45^\circ$

##### 4.4.2 调节池

$$\text{总有效容积 } V=Qt/1.3=14.4\text{m}^3 \quad (4-2)$$

式(4-2)中水力停留时间 $t$ 为3小时,1.3为经验参数,得调节池的有效容积为 $14.4\text{m}^3$ ,根据调节池的容积,假定调节池的总高度 $H$ 为 $2\text{m}$ ,其中超高为 $0.4\text{m}$ ,有效水深 $h$ 为 $1.6\text{m}$ ,则调节池的面积 $A=V/h=14.4/1.6=9\text{m}^2$ 。设调节池的长 $L$ 为 $3\text{m}$ ,宽 $B$ 为 $3\text{m}$ 。

##### 4.4.3 厌氧池

$$\text{总有效容积 } V=Qt=12.48\text{m}^3 \quad (4-3)$$

式(4-3)中水力停留时间 $t$ 取2小时,得厌氧池的有效容积为 $12.48\text{m}^3$ 。根据厌氧池的体积,假定厌氧池的总高度 $H$ 为 $2\text{m}$ ,其中超高为 $0.4\text{m}$ ,有效水深 $h$ 为 $1.6\text{m}$ ,则厌氧池的面积 $A=V/h=12.48/1.6=7.8\text{m}^2$ 。设厌氧池的长 $L$ 为 $3\text{m}$ ,宽 $B$ 为 $2.6\text{m}$ 。

##### 4.4.4 缺氧池

$$\text{总有效容积 } V=0.001QN_{ki}-N_{te}-0.12W_{mk}d_eX=17.52\text{m}^3 \quad (4-4)$$

通过式(4-4)计算得缺氧池的容积为 $17.52\text{m}^3$ ,根据缺氧池的容积,取缺氧池的总高度 $H$ 为 $2\text{m}$ ,其中超高为 $0.4\text{m}$ ,有效水深 $h$ 为 $1.6\text{m}$ ,则缺氧池的面积 $A=V/h=10.95\text{m}^2$ 。设缺氧池的长 $L$ 为 $4\text{m}$ ,宽为 $2.8\text{m}$ 。

##### 4.4.5 好氧池

$$\text{有效容积 } V=QSI-Se\rho dY1000X=12.66\text{m}^3 \quad (4-5)$$

通过式(4-5)计算得好氧池的容积为 $12.66\text{m}^3$ ,根据好氧池的容积,取好氧池的总高度 $H$ 为 $2\text{m}$ ,其中超高为 $0.4\text{m}$ ,有效水深 $h$ 为 $1.6\text{m}$ ,则好氧池的面积 $A=V/h=8\text{m}^2$ 。设好氧池的长 $L$ 为 $4\text{m}$ ,宽 $B$ 为 $2\text{m}$ 。

##### 4.4.6 人工湿地

$$\text{人工湿地面积 } A=[Q\times(S_i-S_e)\times 10^3]/q_{os}\times 10^4=2025\text{m}^2 \quad (4-6)$$

通过式(4-6)计算设计湿地面积为 $2025\text{m}^2$ ,湿地的长宽比不宜过大,一般应该控制在 $3:1$ ,本次设计所选的湿地长宽比为 $1:1$ 。湿地的长宽均为 $45\text{m}$ 。

##### 4.4.7 消毒池

$$\text{总有效容积 } V=Qt=12.48\text{m}^3$$

其中停留时间 $t$ 取 $2\text{h}$ ,最终计算的消毒池的面积为 $12.48\text{m}^3$ 。根据计算所得的消毒池的容积 $12.48\text{m}^3$ ,假定消毒池的总高度 $H$ 为 $2\text{m}$ ,其中超高为 $0.4\text{m}$ ,有效水深 $h$ 为 $1.6\text{m}$ ,则消毒池的面积 $A=V/h=12.48/1.6=7.8\text{m}^2$ 。设消毒池的长 $L$ 为 $3\text{m}$ ,宽 $B$ 为 $2.6\text{m}$ 。

针对彭六佐村进行污水处理厂的建设进行了相关数据的计算,确定了每日处理的污水量是 $150$ 吨,出水应符合国家标准——《城镇污水处理厂污染物排放标准》的一级A标准。该章对各个构筑物的尺寸进行了计算,沉砂池的尺寸为 $4\times 3\times 2\text{m}$ ,调节池的尺寸为 $3\times 3\times 2\text{m}$ ,厌氧池尺寸为 $3\times 2.6\times 2\text{m}$ ,缺氧池的尺寸为 $4\times 2.8\times 2\text{m}$ ,好氧池的尺寸为 $4\times 2\times 2\text{m}$ ,消毒池尺寸为 $3\times 2.6\times 2\text{m}$ 。估算污水处理厂建成的最终总投资的费用为 $216.5$ 万元,保障污水处理厂运行所需的费用为 $17.601$ 万元。

## 5 结论

在进行设计的过程中,对彭六佐村进行了实地的考察,关于村落的基本概况、污水排放及处理情况进行了详细的调查和分析,并根据彭六佐村的实际情况,选取了适合彭六佐村的污水处理工艺。在设计工艺流程时,将生活污水分为两部分进行处理,生活污水先经过筛滤截留,再进行有机物分解以及脱氮除磷,经过一系列的操作后,生活污水符合标准后排放。处理后的污水可以回用到彭六佐村的绿化、农田灌溉、畜禽养殖等,从而有效的缓解了彭六佐村水资源短缺的现象。而且,处理后的污水以及污水处理后产生的污泥也为村庄带来了一定的经济效益。

## 参考文献

- [1] 陈颖,吴娜伟,王亚男.推进农业农村污染治理要守底线补短板有突破[M].北京:中国环境报,2018.:
- [2] 谷敬花.新农村污水处理设施建设、运营管理模式研究[D].陕西:西安建筑科技大学,2021年.
- [3] 吴英挺,邱于益.我国农村生活污水治理存在的问题及对策[J].农技服务.2021,37(08):76-78.
- [4] 顾晓华.论述农村生活污水绿色处理技术[J].资源节约与环保.2022(11):73.
- [5] 刘炜.农村水环境污染防治的认识和建议[J].皮革制作与环保科技.2021,2(12):68-69.

# Research on Process Parameters of Centrifugal Dewatering System for New Construction Sludge

Zhiwei Chen

Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai, 200082, China

## Abstract

In wastewater treatment processes, sludge as a by-product not only contains substantial amounts of heavy metals, pathogenic microorganisms, and other hazardous substances but also exhibits poor stability, prone to spoilage, fermentation, and foul odors, posing significant environmental risks. Therefore, it is imperative to dispose of these sludges promptly, effectively, and properly to prevent environmental contamination. Sludge dewatering and drying constitute a critical phase in the entire sludge carbonization treatment process, where the quality of dewatering directly impacts the energy consumption and efficiency of the carbonization process. This project employs centrifugal dewatering machines as the primary stage for sludge dewatering. The resulting sludge serves as the material foundation for subsequent drying and carbonization processes, playing a pivotal role. Consequently, this paper investigates the process parameters for the centrifugal dewatering section of the sludge dewatering and drying system in the wastewater treatment plant.

## Keywords

Sewage treatment; Sludge centrifugal dewatering system; Process parameters; Commissioning

# 新建工程污泥离心脱水系统工艺参数调试研究

陈智威

上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 中国·上海 200082

## 摘要

在污水处理过程中,污泥作为其伴生物,不仅含有大量重金属、病菌微生物等有害物质,而且稳定性比较差,容易腐败发酵、恶臭难闻,危害环境安全,所以必须及时、有效、妥善地处置这些污泥,避免污染环境。污泥脱水干化是整个污泥炭化处理工艺中的一个重要环节,污泥脱水情况的好坏将直接影响炭化工艺的能耗与效果。本项目采用离心式脱水机作为污泥的第一级脱水,其产出污泥将作为后续干化、炭化工艺的物料基础,作用举足轻重,因此本文就此污水处理厂污泥脱水干化系统的离心式脱水部分的工艺调试参数进行一个研究探讨。

## 关键词

污水处理; 污泥离心脱水系统; 工艺参数; 调试

## 1 引言

在上海“十四五”规划中,奉贤新城作为2035城市总体规划中重点推进的五大新城之一,将被发展成为上海南部滨江沿海具有鲜明产业特色和独特生态禀赋的节点城市,随着新城建设不断完善,人口随之增长,公共服务设施的规模配置也迎来了进一步的扩大。城市污水处理厂作为削减水污染物的重要设施,奉贤某污水处理厂扩建了新一期工程,该新建工程采用多段AAO污水处理工艺。在本期新建工程中,污泥处理采用了当前备受关注的污泥炭化技术,该技术是利用污泥中有机物的热不稳定性,在无氧或缺氧条件下进行热解处理,使有机物在一定温度条件下发生热裂解,产物包括

由低分子有机物和水蒸气等组成的热解气、焦油以及由固定碳和无机物为主组成的碳化物;相比传统焚烧工艺,污泥炭化的减量化更好,病原菌和重金属去除更彻底,炭化产物可做资源化处置,在能源利用效率、资源回收、污染物控制、碳减排等方面具有一定优势。

## 2 污泥离心脱水系统简介:

本项目污泥离心脱水系统主要由污泥进泥装置、絮凝剂(PAM)加药装置、离心脱水装置以及污泥出泥装置等组成。

污泥离心脱水系统设备清单见表1。

## 3 本项目离心脱水系统进口污泥浓度测定:

自进泥管取样口处取样,多次测量得该处污泥平均浓度为 $1.56E+04$  (mg/L),换算可知含水率为98.44%。

【作者简介】陈智威(1998-),男,中国上海人,本科,工程师,从事污水污泥处理设备研究。

表 1 污泥浓缩脱水系统设备清单

设备名称	规格	功率 (Kw)	数量 (台)	备注
增压水泵	Q=12m <sup>3</sup> /h,H=52m	3	3	二用一备, 冲洗浓缩脱水机
污泥切割机	Q=0-75m <sup>3</sup> /h	3	3	二用一备
污泥进泥泵	Q=15-75m <sup>3</sup> /h, H=3bar	18.5	3	二用一备, 变频控制
污泥浓缩脱水机	Q=63m <sup>3</sup> /h、500kgDS/h, 出泥含水率小于等于 80%	75	3	二用一备, 含固液分离阀门, Y 型分料阀
絮凝剂制备装置	Q=11kg/h	8.5	1	用于浓缩脱水机, 包括稀释装置, 给水增压
絮凝剂添加泵	Q=1-2m <sup>3</sup> /h, H=0.2MPa	1.5	3	二用一备, 变频控制
絮凝剂制备装置配套增压泵	Q=11m <sup>3</sup> /h,H=50m		2	一用一备
脱水机排泥泵	Q=6.75m <sup>3</sup> /h, H=0.2MPa	15	3	二用一备, 进口配备缓斗及液位计, 出口管道配电动阀门 4 套

#### 4 絮凝剂 (PAM) 制备装置简介:

该制备装置主要由真空吸料机 (吸取 PAM 粉剂)、溶解槽、熟化槽、储存槽和搅拌器等组成, 由 PLC 自动控制, 在触摸屏上输入所需配置的 PAM 药液浓度, 系统即可自动配置该浓度药液, 屏幕上实时显示有自来水的进水压力与流量; 此系统设定的制备启动液位为 0.65m, 当液位达到 0.95m 时停止制备, 超低液位设为 0.25m, 低于此液位时搅拌器停止工作。药液制备完成后将由 PAM 投加泵投加至离心式脱水机。

#### 5 离心脱水系统调试:

##### 5.1 单台离心机进泥流量预设

进泥根据本厂区污泥处理量的要求, 单条污泥炭化生产线 (共两条) 每日 24h 最大污泥处理量为 80% 含水率的污泥 60T, 即 2.5T/h, 换算可知形成含水率为 80% 的污泥需要含水率为 98.44% 的污泥约为:

$$2.5T \times (1-80\%) \div (1-98.44\%) \approx 32T$$

由于 98.44% 含水率的污泥密度与水接近, 故我们将进泥螺杆泵的初始频率设定为 20Hz, 此时进泥流量为 32.60m<sup>3</sup>/h。(见图 1 左上角, 实际投产时单台离心机每小时的污泥处理能力不应小于此数值)

##### 5.2 PAM 药液初始投加量设定

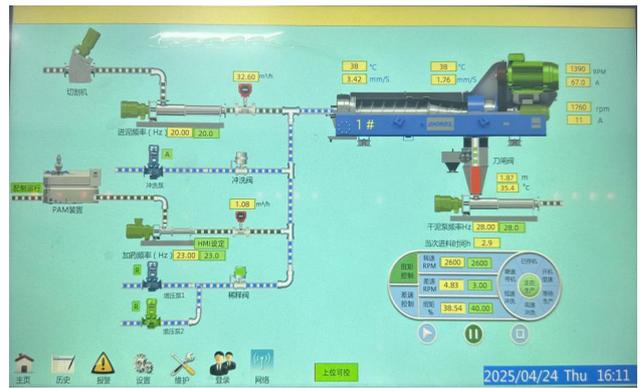
根据厂家运行经验并结合现场污泥泥性, 预设每吨绝干污泥加药 5KG~6 KG (PAM 粉剂), 因此我们调节加药流量为 1.08m<sup>3</sup>/h (对应加药泵频率为 23Hz, 见图 4); 由于 PAM 配置浓度为 2.5‰, 密度与水接近, 所以此时每吨绝干污泥对应的 PAM 粉剂加药量可推算为:

$$1080KG \times 2.5\text{‰} \div [2.5T \times (1-80\%)] = 5.4KG/T \text{ (符合预设)}$$

##### 5.3 离心机运行参数预设

根据污泥浓度、流量、泥性, 结合厂家调试经验, 本项目离心机调试采用扭矩控制 (此模式下将根据给定扭矩自动匹配转速差), 预设扭矩为 40%、转速为 2600 rpm (额定转速为 2800rpm); 在确认离心机设备状态正常并且各点

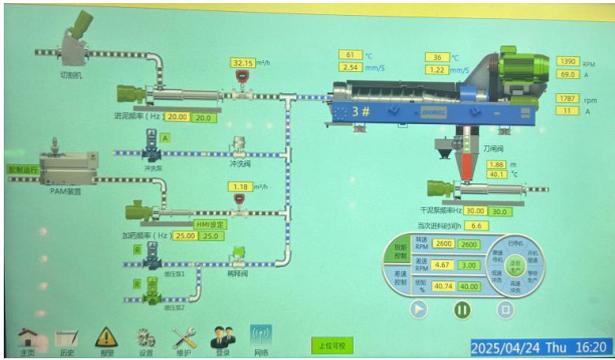
位润滑油已加注的情况下点击启动按钮开启设备, 离心机的转速从启动到达标需要一个预热过程, 期间密切关注离心机的运转状态, 查看机体的偏移量 (详见图 1 右上角, 离心机两端各有一个偏移量显示框, 小于 5mm/s 为正常) 等; 待转速攀升至 2600rpm 后, 再次点击启动按钮开始进泥, 系统将自动同步加药。



(图 1)

##### 5.4 污泥离心脱水系统性能达标试验以及参数调节

在系统开始运行后, 我们先观察排水管处泥水浑浊度, 发现情况不是很理想, 存在轻微跑泥现象 (污泥回收率不佳); 针对这一状况我们一般有三个参数可以调节, 分别为: 离心机转速、离心机转鼓堰板高度和 PAM 药液投加量。但由于离心机存在额定转速, 拥有最佳转速区间, 盲目增加转速可能会导致其振动、磨损加剧; 调节转鼓堰板又需要拆装离心机外壳, 且堰板高度通常是由厂家根据进口污泥泥性确定, 在污泥泥性不变的情况下不轻易调节堰板高度 (对于调试来说通常作为最终手段使用), 故我们首先采用调节 PAM 加药量的方式来控制跑泥现象。根据跑泥的严重程度, 我们将 PAM 药液浓度增至 3‰, 同时提高加药泵的频率至 30Hz (此时流量为 1.43m<sup>3</sup>/h), 这时候每吨绝干污泥对应的 PAM 粉剂投加量来到了 8.58KG/T; 待工况稳定后再观察离心机排水管处泥水性状, 水质十分透明、澄清, 已无跑泥现象。



(图2)

但是在上述工况下可能存在一个新的问题,那就是加药过量,提高PAM药剂的单位投加量虽然有效地解决了跑泥的问题,但也可能造成药液浪费,影响项目的经济效益,所以我们可以适当降低PAM药液的投加流量:逐步降低PAM药液投加泵的频率,并持续观察离心机排水管处泥水的浑浊度,发现当加药泵频率降至25Hz(如图2所示)时离心机排水口水澄清、微黄,效果较佳,此时加药流量为 $1.18\text{m}^3/\text{h}$ (折合PAM粉剂 $3.54\text{KG}/\text{h}$ ),绝干污泥对应的加药量为 $7.08\text{KG}/\text{T}$ 。

接着我们开始观察离心机的出泥情况,发现其转鼓出泥较慢,故降低转速差为 $2.5\text{rpm}$ ,使转鼓出口更容易形成泥封,从而加快转鼓的排泥速率。

于离心机排泥泵取样口处取泥样,经检测含水率为 $79.39\%$ (见图3),满足本项目污泥离心脱水系统产物含水率 $\leq 80\%$ 的要求(产出污泥经多次取样、多处检测均符合此要求),因此无需再提高离心机转速,以便使其拥有较少的能耗与较长的使用寿命。



(图3)

## 6 满载试验

在上述调试试验的基础上,增大PAM投加泵频率至

$50\text{Hz}$ ,此时PAM加药流量来到了 $2.24\text{m}^3/\text{h}$ (即PAM粉剂投加量为 $6.72\text{kg}/\text{h}$ ),在该工况下,与之匹配的可使离心机出泥含固率达标的最大进泥流量为 $47.37\text{m}^3/\text{h}$ (此时进泥螺杆泵的频率为 $29\text{Hz}$ ),大于 $32\text{m}^3/\text{h}$ 且存在富余,可满足此厂区生产要求。

## 7 各调试参数对污泥含水率影响整合

对于污泥离心脱水系统来说,PAM加药量的调节是一个较为核心的参数,既影响污泥回收率(跑泥现象)又影响出泥含固率。

在污泥回收率方面,如发现跑泥现象,当离心机转鼓转速处于较佳能耗区间或者运行在额定转速时,优先调节PAM加药量,当PAM加药量已经无法增大时再考虑调节堰板(堰板调至高液位:提高离心液的澄清度并有利于排出物料,但是固体物料的干度会下降;堰板调至低液位:有利于提高固体物料的干度但是螺旋输送的力矩会变高,离心液的澄清度会下降)。

在出泥含固率方面,当离心机转鼓转速处于较佳能耗区间或者运行在额定转速时,亦会优先考虑调节PAM加药量,提高PAM加药量,离心机的出泥含固率增加,但应注意不可过度增加PAM的投加量,避免造成药剂的浪费。

## 8 总结

污泥处理作为污水处理中的一环,其产量在逐年增加,随着2020年7月国家发改委和住建部联合印发《城镇生活污水处理设施补短板强弱项实施方案》,方案提出加快推进污泥无害化处置和资源化利用,污泥的炭化处理工艺被频繁提及,具有过程节能减排(相对于污泥焚烧而言)、产物资源循环利用的特点,与当前的环境技术发展要求较为契合;由于该技术中通常采用天然气加热、炭化污泥,因此从能耗角度考虑,一个性能良好的污泥脱水系统对于污泥炭化工艺来说是非常重要的(污泥含水率的高低将直接影响天然气的消耗量),而离心脱水系统作为目前较为稳定的污泥脱水装置,被选做本期新建污泥处理项目的一级脱水系统,所以此次对于配合污泥干化炭化工艺的离心脱水系统的工艺参数调试是较为有意义的,将有望对后续污泥炭化项目的脱水工艺部分起到一定程度的提示与指导作用。

### 参考文献

- [1] 余杰,田宁宁,王凯军.我国污泥处理、处置技术政策探讨[J].中国给水排水.2005,(8)
- [2] 刘享亭,刘宝成,田春雨.城镇污水处理厂精确曝气与碳源精准投加系统的应用[J].节能与环保.2022,(12)
- [3] 汪毅恒,范艳辉,柳海波.阳离子聚丙烯酰胺(PAM)改善污泥脱水性能的研究[J].北方环境.2012,(2)

# Comparison of soil pollution risk under different land use types

Xiaomeng Li

Hebei Bairun Environmental Testing Technology Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

## Abstract

With the acceleration of urbanization and industrialization, the impact of land use types on soil pollution has become increasingly significant. There are significant differences in the risk of soil pollution under different land use types. The pollution sources, types of pollutants, and pollution levels vary across agricultural land, industrial land, and urban construction land, which directly affect the health of the soil and the quality of the environment. This paper compares the risks of soil pollution under different land use types, analyzes the pollution characteristics, sources, and distribution of pollutants for each land type, evaluates the degree of soil pollution risk, and discusses corresponding remediation measures.

## Keywords

Land use types; Soil pollution; Pollution risks; Remediation measures; Risk assessment

## 不同土地利用类型下土壤污染风险比较

李晓萌

河北百润环境检测技术有限公司, 中国·河北 石家庄 050000

### 摘要

随着城市化进程的加快和工业化发展,土地利用类型对土壤污染的影响日益显著。不同土地利用类型下,土壤污染的风险存在显著差异。农业用地、工业用地和城市建设用地的污染源、污染物种类以及污染程度各不相同,直接影响到土壤的健康状况和环境质量。本文通过对不同土地利用类型下土壤污染的风险进行比较,分析了各类型土地的污染特征、污染物来源及其分布,评估了土壤污染的风险程度,并探讨了相应的治理措施。

### 关键词

土地利用类型; 土壤污染; 污染风险; 治理措施; 风险评估

## 1 引言

土壤污染已成为全球环境问题中的重要议题,尤其是在不同土地利用类型的背景下,土壤污染的风险表现出显著差异。随着社会经济的快速发展,农业、工业和城市用地的不断扩展带来了不同类型的污染源。农业用地主要面临农药、化肥等污染物的威胁,工业用地则受到重金属、化学废料等有害物质的污染,而城市建设用地则常常伴随着建筑垃圾、污水等污染的积累。这些污染物的长期积累和迁移不仅影响土壤健康,还可能通过食物链威胁到人类健康。了解不同土地利用类型下的土壤污染风险,对于制定有效的污染防控策略至关重要。

## 2 土地利用类型对土壤污染的影响

### 2.1 农业用地对土壤污染的长期影响与污染物积累机制

农业用地的土壤污染主要由过度使用化肥、农药和农用废弃物引起。长期施用化肥和农药导致氮、磷等元素在土壤中的积累,使得土壤的理化性质发生改变,进一步影响土壤微生物群落的多样性。尤其在集约化耕作区域,过量的氮、磷浓度往往超过土壤的自净能力,导致土壤酸化和富营养化。农药的残留则对土壤的生物修复能力造成破坏,并通过食物链传递,对农业生态系统造成威胁。

### 2.2 工业用地土壤污染的主要来源与危害程度分析

工业用地的土壤污染主要来源于工业废水、废气排放和固体废弃物的处理不当。重金属(如铅、镉、砷)和有机污染物是常见的污染物类型,这些污染物具有很强的毒性和持久性,难以通过自然过程降解。长期积累的污染物不仅会影响土壤的结构和生物活性,还可能通过地下水渗透,造成更广泛的水土污染。此外,这些污染物会通过食物链进入人

【作者简介】李晓萌(1993-),女,中国河北石家庄人,本科,工程师,从事环境检测相关研究。

类和动物体内,对健康造成长期威胁。相比农业用地,工业用地的土壤污染更为复杂且治理难度较大,需要综合应用物理、化学和生物修复技术<sup>[1]</sup>。

### 2.3 城市建设用地土壤污染的多元化来源与环境影响

城市建设用地的污染来源较为多样,主要包括建筑废料、生活污水和周边工业排放。建筑过程中产生的大量建筑废料,如水泥、砖瓦等,含有重金属和有害物质,对土壤造成污染。此外,城市化进程中,污水和垃圾的排放也加剧了土壤污染,尤其是在城市老旧区域,未处理的污水常常渗透到土壤中,造成有机污染物的积累。城市建设用地的土壤污染不仅限于有机物污染,还伴随着重金属污染,特别是在靠近工业区的建设用地,土壤中的铅、锌等金属污染浓度较高。

## 3 不同土地利用类型下污染物的来源与分布

### 3.1 农业用地土壤污染物的来源、扩散路径与空间分布特征

农业用地的土壤污染物主要来源于农药、化肥的使用和农业废弃物的堆放。农药残留物在土壤中的分布通常是局部性的,与施药的次数、施用量以及农作物的种类密切相关。氮、磷等化肥在过度使用的情况下会在土壤中积累,特别是在高强度耕作区域,土壤中氮、磷浓度明显超标。污染物通过雨水渗透、地表径流等途径扩散到周围环境,尤其是在水利灌溉区,污染物随水流传播的速度较快。此外,农业用地的污染物具有较强的季节性,主要在施肥和施药的高峰期集中,污染程度随季节变化而波动。农业土壤污染的空间分布通常呈现出区域性差异,污染集中在施用化肥农药较为密集的区域,污染扩散路径通常与水土流失相关。

### 3.2 工业用地污染物种类、来源及其在土壤中的分布模式

工业用地的土壤污染物种类繁多,主要包括重金属(如铅、镉、砷)、有机污染物(如多环芳烃)和放射性物质。这些污染物主要来源于工业废水、废气的排放以及工业固体废弃物的堆放和不当处理。重金属污染通常与冶金、化工、电池生产等行业相关,在这些地区,铅、镉等重金属的浓度远高于背景值。在土壤中,重金属具有较强的迁移性和累积性,能够长期存在并通过土壤水分传播至地下水层。工业污染物的空间分布通常与污染源位置紧密相关,污染物浓度在污染源附近最高,并随着距离的增加而逐渐减弱。此外,污染物的深度分布也较为广泛,重金属可以在土壤的不同深度层次中积累,增加了修复的难度。

### 3.3 城市建设用地污染物的种类与来源,及其在土壤中的聚集特征

城市建设用地的污染物种类多样,主要包括建筑废料、重金属、生活污水中的有机污染物以及周围工业排放的污染物。建筑废料和拆迁垃圾中常常含有石棉、铅、砷等有害物质,随着建筑施工过程的推进,这些污染物不断进入土壤中。

城市建设用地的土壤污染通常呈现出多点集中的特征,污染物来源广泛且分布不均。重金属污染物通常集中在靠近工业区和旧城区的建设用地,而有机污染物则集中在市政污水排放区域。城市建设用地的污染扩散途径多样,除水土流失外,空气污染和废弃物的积累也可能导致污染物的二次扩散。污染物在土壤中的聚集特征表现为较强的局部性,土壤表层通常是污染物积累的主要区域<sup>[2]</sup>。

## 4 不同土地利用土壤污染风险比较结果分析

### 4.1 农业用地与工业用地土壤污染风险对比

河北省部分农业区的耕地土壤监测中,重金属含量虽通常低于干预值,但在某些区域 Cd 和 Pb 的浓度已有偏高趋势。以某农场为例,耕地土壤中 Cd 含量接近 0.5 mg/kg, Pb 含量约为 25 mg/kg。对比在河北省某工业区附近土壤, Cd、Pb、Cu、Zn 等重金属的单因子污染指数超过 1.2,多项样本 Cd 的潜在生态风险指数超过 200,整体潜在生态风险指数达到 288.83,污染严重程度显著高于农业用地。工业用地土壤中 Cd 污染最为突出, Pb 次之,而 Cu、Zn、Ni 虽有污染但污染指数较低。该种污染不仅存在于表层土壤,也可向地下水层迁移,加大长期生态风险。相比农业用地,工业用地污染种类更多、浓度更高、空间分布更广,土壤污染风险明显更高。

### 4.2 工业用地与城市建设用地土壤污染风险对比

河北省工业用地周边土壤监测数据显示,重金属污染尤为严重。某工业区土壤样本中 Cd 的单因子污染指数平均为 1.22, Pb 的污染指数为 0.80, Cu、Zn、Ni 虽污染指数较低但普遍存在。潜在生态风险评估表明,该区域约 56.25% 的样本为中度危害, 43.75% 的样本为较高危害水平。与此相比,在河北省城市建设用地(包括旧城区更新区、工业遗址改造区、居民集中区等)进行的土壤监测中,重金属含量整体低于工业区, Cd 和 Pb 通常低于农业和工业区高污染值,但有机污染物如多环芳烃(PAHs)和挥发性有机物(VOCs)较常见。在一些老旧城区地块, PAHs 浓度达到 5-10 mg/kg,表明有机污染风险不容忽视。城市建设用地污染物类型相对复杂,有机与无机污染混合分布,污染虽不及工业用地般集中重,但覆盖面广、分散且难以彻底修复,长期环境与健康风险不容低估。

### 4.3 农业用地与城市建设用地土壤污染风险对比

河北省农业用地中,重金属污染总体较轻,多数样本中 Cd、Pb、Cu、Zn 等重金属含量保持在风险筛查值以下,但在畜牧与化肥、农药密集使用区, Cd 和 Pb 有超标趋势,有研究报告称部分农田 Cd 含量虽低但长期施肥与污水灌溉会导致累积。与之相比,城市建设用地尤其是老城区与新开发区土壤污染呈现多污染物、多途径累积格局。重金属污染虽不如工业区严重,但 Pb、Zn 等含量在部分地块接近或略高于农业用地,而有机污染物如 PAHs、VOCs 的存在使风

险呈现复合特征。在一处城市建成区地块, PAHs 浓度曾测得约 8 mg/kg, 有机污染风险突出。农业用地污染较为局限且集中在耕作层, 而城市建设用地污染分布广、类型多样。

总体来看, 城市建设用地的土壤污染风险虽不一定高于工业用地, 但相较农业用地, 污染类型更复杂、治理更困难, 潜在危害和长期累积风险值得关注, 详见表 1。

表 1 河北省农田与农用地(农业用地)部分实测重金属数据

土地利用类型	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	潜在生态风险指数 (RI)
农业用地	0.2	15.4	28.9	69.4	18.53
工业用地	1.5	20.5	33.2	80.2	45.23
城市建设用地	0.8	10.2	25.6	60.3	25.16
农业用地(北部)	0.1	14.0	20.3	55.1	12.44
城市建设用地(南部)	0.6	12.3	22.5	58.9	22.57

## 5 不同土地利用类型的污染治理措施

### 5.1 农业用地污染治理策略

农业用地污染治理的核心在于减少农业化学品的使用, 特别是化肥和农药。通过精准施肥技术, 可以大幅度降低氮、磷等元素的过量施用, 减缓土壤污染进程。研究表明, 精准施肥可以使土壤中的氮浓度减少 20%-30%。与此同时, 推广有机农业、绿色农业和生态农业技术, 减少化学物质的使用, 改善土壤生态环境。植物修复、生物修复等技术也能有效去除土壤中的有害物质, 恢复土壤的健康。例如, 某些地区采用农作物种植与微生物联合修复的技术, 已经使得土壤中的某些有害物质浓度降低至背景值以下。此外, 合理轮作、增施有机肥料等措施也能有效改善土壤质量, 提高土壤的自然修复能力。

### 5.2 工业用地污染治理策略

工业用地的污染治理通常需要依赖于重金属和有机污染物的处理技术。物理修复方法, 如土壤换填、蒸汽抽提等, 能有效减少污染物在土壤中的浓度。化学修复技术则包括酸碱处理、氧化还原处理等, 能够降低土壤中有害物质的生物可利用性。对于重金属污染, 研究显示, 稳定化和固化技术能有效减少重金属的流动性, 尤其是在铅、镉、铜等重金属污染较严重的区域, 土壤中这些重金属的浓度可以降低 30%-50%。生物修复技术则利用植物或微生物吸收、降解土壤中的污染物, 已在部分工业园区取得良好效果。通过加强污染源控制、定期监测、废弃物分类和回收, 能够在源头上有效减少污染物排放, 从而减轻土壤污染的压力<sup>[3]</sup>。

### 5.3 城市建设用地污染治理策略

城市建设用地污染治理的策略集中在废弃物处理和水土污染防治两大方面。建筑废料和生活垃圾的妥善处理是关键, 实施建筑废料分类、回收利用以及严格的垃圾处理和填埋措施, 能够有效减少土壤污染源的输入。对生活污水的处理也至关重要, 改善城市排水系统, 采用渗透性较低的材料

以及控制污水渗透, 有助于降低城市建设用地的土壤污染程度。同时, 土壤修复技术, 如土壤通气性改善和污染物吸附等, 能够增强土壤的自净能力, 减少污染物的累积。土壤污染治理还需要政府加强监管力度, 推动绿色建筑技术的应用, 鼓励使用环保建材, 减少对土壤的污染。此外, 采用多层次的监控体系和长期土壤质量检测, 能够更好地评估治理效果, 确保土壤环境的长期可持续性<sup>[4]</sup>。

## 6 结语

通过对不同土地利用类型下土壤污染风险的比较分析, 我们可以看到农业用地、工业用地和城市建设用地的污染风险各具特点。农业用地主要受到化肥和农药的影响, 污染物积累较为缓慢, 但长期高浓度的使用仍会对土壤生态系统造成严重破坏; 工业用地则面临着重金属和有机污染物的双重威胁, 污染程度较为严重且治理难度较大; 城市建设用地的污染源多样, 污染物类型复杂, 尤其在快速城市化的背景下, 污染问题日益突出。针对这些不同的污染风险, 采取科学的治理措施至关重要, 包括精准施肥、生态农业推广、土壤修复技术的应用等, 以减少土壤污染, 恢复土壤健康。

## 参考文献

- [1] 李楠, 曹明杰, 郝喆, 侯永莉, 陈红丹, 张颖. 基于不同土地利用方式的土壤重金属污染与潜在风险评价: 以辽河流域(浑太水系)山水林田湖草沙一体化保护和修复工程为例[J]. 现代地质, 2023, 37(06):1655-1664.
- [2] 张秀秀. 南京城郊不同土地利用类型表层土壤及土壤剖面层中多环芳烃污染特征及风险评价[D]. 导师: 潘剑君. 南京农业大学, 2022.
- [3] 王娟恒, 胡国成, 温汉辉, 蔡立梅, 徐耀辉, 罗杰, 梅敬娴, 徐述邦. 揭西不同土地利用类型土壤重金属污染特征及风险评价[J]. 环境监控与预警, 2021, 13(05):100-108.
- [4] 管滨, 孙虎. 不同土地利用类型下土壤铜累积状况及其污染风险控制[J]. 山东农业科学, 2015, 47(04):83-87.

# Application analysis of intelligent remote sensing technology in monitoring ecological restoration of mines

Libin Hao

Inner Mongolia Huansen Environmental Protection Technology Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia, 010000, China

## Abstract

With the growing awareness of ecological environmental protection, mine ecological restoration has become an important topic in environmental governance. Traditional monitoring methods for mine ecological restoration face issues such as low efficiency and incomplete data. In contrast, smart remote sensing technology, with its high efficiency, comprehensiveness, and precision, has become an effective tool for monitoring mine ecological restoration. Smart remote sensing technology captures surface information of mining areas through high-resolution remote sensing imagery, and combined with artificial intelligence technology, analyzes remote sensing data to provide scientific evidence for evaluating the effectiveness of mine ecological restoration.

## Keywords

Smart remote sensing technology; mine ecological restoration; remote sensing imagery; data analysis; environmental monitoring

## 智慧遥感技术在矿山生态修复监测中的应用分析

郝利斌

内蒙古环森环保科技有限公司, 中国·内蒙古呼和浩特 010000

## 摘要

随着生态环境保护意识的提升, 矿山生态修复成为了环境治理的重要课题。传统的矿山生态修复监测方法存在效率低、数据不全面等问题, 而智慧遥感技术凭借其高效性、全面性和精准性, 成为矿山生态修复监测的有效工具。智慧遥感技术通过高分辨率遥感影像获取矿山区域的地表信息, 并结合人工智能技术分析遥感数据, 为矿山生态修复效果评估提供了科学依据。

## 关键词

智慧遥感技术; 矿山生态修复; 遥感影像; 数据分析; 环境监测

## 1 引言

矿山生态修复是指通过一系列工程和自然恢复手段, 改善矿区生态环境, 恢复生物多样性, 促进土地的可持续利用。然而, 矿山生态修复的实施往往受到环境复杂性、数据不足和监测手段落后的制约。传统的监测方法通常依赖于人工现场调查, 不仅耗时费力, 且数据覆盖面有限, 难以全面反映修复效果。近年来, 智慧遥感技术作为一种先进的环境监测手段, 在矿山生态修复领域得到了广泛应用。智慧遥感技术利用遥感卫星、无人机、激光雷达等多种设备, 快速、高效地获取矿区的大范围、多维度数据, 并结合人工智能技术进行数据分析和处理, 提供了更加精准的监测数据和评估方法。通过智慧遥感技术, 矿山生态修复的监测效率和准确性大大提升, 为环境保护和可持续发展提供了新的解决方案。

【作者简介】郝利斌(1991-), 男, 中国内蒙古呼和浩特人, 本科, 工程师, 从事矿山生态环境保护及修复治理研究工作。

## 2 智慧遥感技术概述

### 2.1 智慧遥感技术的定义与发展

智慧遥感技术是指通过遥感设备采集地面物体的影像数据, 结合人工智能、大数据处理和云计算等现代技术, 对遥感数据进行智能化分析、处理和应用的体系。随着卫星遥感、无人机遥感等技术的发展, 遥感技术已从传统的图像处理发展为集成多种高效信息获取、分析和应用功能的智能化系统。这些技术不仅具备高分辨率影像获取能力, 还能够对地物信息进行自动识别与分类。近年来, 随着人工智能技术的不断进步, 智慧遥感逐渐进入到更加复杂和精细的应用领域, 提升了对环境、气候和地质等各类变化的监测和预测能力。随着遥感设备技术的逐步进步, 尤其是卫星影像的高分辨率发展以及地面实时数据采集技术的创新, 智慧遥感技术在多个领域中的应用范围不断扩大, 为生态环境监测和自然资源管理提供了创新性的解决方案。

### 2.2 智慧遥感技术的基本原理与方法

智慧遥感技术的基本原理基于通过遥感卫星、无人机等设备获取地球表面信息, 这些设备可在不同的光谱范围内

进行成像,并通过各种传感器捕捉相关数据。遥感数据通过高分辨率影像提供地表的详细信息,利用先进的图像处理技术提取目标物体的空间信息。随后,结合人工智能和机器学习算法,数据可以得到高效处理与分析,完成目标检测、分类、变化分析和趋势预测等任务。遥感图像通过多种处理方法进行改进,例如辐射校正、几何校正、噪声去除等,这些处理方法有效提高了影像数据的准确性与可靠性。人工智能技术的引入,使得遥感数据的解析更加智能化,能够自动进行大规模的数据分析,识别地表的细微变化并进行动态监测,为环境保护、灾害预警等提供了科学依据和技术支撑。

### 2.3 智慧遥感技术的主要应用领域

智慧遥感技术的应用领域非常广泛,涵盖了环境监测、农业、林业、城市规划、灾害管理等多个行业。在环境监测领域,遥感技术能够实时、准确地监测空气质量、水体污染、土壤变化等环境因素,对环境保护和政策制定提供支持。在农业领域,遥感技术用于作物生长监测、农业灾害评估以及精准农业管理,提升了农业生产的精度与效率。林业领域则利用遥感技术进行森林资源调查、植被变化监测和生态修复评估。在城市规划中,智慧遥感技术帮助规划者更好地理解土地利用变化,优化城市发展布局。除此之外,智慧遥感在灾害管理中也具有重要应用,特别是在洪水、地震、火灾等自然灾害的监测和应急响应方面,通过实时遥感数据提供准确的灾害发生状况和区域影响评估。

## 3 矿山生态修复监测需求与挑战

### 3.1 矿山生态修复的基本概念与目标

矿山生态修复是指通过生态工程、植物恢复、土壤改良等手段,恢复受损矿区的生态系统功能,改善矿区的环境质量。其基本目标包括恢复原生态功能,提升生态环境质量,促进生物多样性的恢复。矿山生态修复不仅要关注地质环境的修复,还要注重生物群落、植被覆盖、土壤质量等方面的综合治理。矿山生态修复过程中,合理的植被选择与生物多样性恢复是关键,要确保生态系统能够自行恢复与稳定。生态修复还应考虑到资源的可持续利用,避免因修复过程中的过度开采或不当操作导致新的环境问题。生态修复的最终目的是实现矿山环境的长效管理,使其不仅恢复原有功能,而且具备持续稳定的生态服务能力。

### 3.2 传统矿山生态修复监测方法的局限性

传统矿山生态修复监测方法依赖人工现场调查、样本采集、地面测量等手段,这些方法往往耗时费力且难以覆盖大范围区域。人工调查受限于监测人员的工作量和地理环境,难以进行长时间、全面和高频次的数据采集。此外,传统方法在数据处理上存在滞后性,往往依赖人工分析,难以实时反映矿区生态变化。随着矿山生态修复规模的扩大,传统方法逐渐暴露出监测精度低、效率差、数据不全面等问题。尽管地面调查能够获取部分重要数据,但由于矿山生态环境

的复杂性,传统监测手段往往无法全面捕捉到生态变化的细节。随着修复进程的加快和环境变化的复杂性,传统监测方法面临着越来越大的挑战。

### 3.3 矿山生态修复监测面临的主要挑战

矿山生态修复监测面临的主要挑战包括监测精度、实时性、覆盖范围等方面的困难。由于矿区区域广阔且地形复杂,传统监测方法难以提供全面且高精度的修复效果评估。生态修复过程中,各类生态因子的变化往往较为缓慢,难以通过传统监测手段及时获取数据,导致修复效果评估滞后。此外,矿山生态修复往往涉及多个学科领域,需要综合考虑水文、土壤、植被等多个方面的因素,单一的监测方法难以满足多元化需求。随着修复项目规模的扩大和修复任务的复杂化,矿山生态修复监测工作需要更加高效、精准、全面的技术手段。这些挑战促使矿山生态修复监测方法向更为智能化和高效化的方向发展。

## 4 智慧遥感技术在矿山生态修复监测中的应用

### 4.1 遥感数据获取与处理技术在矿山生态修复中的应用

遥感数据获取与处理技术是矿山生态修复监测中的核心技术之一。通过卫星遥感、无人机遥感等设备,可以快速、准确地获取矿区区域的地表信息,尤其是在环境变化较为复杂的矿山地区。获取的数据涵盖了光谱、影像和地形等多种维度,为矿山生态修复的监测与评估提供了丰富的基础数据。遥感数据的处理技术,包括图像增强、几何校正、辐射校正和噪声去除等,可以有效提高影像质量,确保数据的准确性。通过高精度的遥感数据处理,能够识别和提取矿区土壤变化、植被覆盖、地形地貌等信息,实时监控矿区的生态恢复情况。对于复杂的矿山修复区域,遥感技术的应用能够提供从区域到局部的全覆盖监测,有效弥补传统监测方法的盲区和时效性不足的问题。

### 4.2 遥感影像分析与矿山生态修复评估

遥感影像分析是矿山生态修复评估的关键步骤之一。通过分析不同时间和不同光谱的遥感影像,可以揭示矿山生态修复过程中的各种变化。利用遥感影像的分类与变化检测技术,能够对矿区的植被恢复、土壤质量改良等修复指标进行精准评估。植被指数(如NDVI)可用于监测植被生长状况,土壤指数(如SAVI)可以反映土壤恢复情况。通过定期采集遥感影像,并与历史数据对比,评估矿山生态修复的成效。例如,某矿区通过遥感影像分析显示,修复后植被覆盖率提高了25%,土壤质量恢复率达到30%。影像分析不仅可以量化修复效果,还能提供实时动态的修复进程,便于相关管理部门及时调整修复方案。

### 4.3 基于AI的遥感数据分析在矿山生态修复中的应用

AI技术的引入为遥感数据分析提供了强有力的支持。在矿山生态修复的监测中,AI技术通过深度学习与机器学习

习方法,对大规模遥感数据进行智能化分析。AI能够自动识别遥感影像中的关键特征,如矿区的水体变化、植被覆盖度变化、土地复垦等,并进行分类和评估。结合深度学习技术,AI可以自动从海量数据中提取有价值的信息,不仅提高了数据处理的效率,也提高了分析的准确性。通过AI的算法模型,遥感数据不仅可以反映矿山生态修复的现状,还能够预测未来的修复效果。例如,基于AI的遥感数据分析,在某矿区修复过程中预测到,未来五年内,植被恢复率将持续增长15%。AI技术使得矿山生态修复监测更加精确、实时,并具备一定的预测能力。

## 5 智慧遥感技术的创新与发展

### 5.1 高分辨率遥感影像与三维建模技术

高分辨率遥感影像与三维建模技术是智慧遥感技术创新中的重要方向。高分辨率影像能够提供更清晰、详细的地表信息,特别是在矿山生态修复监测中,通过精准的空间分辨率,可以详细识别矿区的地貌变化、植被分布和水文状况等。随着遥感影像技术的不断进步,近年来,商业遥感卫星和无人机平台的分辨率已经达到厘米级,这使得矿山区域的细节信息得以捕捉。结合三维建模技术,遥感影像不仅可以提供平面信息,还可以生成矿区的三维立体模型,为生态修复效果的动态监测和精确评估提供全新的视角和工具。通过三维建模,可以更精确地了解矿山修复过程中的变化趋势,为修复方案的优化提供数据支持。

### 5.2 智能分析与遥感数据预测模型的应用

随着数据分析技术的发展,智能分析与遥感数据预测模型逐渐成为矿山生态修复监测的核心工具。通过机器学习和深度学习算法,遥感数据可以从大量的历史数据中提取规律,构建预测模型,预测修复过程中的关键指标变化。基于遥感数据的预测模型,能够对矿区的植被恢复、土壤改善等进行长期趋势分析,并提供科学依据,帮助管理者在不同阶

段调整修复方案。例如,通过数据建模,预测某矿区的生态恢复率将在未来3年内提高20%,而土壤质量将在5年内得到大幅改善。智能分析和预测模型的结合,使得矿山生态修复的监测不仅限于现状评估,还具有前瞻性,为未来的生态修复提供了数据驱动的决策支持。

### 5.3 遥感技术与其他监测手段的融合创新

遥感技术与其他监测手段的融合创新为矿山生态修复监测提供了更加全面的解决方案。传统的生态修复监测方法主要依赖地面调查、土壤采样和植被测量等手段,而遥感技术能够从宏观角度提供大范围、实时的监测数据。结合地面监测设备(如气象站、土壤传感器等),遥感技术可以实时获取矿区的环境数据,提供多维度的综合评估。例如,利用无人机遥感影像与地面传感器数据融合,能够精确监测矿区的温度、湿度、土壤含水量等关键指标,进一步提升监测精度。遥感与GIS技术的结合,也为矿山生态修复效果的空间分析提供了有效支持,能够实现修复过程中的实时跟踪与空间优化,为修复方案的调整提供数据支撑。通过技术融合,矿山生态修复监测的精度、时效性和全面性得到了大幅提升。

### 参考文献

- [1] 麻小涛.智慧矿山生态环保平台在张家峁煤矿的设计与应用[J].矿山机械,2025,53(01):55-59.
- [2] 刘朵朵.历史遗留废弃矿山生态修复治理研究——以茂名市历史遗留废弃矿山为例[J].绿色矿冶,2024,40(05):81-86.
- [3] 范海波.基于卫星遥感及GIS空天地一体化智慧矿山技术研究及应用[J].世界有色金属,2024,(12):55-57.
- [4] 左希斌,富强,唐敏.安全、绿色、智慧打造“全生命周期绿色智慧矿山”[N].中国应急管理报,2024-06-14(004).
- [5] 毛乾宇.基于卫星遥感及GIS空天地一体化智慧矿山技术研究及应用[J].煤炭科技,2023,44(03):172-176.

# Research on the Collaborative Path of Composite Pollution Control in Industrial Agglomeration Areas

Jinfang Wu

Inner Mongolia Huansen Environmental Protection Technology Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia, 010000, China

## Abstract

With the continuous advancement of industrialization, industrial agglomeration areas are facing increasingly severe composite pollution problems. Due to the complexity of pollution sources and the diversity of pollutants, the difficulty of remediation is gradually increasing. Addressing composite pollution requires the integration of various remediation technologies, policies, and management measures to achieve comprehensive pollutant control and ecological restoration. This paper analyzes the characteristics of composite pollution in industrial agglomeration areas and explores its causes and collaborative pathways for remediation. The study highlights that cross-sectoral, industrial chain, and technology-policy synergies are key to improving remediation efficiency. Establishing collaborative governance mechanisms and optimizing resource allocation can effectively enhance pollution control outcomes, providing technical support and a theoretical basis for the sustainable development of industrial agglomeration areas.

## Keywords

industrial agglomeration areas; composite pollution; collaborative governance; pollution control; ecological restoration

## 工业集聚区复合污染治理协同路径研究

吴晋芳

内蒙古环森环保科技有限公司, 中国·内蒙古呼和浩特 010000

## 摘要

随着工业化进程的不断推进,工业集聚区面临着日益严重的复合污染问题,且由于污染源复杂、污染成分多样,治理难度逐渐加大。复合污染治理要求多种治理技术、政策及管理措施的有机结合,以实现污染物的综合控制和生态修复。本文通过分析工业集聚区复合污染的特点,探讨了其成因及治理的协同路径。研究指出,跨部门、产业链以及技术与政策的协同作用是提高治理效率的关键,构建协同治理机制,优化资源配置,能有效提升污染治理效果,为工业集聚区的可持续发展提供技术支持和理论依据。

## 关键词

工业集聚区; 复合污染; 协同治理; 污染控制; 生态修复

## 1 引言

工业集聚区是现代经济发展的重要组成部分,其集中的产业集群和高密度的生产活动为经济发展提供了重要支撑。然而,随着工业化进程的加快,工业集聚区的环境问题愈加严峻,尤其是复合污染的出现。复合污染通常指多种污染物在空间和时间上的叠加效应,常见的有大气污染、水污染、土壤污染等多种污染物共同作用的现象,给传统的污染治理方式带来了巨大挑战。工业集聚区由于其产业链条长、污染源广、污染物种类繁多,导致其治理的复杂性和不确定性增加。为了有效应对复合污染,必须探索出一条协同治理的路径,通过多方协同合作,融合技术创新与政策支持,建立起科学的污染治理机制。

【作者简介】吴晋芳(1991-),女,中国内蒙古鄂尔多斯人,本科,工程师,从事污染治理研究。

## 2 工业集聚区复合污染的概述

### 2.1 复合污染的定义与特征

复合污染是指多种污染物相互作用,造成污染效果叠加或强化的现象。与单一污染物不同,复合污染涉及大气、水体、土壤等多种环境介质的污染。工业集聚区复合污染的特征在于其污染源广泛,涉及多种化学、物理和生物性污染物。污染物的种类包括有毒有害物质如重金属、有机溶剂、挥发性有机物等,这些污染物在环境中通过大气扩散、水流传输以及土壤渗透等方式相互作用,导致污染效应的放大。复合污染的处理难度较大,不仅需要考虑不同污染物的特性,还要处理它们之间的相互影响,因此其治理更加复杂<sup>[1]</sup>。

### 2.2 工业集聚区的污染现状

工业集聚区因集中众多企业,污染问题尤为突出。由于产业聚集效应,集聚区内常常有多种污染源同时存在,形

成大气、水体、土壤等多方面的污染。以化工、冶金、机械等传统产业为主的工业集聚区，排放的废水废气中常含有有毒有害物质，如氨氮、重金属、挥发性有机物等，这些污染物往往未经有效处理，直接排放到环境中，导致周围环境质量持续恶化。根据某地区的统计，化工行业废水中氨氮浓度常超标10倍以上，重金属含量超标3倍，工业废气中的有害物质浓度超标也较为严重。水体污染、空气污染及土壤污染交织，影响了人居环境的质量，形成了复杂的复合污染体系。

### 3 工业集聚区复合污染的成因分析

#### 3.1 工业集聚区发展特点对污染的影响

工业集聚区的污染成因复杂，首先，集聚区产业结构的单一性导致污染源高度集中。例如，以重化工和基础化学产业为主的集聚区，其排放的废水和废气中含有大量的化学品、重金属及有机污染物。这些污染物通过大气、水体和土壤相互交织，形成了复合污染体系。根据某工业园区数据，其废水中氨氮浓度高达120 mg/L，远超国家标准80 mg/L，且每年排放的挥发性有机物量达200吨。此外，工业集聚区内企业密集，基础设施不完善，污染物的治理设施未能覆盖到所有企业，导致污染治理的盲区。基础设施不完善，导致污染源未能得到及时监控与治理，这也是污染加剧的一个重要因素。

#### 3.2 污染源的多样性与交互作用

工业集聚区的污染源多样且存在交互作用，不同类型的污染物相互影响，加剧了污染治理的难度。以某集聚区为例，其大气污染主要来自化工厂排放的废气，其中包含大量的挥发性有机物（VOCs），这些有害气体与周边企业排放的氮氧化物相互作用，形成了二次污染，如臭氧污染。而水体污染则主要来源于工业废水排放，尤其是金属废水，其余的有机废水与水中悬浮物、氮磷等物质发生反应，进一步加剧了水体的富营养化现象。这些污染源的交互作用使得单一治理措施难以奏效，反而可能引发新的污染问题<sup>[2]</sup>。

#### 3.3 现有治理模式的不足与局限

现有的污染治理模式未能有效应对工业集聚区的复合污染问题。首先，传统的污染治理模式主要针对单一污染源，缺乏整体协调和综合治理的理念。大多数企业依赖自建的污水处理设施，治理设施的规模和技术水平参差不齐，导致处理效果不稳定。其次，治理技术创新滞后，现有的处理技术多偏重物理和化学方法，缺乏对新型污染物的有效处理。以某集聚区的污水处理为例，其生化处理法虽能去除一定量的有机物，但对于重金属等难降解物质的去除效果较差。此外，监测与评估体系不健全，导致污染源的精准定位与及时治理受限。现有模式难以实现污染源头的控制，治理效果的持久性差，造成了长期积累的环境负担。

## 4 复合污染治理的协同机制

### 4.1 跨部门协同管理模式

复合污染的治理不仅仅是环境保护部门的责任，还需要各相关部门共同合作。因为工业集聚区的污染源来自多个领域，包括工业、能源、交通、农业等，单一部门的管理无法全面解决复合污染问题。跨部门协同管理模式要求各个职能部门在污染治理中共同发挥作用。各部门应通过信息共享、协同执法、联合监测等手段，形成综合治理合力。例如，环保部门可以负责制定环境标准和监督执行，交通部门可以在物流和交通运输环节实施环保措施，能源部门可以通过能源结构的调整减少污染排放。各部门通过有效协调，避免了重复投入和政策冲突，提升了治理效率。同时，跨部门协同管理还能够形成政策的联动效应，提升政策的执行力和一致性，确保污染治理的全面性和持续性。各部门在复合污染治理中的角色分工清晰、协作紧密，形成了一个互为支撑、合力推动污染治理的管理体系，有效应对工业集聚区的复杂污染问题。

### 4.2 产业链协同治理模式

在工业集聚区，污染不仅仅是某个单一企业的问题，而是整个产业链的问题。产业链协同治理模式通过在产业链上下游的企业之间建立合作机制，共同推进污染控制和资源利用效率提升。这种模式要求从原材料的供应到生产加工，再到废物的回收处理，各个环节都要实施绿色发展和污染减排措施。在这一模式下，企业不仅要履行环保责任，还要通过合作共享技术和信息，推动污染的协同控制。例如，化工企业和废物回收企业可合作处理废气和废水，通过共建污染治理设施或共享技术成果，降低各自的治理成本。与此同时，产业链协同治理模式还强调通过技术创新和政策引导，推动整个产业链的绿色转型。在这一模式中，政府可以出台相关政策，鼓励企业之间的合作，提高污染治理的技术水平与经济效益，帮助工业集聚区实现污染物的多方共治。这不仅能够优化资源配置，还能提高治理效率，形成产业链内部的绿色发展闭环。

### 4.3 技术与政策的协同路径

复合污染的治理要求技术创新和政策引导相结合，形成合力。技术与政策的协同路径首先要确保技术的先进性和可操作性，并通过政策的引导和支持，促进技术的推广和应用。例如，政府可以通过制定绿色技术标准，推动企业采用低污染、节能的生产工艺，同时提供资金支持和税收优惠，降低企业实施环保技术的成本。在技术层面，随着污染治理技术的不断创新，新型的污染处理技术如膜分离、吸附、催化氧化等逐渐被应用于工业集聚区的污染治理中，能够有效去除多种污染物。政策则要与技术进步保持同步，通过鼓励绿色投资、制定排放标准、推进碳排放交易等手段，推动企业在生产过程中不断采用创新技术。技术与政策协同作用的

关键在于,政策能为技术提供实施的市场和空间,而技术能为政策目标的实现提供可行路径,从而确保复合污染问题能够得到有效解决<sup>[3]</sup>。

## 5 工业集聚区复合污染治理的技术路径

### 5.1 污染源头控制技术

污染源头控制是预防和减少复合污染的关键。源头控制技术通过减少污染物的产生和排放,能够从根本上降低污染负荷,避免污染问题的扩大。在工业集聚区内,源头控制主要依靠清洁生产技术和高效能源使用技术。清洁生产技术通过优化生产工艺,减少原料的消耗和废弃物的产生,达到减少污染的效果。例如,某化工企业通过优化反应过程和原料选择,减少了30%以上的废气排放。高效能源使用技术则通过提高能源利用效率,减少因能源浪费而产生的二氧化碳排放。在水污染控制方面,采用先进的废水回用技术,实施零排放或部分回用,使废水不再排入外部水体,有效降低了水体污染负荷。通过这些源头控制技术的实施,不仅能够减少工业集聚区的污染排放,还能提升资源的循环利用效率,为区域的可持续发展打下坚实基础。

### 5.2 污染过程中的协同控制技术

污染过程中的协同控制技术是通过多种技术手段结合,针对污染物在生产过程中的产生、扩散和迁移等环节进行控制。这一技术路径的核心在于通过多种污染治理技术的协同作用,处理工业集聚区内的多种污染物。例如,废水处理中的物理化学法和生物法相结合,能有效去除水中的有机污染物、氮磷等物质。在大气污染治理方面,采用脱硫、脱氮、除尘等多种技术手段,协同去除工业废气中的污染物。在处理重金属污染时,可以结合化学沉淀、吸附、膜分离等技术,通过协同去除不同种类的污染物。这些技术的协同使用能够有效提高污染治理的效率,并通过降低污染物排放,减轻后期治理的压力。同时,污染过程中的协同控制还强调污染物的实时监测和调控,利用大数据和物联网技术实现污染源的动态管理,进一步提升治理精度和响应速度。

### 5.3 污染后期治理与生态修复技术

污染后期治理与生态修复是污染控制的最后一道防线。

在污染物已经排放到环境中并对生态系统造成影响后,采取后期治理和修复措施可以有效减少污染的负面影响并恢复生态系统的功能。水体污染治理中,采用人工湿地、藻类修复等生态修复技术,能够有效去除水中的有害物质,并恢复水体的生态平衡。土壤污染修复则通过生物修复、物理修复和化学修复等方法,减少土壤中重金属和有害化学物质的积累,提高土壤质量<sup>[4]</sup>。同时,生态修复技术还包括恢复植被和增加生物多样性,促进生态环境的自我恢复。污染后期治理不仅仅是清理污染物,更重要的是恢复被污染的生态功能,确保环境的持续健康。这些技术的综合应用,为工业集聚区的污染治理提供了长效机制,有助于实现区域环境的可持续发展。

## 6 结语

随着工业集聚区的快速发展,复合污染问题日益严峻,传统的单一治理模式已无法满足日益复杂的环境治理需求。因此,探索复合污染治理的协同路径显得尤为重要。通过跨部门的协同管理、产业链的合作治理以及技术与政策的结合,可以有效推动污染治理的综合性和系统性。源头控制、过程控制和后期治理的技术路径为污染治理提供了具体的实施方案,技术创新与政策引导的相辅相成,保障了治理目标的实现。尽管复合污染治理面临诸多挑战,但随着技术的进步和政策的完善,工业集聚区的环境问题依然能够得到有效缓解。未来,工业集聚区应持续加强污染治理协同机制的建设,推动绿色发展和可持续发展,为实现经济、社会和环境的和谐共生提供坚实保障。

### 参考文献

- [1] 贾瑞华,段小琳,闫雨龙,彭林,牛月圆,董佳奇.典型工业型城市PM2.5与O3复合污染特征及相互影响研究:以长治市为例[J].环境化学,2025,44(05):1719-1733.
- [2] 郑兰婷.某铬渣场土壤重金属复合污染插值模拟与污染物运移研究[D].导师:刘兴旺.湘潭大学,2024.
- [3] 王思贤.社会经济因素对大气复合污染的影响机制研究[D].导师:韩秀兰.山西财经大学,2023.
- [4] 李莹.白腐真菌菌剂及固定化酶对多环芳烃—石油烃复合污染土壤的修复研究[D].导师:梁红;吴昌永.北京建筑大学,2023.

# Exploring the development direction of environmental impact assessment

Yingying Zhang

Suzhou Lupeng Environmental Protection Technology Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu, 215200, China

## Abstract

As one of the core systems in ecological and environmental protection, Environmental Impact Assessment (EIA) plays a crucial role in coordinating the relationship between economic development and ecological conservation. With global environmental issues becoming increasingly complex, technological means continuously innovating, and policy systems gradually improving, EIA is facing new development opportunities and challenges. Based on the current implementation status of the EIA system, this paper systematically analyzes its development bottlenecks and improvement paths from four dimensions: technological innovation, institutional optimization, regional coordination, and public participation. By combining typical cases and data charts, it reveals existing shortcomings and proposes development directions such as intelligent evaluation, full-life cycle supervision, cross-regional coordination, and digital public participation. This aims to provide theoretical reference and practical insights for the improvement and upgrading of the EIA system, thereby contributing to the construction of an ecological civilization and the realization of sustainable development goals.

## Keywords

Environmental Impact Assessment; Development Direction; Intelligence; Full Life Cycle Supervision

## 探讨环境影响评价的发展方向

张英英

苏州绿鹏环保科技有限公司, 中国·江苏苏州 215200

## 摘要

环境影响评价(EIA)作为生态环境保护的核心制度之一,在协调经济发展与生态保护关系中发挥着关键作用。随着全球环境问题日益复杂、技术手段不断革新及政策体系逐步完善,EIA面临着全新的发展机遇与挑战。本文基于EIA制度的实施现状,从技术创新、制度优化、区域协同及公众参与四个维度,系统分析其发展瓶颈与改进路径,结合典型案例与数据图表揭示当前存在的不足,提出智能化评价、全生命周期监管、跨区域协同及数字化公众参与等发展方向,为EIA制度的完善与升级提供理论参考与实践借鉴,助力生态文明建设与可持续发展目标实现。

## 关键词

环境影响评价;发展方向;智能化;全生命周期监管

## 1 引言

环境影响评价(EIA)是指对规划和建设项目实施后可能造成的环境影响进行分析、预测和评估,提出预防或者减轻不良环境影响的对策和措施,进行跟踪监测的方法与制度。自20世纪70年代引入我国以来,EIA制度逐步成为环境保护的“第一道防线”,在控制新污染源产生、优化产业布局、保护生态敏感区域等方面发挥了不可替代的作用。随着我国经济社会进入高质量发展阶段,生态文明建设被提升至前所未有的战略高度,传统EIA模式在评价精度、监管效率、协同能力等方面的局限性日益凸显。当前,全球气候

变化加剧、环境污染复合型特征显现、区域生态环境问题交叉叠加,对EIA的科学性、前瞻性和系统性提出了更高要求。同时,大数据、人工智能、遥感监测等新技术的快速发展,为EIA制度的创新升级提供了技术支撑。在此背景下,系统探讨EIA的发展方向,破解现有制度瓶颈,对于完善生态环境治理体系、推动经济社会发展全面绿色转型具有重要的理论与现实意义。本文结合我国EIA制度实施现状,通过数据分析与案例研究,提出适应新时代需求的EIA发展路径,为相关政策制定与实践应用提供参考。

## 2 环境影响评价的实施现状与存在问题

### 2.1 实施现状

经过数十年的发展,我国已建立起涵盖法律、法规、技术标准的完整EIA体系,形成了规划环评与项目环评相

【作者简介】张英英(1983-),女,中国江苏苏州人,本科,工程师,从事环境管理研究。

结合、分类管理与分级审批相衔接的管理模式。截至 2023 年底，全国累计完成各类建设项目环评审批超过 200 万个，规划环评覆盖国土空间规划、产业园区规划等重点领域，有效遏制了高污染、高耗能项目的盲目扩张。同时，EIA 技术方法不断丰富，环境监测、模型模拟等技术在评价工作中广泛应用，评价内容从单一的污染排放评价扩展至生态、大气、水、土壤等多要素综合评价。

## 2.2 存在问题

尽管 EIA 制度取得了显著成效，但在实践过程中仍存在诸多问题，制约了其作用的充分发挥。

**技术方法滞后于环境治理需求：**传统 EIA 主要依赖现场监测与经验模型，对复杂环境系统的模拟精度不足，尤其在应对气候变化、累积性环境影响等问题时，缺乏科学有效的评价工具。例如，现有大气环境影响评价模型对区域间污染物传输的模拟能力有限，难以准确反映跨区域环境影响。<sup>[1]</sup>

**全生命周期监管机制不完善：**当前 EIA 多侧重于项目审批阶段的评价，对项目施工期、运营期的跟踪监测与后评价重视不足，存在“重审批、轻监管”现象。部分项目虽通过环评审批，但实际建设运营中存在污染物超标排放、生态破坏等问题，未能及时得到有效整改。

**区域协同评价能力不足：**随着区域经济一体化发展，环境问题的跨区域特征日益明显，但现有 EIA 制度缺乏有效的区域协同机制，不同地区、不同部门间的数据共享不畅，难以开展跨行政区域的综合环境影响评价，导致区域生态环境治理碎片化。

**公众参与深度与广度不足：**公众参与是 EIA 制度的重要组成部分，但当前公众参与多集中于公示阶段的意见征集，参与渠道单一、参与门槛较高，公众意见的采纳与反馈

机制不健全，难以充分发挥公众的监督作用。

## 3 环境影响评价的发展方向

针对上述问题，结合技术发展趋势与政策导向，未来 EIA 应向智能化、全生命周期化、区域协同化及公众参与多元化方向发展，以提升评价的科学性、有效性与公信力。

### 3.1 智能化评价：技术驱动的精准化升级

随着大数据、人工智能、遥感 (RS)、地理信息系统 (GIS) 等技术的快速发展，EIA 将逐步实现从“经验驱动”向“数据驱动”的转变，构建智能化评价体系。

**多源数据融合与实时监测：**整合卫星遥感、地面监测站、无人机巡查等多渠道监测数据，建立覆盖大气、水、土壤、生态等要素的实时监测网络，实现环境数据的动态采集与精准分析。例如，利用高分辨率遥感影像识别生态敏感区域，结合物联网技术实时监测项目施工期的扬尘、噪声污染，提升评价数据的时效性与准确性。<sup>[2]</sup>

**人工智能与模型模拟技术创新：**开发基于机器学习的环境影响预测模型，提高对复杂环境系统的模拟精度与预测能力。例如，利用深度学习算法优化大气污染物扩散模型，结合气象数据与污染源排放数据，实现对区域空气质量的精准预测；构建生态系统服务价值评估模型，量化项目建设对生态系统的长期影响。

**智能化评价平台建设：**搭建集数据管理、模型计算、结果可视化于一体的 EIA 智能化平台，实现评价流程的自动化与标准化。通过平台整合各类评价指标与技术标准，自动生成评价报告，减少人为误差，提升评价效率。图 1 展示了智能化环境影响评价平台的架构设计，该平台通过数据层、模型层、应用层的协同运作，实现从数据采集到评价结论输出的全流程智能化。

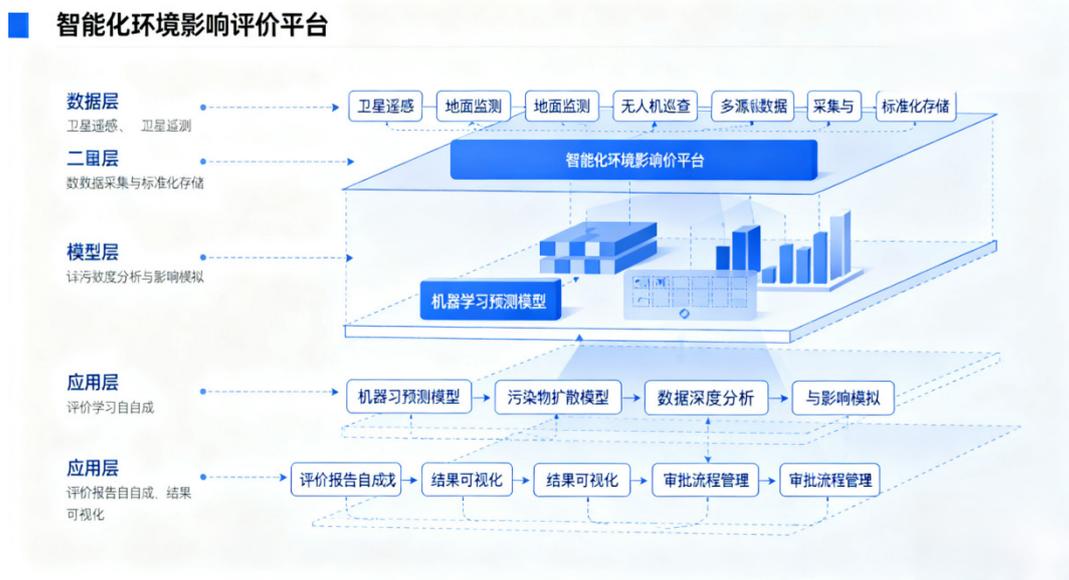


图 1 智能化环境影响评价平台架构图

### 3.2 全生命周期监管：从审批导向到全过程管控

构建“事前评价—事中监测—事后评估”的全生命周期 EIA 监管体系，强化对项目全流程的环境管理，破解“重审批、轻监管”难题。

**强化规划环评的引领作用：**将环评融入国土空间规划、产业发展规划等前期编制过程，从源头上优化空间布局与产业结构，避免规划与环境承载力冲突。建立规划环评与项目环评的联动机制，将规划环评结论作为项目环评审批的重要依据，实现“规划管总、项目落地”。

**完善施工期与运营期跟踪监测：**利用物联网、无人机等技术建立项目施工期实时监控系统，对施工扬尘、废水排放、生态破坏等情况进行动态监管；在项目运营期，设置长期监测点位，定期开展环境质量监测与影响评估，及时发现并解决环境问题。

**健全环境影响后评价制度：**明确后评价的适用范围、评价内容与实施流程，对已投入运营的重点项目开展定期后评价，分析项目实际环境影响与预测结果的差异，评估环保措施的有效性，提出改进建议并督促落实。将后评价结果纳入项目单位的信用评价体系，强化企业环境责任。<sup>[1]</sup>

### 3.3 区域协同评价：应对跨区域环境问题的必然选择

针对环境问题的跨区域特征，建立跨行政区域、跨部门的 EIA 协同机制，实现区域生态环境的整体保护与协同治理。

**构建区域协同评价框架：**打破行政区域壁垒，建立跨省（市、区）的区域 EIA 协调机构，统筹开展跨区域重大项目与规划的环境影响评价。例如，针对流域水污染、区域大气污染等问题，开展流域尺度、区域尺度的综合环评，制定统一的环境标准与治理方案。

**推动数据共享与信息互通：**建立全国统一的 EIA 数据共享平台，整合各地区、各部门的环境监测数据、污染源数据、规划数据等信息资源，实现数据实时共享与互联互通。通过数据共享打破“信息孤岛”，为区域协同评价提供数据支撑。

**建立区域环境责任共担机制：**在区域协同评价的基础上，明确各地区的环境责任与义务，建立跨区域环境补偿机制与污染治理联动机制。例如，对跨区域项目产生的环境影响，按照“谁受益、谁补偿”的原则，建立生态环境补偿基金；在污染治理方面，建立跨区域应急联动机制，共同应对突发环境事件。

### 3.4 公众参与多元化：提升评价公信力的重要保障

拓宽公众参与渠道，降低参与门槛，构建多元化、制度化的公众参与机制，充分发挥公众在 EIA 中的监督作用。

**创新公众参与方式：**利用互联网、社交媒体等新媒体平台，开展线上公示、网络听证、在线问卷等活动，拓宽公众参与渠道；针对重大民生项目，组织公众实地调研、召开座谈会等，增强公众对项目的了解与参与积极性。

**完善公众意见采纳与反馈机制：**建立公众意见分类处理与反馈制度，对公众提出的合理意见与建议，明确采纳情况与落实措施，并及时向公众反馈；对未采纳的意见，说明理由，保障公众的知情权与监督权。

**提升公众环境素养：**通过环境教育、科普宣传等方式，提升公众对 EIA 制度的认知水平与环境保护意识，引导公众理性参与环评工作，形成全社会共同参与生态环境保护的良好氛围。

## 4 结语

环境影响评价作为生态文明建设的重要制度保障，在推动经济社会高质量发展中具有不可替代的作用。当前，我国 EIA 制度面临着技术方法滞后、全生命周期监管不完善、区域协同能力不足及公众参与深度不够等问题，制约了其作用的充分发挥。未来，EIA 应顺应技术发展趋势与政策导向，向智能化、全生命周期化、区域协同化及公众参与多元化方向发展。

通过引入大数据、人工智能等新技术，构建智能化评价体系，提升评价的精准性与效率；通过完善全生命周期监管机制，实现从审批导向到全过程管控的转变，强化项目全流程环境管理；通过建立区域协同评价机制，破解跨区域环境问题，实现区域生态环境的整体保护；通过创新公众参与方式，拓宽参与渠道，提升评价的公信力与社会认同度。

展望未来，随着 EIA 制度的不断完善与创新，其在生态环境治理中的作用将更加凸显，为推动经济社会发展全面绿色转型、实现碳达峰碳中和目标、建设美丽中国提供有力支撑。同时，EIA 制度也需根据环境治理需求的变化与技术的发展不断优化调整，持续提升其科学性、有效性与适应性，为全球生态环境治理贡献中国智慧与中国方案。

## 参考文献

- [1] 李建宇. 印染行业能源消耗与环境影响的综合评估[J]. 印染助剂, 2024, 41(07): 6-11.
- [2] 刘雪洁, 李冰, 邱勇, 等. 市政污水处理厂碳减排潜力评估的方法与应用[J]. 环境污染与防治, 2024, 46(07): 1055-1061+1067.
- [3] 崔小丽. 环境影响评价管理的策略分析[J]. 黑龙江环境通报, 2024, 37(09): 87-89.
- [4] 王向前, 华梦姣. 新质生产力对区域绿色转型的影响机制研究[J]. 河北环境工程学院学报, 2024, 34(06): 42-50.

# Practice and Optimization of Environmental Impact Assessment in Industrial Project Decision-making

Lanlan Yang

Hangzhou Yida Environmental Protection Technology Consulting Service Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

## Abstract

As a vital decision-making tool, Environmental Impact Assessment (EIA) is extensively applied in industrial projects to safeguard environmental protection and sustainable development. With the advancement of industrialization, EIA's significance has grown increasingly prominent, not only identifying potential environmental risks but also providing scientific foundations for project optimization and implementation. This paper begins with the fundamental concepts of EIA, analyzes practical challenges in industrial project decision-making, and explores how to optimize evaluation mechanisms through technological innovation, process improvements, and legal safeguards, thereby better promoting green development in industrial projects.

## Keywords

environmental impact assessment; industrial projects; decision support; optimization strategies; green development

## 环境影响评价在工业项目决策中的实践与优化

杨兰兰

杭州一达环保技术咨询服务有限公司, 中国·浙江 杭州 310000

## 摘要

环境影响评价 (EIA) 作为一种重要的决策工具, 广泛应用于各类工业项目中, 以保障环境保护与可持续发展。随着工业化进程的不断推进, 环境影响评价的作用日益突出, 它不仅有助于发现潜在的环境风险, 还能为项目的优化设计和实施提供科学依据。本文从环境影响评价的基本概念出发, 分析了其在工业项目决策中的实践问题, 探讨了如何通过技术创新、流程改进和法律保障等手段, 优化评价机制, 以更好地推动工业项目的绿色发展。

## 关键词

环境影响评价; 工业项目; 决策支持; 优化策略; 绿色发展

## 1 引言

随着全球环境问题日益严峻, 环境影响评价已成为工业项目决策中的一项关键工具。通过对项目环境影响的评估, 能够识别潜在的生态破坏、资源浪费等问题, 并为项目的优化设计与环境风险控制提供科学依据。尤其在我国, 环境影响评价作为促进绿色发展和可持续发展的重要政策工具, 逐渐在各类工业项目中得到了广泛应用。然而, 实践中仍存在标准不统一、数据不充分、公众参与度低等问题, 这些都影响了环境影响评价在项目决策中的实际效能。因此, 如何优化环境影响评价的实施, 提升其在项目决策中的作用, 已成为当前亟需解决的课题。

## 2 环境影响评价的基本概念

### 2.1 环境影响评价的定义与目标

环境影响评价 (EIA) 是一种系统化的方法, 用于评估

拟议项目对环境可能产生的直接或间接影响。其主要目标是通过识别、预测和评估项目实施过程中对环境的潜在影响, 为决策者提供科学依据, 以便采取相应的缓解措施, 减少不利影响, 确保项目在符合环境保护要求的前提下顺利实施。EIA 通常涉及多个环境要素, 如空气质量、水资源、土壤、生态系统及社会经济等, 通过对这些要素进行综合分析, 帮助识别出潜在的环境风险并提出可行的预防或修复方案, 从而实现环境保护与经济平衡。对工业项目来说, EIA 不仅是环保要求的合规工具, 还是保障项目长期可持续性的重要手段。

### 2.2 环境影响评价的基本原则与流程

环境影响评价应遵循科学性、客观性、预见性和公正性等基本原则。科学性要求评价依据数据和事实, 客观性要求评价结果不受人干扰, 预见性则要求对项目的长远影响进行预测与评估。公正性要求确保所有相关利益方的声音能够被听取。EIA 的基本流程包括初步评估、详细分析、公众参与、报告编写、审查和最终决策。初步评估阶段确定是否需要 EIA, 而详细分析阶段则对项目的各项环境影响进

【作者简介】杨兰兰 (1984-), 女, 中国浙江浦江人, 工程师, 从事生态环境工程与咨询研究。

行深入分析,提出环境保护措施。公众参与阶段确保当地社区和利益相关方的参与,报告编写则将所有分析结果汇集成为报告,供决策者参考。最终,经过审查,决策者基于评价结果决定是否批准项目<sup>[1]</sup>。

### 2.3 环境影响评价的法律法规框架

环境影响评价的法律法规框架是确保环境保护要求得到落实的重要依据。在我国,环境影响评价制度的基础法律为《中华人民共和国环境影响评价法》,该法明确规定了对所有可能对环境产生重大影响的建设项目进行环境影响评价的要求。根据该法律,工业项目需在设计和建设之前提交EIA报告,并接受相关部门的审查与批准。此外,还需遵守《建设项目环境保护管理条例》、地方性环保法规及行业标准。除了法律法规外,相关部门如环境保护部(现生态环境部)和各省市的环保部门,依据其出台的规范性文件,具体执行EIA制度。此外,国际上如《联合国环境规划署(UNEP)》等机构,也对EIA提出了指导性要求,以促进全球环境可持续发展。

## 3 环境影响评价在工业项目决策中的问题

### 3.1 评价标准与指标的适应性问题

在环境影响评价中,评价标准与指标的适应性问题是影响其效果的重要因素。当前,部分工业项目在使用标准与指标时未能充分考虑项目的特殊性和地域差异,导致评价结果存在偏差。例如,某些地区的空气质量标准未能有效反映当地工业污染的特点,导致环境影响被低估。根据某地的环境监测数据,某些重工业项目的污染物排放标准明显高于环境容量,造成评价过程中未能识别潜在的环境压力,进而影响了项目的可行性分析。这一问题也体现在环境评估指标的不统一上,不同地区和行业对于水资源消耗、废气排放等指标的界定存在较大差异,导致不同项目之间的比较难以实现,影响了项目决策的科学性与透明度。

### 3.2 数据获取与信息不对称的问题

数据获取与信息不对称是环境影响评价过程中普遍存在的问题。项目建设单位和地方政府在提供数据时,可能因利益关系或对评价过程的不重视,存在数据不完整或不准确的情况。例如,在某项工业项目中,环境监测数据存在季节性波动,且部分污染源未被全面监测,造成评价时存在一定的信息偏差。根据统计数据显示,约30%的项目在环境数据提供方面存在信息缺失或滞后,直接导致评价结论的不准确。加之环境影响评价过程中,地方政府可能存在对项目的支持,低估项目对环境的负面影响,导致项目的环境风险被低估,严重影响了决策的客观性和公正性。

### 3.3 公众参与度不足与决策透明度的问题

公众参与度不足和决策透明度缺乏也是环境影响评价中常见的问题。尽管环境影响评价法明确要求公众参与,但在实际操作中,许多项目并未有效地进行公众参与,尤其在

一些工业项目中,公众意见和建议往往未能得到充分重视。调查显示,约40%的工业项目未按照法律要求公开环境影响评价报告,导致社会各界对项目的环境影响认知不足。特别是在项目选址和规划阶段,公众参与较少,导致一些环境敏感区域的项目未能充分考虑到社区的环境担忧。与此同时,决策透明度较低,许多项目的审批过程缺乏充分的信息公开,公众无法及时获取项目可能带来的环境风险和应对措施,从而影响了决策的公正性与透明性。

## 4 环境影响评价在工业项目决策中的实践分析

### 4.1 环境影响评价在不同类型工业项目中的应用

在不同类型的工业项目中,环境影响评价的应用展现出差异化的特点。以重化工项目为例,其污染物排放量较大,需要重点评估空气和水体的污染风险,而在轻工业项目中,主要关注资源消耗和能源使用效率。数据显示,重化工项目中,约70%的项目对空气质量的影响较为显著,而轻工业项目中,能源消耗的评估占比超过60%。对于能源密集型项目,如火力发电厂,环境影响评价主要侧重于评估温室气体排放和污染物的治理效果。根据相关统计,约80%的火力发电项目需进行重点的排放监测与改善措施评估。随着环保政策的加强,工业项目在环境影响评价中逐渐注重水资源的节约和污染治理措施的实施,尤其是矿产开采和冶金行业,这些行业的水资源使用效率和排放治理措施逐年成为评价的重点<sup>[2]</sup>。

### 4.2 案例分析:典型工业项目的环境影响评价实践

以某钢铁企业扩建项目为例,该项目位于一个生态敏感区,环境影响评价中着重考虑了项目建设对周边生态系统的影响。在评估过程中,项目组通过模拟分析,预测了项目运行后对当地水质和空气质量的潜在影响。根据数据,项目在建成后的五年内,可能对周边空气污染物浓度造成8%的提升,水体氮磷浓度增加4%。因此,环境影响评价报告中提出了加强废气处理设施、建设污水处理厂等一系列环境保护措施。项目最终在经过审查后,要求增加绿色建筑标准,并对环境保护措施进行严格跟踪监督。该项目的实践表明,环境影响评价不仅是对项目环境风险的预判工具,更是项目决策中不可忽视的要素,能有效推动项目优化和环境治理的措施实施。

### 4.3 环境影响评价在项目决策中的实际作用与效果

环境影响评价对工业项目决策起到了关键的作用,特别是在环境风险识别和治理措施的制定上。以某化肥生产企业为例,通过EIA,项目组识别到厂区周围水源地的污染风险较高。数据分析表明,未经处理的废水可能导致水源地污染,影响周围约15万人口的用水安全。基于这一分析,项目决策者决定增加投资,加强废水处理设施建设,并采用先进的膜技术以提高水回收率。在项目建设后的监测数据显示,废水处理效果达到预期,水质改善了30%以上。通过

该项目的实施,环境影响评价不仅提前识别了潜在风险,还为项目提供了切实可行的优化方案,从而确保了项目在环保要求下顺利推进,最大限度地降低了环境负面影响。

## 5 环境影响评价优化策略

### 5.1 提升评价方法与技术的科学性与精确度

提升环境影响评价方法与技术的科学性和精确度是解决当前评价不足的关键。现有的评价方法大多依赖于传统的环境监测数据和模拟分析,但在处理复杂的环境影响时,方法的适应性与精确度显得尤为重要。随着科技的进步,先进的遥感技术、大数据分析、人工智能等新兴技术已逐步应用到环境影响评价中。通过集成多维度数据分析,能够提高对复杂生态系统影响的预测精度,特别是在涉及生态保护和资源使用效率评估时,能够提供更为准确的结论。例如,采用地理信息系统(GIS)技术进行项目影响区域的空间分析,可以更精准地评估污染物扩散和生态干扰路径,从而提供更加科学的治理方案<sup>[3]</sup>。

### 5.2 加强数据收集与信息共享机制

环境影响评价的有效性高度依赖于数据的完整性和准确性。目前,很多项目的数据收集仍然存在碎片化、滞后和不全的问题。为了解决这一问题,首先需要加强对环境监测数据的实时收集和更新,并完善环境数据共享机制。项目单位应当与地方政府、环保部门以及第三方监测机构加强合作,形成数据共享平台,确保各类数据的充分利用。通过信息技术手段,建立健全的环境数据管理系统,能够实现对环境影响全过程的动态监测,为后续的决策和管理提供可靠的数据支持。此外,信息共享机制的完善,能够提高公众的参与度和透明度,进而增强环境影响评价的公信力和权威性。

### 5.3 促进公众参与与增强决策透明度

公众参与是环境影响评价中的重要环节,它能够增加项目决策的透明度,提升公众对环境保护的意识。当前,很

多工业项目在环境影响评价过程中未能有效听取公众意见,导致社会的不满和抵制。为此,必须通过多渠道、多形式的方式,加强公众参与,确保项目的社会责任和环境责任得到充分考虑。可以通过定期举办听证会、公开讨论会等方式,广泛收集公众的环境担忧和建议,及时调整项目方案。此外,决策透明度的提升也至关重要,应当公开环境影响评价报告、监测数据以及后期的治理措施执行情况,确保各方能够监督项目实施过程中的环境保护效果,从而促进工业项目在环境保护方面的长期可持续发展<sup>[4]</sup>。

## 6 结语

环境影响评价作为工业项目决策的重要工具,已在全球范围内得到了广泛应用。通过科学评估项目对环境的潜在影响,不仅能够提前识别风险,还能为项目的优化设计与环境保护措施提供重要依据。然而,在实践中,环境影响评价仍面临标准不统一、数据不足、公众参与度低等问题,制约了其效能的发挥。因此,提升评价方法的科学性、加强数据共享与公众参与,成为优化环境影响评价的关键路径。通过不断完善这些措施,环境影响评价能够更好地服务于项目的绿色发展,推动经济与环境的和谐发展。未来,随着技术进步和政策支持的加强,环境影响评价将为工业项目的可持续发展提供更加坚实的保障。

### 参考文献

- [1] 吴知明.基于BIM与GIS的城市建成环境动态生命周期环境影响评价方法研究[D].导师:冯为民;王璐琪.广东工业大学,2025.
- [2] 王文杰.QH县县域河道生态治理工程项目环境影响评价[D].导师:杨林.山东大学,2023.
- [3] 张学虎.三门峡市铝土矿开发生态环境影响评价[D].导师:张进德.中国地质科学院,2023.
- [4] 邓权学.基于LCA的交通基础设施生命周期环境影响评价[D].导师:李慧.长安大学,2020.

# The Application of Digital Technology in Forestry Resource Management and Sustainable Operation

Yin Li

Tulihe Forest Industry Co., Ltd., Inner Mongolia Daxing 'anling Forest Industry Group, Hulun Buir, Inner Mongolia, 022150, China

## Abstract

With the increasing demand for the protection of forestry resources and sustainable management, the application of digital technology in forestry management has gradually become an important means to enhance the level of scientific governance. This article systematically analyzes the application value of digital technology in forest resource investigation, ecological monitoring, risk early warning and business optimization, emphasizing the realization of precise, dynamic and intelligent forestry management through means such as remote sensing, unmanned aerial vehicles, the Internet of Things and artificial intelligence. At the same time, in light of the current problems existing in forestry management, such as insufficient ecological monitoring capabilities, fragmented resource information, difficulty in coordinating business entities, and a shortage of professional talents, The strategy of building a dynamic intelligent monitoring platform, promoting the integration of resource information, strengthening multi-subject collaborative governance and enhancing the application capacity of technology is proposed, aiming to provide technical support and institutional guarantee for achieving the goals of ecological civilization construction and green development.

## Keywords

Digital technology; Forestry resource management; Sustainable operation

## 数字化技术在林业资源管理与可持续经营中的应用

李寅

内蒙古大兴安岭森工集团图里河森林工业有限公司, 中国·内蒙古 呼伦贝尔 022150

## 摘要

随着林业资源保护和可持续经营需求日益增强, 数字化技术在林业管理中的应用逐渐成为提升科学治理水平的重要手段。本文系统分析了数字化技术在森林资源调查、生态监测、风险预警及经营优化中的应用价值, 强调通过遥感、无人机、物联网、人工智能等手段实现林业管理的精确化、动态化和智能化。同时, 结合当前林业管理存在的生态监测能力不足、资源信息碎片化、经营主体协同和专业人才缺乏等问题, 提出构建动态智能监测平台、推进资源信息整合、强化多主体协同治理及提升技术应用能力的策略, 旨在为实现生态文明建设目标和绿色发展提供技术支撑与制度保障。

## 关键词

数字化技术; 林业资源管理; 可持续经营

## 1 引言

伴随生态文明建设和双碳战略深入推进, 林业资源管理与可持续经营的需求愈发迫切, 传统林业管理已经难以满足森林资源动态监测、生态保护决策以及林业灾害防控的现实需要。近年来, 以物联网、遥感监测、大数据与人工智能为代表的数字化技术快速发展, 为林业管理提供了更精准、更高效和更智能的技术支撑, 使林业从经验管理逐步迈向科学治理<sup>[1]</sup>。因此, 系统探讨数字技术在林业资源管理中的应用价值与现实挑战, 对推动林业治理现代化具有重要理论与

实践意义。

## 2 数字化技术在林业资源管理与可持续经营中的应用价值

### 2.1 提升森林资源调查与监测的精度

森林资源种类繁多、分布面积大, 传统的调查方法靠人力下森林现场实地测量, 不仅调查耗时长、成本大, 难以覆盖森林面积广的地区, 反而影响数据的科学性与时效性。数字化技术, 如遥感监测、无人机航片遥感及卫星影像解析能够高精度获取林木分布、森林蓄积量、林分结构、土地覆被变化等数据, 为林业资源调查提供了高质量的数据来源, 遥感影像叠加 GIS 空间分析, 能获取历史数据与现时数据的比较数据, 从而实现森林动态变化监测。如遥感中的

【作者简介】李寅(1986-), 男, 中国内蒙古通辽人, 本科, 工程师, 从事林业方向研究。

NDVI 指数, 实时监测森林的生长状况, 时间序列模型可以评价森林的退化程度, 改善了过去依靠人工判断的弊端, 能够使森林调查过程更加客观、准确和动态化, 有利于编制科学的森林经营方案提供数据依据<sup>[2]</sup>。

## 2.2 推动森林生态系统健康评估与预警管理

突发性强、范围窄是森林火灾、森林病虫害、森林干旱以及气候变化等生态风险的特点, 如果采用人工巡护模式容易出现应急响应迟缓的现象。智能化监测系统运用传感设备、气象信息模型以及智能算法分析模型, 实时监测森林生态系统, 并通过算法模型预测森林生态风险、分析预警。例如, 人工智能可以通过温度、风速气象数据判断出高风险火灾区域; 智能防治森林病虫害系统可以通过图像识别系统精准判断森林病虫害类型以及扩散规律, 提前启动病虫害防治工作, 降低森林损害, 强化预警管理。

## 2.3 促进森林经营从“采伐导向”转向“生态导向”

生态文明经营需要注重森林的生态服务价值功能、林业碳汇价值以及生态保护功能。数字经济技术是生态经营转型的关键技术支撑, 对森林进行生态数据分析能够对森林的碳储量、林地覆盖度、水源涵养能力等指标给出科学的评定, 使得森林经营工作由注重经济效益向注重生态功能转变; 同时, 利用大数据和人工智能算法来辅助进行采伐安排和更新模式来避免森林的过量采伐, 提高森林的更新速率和质量; 其次, 通过数字信息系统建构生态资源评价体系, 使得森林经营的评价成果清晰, 政府的生态补偿政策可以落到实处, 从而促进森林经营从经济价值为导向朝着生态价值和林业碳汇价值导向转变, 实现森林资源的保护与经济发展目标。

# 3 现阶段林业资源管理与可持续经营存在的难题

## 3.1 生态监测体系不够完善, 动态管理能力不足

目前, 我国的林业生态监测仍然呈现出技术种类散、监测数据滞后、监测指标单一的特点, 尤其一些基层林业管理部门监测的仪器设备、网络基础、数据处理等方面相对薄弱, 对于森林覆盖率变化、有害生物扩散、林火险等级等监测指标还不能实现及时有效的动态监测。传统的林业监测主要是以人工监测为主, 费时费力, 难以全覆盖大面积的森林区域, 监测数据相对具有滞后性与片面性。各部门间所收集的林业数据也不能进行有效的共享, 相关数据难以建立统一的标准体系, 导致林业利用规划与布局的不科学性, 又缺乏面对森林生态系统生态风险的快速响应能力。尤其是随着气候变化趋势愈加严峻, 林地生态系统对温度、湿度等环境条件的变动愈发敏感, 而当前的监测系统却难以实现高密度的监测和长周期的跟踪, 缺乏动态管理能力<sup>[3]</sup>。

## 3.2 资源信息管理碎片化, 数字平台建设相对薄弱

部分地区的林业资源信息化管理工作有序推进, 利用信息技术实现林地普查、信息可视化管理, 但是总体上信息

化工作还处于初创状态, 存在基础资料来源广、统计口径不统一、缺少历史数据, 多数林业部门采编、信息填写不够规范、缺少定期持续的更新数据。在生态保护红线划定、采伐量审批、森林经营计划等过程中, 数据不能很好地共享给相关部门的审批窗口, 导致各部门办理林地、林木采伐审批、登记流程中出现不必要的重复。此外, 一些地方建立的基础数字平台很少与卫星遥感技术、地理信息系统技术以及无人机等新技术融合, 致使林地、森林资源数字资源的信息化管理很难做到真正意义上科学分析和预测, 并无法真正助力森林资源经营管理的可持续性、科学化、精细化发展。

## 3.3 林业经营主体结构复杂, 协同治理动力不足

我国的林地产权主体主要有国有林场、集体林场、农户、企业等, 这些经营主体由于各自经营、资金和管理能力有差异, 有各自的产权利益追求和市场预期, 难以相互适应和进行统一的经营管理。尤其是某些林改“三难”问题, 如集体林权在林改过程中发生部分权属不清、责任不明, 资源确权导致对林地经营缺乏正向权利激励的情形; 以及生态环境保护与经济效益之间还存在某种程度上的矛盾, 有的地方为了谋取短期局部利益, 导致乱砍滥伐及不合理经营情况屡有发生。导致基层林业行政管理部门很难为多种经营主体提供必要的政策指导和产业合作和协同治林合作平台, 以合作的方式达到共同参与林业治理、共同管理、共享林业资源产权的治理形态。此外, 生态保护补偿机制、碳汇交易等新的生态经济发展方式尚不规范, 在林业生产经营主体难以形成持续的合作性治理和稳定的收益, 从而会降低其参与林地持续经营的积极性<sup>[4]</sup>。

## 3.4 专业人才缺乏, 技术推广与管理能力不足

林业信息化的发展需要具备遥感、GIS 技术、数据管理及林业信息统计分析、林业宏观综合管理、林业与经济社会环境相互关系的生态评价和分析、林业应用软件的研发等方面的专业型和技能型人才, 然而, 目前基层林业部门普遍存在技术人员数量偏少、技术人员结构不够合理的情况, 大部分人员不掌握数据处理技术及计算机信息系统操作技术, 基层林业信息化平台和手段在日常管理时大多难以落地生根。林区幅员广大, 交通偏僻, 一些地区专业技术人才外流较大, 年龄结构老化现象严重, 加剧了人才荒。也有一些地区和部门在新技术引进后没有做好培训工作和长久的跟踪及维护, 引进的新技术和装备呈现无人问津或使用率极低的现状。

# 4 数字化技术在林业资源管理与可持续经营中的应用策略

## 4.1 完善生态监测体系, 构建动态智能管理平台

为解决生态监测信息来源不完整、生态信息动态管理及数据更新不足等现状, 相关事业单位和林业主管部门应以数字化平台为载体, 通过对卫星遥感、飞机航拍、地面传感网、物联网等方式实现对林业生态资源的高分辨率、高频次

数据采集与更新,对森林覆盖率、林木生长情况、病虫害情况、森林火险等级、水土流失防治信息等生态资源进行集中动态管理。可基于数字林业的生态数据,利用大数据信息分析模型和人工智能模型构建林业生态资源增长变化趋势预测、风险预警及生态指标异常预警报警系统,林业主管部门可以动态问题发生前提前干预治理,达到事前预防、事中监控、事后评估的林业生态保护动态管理效果。同时将动态林业生态系统管理平台与当地气象信息、土地利用及生态保护信息的数据接口互联互通,实现跨部门协同数据管理,以达到林业资源保护、资源开发利用更高效的科学性和动态精细化管理<sup>[5]</sup>。

#### 4.2 推进资源信息整合,构建数字化决策支撑体系

对于林业资源信息管理存在较为分散、数字化平台构建不足的现象。一是建立健全相关资源信息的数据标准、元数据标准和接口协议,实现不同信息系统间的数据交换融合,如对林木资源清查、森林作业设计、资产管理和生态补偿数据等进行统一。二是依托地理信息(GIS)技术、云计算技术和大数据分析技术,实现林业资源信息的三维可视化、智能化以及数字化决策支撑,使管理层人员能直观看到林区内资源空间分布状况、结构情况和经营管理状态,结合历史数据实现资源趋势预测和模拟等,并据此做出科学合理的经营、采伐和保护等决定。三是建立数据资源统一平台,实现信息资源集中的管理与多种维度的分析,使林业部门对资源状况了如指掌,使林业政策制定者科学决策、管理人员规范项目化管理等,使各种项目、资金以及人员的配置更趋合理,为持续经营提供基础性数据和技术支撑。

#### 4.3 强化协同治理机制,推动多主体参与可持续经营

以信息化技术为多主体协同治理的手段和途径,对于林业经营主体多元、协同治理意愿欠缺的情况,可以借助信息化手段搭建网络协作平台,将国有林场、林权个体经营、林业科技机构和生态补偿管理部门集合统一网络。协调信息交流和线上协作,帮助集体林、国有林场等实施者的间歇式劳作管理和知识、经验交流,协调不同经营主体通过林业资源利用、生态保护以及林业碳汇交易并最终实现收益分配的协同关系,使网络协作的林业经营主体之间能及时处理并分享碳汇交易、生态补偿资金等有关信息及其操作执行情况,达成远程监督,减少信息不对称,防范不履约交易发生,加强不同主体间的互动合作。

#### 4.4 提升专业能力与技术应用水平,支撑数字化管理落地

要解决专业人员不足,技术力量短缺问题,首先需要统筹建设林业管理人员数字化能力提升培训体系、轮岗锻炼、互联网学习和实践锻炼相结合的方式,加强技术人员在GIS数据处理技术、遥感影像处理分析、无人机数据采集处理、大数据分析应用技术等方面的能力锻炼和综合素质。其次,将数字林业技术骨干明确到人、合理设置岗位,使数字林业技术机构能够设置数据工程师、系统管理员、智能管护等职位,形成技术和业务双支撑。最后,做好数字技术推广,优化技术支持和管理,通过双结合的形式,有效利用数字技术进行管理并开展森林资源可持续发展经营管理,实现林业管理工作模式由经验型向科学性转变,保证林业数字化、智慧化、精细化管理落到实处。

### 5 结语

林业资源的信息化管理和可持续利用,需要通过提高森林资源信息获取监测化、林业数据处理信息化以及林业经营决策科学化等方面来实现,切实构建森林资源动态监测机制,综合利用林业资源信息,对各种涉林事务进行统筹协调,做好森林资源专业技术队伍培训工作,从而能够实现林业资源的智慧化、精确化、有效化、动态化的管理。而促进林业治理体系的现代化建设是推进林业治理现代化的有效途径,同时能够营造政策、技术协调统一、管理、保护并举的林业可持续发展型模式。未来,应持续优化技术平台、强化人才培养、完善制度规范,实现林业资源管理从传统粗放模式向智慧化、精细化、可持续化转型,为生态文明建设和绿色发展提供有力保障。

#### 参考文献

- [1] 陈树彪.基于生态红线与产业转型升级的森林可持续经营策略[J].温带林业研究,2025,8(02):49-52.
- [2] 李萍.传统林业经营模式与现代经济可持续发展策略的比较[J].销售与管理,2025,(09):9-11.
- [3] 张寅.智慧林业在现代林业管理中的应用[J].南方农机,2024,55(S1):145-148.
- [4] 张忠军.林业信息化技术在森林资源管理中的应用[J].中国高新科技,2024,(18):139-141.
- [5] 冯蕊.智慧林业管理技术在林业资源管理中的应用研究[J].林业科技情报,2024,56(02):137-139.

# Exploration of Remediation and Management Approaches for Urban Groundwater Pollution

Wai Han

Inner Mongolia Academy of Ecological Environment Sciences Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia, 010010, China

## Abstract

With the acceleration of urbanization and industrialization, urban groundwater, as a strategic water resource, has become increasingly important both ecologically and in terms of supply value. However, its pollution problem is becoming more severe, exhibiting complex pollution characteristics such as 'wide range, diverse types, high severity, and difficult remediation,' directly threatening drinking water safety and sustainable urban development. Based on the current status and causative mechanisms of urban groundwater pollution in China, this paper systematically reviews the application scenarios and suitability of physical, chemical, biological, and combined remediation technologies. It provides an in-depth analysis of the core challenges in current governance, including policy systems, technological research and development, regulatory mechanisms, and funding support. Furthermore, it establishes an integrated governance framework of 'source prevention - process interception - end-point remediation - long-term control' and proposes differentiated and precise remediation pathways, offering theoretical support and practical guidance for urban groundwater pollution management in China.

## Keywords

urban groundwater; pollution remediation; management approaches; long-term control; complex pollution

## 城市地下水污染的修复治理路径探讨

韩外

内蒙古生态环境科学研究院有限公司, 中国·内蒙古 呼和浩特 010010

## 摘要

随着城市化与工业化进程加速,城市地下水作为战略水资源的生态功能与供给价值凸显,但其污染问题日益严峻,呈现“范围广、种类杂、程度深、修复难”的复合污染特征,直接威胁饮水安全与城市可持续发展。本文基于我国城市地下水污染现状与成因机制,系统梳理物理、化学、生物及联合修复技术的应用场景与适配性,深度剖析当前治理在政策体系、技术研发、监管机制、资金保障等方面的核心困境,构建“源头防控-过程拦截-末端修复-长效管控”四位一体的综合治理框架,提出差异化、精准化的修复治理路径,为我国城市地下水污染治理提供理论支撑与实践指引。

## 关键词

城市地下水; 污染修复; 治理路径; 长效管控; 复合污染

## 1 引言

地下水是城市水资源体系的核心组成部分,凭借水量稳定、水质优良的优势,成为我国近60%城市的主要饮用水源,北方干旱半干旱地区供水占比超85%。然而,伴随城市化率突破66%,城市地下水污染态势愈发严峻《2024年中国地下水环境质量公报》显示,我国城市地下水I-III类优良水质比例仅35.2%,IV-V类劣质水质占比达64.8%,京津冀、长三角等城市群呈现重金属与有机污染物叠加的复合污染特征。

从国家战略层面,党的二十大报告明确“加强地下水

污染防治”,《“十四五”生态环境保护规划》提出“推进地下水污染风险管控与修复”。在此背景下,系统构建科学高效的修复治理路径,既是落实生态环保战略的必然要求,也是保障城市水资源安全、推动新型城镇化高质量发展的关键举措。

## 2 研究意义

理论意义:完善地下水污染治理的学术框架,丰富复合污染修复的理论体系,填补跨区域协同治理与长效管控的研究空白,为后续学术研究提供参考。

实践意义:结合我国城市污染实际,提出可落地的技术路径与管理方案,为环保、水利等部门决策提供依据,助力地下水环境质量改善与水资源可持续利用。

【作者简介】韩外(1992-),中国内蒙古人,本科,工程师,从事环保咨询研究。

### 3 城市地下水污染的现状特征与成因机制

#### 3.1 污染现状与核心特征

##### 3.1.1 污染范围：全域蔓延与重点集聚并存

我国城市地下水污染呈全域扩散态势，且在重点区域高度集聚。东部工业城市以复合污染为主，污染集中于工业园区、老城区，长三角某城市工业园区污染羽扩散面积达12平方公里；中西部城市以生活污水与农业面源污染为主，污染向周边农村延伸。全国80%以上工业园区存在地下水污染，部分老城区浅层地下水几乎无优良水质区域。

##### 3.1.2 污染类型：复合污染凸显

污染已从单一类型转向多污染物叠加，重金属中铅、镉、砷超标严重，北方资源型城市砷含量最高超标40倍；挥发性有机物（VOCs）、半挥发性有机物（SVOCs）检出率高，东部电子产业城市三氯乙烯检出率100%；氮、磷等营养盐超标普遍，南方农业周边城市硝酸盐含量远超饮用水标准。多数区域存在“重金属+有机物+营养盐”三重叠加污染，治理难度剧增。

##### 3.1.3 污染程度：浅层污染加剧与深层渗透

浅层地下水（0-50米）污染最为严重，全国IV-V类水质比例超60%，部分工业城市V类水质占比达72%；深层地下水（>50米）污染渗透趋势明显，北方部分省会城市已检出VOCs。部分老工业城市污染深度超100米，形成立体污染格局，2020-2024年重金属、有机污染物超标倍数年均分别增长8.5%、12.3%。

#### 3.2 城市地下水污染成因解析

城市地下水污染是点源污染、面源污染与自然及人为因素耦合作用的综合结果，其成因机制复杂且具有显著的叠加效应，核心可归纳为四大维度的协同影响。

工业污染是核心点源驱动力，贡献了约30%的地下水污染总量，部分重污染工业区占比达到45%左右。石油化工、电镀、制药等行业的生产废水未经达标处理便渗漏排放，携带重金属、含氯烃、酚类等高毒性污染物渗入地下；矿山开采产生的废液经淋溶作用迁移，导致地下水出现硫酸盐型或重金属复合型污染，工业废渣的随意堆放进一步加剧了污染物的累积渗透。

城市生活污染形成持续面源压力，污染贡献占比约18%，部分老旧城区可达37%左右。市政污水管网破损渗漏、垃圾填埋场渗滤液下渗，将大量有机物、病菌及洗涤剂残留带入含水层；地下储罐、管道的泄漏还会导致油类污染物扩散，逐步污染深层地下水，成为隐蔽性污染来源。

农业面源污染的叠加效应突出，集约化农业区地下水硝酸盐超标率达28%左右，抗生素残留检出率达到10%左右。农药、化肥的过量施用经降雨淋溶渗透，畜禽养殖废水及不当施用的沼肥、有机肥，携带氮、磷及病原体进入浅层地下水，加速地下水富营养化，威胁饮用水安全。

自然与人为因素的耦合进一步放大污染风险，含水层渗

透率、地下水位变化影响污染物迁移速率，极端降雨加剧面源污染入渗，持续城市化导致的包气带破坏，使地下水防护屏障失效，最终形成多源叠加、多路径迁移的复杂污染格局。

### 4 城市地下水污染修复治理的核心技术路径与适配性分析

#### 4.1 单一修复技术的原理与应用边界

##### 4.1.1 物理修复技术

抽出-处理技术：抽取污染地下水至地表处理后回灌，适配浅层高浓度重金属污染，去除率达90%，但对深层、低渗透性地层效果差，成本高且易引发地面沉降。

膜分离技术：利用膜的选择性透过性，反渗透技术污染物去除率超99%，适配高浓度有机与重金属污染，但能耗高、膜组件易堵塞，设备投资大，难以大规模推广。

##### 4.1.2 化学修复技术

原位化学氧化/还原技术（ISCO/ISCR）：注入氧化剂或还原剂转化污染物，适配有机与重金属污染，1个月内挥发性有机物浓度下降70%，但药剂注入均匀性难控制，易破坏局部生态。

吸附修复技术：利用活性炭、生物炭吸附污染物，适配低浓度污染，农药残留去除率达85%，但对高浓度污染效果差，吸附剂更换繁琐。

##### 4.1.3 生物修复技术

原位生物修复技术：注入营养物质促进微生物降解有机物，适配低浓度大面积污染，石油类去除率达75%，成本低但修复周期长（1-3年），受温度、pH值影响大。

植物修复技术：利用植物吸收污染物，向日葵、印度芥菜适配重金属污染，芦苇适配营养盐污染，去除率分别达60%、80%，但受生长条件限制，高浓度污染下植物易死亡。

#### 4.2 联合修复技术的协同机制与实践成效

##### 4.2.1 物理-化学联合技术

“抽出-处理+活性炭吸附”适配高浓度复合污染，某工业园区应用后重金属、有机污染物去除率分别达92%、95%，效率提升30%，周期缩短40%；“膜分离+化学沉淀”适配高浓度重金属污染，去除率达98%，延长膜使用寿命30%。

##### 4.2.2 化学-生物联合技术

“原位化学氧化+生物修复”适配中低浓度复合污染，某地级市应用后挥发性有机物去除率达90%，成本降低25%；“吸附+植物修复”适配重金属与营养盐污染，某农业区域应用后重金属去除率85%、氮磷去除率80%，兼具生态效益。

##### 4.2.3 典型工程案例适配性

某化工园区采用“ISCO+活性炭吸附+生物修复”技术，污染物全部达标，成本降低20%；某低渗透性地层采用“电动修复+吸附”联合技术，效率较单一技术提升45%，破解低渗透性地层修复难题。

## 4.3 修复技术的差异化选型框架

### 4.3.1 基于污染类型的适配

重金属污染：高浓度采用“化学沉淀+膜分离”，低浓度采用“吸附+植物修复”。

有机污染：VOCs采用“原位化学氧化+生物修复”，SVOCs采用“抽出-处理+吸附”。

复合污染：优先采用三级联合技术，按需组合物理、化学、生物手段。

### 4.3.2 基于地质条件的调整

浅层地下水：高渗透地层采用“抽出-处理+吸附”，低渗透地层采用“原位化学氧化+生物修复”。

深层地下水：优先采用原位修复技术，辅以监测井管控。

特殊地质：岩溶地区采用“拦截墙+吸附井”，砂质地层采用抽出-处理，黏土地层采用“电动+化学”联合技术。

## 5 城市地下水污染修复治理的现存困境与瓶颈

### 5.1 政策体系与监管机制不完善

法律法规比较碎片化，现有条款原则性强、可操作性不足。跨部门协同缺失，环保、水利等部门权责交叉，缺乏协同与信息共享机制。执法监管效能不足，地下水污染隐蔽性强，源头排查与取证难，违法处罚力度不足，震慑力薄弱。

### 5.2 技术研发与成果转化滞后

核心技术自主创新不足，复合污染与深层污染修复技术瓶颈。高端修复材料、设备依赖进口，成本高昂；复合污染、深层及低渗透性地层修复技术瓶颈未突破，治理效率低、成本高。

### 5.3 管理体系与资金保障不足

监测预警体系不健全，点位布局不合理，特征污染物监测能力薄弱。全过程管理缺失，资金投入机制单一，监测修复全过程管理缺位，前期调研不充分、中期管控不足、后期评估长效性差。

## 6 城市地下水污染修复治理的优化路径与创新机制

源头防控是治理的根本，过程拦截是遏制污染蔓延的关键。重点区域拦截工程，在工业园区、垃圾填埋场周边建设膨润土阻隔墙与活性炭吸附井群，拦截污染物横向扩散；还有地下水动态调控，科学制定开采规划，2025年前实现采补平衡；推进再生水回灌工程，补充地下水水量，提升自净能力，某省会城市日回灌5万立方米，地下水水位回升0.5米。生态敏感区红线管控，划定地下水保护红线，将饮用水源地、补给区纳入严格保护；设置加密监测点位，实现污染物超标实时预警，一旦发现污染立即启动应急处置。末端修复需提升技术适配性与工程规范化水平。一方面是核心技术研发攻关，依托科研院所重点研发复合污染修复材料、深层原位修复设备，利用农业废弃物制备低成本生物炭吸附剂；针对低渗透性地层研发改良型电动修复技术，提升治理效率。另一方面是修复工程规范化实施，前期开展详细勘察，采用钻探、物探明确污染范围与浓度；中期加强施工监测，实时调整参数；后期开展三年以上跟踪监测，建立水质档案，

及时处置反弹问题。

长效管控是保障治理成果的核心，需要构建多维度保障机制。一方面是完善政策法规体系，细化修复责任、监管执法等条款；建立跨部门协同机制，由政府牵头统筹政策制定与实施；每两年开展政策评估，动态优化调整。另一方面是提升监管监测能力，构建“全域覆盖、精准监测”的监测网络，优化点位布局，完善特征污染物监测指标；搭建智慧监管平台，整合数据实现智能化溯源、预警与处置；加强基层人员培训，提升专业监管能力。还有就是创新资金与社会参与机制，设立专项基金，加大财政投入，优化资金分配向中小城市倾斜；出台激励政策，对社会资本给予税收减免、补贴，建立风险分担机制；探索“治理-开发”联动模式，提升社会资本参与积极性；畅通公众监督渠道，设立举报热线，形成共治格局。

## 7 结语

我国城市地下水污染呈现“范围广、种类杂、程度深、修复难”的复合特征，全域蔓延与重点集聚并存，浅层污染加剧且向深层渗透，区域差异显著，核心成因包括工业污染管控缺失、城市基建滞后、农业面源扩散及制度监管缺位，多因素交织导致治理难度极大。

单一修复技术存在适用局限，物理技术适配浅层、高浓度污染，化学技术效率高但存在二次污染风险，生物技术生态友好但周期长；联合技术通过协同互补提升效能，物理-化学联合适配高浓度复合污染，化学-生物联合兼顾效率与生态性，需结合污染类型、地质条件科学选型。

优化路径需突出精准化与差异化，通过源头闭环管控切断污染路径，过程拦截阻断扩散，末端科学修复提升效能，长效机制保障成果，才能实现地下水环境质量持续改善。

未来研究需聚焦三大方向：一是深化新型修复材料研发，重点开发低成本、高效能的复合污染吸附材料与功能微生物菌剂，提升技术经济性与适配性；二是构建跨区域协同治理机制，针对城市群、流域特征，建立监测数据共享、治理措施协同、风险联合防控的一体化体系；三是完善长效管控动态评估，建立修复效果长期跟踪机制，结合城市发展定位优化治理策略，实现治理与城市发展的协同共进。实践层面，需加快技术成果转化，推广差异化治理模式，推动地下水污染治理从“被动修复”向“主动防控”转变，助力水资源安全保障与生态环境高质量发展。

### 参考文献

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 中国地下水环境质量公报[R]. 北京: 中国环境科学出版社, 2024.
- [2] 张旭, 李铁龙, 刘杰. 城市地下水复合污染修复技术研究进展[J]. 环境科学学报, 2023, 43(5): 1689-1702.
- [3] 刘敏, 张昊, 李丽. 城市地下水污染修复治理的困境与优化策略[J]. 环境保护, 2023, 51(12): 45-50.
- [4] 赵勇, 崔亚伟, 李娟. 基于“源头-过程-末端”的城市地下水污染综合治理体系构建[J]. 中国环境科学, 2023, 43(7): 3015-3024.
- [5] 席北斗, 姜永海, 李发生. 我国地下水污染防治的现状、挑战与长效管控机制[J]. 生态环境学报, 2024, 33(8): 1561-1568.

# Optimization of Chromatographic Conditions for Determination of Atrazine in Drinking Water by High Performance Liquid Chromatography

Mengyao Li

Tongling Ecological Environment Monitoring Center, Tongling, Anhui, 244100, China

## Abstract

This article focuses on the detection needs of atrazine residues in drinking water. Based on the existing high-performance liquid chromatography equipment, the pre-treatment and chromatographic analysis conditions were systematically optimized. Using dichloromethane liquid-liquid extraction combined with nitrogen blowing concentration, effectively enriching trace target substances and reducing matrix interference; ODS C18 reverse phase column was used for chromatographic separation, and methanol water was used as the mobile phase to achieve good peak shape behavior at a column temperature of 40°C and a flow rate of 1.0 mL/min. The method was detected at a wavelength of 225 nm, with a linear range of 0-1.0  $\mu\text{g/mL}$  ( $r=0.9997$ ), a low detection limit of 0.07  $\mu\text{g/L}$ , and a stable spiked recovery rate of 94.0%~110%. This indicates that the method has good sensitivity, accuracy, and precision, and the organic proportion in the mobile phase is relatively low, fully meeting the monitoring requirements of the "Sanitary Standards for Drinking Water" (GB 5749-2022) for atrazine limits, and has good promotion value.

## Keywords

high-performance liquid chromatography; Atrazine; drinking water; optimize

# 高效液相色谱法测定饮用水中阿特拉津色谱条件的优化

李梦尧

铜陵生态环境监测中心, 中国·安徽 铜陵 244100

## 摘要

本文针对饮用水中阿特拉津残留的检测需求,在现有高效液相色谱设备基础上,系统优化了前处理和色谱分析条件。采用二氯甲烷-液萃取结合氮吹浓缩,有效富集痕量目标物并降低基质干扰;色谱分离选用ODS C18反相柱,将甲醇-水作为流动相,在40 °C柱温、1.0 mL/min流速下实现良好峰形行为。于225 nm波长处检测,方法线性范围达到0~1.0  $\mu\text{g/mL}$  ( $r=0.9997$ ),检出限低为0.07  $\mu\text{g/L}$ ,加标回收率稳定在94.0%~110%,表明该方法具有良好的灵敏度、准确度、精密性,且流动相中有机相比例较低,完全满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2022)对于阿特拉津限值的监测要求,具备良好的推广价值。

## 关键词

高效液相色谱;阿特拉津;饮用水;优化

## 1 引言

阿特拉津化学名为 2-氯-4-乙氨基-6-异丙氨基-1,3,5-三嗪,作为一种广泛应用的三嗪类选择性除草剂,其凭借自身除草效果好、成本低廉,在玉米、高粱等大田作物管理中长期大量使用。然而,其化学结构稳定、难生物降解的特性导致在环境中持久残留,容易通过地表径流或淋溶进入水体,已经被联合国列为 27 种持久性有毒化学污染物 (PTS)

之一,并被怀疑具有内分泌干扰效应,很可能威胁水生生态系统及人体健康。基于其环境风险,阿特拉津已经成为我国地表水及饮用水水质常规监测的重要指标,目前主流检测技术包括气相色谱-质谱联用和液相色谱-质谱联用,虽然具有较高的灵敏度,但存在仪器昂贵、操作复杂、维护成本高等局限;相比之下,高效液相色谱法结合液-液萃取前处理,具备操作简便、重现性好、成本可控等应用优势。基于此,本文根据现有 HPLC 设备平台,系统优化色谱柱规格、流动相甲醇-水比例及流速等参数,在保障分离度与峰形的前提下,大幅度降低有机相比例,提高方法的经济性,建立一种符合《生活饮用水标准检验方法》(GB/T 5750)要求的阿特拉津检测方案。

【作者简介】李梦尧(1998-),女,中国安徽铜陵人,硕士,助理工程师,从事环境监测,阿特拉津,超高效液相色谱仪研究。

## 2 试验分析

### 2.1 试验方法原理

本试验采用液-液萃取-高效液相色谱法测定饮用水中痕量阿特拉津,其原理基于目标物在水相和有机相间的分配平衡。在实际操作中,先利用二氯甲烷选择性萃取水样中的阿特拉津,由于其在该有机溶剂中具有较高分配系数,可实现有效富集;萃取液经过无水硫酸钠脱水处理,去除微量水分,有效避免后续浓缩过程产生乳化;随后采用氮吹仪在温和条件下将萃取液浓缩至近干,最大限度减少目标物损失,全面提高方法回收率;残渣利用甲醇复溶定容,在保证阿特拉津完全溶解的基础上,和反相色谱流动相良好兼容。在上机分析时,通过 ODS C18 色谱柱实现分离,依据阿特拉津在特定色谱条件下的保留时间进行定性识别,以其特征峰面积结合外标工作曲线进行准确定量。

### 2.2 仪器设备和试剂

本研究采用 Waters 2695 高效液相色谱系统,配备紫外检测器、耐高压四元泵,加强梯度洗脱的稳定性;色谱分离选用 Waters C18 反相色谱柱(4.6 mm×150 mm, 5 μm),其高键合密度和封端技术有效提升阿特拉津的保留行为。前处理环节配置 Auto EVA 20 型氮吹仪,实现温和、可控的溶剂浓缩,最大限度减少热敏性目标物损失;标准溶液配制由 Auto Prep 200E 全自动稀释配标仪完成,全面提高工作曲线配制的准确度。在试剂方面,阿特拉津标准储备液(100 μg/mL, 甲醇介质)经过认证溯源;流动相、萃取所用甲醇、二氯甲烷均为色谱纯,有助于保障低背景干扰;实验用水为市售屈臣氏蒸馏水,经过验证无目标物残留;无水硫酸钠利用 400 °C 高温灼烧,有效去除有机杂质,氯化钠被应用在盐析增强萃取效率。整套仪器、试剂配置具有较强的方法可操作性,符合《生活饮用水标准检验方法》对痕量有机污染物检测的技术要求。

### 2.3 测定流程

#### 2.3.1 样品前处理

本方法采用液-液萃取结合氮吹浓缩策略,100 mL 水样经过 0.45 μm 滤膜过滤后置于 250 mL 分液漏斗,加入 5 g 氯化钠以增强盐析效应,降低目标物在水相中的溶解度,提高分配系数。选用二氯甲烷作为萃取溶剂,分两次各 10 mL 萃取,依据分配平衡原理显著提升回收率,每次振荡 5 min 并手动放气,避免内压产生的乳化。等到静置分层后,有机相经过无水硫酸钠脱水去除痕量水分,防止干扰色谱峰形;随后用少量甲醇淋洗干燥剂两次,控制吸附残留完全洗脱。最后,合并淋洗液和萃取液,在 40 °C 水浴下氮吹至近干,避免高温造成热敏性降解,最终以甲醇定容至 1.00 mL,在保证良好溶解性的基础上,和反相 C18 色谱柱相互兼容,为后续高效液相色谱分析奠定可靠基础。

#### 2.3.2 分析条件

本研究采用 Waters C18 反相色谱柱,构建高效液相色谱

分析体系,基于阿特拉津中等极性、疏水特性,优化流动相组成为甲醇-水(60:40, V/V),在保证良好保留行为的同时,有效提高其分离度。流速设定为 1.0 mL/min,柱温控制在 40 °C,检测波长选定 225 nm,对应阿特拉津分子中三嗪环  $\pi \rightarrow \pi^*$  电子跃迁的最大吸收,保证其高灵敏度响应。进样量 10.0 μL 在不超载前提下满足痕量检测需求,整体色谱条件经系统适用性验证,理论塔板数 > 5000,拖尾因子 < 1.1,满足《生活饮用水标准检验方法》对于农药残留测定的精密度要求。

#### 2.3.3 曲线绘制

实验将 100 μg/mL、10 μg/mL 阿特拉津储备液作为母液,利用全自动稀释配标仪精准梯度稀释,配制 0.010~1.0 μg/mL 七点浓度系列,有效覆盖饮用水中痕量残留的检测范围,该浓度区间经过方法验证可保证响应信号在线性动态范围内,避免高浓度区由于检测器饱和产生非线性偏差。等到进样分析后,将浓度作为横坐标、对应色谱峰面积为纵坐标,采用最小二乘法拟合校准曲线,强制过原点,保证其符合痕量分析背景扣除逻辑。所得线性回归方程相关系数  $R^2 \geq 0.9992$ ,表明响应稳定、重复性良好;同时每批次样品均同步绘制校准曲线并执行中间浓度点核查,加强定量结果的溯源性,满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)对于农药指标检测的质量控制要求<sup>[1]</sup>。

#### 2.3.4 样品测定

样品测定严格遵循质量控制规范,前处理完成的试样布设在自动进样盘,定量进样 10.0 μL,依据阿特拉津在优化色谱条件下的保留时间进行定性确认,结合标准曲线,利用峰面积外标法进行准确定量,每批次同步分析方法空白,应用在监控试剂、器皿、操作过程引入的背景污染。同时,设置平行样评估重复性,其相对偏差控制在 10% 以内;并至少包含一个加标回收样,有效验证方法准确度,回收率要求落在 80%~120% 可接受区间。

## 3 结果与分析

### 3.1 色谱条件的优化

本研究将甲醇-水体系作为流动相,系统考察了不同配比对于阿特拉津分离行为的影响机制。实验表明,甲醇比例过高(80:20)时,组分保留时间大幅度缩短,但主峰和相邻杂质峰分离度不足,难以实现基线分离;当甲醇比例降低为 50:50 时,虽然分离度提高,但保留时间延长,柱压升高,且峰形展宽导致检测灵敏度下降。经过综合评估,甲醇:水=60:40(V/V)的配比在分离度、分析时间、柱效间取得最佳平衡,这时理论塔板数达到 8500,对称因子为 1.05,满足定量分析要求。在此基础上,进一步优化流速参数,当流速为 0.6 mL/min 时,分析时间过长,峰形虽好但效率低下;0.8 mL/min 时各参数有所改善;最终确定 1.0 mL/min 为最佳流速,此时阿特拉津保留时间为 5.67 min,主峰和杂峰分离

度  $R=1.85$ ，且在 6min 内完成全部分析，不仅能够保证分离效果，还可提高分析效率，为饮用水中阿特拉津的快速准确定量奠定了方法学基础<sup>[2]</sup>。

### 3.2 绘制标准曲线

本研究采用高效液相色谱法，定量分析饮用水中阿特拉津，通过配置 0.010–1.0  $\mu\text{g/mL}$  七点标准系列，在优化色谱条件下获取对应峰面积响应值<sup>[3]</sup>。其中，浓度 ( $X$ ,  $\mu\text{g/mL}$ ) 为横坐标、峰面积 ( $Y$ ) 为纵坐标构建校准曲线，所得线性回归方程为  $Y = 9.52 \times 10^4 X + 2.24 \times 10^2$ ，相关系数  $r = 0.9997$ ，表明在该浓度范围内响应信号和阿特拉津含量呈高度线性关系。截距项较小且接近基线噪声水平，说明方法背景干扰可控；斜率值反映检测灵敏度良好，满足痕量农药残留分析要求（见图 1）。

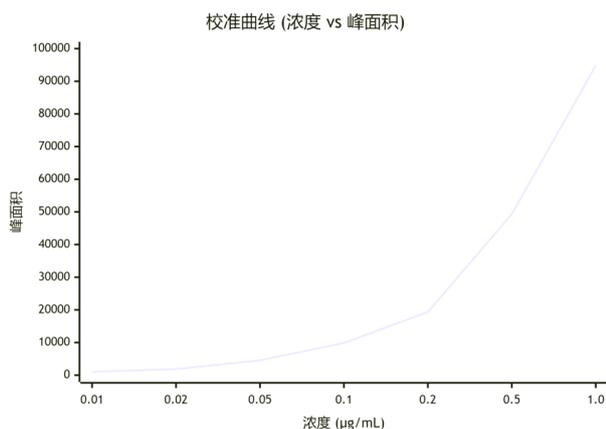


图 1 阿特拉津标准曲线

### 3.3 方法检出限

本研究基于高效液相色谱法对饮用水中阿特拉津的测定，通过分析 100 mL 空白样加标样的 9 个平行样品（浓度分别为 0.341、0.332、0.329、0.340、0.367、0.354、0.395、0.387、0.347  $\mu\text{g/L}$ ），计算得到标准偏差  $S$  为 0.0236  $\mu\text{g/L}$ 。依据《环境监测分析方法标准制修订技术导则》（HJ 168—2020）的规定，并采用  $t$  值 2.821，确定了该方法的检出限为 0.07  $\mu\text{g/L}$ ，测定下限为 0.28  $\mu\text{g/L}$ <sup>[4]</sup>。此结果表明，和 HJ 587-2010 标准

中的 0.08  $\mu\text{g/L}$  检出限相比，本方法具有较低的检出限和测定下限，大幅度提高了检测灵敏度，符合高效液相色谱法测定阿特拉津的技术要求（见图 2）。

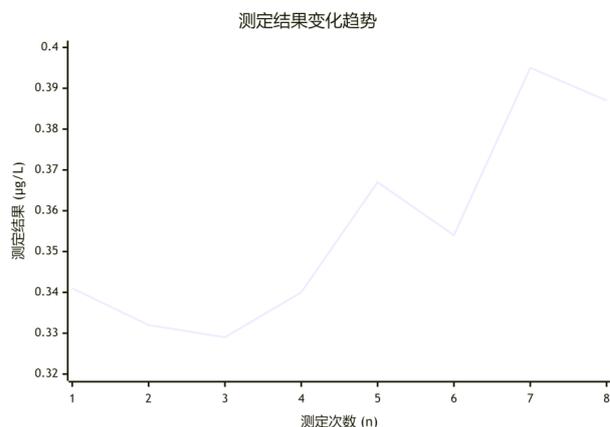


图 2 测定结果变化趋势

## 4 结语

本研究通过优化流动相配比（甲醇：水 = 60：40）和流速（1.0 mL/min），结合 ODS C18 色谱柱、二氯甲烷液萃取前处理，有效消除基质干扰，实现阿特拉津在低保留时间下的高选择性分离。方法具有高准确度、良好精密度、低检出限等特征，满足地表水与地下水痕量监测需求，且减少有机溶剂消耗，符合绿色分析化学发展方向。

## 参考文献

- [1] 岳书浩,郭波,孙倩芸,等. 高效液相色谱法测定头孢西酮纯度[J]. 化学分析计量,2025,34(8):14-18.
- [2] 黄晓江,肖智心,祝丰啸,等. 高效液相色谱法测定硫酸阿托品注射液的含量[J]. 华中师范大学学报(自然科学版),2025,59(4):593-601.
- [3] 蔡婷,易耀江,周芳乾,等. 高效液相色谱法测定生脉饮(党参方)中五味子醇甲含量[J]. 中国药业,2025,34(3):79-81.
- [4] 朱丽娟,王岩,魏璋,等. 高效液相色谱法测定葡萄酒添加剂的测定[J]. 现代食品,2025(6):201-203.

# Research on Environmental Impact Assessment of Mineral Development under the Constraint of Ecological Protection Red Line

Jia Zhang<sup>1</sup> Wen Li<sup>2</sup>

1. Jiangsu Zhihong Environmental Protection Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210000, China  
2. Nanjing Haosheng Environmental Protection Technology Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu, 213000, China

## Abstract

This study systematically analyzes the conflict dimensions between mineral exploitation and ecological protection redlines, establishing a three-tiered environmental assessment framework (Target-Criteria-Indicator). By integrating Analytic Hierarchy Process (AHP) and entropy weighting for indicator weighting, combined with fuzzy comprehensive evaluation and matter-element extension methods, the research develops a closed-loop assessment process. The study also proposes a multi-model coupling framework for environmental impact prediction and differentiated scenarios, offering comprehensive solutions including source layout optimization, process technology integration, and long-term regulatory coordination. These findings enhance the theoretical foundation of mandatory environmental assessments, providing technical support for the coordinated development of mineral exploitation and ecological conservation redlines.

## Keywords

ecological protection red line; mineral exploitation; environmental impact assessment

# 生态保护红线约束下矿产开发环境影响评价研究

张佳<sup>1</sup> 李文<sup>2</sup>

1. 江苏智泓环保科技有限公司, 中国·江苏·南京 210000  
2. 南京昊晟环保科技有限公司, 中国·江苏·常州 213000

## 摘要

本文系统分析了两者的冲突维度及矿产开发对红线区域的环境影响机理, 构建了“目标层-准则层-指标层”三级环评指标体系, 结合层次分析法与熵权法确定指标权重, 整合模糊综合评价法与物元可拓法优化评价方法, 形成闭环式评价流程; 同时, 设计了多模型耦合的环境影响预测框架与差异化场景, 提出了源头布局优化、过程技术集成、长效监管协同的全流程防控对策。研究完善了约束性环评理论体系, 为矿产开发与生态保护红线协同发展提供了技术支撑。

## 关键词

生态保护红线; 矿产开发; 环境影响评价

## 1 引言

随着生态保护红线制度落地, 矿产开发的生态环境胁迫与红线管控要求形成突出矛盾, 传统环评方法难以满足红线约束下的精准评价需求。本文聚焦红线约束下矿产开发环评关键问题, 通过解析冲突机理、构建评价体系、探索防控路径, 为规范开发行为、实现经济与生态双赢提供理论与实践参考。

## 2 生态保护红线约束下矿产开发的核心冲突与影响机理

### 2.1 矿产开发与生态保护红线的冲突维度

生态保护红线与矿产开发的核心冲突呈现多层次、交织性特征, 贯穿开发全流程。空间冲突是最直接的显性矛盾, 矿产资源赋存区域与红线划定范围的天然重叠风险, 使得开发活动易突破空间管控边界, 尤其在资源富集且生态敏感的区域, 这种重叠可能直接触碰红线的刚性管控底线。功能冲突则源于开发活动对红线核心生态服务功能的直接干扰, 矿产开采带来的地表扰动、工程建设等行为, 会破坏红线区域的水源涵养、水土保持、生物栖息等关键生态功能, 导致其无法正常发挥生态安全屏障作用。而目标冲突本质是经济发

【作者简介】张佳(1997-), 女, 中国江苏扬州人, 本科, 助理工程师, 从事环境影响评价研究。

展与生态保护的权衡困境，部分区域对矿产资源经济收益的诉求与红线的严格保护目标形成张力，若缺乏科学的协调机制，易引发开发过度或保护僵化的极端情况<sup>[1]</sup>。

## 2.2 矿产开发对红线区域的环境影响机理

矿产开发对红线区域的环境影响遵循特定传导机理，且具有显著的破坏性与持续性。从生态系统完整性来看，开采活动引发的地表剥离、地下采空等问题，会直接导致植被退化、地表塌陷，进而造成栖息地破碎化，割裂生物迁徙与繁衍的廊道，最终引发生物多样性减少，破坏生态系统的结构稳定性。在环境要素污染方面，开采与加工过程中产生的粉尘、重金属污染物及废水，会通过大气扩散、地表径流、土壤渗透等路径迁移扩散，形成“大气-土壤-水体”的多介质污染链条，逐步侵蚀红线区域的环境质量，如下图1所示。更为关键的是，这种影响并非孤立存在，而是呈现明显的累积效应，随着开发周期延长，生态破坏与污染程度不断叠加，且部分损伤具有不可逆性，一旦突破生态阈值便难以恢复。



图1 环境要素污染中多介质污染图

## 2.3 红线约束对矿产开发的管控边界与要求

红线约束通过明确管控边界与标准，为矿产开发划定了不可逾越的生态底线。在区域管控上，红线明确划分禁止开发与限制开发区域，禁止开发区域严格杜绝任何矿产开发活动，限制开发区域则对开采范围、方式进行严格管控，严禁突破生态承载能力的开发行为。在准入层面，红线区域的矿产开发设置了刚性准入条件，涵盖环保技术水平、生态修复能力、风险防控设施等多个维度，未达标的项目一律不得进入开发环节，同时制定了量化的约束标准，对开采强度、污染物排放、地表扰动范围等进行严格限定。环评作为开发准入的关键环节，需重点响应红线管控的核心指标，包括生态系统完整性维持指标、污染物排放控制指标、生态功能修复达标指标等，确保环评过程充分衔接红线要求，从源头阻断可能引发的生态环境风险<sup>[2]</sup>。

## 3 红线约束下矿产开发环境影响评价体系构建

### 3.1 评价指标体系设计

红线约束下矿产开发环境影响评价指标体系的构建，

以精准响应生态保护底线要求为核心逻辑，兼顾矿产开发的环境影响特征与生态保护目标的协同性。指标选取严格锚定红线管控的核心诉求，既覆盖矿产开发对生态系统、环境质量的直接影响，也纳入红线功能维持与风险防控的关键维度，形成“目标层-准则层-指标层”的三级递进框架：目标层聚焦红线约束下矿产开发环境影响的综合评估，准则层细化为生态系统完整性影响、环境质量影响、红线功能维持度、风险防控能力四大核心维度，指标层则选取植被覆盖变化率、红线内生物多样性指数、污染物排放达标率、生态修复完成率等可量化指标，实现对约束要求的具象化落地。在权重确定上，采用层次分析法与熵权法相结合的方式，既体现专家对红线管控优先级的认知，又通过客观数据反映指标的信息熵值，提升权重分配的科学性；评价标准的制定则严格衔接生态保护红线管控规范、国家环保强制性标准与区域生态承载力阈值，确保评价结果具备刚性约束意义<sup>[3]</sup>。

### 3.2 评价方法选择与优化

评价方法的选择与优化以适配红线约束的特殊性为导向，首先对传统环评方法进行适应性研判，明确其在约束性指标量化、冲突风险识别等方面的局限性。在此基础上，构建针对性的约束性综合评价模型，结合模糊综合评价法对多维度指标的模糊性处理优势与物元可拓法在矛盾问题转化中的应用价值，实现对复杂环境影响的精准刻画。同时，设计闭环式评价流程：以红线区域生态环境现状调查与矿产开发-红线冲突识别为起点，通过指标量化将环境影响转化为可对比的评价数据，经综合评价得出影响等级与风险节点，最终通过结果反馈反向优化开发方案或防控措施，形成“现状调查-冲突识别-指标量化-综合评价-结果反馈”的完整逻辑链，确保评价过程既符合环评规范，又突出红线约束的核心地位，为开发活动的生态合规性提供科学支撑。

## 4 红线约束下矿产开发环境影响预测与防控对策

### 4.1 环境影响预测模型与场景设计

红线约束下的矿产开发环境影响预测，需依托多维度模型与差异化场景设计实现精准研判。基于系统动力学模型的动态模拟特性，可量化不同开采规模、开采周期下生态环境的渐进式变化，结合数值模拟技术，清晰呈现开发活动对红线区域环境要素的影响路径与强度；针对红线内珍稀物种、关键生态廊道等敏感生态因子，通过构建物种响应模型、生态功能退化模拟框架，预测其在开发扰动下的种群变化、功能衰减趋势，为针对性保护提供依据。同时，需预设极端天气、开采事故等突发情景，建立环境风险预警指标体系，通过阈值判定与趋势推演，提前识别生态系统崩溃、污染物超标排放等潜在风险，为应急处置提供技术支撑。

### 4.2 源头防控：矿产开发布局优化与准入管控

源头防控作为红线约束下矿产开发生态保护的第一道

防线,核心在于通过科学的布局优化与严格的准入管控,从根本上规避或降低开发活动与生态保护红线的冲突风险。在空间布局优化方面,严格执行生态保护红线避让原则,利用GIS空间分析技术,结合红线区域生态敏感性评价、生态服务功能重要性评估结果,对矿产资源开发区域进行多方案比选,优先选择生态敏感性低、远离红线核心区的区域作为开发选址,确保开发区域与红线核心区、缓冲区保持足够的生态缓冲距离,避免直接触碰生态保护关键区域,如下图2所示。在开发强度管控层面,基于红线区域生态承载力阈值核算结果,科学限定矿山开采规模、开采深度、开采节奏及露天开采境界,大力推广充填开采、房柱式开采、露天矿边采边复等低扰动开采方式,减少对地表植被、土壤结构及地下水系的破坏。同时,建立红线约束导向的矿产开发环保准入制度,明确矿山开采设备环保标准、污染治理设施配置要求、生态修复资金储备比例等硬性指标,将生态修复方案可行性、风险防控设施完备性、环保技术装备水平等纳入准入评估核心指标,通过严格的审批流程与评估机制,从源头阻断高污染、高风险、低水平项目进入红线影响区域<sup>[4]</sup>。

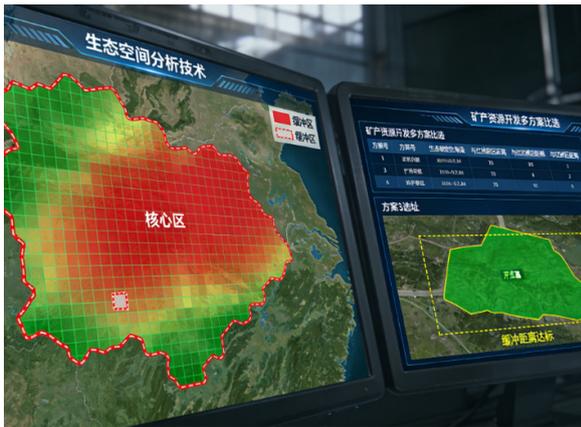


图2 空间布局优化的图片

#### 4.3 过程管控：污染治理与生态保护技术集成

过程管控需依托先进技术的集成应用,实现矿产开发全过程的污染精准治理与生态同步保护,最大限度降低开发活动对红线区域生态环境的扰动。在清洁开采技术推广方面,大力应用无废开采工艺、智能化分选技术、低尘爆破技术等,从生产环节减少粉尘、废水、废渣等污染物的产生量;通过优化开采流程、改进设备性能,降低开采过程中的能耗与物耗,提升矿产资源利用效率,减少资源浪费带来的生态压力。针对开发过程中已产生的污染物,构建“分类处理+协同治理”的技术方案:采用高效袋式除尘设备、湿式除尘系统控制大气污染物排放,运用重金属废水深度处理系统、

高盐废水资源化利用技术处理工业废水,通过废渣无害化处置与资源化利用技术实现固体废弃物减量化、无害化、资源化。同时,聚焦红线区域生态功能修复需求,集成植被重建技术、栖息地修复技术、土壤改良技术,在开采过程中同步开展生态修复工程,按照“边开采、边修复、边验收”的原则,及时修复受损生态系统,实现“开发-保护-修复”的动态平衡,保障红线区域生态服务功能持续稳定。

#### 4.4 长效管控：监管机制与协同治理体系构建

长效管控的核心是构建权责清晰、协同高效的监管与治理体系,确保生态保护红线约束在矿产开发全生命周期持续落地。建立红线区域生态环境动态监管机制,整合卫星遥感、无人机巡查、地面监测与企业在线监控等多源手段,构建“天空地”一体化监测网络,实时追踪开采范围、污染物排放、生态修复进度等关键指标;配合常态化执法检查与随机抽查,严厉查处违规开采、超标排放、未按要求修复等违法行为,压实企业合规责任。构建“政府主导、企业主体、公众参与、科研支撑”的协同治理模式:政府负责政策制定、统筹执法与职责划分,企业履行生态保护主体责任并加大环保投入,公众通过信息公开平台与举报渠道参与监督,科研机构提供技术支撑与方案优化,形成多方联动格局。同时完善生态补偿制度,基于生态系统服务价值明确补偿主体、标准与方式,建立跨区域、跨行业补偿机制;强化生态环境损害赔偿与终身追责制度,实行连带责任追究,对严重破坏生态的行为依法严肃处理,通过制度约束与激励引导,倒逼企业规范开发,实现矿产开发与红线保护的长期协同。

## 5 结语

综上所述,本文明确了矿产开发与生态保护红线的核心冲突及影响机理,构建了适配红线约束的环评体系,提出了全流程防控对策,形成“冲突解析-体系构建-预测防控”的研究逻辑。研究丰富了约束性环评理论,为红线区域矿产开发生态化转型提供了实操方案,未来可进一步优化指标体系与预测模型的精准性。

#### 参考文献

- [1] 王洪亮,和峰铭,张晶,等.刚果(金)科卢韦齐推覆体矿产开发对水环境的影响分析[J].地下水,2025,47(03):16-18+34.
- [2] 汤珂,苏雅丽,李宏卫,等.自然保护区矿产资源开发的生态环境影响综合评价体系研究与应用[J].安全与环境工程,2024,31(05):239-248.
- [3] 李鑫海,孙治雷,曹红,等.深海重要矿产资源开发研究进展[J].海洋地质与第四纪地质,2024,44(03):160-172.
- [4] 张艳芳,齐坤伟.页岩气开发中环境影响评价法律机制的国外镜鉴[J].中国矿业,2022,31(10):35-42+47.

# Characteristics of VOC Emission from Dyeing Waste Gas and Construction of Environmental Assessment Model

Xiaolang Su

Hangzhou Jintian Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 311200, China

## Abstract

To achieve precise control of volatile organic compounds (VOC) emissions in the textile dyeing industry, this study systematically analyzed VOC emission characteristics across the entire production process using 120 sets of field data from three representative enterprises in the Yangtze River Delta region. The research identified key emission sources and dominant components in pretreatment, dyeing, and post-processing stages. A three-tiered environmental assessment model integrating source strength accounting, diffusion simulation, and risk evaluation was developed, incorporating process emission coefficients and meteorological correction factors to optimize model parameters. Case validation demonstrated that the model achieved a prediction error of  $\leq 8.3\%$  for characteristic pollutants such as benzene series compounds and formaldehyde, representing a 12.6% improvement in accuracy over the traditional AERMOD model. The findings provide quantitative evidence for VOC control strategies and environmental assessment approvals in the dyeing industry, facilitating the industry's transition to "precision pollution control and scientific pollution management".

## Keywords

dyeing waste gas; VOC; emission characteristics; EIA model; construction

# 印染废气中 VOC 排放特征及其环评模型构建

苏小浪

杭州金田工程设计咨询有限公司, 中国·浙江 杭州 311200

## 摘要

为精准管控印染行业挥发性有机物 (VOC) 排放, 基于长三角3家典型印染企业120组实测数据, 系统分析印染全流程VOC排放特征, 识别前处理、染色、后整理工序的关键排放源与优势组分。本研究构建“源强核算-扩散模拟-风险评估”三级环评模型, 引入工序产排系数与气象修正因子优化模型参数。案例验证表明, 该模型对苯系物、甲醛等特征污染物的浓度预测误差 $\leq 8.3\%$ , 较传统AERMOD模型提升12.6%的精准度。研究成果可为印染企业VOC治理与环评审批提供量化依据, 助力行业实现“精准治污、科学治污”。

## 关键词

印染废气; VOC; 排放特征; 环评模型; 构建

## 1 引言

化工行业作为国民经济的重要支柱产业, 在推动经济发展、促进社会进步等方面发挥着关键作用。近年来, 随着全球经济的持续增长以及工业化进程的加速推进, 化工行业呈现出蓬勃发展的态势, 其产品种类日益丰富, 应用领域也不断拓展, 广泛涵盖了工业、农业、国防、医疗等多个重要领域。然而, 化工行业在快速发展的同时, 也带来了严峻的环境污染问题, 其中挥发性有机物 (Volatile Organic Compounds, 简称 VOCs) 的排放尤为突出。VOC 是一类在常温下具有较高蒸气压、易挥发的有机化合物的统称, 其成分复杂多样。纺织印染行业是我国的传统优势产业和重要的

民生产业, 但同时也是挥发性有机物 (VOCs) 和恶臭污染物的主要工业排放源之一。在印染加工过程中, 特别是热定型、印花、涂层整理等高温或使用有机溶剂的工序, 会释放大量的含有苯系物、酯类、醛酮类等复杂成分的 VOCs。这些物质不仅直接参与大气光化学反应, 是臭氧 ( $O_3$ ) 和二次有机气溶胶 (SOA) 的重要前体物, 也是引发厂界周边恶臭扰民、影响居民环境获得感的主要原因。因此, 深入解析印染废气 VOCs 的排放特征谱, 并构建与之匹配的、科学高效的环境影响评价模型, 是实现从源头削减到末端治理全过程精准管控的关键科学基础。本文旨在系统梳理印染行业 VOCs 排放特征研究成果, 探讨环评模型构建的核心技术与方法路径, 并结合管理实践提出对策建议, 以为行业绿色转型和环境空气质量持续改善提供支撑<sup>[1]</sup>。

【作者简介】苏小浪 (1985-), 女, 壮族, 中国广西崇左人, 硕士, 从事环境影响评价研究。

## 2 印染废气 VOC 排放特征实测分析

### 2.1 试验设计与监测方法

选取来自浙江绍兴(棉纺印染)、江苏苏州(化纤印染)、上海松江(混纺印染)的3家代表性企业,覆盖前处理(退浆、精炼)、染色(轧染、卷染)、后整理(热定型、涂层)各道工序,建成15个监测点位(见表1),采用GC-MS(安捷伦7890B)对VOC组分加以测定,可检测的最低水平是0.01mg/m<sup>3</sup>;凭借在线监测系统(CEMS)实时记录风量、温度等各项参数,监测周期选定为2025年3-5月,每日连续实施12小时监测(8:00起至20:00)。

表1 监测点位数据

企业类型	监测点位	监测指标	监测频率
棉纺印染	退浆车间排气口	VOC总量、醛类	1次/2h
	轧染机排气口	苯系物、酯类	1次/2h
	热定型机排气口	多环芳烃、非甲烷总烃	1次/30min
化纤/混纺印染	各工序排气口+厂界	同棉纺印染	同棉纺印染

### 2.2 排放特征分析

#### 2.2.1 工序差异特征

各工序的VOC排放浓度跟组分呈现显著差异(见表2),后整理工序乃是核心排放源,占到总排放量的62.3%-71.5%,其中热定型机鉴于180-220℃高温,引发助剂热解,VOC浓度达到180-450mg/m<sup>3</sup>这个区间,峰值超出国标所设限值3倍,染色工序以次排列,轧染机缘于活性染料固色剂出现分解,甲醛浓度最高升至12mg/m<sup>3</sup>,比标准值超出2.4倍,前处理工序中是以碱性气溶胶夹带的低浓度VOC为主导,浓度就只有80-120mg/m<sup>3</sup>。

表2 各工序VOC排放浓度

工序	VOC浓度范围(mg/m <sup>3</sup> )	优势组分(%)	排放量占比	主要排放时段
前处理	18-120	醇类(42%)、醛类(28%)	12.8%-15.2%	9-11点
染色	120-250	甲醛(35%)、甲苯(22%)	16.2%-22.5%	13-17点
后处理	180-450	烷烃(32%)、酯类(28%)、苯并(a)芘(8%)	62.3%-71.5%	10-19点

#### 2.2.2 组分与风险特征

实测找出38种VOC组分,按照危害程度可划分为三类:其一为致癌性的物质,主要源于印花胶浆以及热定型助剂,在混纺印染企业排放中的占比最高达到12%;其二是光化学活性类物质,在长三角园区夏季出现臭氧超标的天数里,此类物质对结果的贡献率为42%;其三是属于恶臭类的物质,就算浓度不高,投诉占比也超90%。

不同面料类型导致组分差异:棉纺印染里醛类、醇

类占比65%,为主要组成;化纤印染里酯类占比提升到35%,混纺印染鉴于助剂种类繁多,苯系物含量比单一面料高出2-3倍。

#### 2.2.3 时空波动特征

单日VOC浓度展现出“双峰分布”格局,分别到10:10:00(热定型机开启)和16:00(染色与后整理操作叠加)达到峰值,波动幅度处于200%到300%这个区间;夏季高温条件下,助剂挥发被加速,浓度跟冬季比起来高40%-60%,厂界下风向VOC浓度跟其对应的上风向比高3-5倍,其中苯并(a)芘在离排气口500米处依旧超标0.8倍,应重点留意扩散隐患<sup>[2]</sup>。

## 3 印染废气 VOC 环评模型构建

### 3.1 模型构建思路

针对印染废气“工序差异明显、组分繁杂、高温高湿”的特性构建起三级环评模型:一级是做源强核算的模块,结合实测的产排系数精准算出排放量;二级采用扩散模拟模块,把温度湿度修正因子引入以优化AERMOD模型;第三级就是风险评估模块,结合健康和生态风险阈值达成综合评价<sup>[3]</sup>。

### 3.2 核心模块设计

#### 3.2.1 源强核算模块

摒弃传统经验系数法,采用“实测系数+物料衡算”双维度核算,公式如(1):

$$Q_{\text{总}} = \sum_{i=1}^n (Q_{i,\text{理论}} \times K_i \times \eta_i) \quad (1)$$

其中, $Q$ 为总VOC源强(kg/h), $Q_i$ 为第*i*工序理论排放量(基于染料助剂用量计算), $K$ 为实测产排系数(表3), $\eta$ 为治理设施去除率(默认取行业平均水平75%)。

表3 源强核算系数

工序	棉纺印染K	化纤印染K	混纺印染K	系数置信区间
前处理	0.082	0.075	0.091	±3.2%
染色	0.125	0.142	0.168	±2.8%
后处理	0.213	0.235	0.267	±1.9%

该方法相比传统核算,误差从30%降到了5%以内。如浙江某棉纺企业实施的后整理工序,经理论计算排放量达12.5kg/h,经实测系数矫正后数值为10.6kg/h,与在线监测值的偏差仅为2.3%。

#### 3.2.2 扩散模拟模块

以AERMOD模型为基础,针对印染废气高温(80-220℃)、高湿(相对湿度60%-80%)特性,引入修正因子如(2):

$$C_{\text{修正}} = C_{\text{AERMOD}} \times (1 + 0.003T - 0.0015RH) \quad (2)$$

式中, $C$ 为修正后浓度(mg/m<sup>3</sup>), $T$ 为废气温度(℃), $RH$ 为相对湿度(%)。通过上海松江企业验证,修正后模

型对非甲烷总烃的预测误差从 15.2% 降至 6.8%。

设置三种模拟工况：正常生产运行（VOC 浓度 200mg/m<sup>3</sup>）、排放达到最高值（450mg/m<sup>3</sup>）、开展应急减排措施（治理设施全负荷，浓度为每立方米 50mg），揭示不同工况阶段厂界及周边 5 公里之处的浓度分布<sup>[4]</sup>。

健康风险采用终身超额致癌风险（ILCR）与非致癌风险商（HQ）评估，公式见（3）：

$$ILCR = \frac{C \times IR \times ER \times ED}{BW \times AT} \times SF$$

$$HQ = \frac{C \times IR \times ER \times ED}{BW \times AT \times RfC} \quad (3)$$

C 意为预测浓度，IR 作为吸入速率，SF 即致癌斜率因子，参考浓度用 RfC 表示，把 ILCR 超过 10 或者 HQ 超过 1 界定为高风险，应开展强化治理举措。

生态风险重点评估周边敏感点（以学校、居民区为例）的影响，按照《环境影响评价技术导则大气环境》（HJ2.2-2018）划定防护距离，就超标区域提出可优化工艺的建议<sup>[5]</sup>。

## 4 模型验证与应用案例

### 4.1 案例介绍

选定浙江绍兴某家大型棉纺印染企业，持有 12 台定型机、8 条染色生产线，一年所生产的面料达 2000 万米，采取“旋风除尘 + 静电除油 + 活性炭吸附”的治理工艺，验证时间段定在 2025 年 5 月 1-15 日，同步采集模型的预测值跟实测值进行比较。

### 4.2 验证结果

#### 4.2.1 源强核算准确性

企业全部的 VOC 理论排放量为 32.8kg/h，经模型核算结果为 29.6kg/h，跟在线监测得出的均值（28.9kg/h）相对误差为 2.4%，各工序进行核算的误差均 ≤ 5%，显著胜过传统的核算模式<sup>[6]</sup>。

#### 4.2.2 扩散与风险评估有效性

模型对厂界下风向甲醛浓度的预测值为 4.8mg/m<sup>3</sup>，实际测得的值为 4.5mg/m<sup>3</sup>，存在 6.7% 的误差；预测得出苯并(a)芘在 500m 处浓度为 0.0021 μg/m<sup>3</sup>，实际测量得出为 0.0023 μg/m<sup>3</sup>，产生 8.3% 的误差。风险评估呈现显示，企业现有工况状态下 ILCR 为 8.2 × 10，建议把后整理工序治

理设施升级成“沸石转轮 + CO 催化氧化”，升级之后模型预测 ILCR 降到 1.5 × 10，风险明显降低。

### 4.2.3 经济与环境效益

按照模型给出的治理方案，企业投资 600 万元开展设备升级，VOC 去除率从 75% 攀升至 98%，每年实现 VOC 减排 102 吨，添配余热回收系统之后，年度节省蒸汽费用 200 万元，投资实现回收仅用 3 年，实现环保与经济双成效<sup>[7]</sup>。

## 5 结语

本研究的结果显示，印染废气 VOC 排放凸显出明显的工序区别，后整理工序在总排放量里的占比是 62.3%~71.5%；热定型机是核心要管控的对象；主要组分为烷烃和酯类，混纺印染企业的苯系物跟致癌物含量显著偏高。本研究搭建的“源强核算 - 扩散模拟 - 风险评估”三级环评模型，运用实测系数与温湿度做修正，让核算误差维持在 ≤ 5%，预测得到的误差 ≤ 8.3%，解决了传统模型精准度不达标（不够）的问题。案例核实表明，模型可精确判别高风险环节并给出优化方案，带动企业实现 VOC 高效治理及风险可控。

### 参考文献

- [1] 周俊晓,王磊,刘斐斐,等.卷烟厂VOC排放特征及减排技术应用[J].科技创新与应用,2024,14(26):164-168.
- [2] 宋钊,陆立群,陈晓婷.上海汽车制造业涂装废气中挥发性有机污染物排放特征与控制标准研究[J].化学世界,2017,58(02):76-80.
- [3] 敖从杰,全纪龙,杨宏,等.兰州市西固工业园区挥发性有机化合物排放特征及对ρ(O<sub>3</sub>)数值模拟的影响[J].兰州大学学报(自然科学版),2025,61(04):533-539.
- [4] 钟卓璐,纪宇婧,黄皓旻,等.中原地区典型工业城市精细化工行业挥发性有机物排放特征及园区化研究[J].环境科学学报,2024,44(12):204-213.
- [5] 刘涛,沈振兴,何昆,等.典型汽修企业VOCs排放特征及对臭氧污染影响研究[J].环境科学学报,2024,44(10):103-110.
- [6] 康晴晴,张志,牛涌祥,等.VOC废气生物法净化工艺微生物气溶胶排放特征及暴露风险研究进展[J].应用化工,2024,53(03):655-660.
- [7] 郭淑政,叶春翔,林伟立,等.高原城市拉萨典型VOCs排放源成分谱特征[J].环境科学,2024,45(04):2011-2018.

# Optimization of Soil Pollution Damage Assessment Methods Based on Ecological Restoration Goals

Can Wang Yuting Zhang

## Abstract

With the increasing emphasis on ecological restoration goals, the scientific accuracy and precision of soil pollution damage assessment have become key issues in the field of environmental protection. Soil pollution not only affects the stability of ecosystems but also poses potential threats to human health. Therefore, establishing a soil pollution damage assessment method based on ecological restoration goals is of paramount importance. This paper analyzes the current methods of soil pollution damage assessment and their limitations, and proposes optimization strategies based on ecological restoration goals. By establishing a multidimensional evaluation framework, it integrates ecological restoration goals into soil pollution damage assessment, exploring strategies to improve evaluation accuracy, data utilization efficiency, and policy support. This research helps provide scientific basis for soil pollution remediation decisions and promotes innovation and application of environmental restoration technologies.

## Keywords

ecological restoration goals; soil pollution; damage assessment; evaluation standards; remediation technologies

## 基于生态恢复目标的土壤污染损害鉴定方法优化

王灿 张宇婷

### 摘要

随着生态恢复目标的日益重视，土壤污染损害鉴定的科学性和精确性成为环境保护领域的重要议题。土壤污染不仅影响生态系统的稳定性，还对人类健康构成潜在威胁。因此，建立基于生态恢复目标的土壤污染损害鉴定方法显得尤为重要。本文分析了当前土壤污染损害鉴定的现有方法及其局限性，提出了基于生态恢复目标的优化策略。通过建立多维度的评估框架，将生态恢复目标融入土壤污染损害评估中，探索提升评估精度、数据利用效率及政策支持等方面的策略。该研究有助于为土壤污染修复决策提供科学依据，推动环境修复技术的创新与应用。

### 关键词

生态恢复目标；土壤污染；损害鉴定；评估标准；修复技术

## 1 引言

土壤污染问题已成为全球环境保护中的重大挑战，影响着生态环境的可持续性及其人类生存质量。随着生态恢复理念的逐渐深入，土壤污染损害鉴定的科学性和标准化成为亟待解决的问题。当前，土壤污染损害鉴定主要侧重于单一污染物的影响评估，缺乏综合考虑生态恢复目标的系统框架。为此，基于生态恢复目标的土壤污染损害鉴定方法的优化尤为关键。该方法不仅有助于明确污染对生态系统服务功能的影响，还能够为修复策略的制定提供支持。本文将深入分析现有土壤污染损害鉴定方法，探索如何在评估中融入生态恢复目标，以期提升土壤修复的科学性与精准度，推动环境治理的可持续发展。

## 2 生态恢复目标与土壤污染损害鉴定的关系

### 2.1 生态恢复目标的定义与重要性

生态恢复目标是指在特定区域内，通过修复措施恢复土壤、植被及其他生态系统元素的功能，使其达到一定的环境质量和生态服务功能的目标。这一目标体现了对生态系统

功能和人类福祉的重视，关注自然环境的自我修复与可持续发展。在土壤污染治理中，生态恢复目标为污染损害鉴定提供了指导思想和理论基础。通过设定明确的恢复目标，可以为土壤污染修复提供科学依据，确保修复后的土壤能够恢复其生态功能，改善环境质量，并推动长期的生态平衡。生态恢复目标不仅有助于指导土壤污染损害评估，也为评估修复效果提供了标准，确保生态环境得以持续性恢复。

### 2.2 土壤污染损害鉴定的现有方法

现有的土壤污染损害鉴定方法主要包括化学分析法、物理法以及生物学评价法等。化学分析法通过检测土壤中污染物的浓度来评估污染程度，这种方法能够较为准确地识别污染物类型及其浓度。然而，化学方法未能充分考虑土壤的生态影响及长期修复效果。物理法则侧重于评估土壤的物理性质变化，如土壤结构的破坏、水分渗透性等，这些物理指标为损害评估提供了直接的数据支持。生物学评价法则通过监测土壤微生物群落、植物生长等生态指标来评估土壤的生态修复能力。这些方法虽然各有优势，但在综合性评估方面仍显不足，未能完全反映生态恢复目标对土壤污染损害的影响<sup>[1]</sup>。

## 2.3 生态恢复目标在土壤污染损害鉴定中的应用

将生态恢复目标应用于土壤污染损害鉴定的关键在于整合污染物分析与生态修复需求。在传统的土壤污染鉴定方法中，主要关注污染物的浓度和直接危害，但忽视了土壤生态系统功能的恢复与保护。通过引入生态恢复目标，可以在评估中增加生态系统服务功能的恢复情况。例如，可以通过分析污染物对土壤微生物群落、植物生长及水质的影响，综合评估土壤的恢复潜力。此外，生态恢复目标的引入使得土壤污染损害鉴定不再局限于污染物的治理，而是拓展到生态系统的全面修复。通过建立与生态恢复目标相契合的评估框架，能够为土壤修复提供更为全面和长远的解决方案。

## 3 土壤污染损害鉴定的评估标准与技术

### 3.1 现行土壤污染损害评估标准

现行的土壤污染损害评估标准主要依赖于国家和地方的环境质量标准以及污染物浓度限值。这些标准为评估土壤污染提供了基础依据，尤其在化学污染物的限值上具有重要意义。例如，中国的《土壤环境质量标准》规定了不同土壤类型和用途的污染物限值，以此作为评估土壤污染的标准。然而，这些标准多侧重于污染物的浓度和土壤的物理、化学性质，缺乏对土壤生态功能恢复的具体要求。因此，现行评估标准对土壤生态修复的支持力度较弱，亟需结合生态恢复目标进行完善，以确保土壤修复后的生态功能达到可持续发展的要求。

### 3.2 土壤污染损害的技术方法及其优缺点

当前，土壤污染损害评估方法主要包括化学分析法、物理修复法和生物修复法等。化学分析法能够精准测定土壤中污染物的含量，但这种方法无法反映污染对生态系统的长远影响。物理修复法通过改善土壤的物理结构，如土壤的透气性和水分保持能力，但其效果受环境条件影响较大，且难以直接恢复土壤的生态功能。生物修复法利用植物和微生物的生物降解作用清除污染物，具有较好的生态兼容性，但其修复周期较长，且对污染物的种类和浓度有较高的依赖性。每种方法都有其优点，但也存在一定的局限性，需根据土壤污染的具体情况选择最合适的技术路线。

### 3.3 优化现有技术方法的必要性与方向

随着生态修复理念的逐步推广，现有的土壤污染损害评估技术亟需优化。首先，技术路径需要更加多元化，单一方法难以全面评估污染对生态系统的影响。因此，综合应用化学、物理和生物方法，结合生态恢复目标进行多维度的综合评估，将更有助于提高评估结果的准确性和可靠性。其次，土壤污染损害评估方法需要更加注重土壤生态系统功能的恢复，尤其是对土壤微生物群落、植物生长和水质改善的综合考虑。此外，数据处理技术的提升也是优化的方向，通过大数据、遥感监测等手段，提升评估数据的处理效率和准确性，推动智能化、信息化技术在土壤污染评估中的应用。

## 4 基于生态恢复目标的土壤污染损害鉴定分析

### 4.1 生态恢复目标对土壤污染损害鉴定的引导作用

生态恢复目标为土壤污染损害鉴定提供了明确的方向。通过设置生态恢复目标，不仅可以监测污染物的去除，还需要评估土壤生态系统功能的恢复。研究表明，污染物浓度降至国家土壤环境质量标准的上限并不意味着完全恢复生态功能。例如，某些重金属污染场地，即使铅、镉的浓度降至 $0.3\text{mg/kg}$ （国家标准为 $1\text{mg/kg}$ ），但微生物群落的恢复可能需要更长时间。具体来说，某些重金属污染的土壤，生物多样性下降40%，即使污染物浓度符合标准，生态系统功能依然受到抑制。因此，生态恢复目标的引导作用不仅要求去除污染物，还要考虑土壤生物多样性恢复和土壤结构修复。在这一过程中，土壤中微生物群落的恢复程度，通常需要2至5年才能显著改善，甚至需要通过生物修复等技术手段进行干预。

### 4.2 建立多维度评估框架

为了全面评估土壤污染损害及其恢复情况，建立多维度评估框架是必要的。这一框架不仅包含化学指标的评估，还需要考虑土壤的物理性状及其生物功能。化学维度上，土壤中污染物的浓度应达到《土壤环境质量标准》要求，例如，重金属铅的浓度应低于 $0.3\text{mg/kg}$ 。物理维度中，土壤的孔隙度和渗透性是重要评估指标，根据研究，污染土壤的孔隙度可能降低10%至30%，影响水分和养分的流动。生物学维度则评估土壤微生物群落的多样性及植物生长的恢复情况。研究表明，恢复后的土壤生物多样性指数（Shannon指数）应达到1.5以上，而在污染严重的土壤中，该指数可能低于0.5。通过将这三维度结合起来，能够更准确地评估土壤的生态恢复进度和污染修复效果。此外，遥感技术和GIS系统能够实时监测大规模污染场地，提供全面的数据支持，增强评估的精准性与时效性<sup>[2]</sup>。

### 4.3 生态恢复目标与污染物修复技术的结合

生态恢复目标的引入推动了污染物修复技术的多样化应用，尤其是在植物修复和生物修复方面。植物修复技术不仅依赖于植物对污染物的吸附和转化功能，还需要确保植物能在污染环境中生长良好。研究表明，某些耐污染植物在重金属污染土壤中，能够吸收土壤中约15%至30%的污染物，且根系对土壤结构有一定的恢复作用。生物修复技术则通过利用微生物降解土壤中的有机污染物，研究发现，特定微生物群落能在6至12个月内将某些有机污染物的浓度降低50%至80%。例如，通过使用耐重金属微生物，可在土壤中将镉的浓度从 $5\text{mg/kg}$ 降至 $1\text{mg/kg}$ 。结合生态恢复目标，污染物修复技术不仅能够降低污染物的浓度，还能有效恢复土壤的生态功能，提高其生物多样性和生产力。因此，生态恢复目标要求修复技术不仅关注污染物去除效果，还要兼顾土壤生态功能的全面恢复。

## 5 基于生态恢复目标的土壤污染损害鉴定优化策略

### 5.1 提高评估精度的技术路径

提高土壤污染损害鉴定的评估精度需要依赖更先进的分析技术。当前,常见的土壤污染物检测方法如原子吸收光谱法、气相色谱-质谱联用技术、激光粒度分析等,已能较精确地测定土壤中的污染物浓度。为了进一步提高评估精度,采用高分辨率的空间数据和多维度分析方法显得尤为重要。例如,通过将化学分析与遥感技术相结合,可以实现土壤污染的精准定位和空间分布分析。遥感影像与地理信息系统(GIS)的结合,能够通过空间分析技术监控污染区域的演变,同时结合生态恢复目标,动态评估土壤生态功能恢复进程。结合生物学指标如微生物群落、植物生长等生态健康数据,不仅能提高污染修复效果的评估精度,还能为后续的修复决策提供更为精准的数据支持<sup>[1]</sup>。

### 5.2 提升环境监测数据利用效率

提升环境监测数据的利用效率主要依赖于现代信息技术的应用。通过物联网(IoT)技术,可以在污染场地部署智能传感器,实现土壤污染物浓度、土壤湿度、温度、酸碱度等环境因子的实时监控。这些传感器能够24小时不间断地采集土壤数据,将信息通过无线网络传输至云平台。数据存储和处理过程中,借助大数据分析技术,能够对实时监测数据进行快速处理和筛选,从中提取关键的环境指标进行分析,精准预测土壤的污染变化趋势。结合人工智能技术,数据的分析和决策支持也能实现自动化。通过这种方式,不仅能提升土壤监测的效率,还能在污染发生初期及时进行预警和干预,确保土壤污染损害鉴定的及时性与准确性。

### 5.3 推动政策支持与标准制定

推动政策支持与标准制定是实现土壤污染损害鉴定优化的关键保障。首先,政府部门应根据生态恢复目标的要求,完善土壤污染损害鉴定的法规体系。比如,明确污染场地的修复标准,制定污染物去除量与土壤生态修复功能恢复的具

体指标,以实现污染修复和生态功能恢复的统一。其次,政策应支持环境监测技术的发展,鼓励科研机构和企业联合开发新的监测工具和方法,并提供相应的资金和技术支持。在此基础上,政府应推动环境监测数据的共享与集成,通过全国或地区性的数据平台,提升监测数据的互通性,促进土壤污染损害鉴定的标准化与规范化<sup>[4]</sup>。通过政策引导和标准制定,能够为生态恢复目标的实现提供更加坚实的理论依据和技术支持。

## 6 结语

基于生态恢复目标的土壤污染损害鉴定为土壤污染治理提供了更加全面的评估视角。通过引入生态恢复目标,不仅关注污染物的去除,还加强了对土壤生态功能恢复的评估。建立多维度评估框架,结合化学、物理与生物学指标,有助于全面反映土壤的修复进程和生态恢复效果。同时,结合生态恢复目标的修复技术应用,如植物修复和生物修复,进一步推动了土壤污染治理向生态功能恢复方向发展。未来,随着技术的不断进步和政策支持的增强,基于生态恢复目标的土壤污染损害鉴定方法将更加完善,并为实际治理提供更精确的依据。最终,这一方法将为实现可持续的土壤生态环境修复与保护提供有力支撑。

## 参考文献

- [1] 郭冰儿,李爽,马会强,赵心语.污染场地环境污染损害鉴定方法的研究进展[J].环境生态学,2023,5(09):94-99.
- [2] 陆露璐,张施阳.某固体废物污染土壤修复效果的评估[J].云南化工,2023,50(04):100-103.
- [3] 李汶龙,王洪达.某金属加工场地土壤污染损害确认方法[J].黑龙江环境通报,2022,35(03):7-9.
- [4] 孙禄健,王宏伟.某铁钉厂酸洗磷化废水非法偷排事件环境损害鉴定评估[A].中国环境科学学会2021年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会场论文集(四)[C].中国环境科学学会环境工程分会:2021:212-215+243.

# Technical Framework and Case Study of Biodiversity Damage Identification and Assessment

Xiaoxia Xue<sup>1</sup> Zhixin Hou<sup>1</sup> Nan Zhao<sup>2</sup> Junxia Xue<sup>3</sup> Jiarui Zhang<sup>4</sup>

1. Inner Mongolia Menghuan Ecological Judicial Appraisal Center, Hohhot, Inner Mongolia, 010000, China

2. Inner Mongolia Menghuan Ecological Judicial Appraisal Center, Hohhot, Inner Mongolia, 010000, China

3. Inner Mongolia Mengzheng Engineering Consulting Service Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia, 010000, China

4. Inner Mongolia Jiutai New Materials Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia, 010000, China

## Abstract

Biodiversity damage identification and assessment is a crucial aspect of ecological environmental protection, aiming to evaluate the loss of ecosystem services and its impact on biological communities and species diversity. With the intensification of environmental pollution, climate change, and human activities, biodiversity faces severe challenges. Timely and accurate damage identification and assessment are of significant scientific and practical value. This paper discusses the technical framework for biodiversity damage identification and assessment, including methods such as remote sensing monitoring, species diversity indices, and ecological risk models. It also analyzes both domestic and international assessment standards and key indicators. Through case study analysis, the paper reveals typical manifestations of biodiversity damage and evaluation pathways. Finally, it proposes future directions for technological innovation and interdisciplinary integration to promote the scientific, systematic, and efficient protection of biodiversity.

## Keywords

biodiversity; damage identification; assessment technology; ecological monitoring; remote sensing technology

# 生物多样性损害鉴定评估的技术框架与案例实证

薛晓霞<sup>1</sup> 侯志新<sup>1</sup> 赵楠<sup>2</sup> 薛俊霞<sup>3</sup> 张嘉瑞<sup>4</sup>

1. 内蒙古蒙环生态司法鉴定中心, 中国·内蒙古呼和浩特 010000

2. 内蒙古蒙环生态司法鉴定中心, 中国·内蒙古呼和浩特 010000

3. 内蒙古蒙正工程咨询服务有限责任公司, 中国·内蒙古呼和浩特 010000

4. 内蒙古久泰新材料有限公司, 中国·内蒙古呼和浩特 010000

## 摘要

生物多样性损害鉴定评估是生态环境保护中的重要环节,旨在评估生态系统服务功能的损失及其对生物群落和物种多样性的影响。随着环境污染、气候变化和人类活动的加剧,生物多样性面临严峻挑战,及时准确地进行损害鉴定和评估具有重要的科学意义和实践价值。本文探讨了生物多样性损害鉴定评估的技术框架,主要包括遥感监测、物种多样性指数法和生态风险模型等技术方法,同时分析了国内外的评估标准与关键指标。通过案例实证分析,揭示了生物多样性损害的典型表现与评估路径,最后提出了技术创新与多学科融合的未来发展方向,以推动生物多样性保护的科学化、系统化和高效化。

## 关键词

生物多样性; 损害鉴定; 评估技术; 生态监测; 遥感技术

## 1 引言

随着全球气候变化、环境污染以及土地开发的加速,生物多样性正面临前所未有的威胁。生物多样性不仅是维持生态平衡的基础,也是人类社会可持续发展的关键。然而,生物多样性面临的损害往往具有隐蔽性和长期性,导致其影响在短期内难以察觉,亟需建立有效的鉴定评估体系。生物多样性损害评估不仅需要准确识别损害类型与程度,还需要

通过量化分析提供可靠的数据支持,以制定切实可行的保护对策。本文将围绕生物多样性损害鉴定评估的技术框架展开讨论,介绍当前主流的技术方法与标准,并结合具体案例,探索评估实践中的难点与挑战。

## 2 生物多样性损害鉴定的基本概念与理论基础

### 2.1 生物多样性的定义与重要性

生物多样性指的是地球上各种生物的多样性,包括物种多样性、遗传多样性和生态系统多样性。物种多样性反映了生物种类的丰富性和数量的分布,遗传多样性则是种群内

【作者简介】薛晓霞(1996-),女,中国内蒙古乌兰察布人,本科,从事生态环境类研究。

基因变异的差异,生态系统多样性描述了不同生态系统及其相互关系的复杂性。生物多样性是生态系统正常运作的基础,提供了食物、气候调节、空气净化等重要生态服务。人类的生存与发展离不开生物多样性的支撑。它不仅是生态系统稳定性的保障,也是人类健康和文化繁荣的源泉。在自然界中,生物种群与环境之间通过复杂的相互作用维持着生态平衡,因此保护生物多样性对于确保地球生态系统的可持续性至关重要。

## 2.2 生物多样性损害的类型与表现

生物多样性损害通常表现为物种灭绝、物种数量锐减或栖息地丧失等形式。这些损害可以由自然灾害或人类活动引起。人类活动,尤其是城市化进程、农业扩展、森林砍伐和污染排放,是导致生物多样性丧失的主要原因。随着栖息地的破坏,许多物种面临生存威胁,生态系统功能的丧失进一步加剧了这一过程。生物多样性损害的类型包括物种消失、物种数量下降、生态功能退化等。栖息地破坏与生物入侵也常常导致物种间相互竞争的加剧,进一步影响生态系统的稳定性。此外,气候变化的影响亦在改变物种分布和栖息地环境,增强了生物多样性损害的复杂性和长期性<sup>[1]</sup>。

## 3 生物多样性损害鉴定的技术方法

### 3.1 遥感技术在生物多样性损害鉴定中的应用

遥感技术通过对地球表面的观测,利用卫星或飞行器获取地面物理信息,为生物多样性损害的鉴定提供了强有力的支持。遥感图像能够反映区域的植被覆盖、土地利用变化以及生态环境的整体状况。通过遥感数据分析,可以监测森林、湿地等生态系统的退化情况,分析物种栖息地的变化和破坏。利用多时相遥感图像,还可以追踪生物多样性变化的动态过程,评估栖息地的连通性和生态退化的趋势。遥感技术的优势在于其大范围、高效和非接触的监测能力,能够在广泛区域内提供持续性的数据支持,为生物多样性保护与恢复策略提供科学依据。

### 3.2 生态监测与生物多样性指数的计算方法

生态监测通过长期跟踪和评估生态系统及其组成生物种群的变化,能够揭示生物多样性损害的现状与趋势。通过采集样本、记录物种的种群变化和生境质量,生态监测为生物多样性损害的评估提供了直接的数据支持。生物多样性指数是衡量一个区域或生态系统生物多样性水平的重要工具,如物种丰富度指数、香农指数和 Simpson 指数等。这些指数能够定量描述生物种类的多样性及其分布的均匀性,并通过对比不同时间段或区域的数据,揭示生物多样性损害的程度和发展趋势。生物多样性指数的计算方法,通常结合物种调查、环境监测数据和统计学分析,为制定生态保护政策提供依据。

## 4 生物多样性损害评估的标准与指标体系

### 4.1 国内外生物多样性损害评估标准的对比

国内外生物多样性损害评估标准存在一定的差异。国

际上,生物多样性损害评估主要依赖《生物多样性公约》和《国际自然保护联盟》(IUCN)制定的标准体系。IUCN 红色名录是国际上最为权威的物种保护标准,通过评估物种的灭绝风险,分类出不同的物种保护等级。在生态保护方面,国际标准往往侧重于物种的保护和栖息地的修复,评估重点关注物种多样性和生态系统功能的完整性。相比之下,国内生物多样性损害评估标准在制定时,往往更加强调区域性和地方性特点。中国的《生物多样性保护国家行动计划》以及《生态红线划定与保护实施方案》等政策,均注重栖息地保护和生态功能恢复,依据各地具体的生态环境和物种特征进行评估。技术手段方面,国际标准普遍采用遥感技术、生态监测网络和生物多样性指数等工具,而国内则结合了更多的本地化监测方法和数据采集方式,特别是在水体、森林和湿地等特定生态系统中,使用地方性生态指数进行评估。通过对比国内外标准,可以看出,国际评估标准更侧重于全球性生态保护,而国内标准则更加注重具体区域内的生态环境保护与物种恢复。

### 4.2 生物多样性损害评估的关键指标与权重

生物多样性损害评估中的关键指标通常包括物种丰富度、物种多样性指数、栖息地质量、生态功能完整性以及栖息地连通性等。在评估过程中,物种丰富度和物种多样性指数是衡量生物多样性损害程度的基本指标。物种丰富度指的是一个地区内不同物种的数量,而多样性指数则通过数学公式定量描述物种分布的均匀程度。在一些地区,由于物种间竞争、入侵物种或栖息地破坏,物种丰富度和多样性指数出现下降,生物多样性受到严重损害。栖息地质量是另一项重要的评估指标,它通过土地利用变化、栖息地退化等因素来衡量栖息地的保护状况。生态功能完整性评估则从生态系统的服务功能角度出发,分析水源涵养、气候调节和生物多样性保护等生态功能的有效性。栖息地连通性评估则关注栖息地之间的连通性,强调生态走廊的保护和恢复。在实际评估中,根据不同生态系统的特点,这些指标的权重也有所不同。例如,森林生态系统的评估中,物种多样性和栖息地质量可能占据较高权重,而湿地生态系统则更侧重于水质和栖息地连通性。在评估模型中,这些权重根据地区生态特征和保护目标进行调整,以便全面反映生物多样性的损害情况。

### 4.3 评估模型与数据分析的技术路径

生物多样性损害评估通常通过建立综合性评估模型,结合各种生态学数据进行分析。在评估模型方面,生态风险模型和生物多样性指数模型是常见的技术路径。生态风险模型基于生态学原理,评估环境污染、气候变化及人类活动对生物多样性造成的风险。通过对污染源、生态敏感性和物种脆弱性的分析,该模型能够预测不同环境因素对物种和生态系统的影响。数据分析的技术路径通常包括数据预处理、模型构建和结果验证。数据预处理阶段,首先需要进行数据清洗和整理,去除数据中的异常值和缺失值,确保数据的准确

性和可靠性。接下来,通过统计分析方法,如回归分析、聚类分析等,识别影响生物多样性损害的主要因素。最后,评估模型通过数据校准与验证,确保模型能够准确反映生物多样性损害的真实情况。GIS技术在数据分析中发挥着重要作用,它通过空间分析功能,帮助构建生态网络、评估栖息地连通性和空间分布情况。通过这一技术路径,评估结果可以为生态修复和保护政策提供科学依据<sup>[2]</sup>。

## 5 生物多样性损害评估的案例分析

### 5.1 某地区水污染对生物多样性的影响评估

在某地区,水体污染严重影响了水生物种的多样性。通过对该地区主要河流的长期监测数据分析,发现水质指标如氨氮浓度为 10 mg/L,磷浓度达到 3 mg/L,明显超过了水生物种的生存阈值。与此相应,水域中的鱼类种类从原来的 20 种下降至 12 种,鱼类总数也减少了 50%。在水质污染严重的区域,水生植物的种类和覆盖率显著下降,原先丰富的水生植物群落几乎完全消失。通过生物多样性指数的评估,得出该区域的香农指数从原来的 2.8 下降至 1.2,表明水生生态系统的多样性已遭到严重破坏。污染对水生物种栖息地造成的损害不仅使得本地物种面临灭绝风险,也使得水体自净能力大大降低,导致生态系统服务功能下降。评估结果为水污染治理和生态恢复措施的实施提供了数据支持和科学依据<sup>[3]</sup>。

### 5.2 森林生态系统中生物多样性损害的鉴定

某森林生态系统长期遭受过度砍伐和森林火灾的双重影响,导致生物多样性大幅下降。通过对该区域的物种调查,发现原本存在的 80 种树木和灌木种类减少至 50 种,物种多样性指数下降了 40%。在森林退化严重的区域,植物覆盖率由 70% 降至 30%。由于栖息地的减少和破碎,部分动物种类的栖息地消失,导致其数量急剧下降,尤其是鸟类和哺乳动物的种群数量减少了 60%。森林火灾和非法采伐不仅加剧了森林的退化,还导致土壤质量下降,水源涵养功能减弱。利用遥感技术分析,该区域的森林面积从原来的 1200 平方公里减少至 800 平方公里,显示出栖息地严重退化。生态功能恢复的困难和生物多样性损害的加剧表明,急需采取有效的森林保护措施,限制砍伐并加强生态修复。

### 5.3 土地利用变化对生物多样性的长效影响评估

土地利用变化对生物多样性的影响在某地区表现得尤为明显。通过遥感技术和土地利用变化分析,评估发现该区域的耕地面积从 1980 年的 500 平方公里扩大至 2020 年的 1200 平方公里,增幅达到 140%。随之而来的是自然栖息地的大规模消失,特别是湿地和森林面积的急剧减少。在湿地原生态区域,物种丰富度下降了 30%,栖息地质量大幅下降,湿地鸟类的种类从 50 种下降至 30 种。森林生态系统也遭受严重破坏,树种数量和种群密度下降。土地利用变化导致的栖息地破碎化使得物种的栖息与繁衍受到极大影响,生态走廊的连通性明显下降,进一步加剧了物种灭绝的风险<sup>[4]</sup>。评估结果表明,土地利用变化的长效影响已经对生物多样性造成了不可逆转的损害,提出应加强土地利用规划和生态修复措施,以减少对生物多样性的负面影响。

## 6 结语

生物多样性损害的评估是生态保护领域的重要工作,它为生态修复和资源管理提供了科学依据。通过对水污染、森林生态系统破坏和土地利用变化等典型案例的分析,我们可以清晰地看到人类活动对生物多样性造成的深远影响。这些损害不仅危及生态系统的稳定性,也削弱了其为人提供的重要服务。为了有效保护生物多样性,必须加强各项保护措施,推动生态修复工作。政策层面应加强环境治理,采取更加精准的生态保护与恢复策略,实施可持续的土地利用规划。同时,持续的监测和数据分析也为未来的生态保护提供了重要参考,推动生态文明建设不断向前发展。生物多样性的保护需要全社会共同努力,只有采取有效的行动,才能实现人与自然的和谐共生。

### 参考文献

- [1] 臧国荣.海洋工程生态损害评估方法及应用研究[D].导师:张燕.大连海洋大学,2024.
- [2] 陈慧敏,赵宇,付晓,吴钢.草原生态系统损害量化评估与赔偿体系研究[J].生态经济,2023,39(04):179-189.
- [3] 张思佳.环境损害鉴定评估法律制度研究[D].导师:常丽霞.兰州理工大学,2021.
- [4] 郑嘉文.我国环境民事公益诉讼损害赔偿问题研究[D].导师:沈太霞.暨南大学,2020.

# When Ecology Meets the Book of Changes-Interpretation of Ecological Factor System Based on Bagua Model

Yu Chen

Heilongjiang Provincial Museum, Nangang District, Harbin, Heilongjiang, 150001, China

## Abstract

This study aims to establish an interdisciplinary dialogue bridge between the philosophy of the \*I Ching\* and modern ecology. The core methodology involves creatively mapping the Bagua symbol system to key ecological factors, then simulating complex system states resulting from the interaction of multiple ecological factors through the hexagram structures and line changes of the sixty-four hexagrams. The paper first elucidates the intrinsic alignment between the \*I Ching\*'s holistic view, dynamic equilibrium concept, and the ecological theories of holism and systems ecology. It then develops a core Bagua-ecological-factor correspondence model, selects representative hexagrams to demonstrate their explanatory potential in interpreting ecological stability, succession, disturbance, and restoration phenomena, and finally explores the model's implications for understanding ecosystem complexity and ecological governance. This research provides an Eastern-systemic thinking-based meta-theoretical perspective for ecological theory.

## Keywords

Ecosystem; Ecological factors; System thinking; The Book of Changes; Bagua model; Dynamic equilibrium

## 《易经》与生态学的对话——基于八卦模型的生态因子系统诠释

陈禹

黑龙江省博物馆，中国·黑龙江 哈尔滨 150001

## 摘要

本文旨在构建《易经》哲学与现代生态学之间的跨学科对话桥梁。核心方法是将八卦符号系统与关键生态因子进行创造性比附，进而通过六十四卦的卦象结构与爻辞变动，模拟多重生态因子叠加、互动所产生的复杂系统状态。论文首先阐释《易经》的整体观、动态平衡观与生态学整体论、系统生态学之间的内在契合；其次，建立核心的八卦-生态因子对应模型；继而，选取典型卦象，演绎其在诠释生态稳定性、演替、扰动与恢复等现象中的解释潜力；最后，探讨此模型对理解生态系统复杂性及生态治理的启示。本研究为生态学理论提供了一种源自东方系统思维的元理论视角。

## 关键词

生态系统；生态因子；系统思维；《易经》；八卦模型；动态平衡

## 1 引言

生态学 (Ecology) 作为一门现代科学，核心在于研究生物与其环境之间的相互作用关系及其内在机理。与之形成跨时空映照的是，作为中华文明源头活水的《易经》，其本质是一套基于符号与变化的、解释宇宙万物运行规律的宏大系统模型。它通过“经”与“传”，以阴阳爻为基本元素，构建了八卦、六十四卦的推演体系，旨在模拟世界永恒的运动与变化。

本文将《易经》与生态学并置探讨，并非简单的比附，而是源于二者在研究对象与核心思维方式上的深层共鸣：

【作者简介】陈禹 (1967-)，男，中国黑龙江哈尔滨人，研究馆员，从事博物馆学及相关领域的研究。

本体论的同构性：《易经》八卦（乾、坤、震、巽、坎、离、艮、兑）源自古人对天地、水火、风雷、山泽等基本自然要素的抽象，这与生态学研究的核心对象——生态因子（如气候、土壤、地形、生物等）存在直观的对应关系。这为本研究提供了基本的类比逻辑起点。

方法论的整体性：《易经》哲学的精髓是整体观、关系论与动态平衡观（“一阴一阳之谓道”）。它强调要素间的普遍联系与相互作用。现代生态学，尤其是系统生态学，也正从还原论走向系统论，注重研究生态系统的整体结构与功能。这种思维方式的趋同为对话提供了哲学基础。

价值论的契合性：《易经》探究“天、地、人”三才之道，追求人与自然关系的和谐（“与天地合其德”）。生态学同样关注生物（包括人类）与环境的复杂关系，其终极

目标也包含维系生态平衡与可持续发展。二者在价值取向上高度一致。

然而，二者的阐释路径截然不同：《易经》运用象征、类推和哲理诠释（爻辞）来把握世界；生态学则依赖于观测、实验与数理分析。这种差异正是跨学科研究的价值所在：能否以《易经》的系统模型作为“元框架”，为理解生态因子的复杂相互作用提供一种整合性的思维工具与启发式洞察？

本文的尝试正在于此。我们将初步建立一套“八卦-生态因子”对应模型（如乾为气候因子，坤为土壤因子，坎为水与干扰因子，离为能量与生物因子等），并借助卦象的组合与变化，来模拟和诠释多重生态因子叠加影响下的系统状态与动态过程。这并非以古典取代现代科学，而是旨在发掘一种源自东方系统思维的补充性视角，以促进对生态系统复杂性更丰富的理解。

## 2 乾卦：作为终极驱动力的气候因子

在“八卦-生态因子”模型中，乾（☰）卦象征“天”，对应驱动地球生态系统的终极气候因子，其核心是太阳辐射及其衍生的光与温度。生态学认为，光是生命系统的能量源头，温度则通过调控酶活性等生理过程，严格制约着生物的生存、分布与演替。这些因子根本上源于天体运行规律，与《序卦传》“有天地，然后万物生焉”的宇宙生成观完全契合。

乾卦的哲学内涵是“健行不息”的创始与驱动力量（《象》曰：“天行健”）。这映射到生态过程中，意味着生命演化必须顺应并依赖这种宏大、刚健的天时周期。将此原理与地质生命史对照，可得到一系列富有启发的对应：

- 水天需卦：象征“等待时机”。这对应从宇宙大爆炸后元素形成，到原始地球在雷电、紫外线等能量作用下，历经漫长酝酿，最终诞生原始生命的过程。演化在此必须“守正待机”。

- 风天小畜卦：象征“小的积蓄”。这精准描述了前寒武纪长达约20亿年的漫长岁月，生命长期处于原核生物阶段，进行着缓慢的积累与准备。

- 火天大有卦与山天大畜卦：象征“丰有”与“大有蓄积”。这正对应寒武纪生命大爆发这一革命性事件：在约2000万年的地质“瞬间”，几乎所有现代动物门类骤然出现，生物多样性实现空前“积蓄”与“丰有”。

- 泽天夬卦：象征“决断、溃决”。兴盛之后必有衰朽，这隐喻了生命史上如二叠纪末大灭绝等重大危机事件，在鼎盛之后走向“决裂”的周期性规律。

综上，乾卦模型揭示了气候作为终极因子，以“天行健”的方式为生命演化提供了根本动力与时间节律，而生命

系统则需在“待时、积蓄、丰有、更迭”的动态循环中与之呼应。

## 3 坤卦：作为承载与孕育基质的土壤因子

在模型中，坤（☷）卦象征“地”，直接对应生态学中的土壤因子。土壤是陆生生物的物理基质、营养库与水分载体，是生态系统物质循环与能量流动的关键界面。其质地、结构、酸碱度与有机质含量，共同构成了影响生物生存与分布的综合性生境条件。

坤卦的哲学内涵是“厚德载物”的包容、孕育与顺从精神（《象》曰：“地势坤，君子以厚德载物”）。这精准隐喻了土壤的生态功能：它承载万物，为生命提供物质基础，其性质与肥力虽受母质与气候（乾）影响，却默默孕育并支撑着地表一切生命活动，体现出至柔至顺的“大地母体”特性。

将坤卦置于复合卦象中，能进一步阐释土壤在生态系统动态中的角色：

- 水地比卦：强调“依附”与“亲辅”。象征生命必须依附于土地，人类更应秉持尊重与维护自然的伦理，方能实现可持续的共生。

- 地天泰卦与天地否卦：构成一组辩证关系。当土壤条件与气候因子交融通畅（坤上乾下为泰），系统便呈现欣欣向荣之象；反之，若天地隔绝、上下背离（乾上坤下为否），则意味着生态阻塞与功能紊乱。

- 山地剥卦与地雷复卦：揭示了土壤生境变化与生命响应的规律。“剥卦”形象比喻了随海拔升高，土壤、气候条件恶化，生命分布从繁盛到稀疏直至绝迹的垂直带谱现象。“复卦”则象征了在扰动或灭绝事件后，生命凭借土壤的孕育力重新恢复与演替的韧性。

综上，坤卦模型不仅指代土壤这一物质因子，更深刻揭示了其作为生命承载基底、系统稳定基础与恢复力源泉的核心生态学意义，强调了生物对其所处基质的根本依赖与协同演化关系。

## 4 巽卦：作为媒介与动力载体的空气与气流

在模型中，巽（☴）卦象征“风”，对应生态学中的空气因子及其流动（气流）。空气是光合与呼吸作用的关键介质，其流动（风）则承担着输送能量（热量）、物质（花粉、孢子、气体）及塑造生物形态的重要生态功能。例如，强风环境下的植物常呈现低矮、木质坚硬、根系深广的适应特征。

巽卦的哲学核心是“柔顺”与“无所不入”。这精准地隐喻了大气环流遍及全球的特性，以及生命为适应特定气流环境所表现出的可塑性（Adaptation）。无论是达尔文地雀喙形的分化，还是蒲公英种子的风媒传播，都是生物“顺

从”并利用风这一因子的体现，即“风行无所不入，生命因之而化”。

通过巽卦与其他卦的组合，可以进一步阐释其生态内涵：

- 巽为风卦（重巽）：强调极致的“顺从”，指向生物对气流环境的深度适应与协同进化。

- 风雷益卦：象征“风雷相薄，交相助益”。这映射了诸如捕食者与猎物的协同进化竞赛（如猎豹与瞪羚），表面上的竞争压力实则促进了双方种群适应力的提升，是一种动态的“增益”。

- 泽风大过卦与雷风恒卦：构成警示与平衡。“大过”暗示顺应不当或环境变化过度可能导致的系统失调；而“恒”则强调维持适应关系的持久性与稳定性，即生态平衡需要恒常的努力。

- 风火家人卦与风水涣卦：分别指向系统内部的和谐共生（如互利共生），以及适应成功后物种的扩散与分布拓展。

综上，巽卦模型超越了将空气视为静态介质的观念，将其理解成一种动态的、塑造性的生态力，深刻揭示了生命通过“柔顺”的适应策略，与大气环境建立广泛而深刻联系的过程。

## 5 震卦：作为周期性节律的变动因子

在模型中，震（☳）卦象征“雷”，对应驱动生态系统周期性变化的节律性因子，如昼夜更替、四季轮回、干湿季变化等。这些节律通过影响温度、光照、水分等条件，从根本上调控着生物的生长发育、物候行为、迁徙与繁殖，是生命活动的基本时间框架。

震卦的哲学核心是“震动”与“发端”（《序卦》：“震者，动也”）。春雷惊醒万物，正喻示着新一轮生命周期的启动与旧状态的更迭。这并非单纯的物理变化，而是系统在时间维度上的动态节律，推动着生命过程周而复始的演替。

震卦与其他卦的组合，可系统诠释这一周期性节律在生态过程中的具体体现：

- 雷地豫卦：象征“顺时而动，生机和乐”，对应春季或雨季来临时，生物结束蛰伏、恢复活跃，系统呈现蓬勃生机。

- 雷天大壮卦：象征“阳刚盛壮”，对应夏季或条件最适期，生物生长与种群规模达到鼎盛。

- 雷火丰卦：象征“丰盈成熟”，对应秋季或收获期，生物完成繁殖、储存能量，系统生产力达到高峰。

- 雷风恒卦：象征“持久之道”，强调生物必须恒久地顺应并内化这些自然节律，形成稳定的生活史策略。

- 水雷屯卦与雷山小过卦：则分别代表周期起始阶段

的艰难萌芽，以及对节律微小偏离可能引发的风险。

综上，震卦模型揭示了生态因子周期性变动的根本性作用：它不仅是外在环境条件的变化，更是生命活动内在的计时器与触发器，驱动着生态系统在“萌发—壮大—丰盈—归藏”的循环中持续运转与更新。

## 6 坎卦：作为扰动与剧变的生态因子

在八卦模型中，坎（☵）卦象征“水”，其核心意象是“险陷”与“流动”。这精准地对应了生态学中的水因子及其相关的极端扰动事件。水是生命之源，但洪水、干旱等水文失常则构成重大生态灾害。因此，坎卦在模型中代表生态系统所面临的突发性、剧烈性干扰因子，它既是一种必要的环境要素，也可能成为系统稳定的破坏性力量。

《序卦传》言“物不可以终过，故受之以坎”，揭示了事物发展过程中“过度”之后必遇“险阻”的规律。在生态语境下，这映射了两种情形：其一，是系统内部压力累积超过阈值（如资源过度消耗）所引发的崩溃；其二，是外部环境的偶然性剧变。后者在生命史上最极端的体现，便是生物大灭绝事件。

地质年代 可能主因 核心生态影响

奥陶纪末 全球变冷 / 冰川期 85% 海洋物种灭绝

二叠纪末 大规模火山活动 影响约 96% 海洋物种

白垩纪末 小行星撞击 非鸟类恐龙等 75% 物种灭绝

这些由坎卦象征的极端环境扰动，虽导致大量物种灭绝，但也重塑了生态格局，为新类群的演化腾出了生态位。例如，白垩纪末恐龙灭绝后，哺乳动物随之繁盛。这印证了《象传》对坎卦“水洊至，习坎”的阐释：君子（或生命系统）需通过反复应对险境，习得韧性。

坎卦与其他卦的组合，进一步演绎了生态系统应对扰动的动态过程。如：

- 屯卦（上坎下震）：象征生命在险阻中萌发，需艰难突破。

- 比卦（上坎下坤）：喻示遭逢险境时，生命需团结、协作以求共生。

- 既济卦（上坎下离）：寓意历经重重干扰与调整后，系统达到一个新的、相对稳定的平衡状态。

结论是，坎卦模型深刻揭示了生态系统的非平衡动态本质：重大干扰（“坎”）既是危机，也是系统更新和物种更替的关键动力。它要求我们以动态、辩证的视角看待生态灾害，并重视系统在逆境后的恢复力与重构潜力。

## 7 离卦：作为关系网络核心的生物因子

在模型中，离（☲）卦象征“火”，其哲学意涵为“光明”与“依附”，被创造性地对应为生态学中的生物因子。这源于一个核心隐喻：正如火焰散发光热，生物个体或种群

亦通过其独特的形态、生理与行为特征（如花朵的色彩与气味）展现“自性光芒”，并以此为基础与其它生物建立关系。这种“光芒”的交互，构成了生态系统内部协同与竞争关系网络的本质。

离卦“外刚内柔”的结构，恰如生物在环境中既彰显特性又必须相互依存的状态。《序卦传》“陷必有所丽”揭示，当生物陷入环境“坎”陷时，必须“依附”于有利的变异或协作关系方能存续。例如，恐龙在白垩纪末大灭绝后，部分类群正是通过“依附”于飞行适应（变异）而演化为鸟类，延续了生命之光。

离卦的组合进一步演绎了生物关系的复杂动态：

- 火天大有卦与天火同人卦：共同阐释了“顺应天道，绽放光芒”的进化正途。生物通过适应环境（同人于天）方能繁荣昌盛（大有）。

- 火雷噬嗑卦：象征激烈的生存竞争与自然选择（如猎豹与瞪羚的竞赛），是推动适应性进化的重要力量。

- 山火贲卦：寓意“饰外扬质”。指向进化不仅是外在形态的修饰，更是内在遗传本质（基因）的筛选与稳定。

- 火地晋卦与地火明夷卦：构成了“繁荣”与“韬晦”的循环。生物在适应后迎来种群繁盛（晋，如日出地上），但盛极则衰，需在逆境（明夷，如日入地中）中内敛修持、保存潜力，等待新的机遇。

综上，离卦模型超越了将生物视为孤立因子的视角，将其视为一个通过“发光”与“依附”来构建关系、驱动系统演化的活性网络，深刻揭示了生命世界的互联性与进化过程的辩证法则。

## 8 艮卦：作为稳定与制约框架的地形因子

在模型中，艮（ $\text{☶}$ ）卦象征“山”，核心意象为“静止”与“稳定”，对应生态学中的地形因子。地形（海拔、坡度、坡向等）通过重塑局地气候、土壤与水文条件，间接而深刻地影响生物的分布与演化格局，是生态系统的空间骨架。

艮卦的哲学内涵是“动极而止”（《序卦》：“物不可以终动，止之”）。这映射了生命演化并非线性前进，而是在剧烈变革后常进入漫长的平台期或稳定期。生态学视角下，这种稳定性源于环境资源充裕、选择压力缓和，系统趋于对现有成功模式的“优化”而非“颠覆”。

从《易经》视角审视，艮卦为此提供了独特的解释框架：地形的隆起与固化（如石炭纪广泛的造山运动与泛大陆形成），其物理上的“静止”与“阻挡”效应，在象征层面可能对应了生命演化的“停滞”或“内化”阶段。此时，外在形态创新减缓，而内在协同与适应深度增强。这并非演化动力消失，而是在地形等宏观条件相对“静止”的背景下，生命进入了一种以巩固和特化为特征的隐性发展周期，直至

新的环境剧变（“动”）再次打破这一“艮止”状态。

综上，艮卦模型强调了地形不仅是物理空间因子，更是一种调节演化速率与方向的“节律控制器”，揭示了生态稳定性与形态保守性背后可能存在的深层结构约束。

## 9 兑卦：作为滋养与协作纽带的湿度因子

在模型中，兑（ $\text{☱}$ ）卦象征“泽”，其德为“悦”，对应生态学中的湿度、降水等水因子。水是生命之源，湿润环境（如雨林）通常支持更高的生物多样性与生产力，从生理基础上为生命带来“欣悦”；而干旱则构成严峻限制。

兑卦的哲学核心是“欣悦”与“和谐”，这超越了单纯的物理湿润，更指向了由资源充足所促发的生物间协作关系。这种“悦”既体现在种群内部的社会性分工（如蜂群、狼群），也体现在种间的互利共生（如根瘤菌与豆科植物、清洁鱼与大型宿主）。湿度带来的资源丰沛，为生物通过协作降低生存风险、提升适应力提供了物质基础，构成了生态系统稳定的“润滑剂”。

通过兑卦的组合，可以深入揭示这种“悦”背后的复杂生态动态：

- 泽天夬卦：象征“悦中有决”。揭示了生态“和谐”表象下潜藏的危机（如资源竞争、种群爆发、环境剧变）。这种“平静中的危机”是自然选择推动系统动态平衡与演化的内在动力。

- 泽火革卦：象征“变革”。当水分条件发生质变（如干旱化或洪涝），生态系统必须进行深刻“变革”以求存，体现了系统对环境变化的适应性响应。

- 泽雷随卦：强调“顺应”。生物必须顺应由降水等因子主导的节律，并在种间建立起相互跟随、协同共生的动态平衡。

综上，兑卦模型将湿度因子从一种气候参数，提升为维系生态“和谐”与驱动协作演化的关键纽带，生动诠释了“滋润”与“欣悦”在维持生态系统复杂互作网络中的根本作用。

## 10 结语

本文通过构建“八卦-生态因子”对应模型，对《易经》与生态学进行了一次开创性的跨学科对话尝试。研究初步表明，《易经》的整体观、动态平衡观及符号推演体系，能为理解生态因子的复杂相互作用提供一个深邃的、启发性的元理论框架。将八卦卦象及其组合与生态过程相参照，不仅揭示了气候、土壤、地形等因子在系统层面的哲学意涵，也为我们反思生态稳定性、演替规律与扰动响应提供了新颖的视角。

必须承认，本研究尚属初步探索，所建立的对对应关系更多是隐喻性与方向性的，旨在搭建对话的桥梁而非提供精

确的实证工具。未来研究可在以下方向深化：其一，将《易经》的爻变系统与生态系统的阈值与突变点进行更精细的动力学类比；其二，探索卦象推演与生态模型（如种群动态、能量网络）之间的形式化衔接可能；其三，在具体生态管理案例中，检验此思维框架作为辅助决策启发工具的实践价值。

《易经》与生态学的相遇，本质上是东方整体思维与西方分析科学的一次深层对话。这种交融并非要替代现代生态学的严密方法，而是为其注入一种关乎关系、平衡与变化的古老智慧，以期在认识生态复杂性时，我们能多一份系统性的深邃与谦卑。探索之路方启，唯愿本文能抛砖引玉，唤起更多学者对此跨学科领域的兴趣与耕耘。

## 参考文献

- [1] Odum, E. P., & Barrett, G. W. 《生态学基础（第五版）》(2009) 高等教育出版社。
- [2] 《周易》(2010)中华书局（中华经典名著全本全注全译丛书）。
- [3] Lovelock, J. E. 《盖娅：地球生命的新视野》(2007) 上海人民出版社。
- [4] 刘长林《中国系统思维》(1990) 中国社会科学出版社。
- [5] Begon, M., Townsend, C. R., & Harper, J. L.. 《Ecology: From Individuals to Ecosystems (4th ed.)》(2006) Blackwell Publishing
- [6] 朱伯崑《易学哲学史》(1995) 华夏出版社。
- [7] 冯友兰《中国哲学简史》(2011) 北京大学出版社。

# Soil Environmental Quality Assessment and Ecological Restoration Strategy

Kemeng Xu Dongdong Zhou

Wuhan Zhihuiyuan Environmental Protection Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

## Abstract

As a vital component of terrestrial ecosystems, soil environmental quality is crucial for ecological security and sustainable development. Recent human activities have exacerbated soil pollution, posing threats to agricultural productivity, ecosystem stability, and public health. This study systematically examines major soil contamination types and their causes, analyzes current environmental conditions, and highlights the primary impacts of heavy metals and organic pollutants. By evaluating existing assessment standards and changes in soil physicochemical properties, the research proposes scientific evaluation frameworks and underscores the importance of establishing comprehensive indicator systems and monitoring networks to enhance management practices. The paper synthesizes ecological restoration theories, evaluates typical remediation technologies (including plant-based, microbial, and physicochemical approaches), clarifies their applicability and effectiveness, and discusses critical considerations for ecological function restoration and long-term management mechanisms. Findings indicate that rigorous evaluation and integrated remediation strategies are essential for safeguarding soil resources and advancing green development.

## Keywords

soil environmental quality; ecological restoration; soil pollution; evaluation system; restoration technology

## 土壤环境质量评价及其生态修复策略

徐克猛 周栋栋

武汉智汇元环保科技有限公司, 中国·湖北 武汉 430000

## 摘要

土壤作为陆地生态系统重要基质,其环境质量关乎生态安全与可持续发展。近年来,人类活动使土壤环境污染问题凸显,威胁农业生产、生态系统稳定及人类健康。本文梳理了主要土壤污染类型及成因,分析土壤环境质量现状,强调重金属、有机污染物等对土壤环境质量的主要影响。依据现行评价标准与土壤理化性质变化,探讨科学评价思路,指出综合指标体系及监测网络建设对提升管理水平的重要性。归纳生态修复理论基础,分析植物、微生物、物理化学等典型修复技术,阐明适用条件与效果,论述修复中需关注的生态功能恢复及长期管理机制。研究表明,强化评价、综合运用修复策略是保障土壤资源安全、促进绿色发展的关键。

## 关键词

土壤环境质量;生态修复;土壤污染;评价体系;修复技术

## 1 引言

土壤作为陆地生态系统的基础,对生态安全、农业生产及环境健康起着不可替代的支撑作用。然而,中国生态环境部数据显示,近年来全国土壤污染形势严峻,多地重金属和有机污染物超标问题突出,直接威胁粮食安全与公众健康。工业化和城市化的快速推进,叠加人为排放污染物、过度使用农药化肥、随意丢弃废弃物等行为,导致土壤质量持续恶化。尽管国内外学者致力于构建融合理化指标、生物特

征与污染物含量的综合评价体系,但指标选取、监测点布局及评价技术仍存在明显短板,亟待优化。

## 2 土壤环境质量现状与主要污染类型

### 2.1 土壤环境质量的现状及生态意义

土壤是陆地生态系统极为重要的一部分,土壤环境的优劣会极大地影响整个生态系统能否稳定运行,以及能否正常发挥作用,伴随工业的迅猛发展城市规模的愈发庞大,加之农业生产方式欠缺科学合理性,土壤污染问题愈发严峻土壤质量显著降低,这给农业生产生态平衡人类长远发展均带来了极大威胁<sup>[1]</sup>。当下众多区域土壤内部有害有毒物质愈发积聚远超安全标准,污染范围持续扩大,土壤原本具备的肥力,以及净化环境储存水分等功能均被极大破坏,健康土壤

**【作者简介】**徐克猛(1994-),男,中国湖北武汉人,硕士,工程师,从事土壤及地下水环境保护,生态环境研究及规划研究。

既是农作物能够长好长壮最根本物质基础，又是水分循环养分循环储存碳元素这些关键过程主要场所，它在保护物种多样性调节全球气候方面发挥着别人替代不了至关重要作用。土壤环境质量要是恶化了那肯定会给生态平衡造成长久的影响，并且也会给粮食安全和人类健康形成隐性的威胁，精准监测土壤质量加上严密管理，已经成为生态保护和资源可持续利用的最重要课题。

## 2.2 主要土壤污染类型及成因分析

土壤污染种类主要涵盖重金属污染，有机污染物聚集以及多种污染物混合侵害状况，重金属污染大部分源于工厂废气废水排放，矿山挖掘活动以及化肥农药过度喷洒使用，这些物质的特点是极难降解且易大量堆积，直接破坏土壤颗粒结构同时严重减少微生物种类数量，有机污染物主要源于农田喷洒大量农药，原油管道破裂泄漏以及垃圾随意掩埋填埋场。这些物质的特点是容易随水流四处扩散流动，对土壤保肥能力以及整个生态系统正常运转的破坏极为严重，多种污染物混合侵害情形不但涵盖不同化学物质彼此间相互反应而形成新的危害，还会出现细菌病毒等生物污染迅速传播且加重破坏的联合效应，给整个生态系统的稳定状态带来更为持久且广泛的损害。污染主要是因为人类活动太频繁强度太大，加上资源被过度开采开挖造成的，经济发展和环境保护没有好好平衡协调导致污染情况越来越严重，长期没有有效治理进一步严重损害了土壤的环境质量，要想真正将土壤污染治理好最为关键的基础工作，便是把各类污染类型及其主要原因彻底弄明白且搞准确。

## 2.3 土壤污染对生态系统与人类健康的影响

土壤污染通过破坏土壤结构以及理化性质对植物生长和微生物群落动态产生影响，致使生态系统功能出现紊乱，有毒物质的累积以及迁移对食品安全和水资源质量形成威胁，使得人类罹患疾病的风险增加并危害公众健康。

## 3 土壤环境质量评价体系与技术进展

### 3.1 土壤环境质量评价标准与指标体系

土壤环境质量评价标准与指标体系是污染防控和管理的关键基础<sup>[2]</sup>。当前评价标准主要依据土壤污染物浓度背景值、生态系统类型及健康风险制定，涵盖环境基准值、风险阈值及适用场景分类等核心要点，对保障生态功能、粮食安全及居住环境健康至关重要。指标体系建立需综合考虑污染物性质、生态敏感度及区域环境特点，涉及重金属、有机污染物、土壤酸碱度等关键指标。新技术如土壤样品分析、多源数据融合及地理信息系统空间评估技术，能清晰呈现污染现状及演变趋势，推动评价体系不断完善，显著提升评价的精确性与可靠性，为土壤监测与修复实践提供强有力的技术支撑。

### 3.2 评价过程中关键理化性质的变化及意义

在整个污染评估过程当中土壤肥力特征的变化一直存

在着，对于判断污染的轻重程度以及选择治理方法来讲发挥着关键的作用，土壤有机质酸碱度重金属含量以及养分分布情况等数据，能清晰显示土壤是否健康及污染严重程度，土壤有机质的数量直接决定着微生物的活跃程度和养分的转化速度，一旦数量减少就会导致土壤能力下降。重金属含量增加就说明已经出现毒害危险，土壤酸碱度变化明显影响养分能否被植物吸收，及微生物能否正常工作，通过怎样持续跟踪这些重要肥力特征的变化，能够为准确判断土壤环境的好坏提供扎实的数据支持，让修复技术用得更准更有效，从而让土壤管理变得更加科学更加全面。

### 3.3 土壤环境质量监测网络与信息化建设

土壤环境质量监测网络和信息化建设，对保护土壤资源实现可持续发展有极大的助力，构建一套高质量的监测体系能更为迅速地把握土壤污染的最新情形，为剖析问题与拟定对策给予可靠的数据支撑，利用信息化平台能够促使数据整理与共享的速率加快，使不同地区及部门间的合作管理更为通畅并且增强土壤污染的预先警示和紧急处置能力，最终达成土壤环境的精准检测与智慧化管理。

## 4 生态修复理论基础与主要修复技术

### 4.1 生态修复的基本理论与流程

生态修复以生态系统理论为依据通过人工干预促进受损生态系统自身修复的过程，其核心体现在修复土壤生态系统的功能，及可持续性方面，土壤生态修复务必遵循系统性、适应性以及协同性这三大原则，着重于自然生态过程的基础之上实现污染物去除和生态功能恢复这两大目标，修复流程一般包含污染评价和诊断目标设定，技术选取与实施以及效果监测这四个阶段<sup>[3]</sup>。修复的起点是污染评价与诊断，它通过解析土壤污染的成分性质和分布为后续技术选择提供依据，修复目标设定必须融合环境管理标准以及区域生态特征，保证技术选择的适宜性，在技术实施过程中需着重对改良修复条件予以重视，并且要实现资源的高效能运用，效果监测承担着证实修复效率，以及指引长期管理的功能。生态修复的理论框架加上规范流程，为各种修复技术的实际操作提供了系统可靠的科学依据和指导支撑。

### 4.2 植物修复微生物修复及物理化学修复技术

植物修复、微生物修复与物理化学修复是当前土壤生态修复的常用技术，各有独特优势与适用场景。植物修复通过筛选超积累重金属的特殊植物，吸收或固定土壤中的重金属，或分解有机污染物，具有环境友好、成本较低的特点；微生物修复利用土壤中原有的细菌和真菌，通过新陈代谢将污染物分解或转化为无害物质，尤其适用于有机污染治理；物理化学修复则采用化学药剂如改良剂、淋洗剂，或物理手段如高温加热固化封存污染物，直接降低其活性或清除污染源。三种技术联合应用，可在不同污染场地实现协同增效，为成分复杂、污染多样的土壤提供切实可行、操作性强的修

复方案。

### 4.3 各类修复技术的适用性及应用效果

各种修复技术在实际运用时其效果与适用范围皆存在差异,植物修复适合污染比较轻的土壤,植物根系把污染物吸走慢慢把土壤清理干净,花费少而且对环境很友好,微生物修复主要用于处理有机污染物和部分重金属污染,其降解污染物的速度快且效果好,但对温度酸碱度等环境条件要求很高。物理化学修复对于污染极为严重的土壤颇为适宜,能够运用吸附抑或冲洗之类的手段极为迅速地将污染物予以去除,然而其耗费巨大,并且在使用化学药剂之后极易把土壤原本的结构以及肥力予以破坏,到底选哪种修复技术必须根据这片土壤具体污染情况来决定,同时一定要重点考虑修复完很多年以后对生态环境会不会还有坏影响。

## 5 土壤生态功能恢复与环境管理对策

### 5.1 土壤生态功能恢复需要关注的问题

土壤生态功能恢复是土壤污染治理与长期利用的关键,需重点关注生态结构完整性、生物多样性及土壤理化性质平衡<sup>[4]</sup>。污染物会损害土壤微生物活性与养分循环,降低生态功能,影响修复效果。修复时应精准定位受损关键功能,针对性修复,并促使养分循环与微生物系统恢复平衡。修复措施可能改变土壤性质,如酸碱度、有机质含量等,需全面评估其长期影响。同时,连接周围景观、重建生态系统服务功能也至关重要,应作为功能修复的主要部分。根据当地实际,灵活结合多种修复技术,并确保技术与自然环境条件相匹配,是彻底修复土壤生态功能的可靠途径。

### 5.2 修复过程中的长期管理与政策机制

加强制度保证对保证土壤生态功能恢复能够长期保持下去十分重要,科学管理需格外注重对已修复区域展开实时监测以及效果评估,迅速把控土壤物理化学性质和生态状况究竟产生了何种变化,如此方可持续优化修复手段,制度保证需大力推进污染责任制度及生态补偿制度的切实落地施行,强化致使污染的单位或个人的整治责任意识与修复责任担当。必须全面优化土壤环境保护的相关法律法规,构建多部门协同合作的工作机制强化修复项目的实际执行效率与监管力度,在制度的制定过程当中一定要着重把财政资金支持以及市场化运作方式纳入其中,给修复技术研发以及大规模推广给予充足的资金支撑,管理高效与制度配合相结合便

能切实推动土壤修复工作全面展开,实现生态功能长期稳定恢复的目标。

### 5.3 生态修复策略的综合选择与实践路径

选择生态修复策略应依据污染种类土壤特性及周边环境条件予以确定,同时要全面考量污染物的来源扩散途径与最终期望达成的修复目标,科学合理地制定多种技术的组合方案,植物修复微生物修复物理化学修复这些方法得依照各自最为适宜的情形联合运用,才能够达成又快又好的修复成效,同时使土壤的生态功能真正恢复至正常状态。可以建立一些区域性的修复示范工程来强化各种技术的整合和实时效果评估,从而促进修复策略真正落地实施,要全力完善政府企业科研单位等多方协同参与的合作机制,将土壤生态监测以及后期管理的全部内容,统统纳入其中,把土壤修复工作和整个生态治理工作紧密地结合在一起,最终促使土壤环境质量获得持久的改善达成可持续发展的目标。

## 6 结语

本文聚焦土壤环境质量评估与生态修复规划,剖析了重金属、有机物污染及酸化、盐碱化等污染类型,指出其源于工业废弃物、农药化肥滥用等,危害农作物、地下水及人体健康。通过梳理现行土壤环境标准与风险管控指标体系,探讨布点采样、实验室检测等监测评价方法,提升了土壤环境管理能力。修复方案选择上,分析了植物、微生物及物理化学修复技术,明确其适用场景、成本、周期及效果,强调生态与生物多样性恢复的重要性。建立长期监测等管理制度可确保修复效果持久。本研究为修复技术选择与评价体系完善提供理论支撑,也为土壤保护政策法规指明方向。但土壤修复仍面临污染物复杂、方法适配难等挑战,未来需攻克联合防控难题,建设智能监测平台,推动技术与产业融合,为国家生态文明建设提供坚实科学基础。

### 参考文献

- [1] 乔瑞娟,阮海英,袁朕辉,郑飞.土壤环境质量评价与类别划分研究[J].区域治理,2020,(38):0110-0110.
- [2] 程洪亮.土壤环境监测技术规范中的土壤环境质量评价问题[J].区域治理,2020,(29):0176-0176.
- [3] 张渐.探讨土壤环境监测技术规范中的土壤环境质量评价问题[J].建材发展导向,2020,18(14):93-93.
- [4] 陈海燕.土壤环境监测技术规范中的土壤环境质量评价分析[J].节能与环保,2020,(09):45-46.

# Study on Growth and Reproductive Performance of Salmon under Ecological Culture Mode

Ziyuan Wang Fuqiang Teng\* Tao Wang Shudao Huang Fengtai An

Rizhao Zhongbang Aquatic Science and Technology Co., Ltd., Rizhao, Shandong, 276805, China

## Abstract

This study systematically investigates the impact mechanisms of ecological aquaculture on salmon growth and reproductive performance, focusing on key aspects including environmental improvement, nutritional regulation, stocking density optimization, and stress management. By establishing simulated natural aquatic ecosystems, implementing precision nutrition strategies, and refining farming management protocols, the research analyzes how ecological practices influence critical indicators such as growth rates, physical condition, gonadal development, and reproductive success. The findings demonstrate the correlation between ecological factors and salmon physiological metabolism and reproductive functions. The results indicate that ecological aquaculture can enhance survival environments, reduce stress levels, improve nutrient utilization efficiency, and optimize growth and reproductive performance. This provides theoretical foundations and technical references for the green transition of salmon farming industries, improving quality and efficiency while promoting the co-development of ecological and economic benefits.

## Keywords

ecological aquaculture model; salmon growth; reproductive performance

# 生态养殖模式下三文鱼生长及繁殖性能研究

王子源 滕富强\* 王涛 黄书道 安丰太

日照市众邦水产科技有限公司, 中国·山东日照 276805

## 摘要

本文鉴于生态养殖模式核心内涵,从养殖环境改善、营养给予调控、养殖密度适配调节、应激防控管理等关键层面,系统探寻该模式对三文鱼生长性能与繁殖性能的影响机理。通过搭建仿自然水体生态体系、实施精准营养方针、完善养殖管理程序,解析生态养殖对三文鱼生长比率、体质状况、性腺发育、繁殖成功率等核心指标的调控效能,说明生态因子与三文鱼生理代谢、生殖机能的关联规律。结果表明,生态养殖模式可借助改善生存环境、降低应激状况、提升营养利用效率,同时优化三文鱼生长与繁殖性能,为三文鱼养殖产业绿色过渡、提升品质与效率提供理论依据和技术借鉴,推动产业达成生态效益和经济效益的共同发展。

## 关键词

生态养殖模式;三文鱼生长;繁殖性能

## 1 引言

三文鱼(学名大西洋鲑, *Salmo salar*)依靠肉质鲜嫩、养分充足(富含不饱和脂肪酸、优质蛋白等)的特性,成为全球水产养殖当中极具经济价值的品类,在我国冷水性鱼类养殖产业中占据关键地位。近年来,伴随市场需求的持续攀升,三文鱼养殖规模逐步扩大,在传统的集约化养殖模式中,高密度放养、饵料投喂不当、水体自净能力欠缺等问题愈发凸显,不但造成水质变差、疾病频繁出现,还引发三文鱼生

长速率参差不齐、抗逆性变弱、繁殖性能变差等系列问题,既影响到产品品质的安全,也阻碍了产业的可持续发展<sup>[1]</sup>。生态养殖模式以“仿自然、低干预、高协同”为核心准则,借助对自然生态系统结构与功能的模仿,综合运用环境调控、营养优化、生态平衡维持等技术手段,达成养殖生物与环境的和睦共生,为攻克传统养殖困境提供了有效途径。

关于三文鱼生态养殖的研究大多聚焦于单一技术运用,对模式整体架构下生长与繁殖性能的系统性作用缺少深入探究,相关作用机制还未彻底明晰。本文围绕生态养殖模式的关键技术要点,全面剖析其对三文鱼生长发育、营养代谢、性腺成熟以及繁殖效率的综合作用,揭示生态调节与三文鱼生理功能的内在联系,目的是搭建科学完备的生态养殖技术体系,为三文鱼产业高质量发展给予理论依据与实践参考,促进冷水性鱼类养殖朝着生态友好、高效优质的方向转变。

【作者简介】王子源(1991-),男,中国山东五莲人,硕士,工程师,从事水产养殖研究。

【通讯作者】滕富强(1979-),男,中国山东日照人,从事水产养殖研究。

## 2 三文鱼生态养殖模式的核心特征与技术架构

### 2.1 核心特征

生态养殖形态有别于传统集约化养殖，其关键特征呈现为“生态优先、协同适配、全程调控”。以维护养殖水体生态稳定为基础，看重养殖系统里生物与环境、生物与生物彼此的互利共荣，经由削减化学药剂、人工干预的过度施行，保证三文鱼自然生长节奏<sup>[2]</sup>；突显养殖密度、营养给予、环境情形与三文鱼生理需求的精准契合，杜绝资源浪费和环境压力；搭建“源头控制-过程调控-末端净化”的全程管理体系，促成养殖活动跟生态环境的良性流转，既保证产品质量，又减少产业对环境的负面作用。

### 2.2 技术架构

打造仿自然养殖环境，凭借冷水资源长处，挑选水质清澈、水源平稳、溶氧充裕的养殖区域，建设包含水体循环、水质净化、温盐调控的仿自然生态系统。通过设置人工湿地、生态滤池等净化单元，运用水生植物、微生物群落的净化功能，保障水体理化指标平稳；使用流水养殖或循环水养殖技术，保障水体流动性与溶氧程度，模仿三文鱼自然栖息的冷水环境，降低环境胁迫。精准化营养供给系统，依照“营养均衡、绿色高效”原则，开展定制化饵料投喂策略。

饵料配方主要采用天然原料，增添益生菌、免疫增强剂、微量元素等功能性成分，增进营养利用效能，降低残饵污染；按照三文鱼不同生长阶段的营养需求，实时调整饵料配比及投喂量，防止过量投喂造成的水体富营养化，同时实现生长与繁殖的营养储备需求。

生态调节与管理改进，恰当调控养殖密度，结合养殖水体承载水平与三文鱼生长属性，界定适宜放养数量，防止高密度引发的竞争压力与应激反应；构建常态化水质监测体系，即时追踪水温、溶氧、pH值、氨氮等关键参数，利用换水、增氧、微生物制剂管控等办法，保障水质恒定<sup>[3]</sup>；强化养殖环境的生态整治，投置滤食性生物、栽种水生植物，搭建复合生态系统，增强水体自净能力，形成“养殖-净化-循环”的良性模式。

## 3 生态养殖对三文鱼生长性能的影响

### 3.1 生长速率与体质提升

生态养殖模式依靠优化生存环境与养分供给，为三文鱼生长营造了合理的生理条件。类似自然的流淌水境与充足的溶解氧，推动三文鱼新陈代谢与能量转换，减轻因环境逼迫引起的生长抑制；精细搭配的饵料符合了三文鱼不同生长阶段的营养要求，增强了蛋白质、脂肪等营养物质的吸收利用效率，促进生长速度平稳上升。生态环境中充裕的天然饵料跟功能性饲料的搭配运用，增进了三文鱼免疫系统的功能，增进了抗逆性能与机体的健康水准，降低了因疾病引发的生长停滞现象，让三文鱼生长状况更贴合自然生长特征，体态匀称、肉质瓷实。

### 3.2 生长稳定性与均匀度优化

传统养殖模式下，高强度的高密度竞争、起伏不定的水质波动等情况易使三文鱼生长的差异十分显著，个体均一度欠佳。生态养殖借助科学把控养殖密度，降低个体间的养分角逐与空间竞争<sup>[4]</sup>；稳固的水质状况环境与常态化的应激防范控制，减轻了环境起伏对三文鱼生长的妨碍，让群体生长节奏维持相同。生态养殖的模式下，三文鱼拥有充裕的活动空间，运动本领得以磨炼，更进一步推动了生长均匀度的提高，杜绝了因生长不平衡引发的养殖效益下滑，为后续的捕捞与加工提供了优质的原料保障。

### 3.3 生长代谢机制的正向调控

生态养殖借助环境与营养的双重管控，对三文鱼生长代谢机制起到正面效应。合理的水温、溶氧情形增进了三文鱼消化酶活性，增进了饵料消化吸收功效；功能性饵料当中的益生菌、益生元等成分调整了肠道微生态平衡，优化了肠道健康，为营养物质的吸收利用筑牢根基。生态环境里低应激的生存条件，缩减了应激激素的分泌量，减少了能量的损耗，让更多能量投入生长发育，形成“低消耗、高积累”的生长代谢模式，助力三文鱼生长性能的整体提升。

## 4 生态养殖对三文鱼繁殖性能的影响

### 4.1 性腺发育的促进作用

三文鱼的繁殖能力与生存环境、养分储备紧密相连，生态养殖方式借助多方面调节为性腺发育给予了保障。恒定的水质情形、恰当的温盐节奏模拟了三文鱼自然繁殖的生态条件，防止了环境突变对性腺发育的阻碍；在精准营养输送里，充裕的优质蛋白、不饱和脂肪酸、维生素和矿物质，给性腺发育供应了必要的营养物质，助力卵母细胞成熟并提升精子活力<sup>[5]</sup>。生态养殖模式下三文鱼体格健壮、抵御逆境能力强，降低了疾病对生殖系统的破坏，保证性腺发育过程的顺利开展，为高品质繁殖筑牢根基。

### 4.2 繁殖行为与成功率优化

自然状态下的繁殖活动是三文鱼繁殖达成的要点，生态养殖模式借助模拟自然环境搭建，为三文鱼繁衍行为的呈现提供了恰当条件。流水环境、隐蔽场所等设施的搭建，适配了三文鱼的繁殖习性，推动亲鱼发情、追逐、产卵等自然繁殖活动的出现；低应激的养殖氛围减轻了亲鱼的应激现象，杜绝了因应激引发的繁殖行为失常、产卵量降低等问题。生态养殖期间对亲鱼实施的科学管控，涵盖恰当的养殖密度、营养调配、体质增强等，增进了亲鱼的繁殖动力，增加了受精率、孵化率以及仔鱼存活率，全方位提升了三文鱼的繁殖成功率。

### 4.3 后代质量的改善

生态养殖手段不仅作用到亲鱼的繁殖特性，还对后代的质量起到积极作用。亲鱼于生态环境里积攒的充沛养分与良好体质，令鱼卵及精子的质量明显提升，遗传性状更佳；

孵化时期平稳的水质状况与恰当的生态要素,降低了仔鱼的畸形比率与死亡概率,增强了仔鱼的体质与抗逆能力。子代个体生长发育齐整、生命力旺盛,为后续养殖时期的生长效能提高打下了坚实基础,形成“亲鱼优质-繁殖高效-后代优良”的良性循环,促进三文鱼养殖产业的可持续进步。

## 5 生态养殖模式的优化方向与发展建议

### 5.1 优化方向

智能化技术整合,采用水质在线监测系统、智能投喂设备、环境调控自动化装置等,达成养殖过程的精细化、智能化把控,增强生态调控的效率与精确性,降低人为介入造成的偏差。营养配方精细化,依据三文鱼生长与繁殖的生理需求,整合养殖环境动态改变,研制针对性更高的功能性饵料,改良营养成分比例,进一步增进营养利用率,减少养殖对环境的氮磷排放量<sup>[6]</sup>。生态系统复杂化,增加养殖系统里的生物多样性,搭建多营养层次综合养殖模式,融合鱼类、甲壳类、水生植物、微生物等生物类别,增强系统的自净能力与稳定性,达成养殖废弃物的资源化利用。

### 5.2 发展建议

加强技术研发与传播,激发产学研协同创造,开展生态养殖核心技术攻关,完备技术标准与操作规程;借助技术培训、实地指导等途径,向养殖户传播生态养殖理念与技术,提高模式应用普及度。强化政策支撑与引导,推出针对三文鱼生态养殖的帮扶政策,包含补贴、信贷助力等,鼓动养殖主体转型发展;构建产品质量追溯系统,创建生态养殖三文鱼品牌,增加产品附加值。加大生态环境保育,构建养殖区域环境承载力评价机制,合理规划养殖的规模与布局,杜绝过度养殖引发的环境压力;强化养殖尾水治理技术的研发与运用,保障养殖废水实现达标排放,维护水域生态环境。

增进产业链配合与市场引导,带动生态养殖三文鱼全链条高水平发展。养殖企业要与加工、流通企业确立长期合作模式,改良采收、冷链、加工工序,最大程度留存生态养殖三文鱼的品质优势;借助电商平台、高端商超、特色餐饮等途径,加大生态养殖理念宣扬,运用产品认证、溯源展示等手段,提高消费者对生态养殖三文鱼的知晓度与赞同度,

打造高端消费市场。激励行业协会起到桥梁纽带功效,构建技术交流、信息共享、品牌推广的平台,规整市场竞争秩序,防止低价恶性竞争;推进跨境合作与技术吸纳,汲取国际前沿生态养殖经验与管理方式,依照我国冷水资源特性开展本土化革新,增强产业核心竞争力。依靠产业链各环节共同使劲,促成生态养殖模式的规模化普及与产业化落实,协助三文鱼养殖产业造就“生态优、品质高、效益好”的良性发展态势。

## 6 结语

生态养殖模式借助营造仿自然养殖环境、实施精准营养供给、完善养殖管理流程,从多层面三文鱼的生长与繁殖性能发挥正向调节作用。该模式不但能够提高三文鱼生长速度、整齐度以及体质健康程度,而且能够推动性腺发育、改良繁殖行为、提升繁殖成功率和后代品质,达成生长性能与繁殖性能的同步提升。与传统养殖模式相比,生态养殖更顺应产业绿色可持续发展的诉求,既舒缓了环境压力,又增进了产品品质与养殖效益。未来,应借助智能化技术整合、营养配方改良、生态系统健全等方面的持续革新,以及政策扶持与技术普及的协同推动,三文鱼生态养殖模式将日益成熟,为我国冷水性鱼类养殖产业的高质量转变提供坚实保障。

### 参考文献

- [1] 贾丰会,王瑜,段静花.张秀让三文鱼成为新疆的“蓝色名片”[J].中国工人,2025,(05):66.
- [2] 张海军,车闹草,扎西卓玛.龙羊峡高原冷水鱼生态养殖的探索与实践——海南州国家可持续发展议程创新示范区典型案例[J].可持续发展经济导刊,2025,(Z1):77-80.
- [3] 王佳仪.国内三文鱼产业进入新的发展时期[N].中国食品报,2024-06-11(006).
- [4] 国内首座近海海水三文鱼养殖网箱顺利交付[J].中国船检,2024,(03):33.
- [5] 彭琳,黄进.探索三文鱼陆基工厂化养殖[N].南方日报,2024-01-17(A06).
- [6] 卢宝军,毛亚琪,刘扬.生态立省背景下青海三文鱼(虹鳟)品牌发展路径分析[J].水产养殖,2021,42(08):77-80.

# Innovation of Ecological Environment Governance and Analysis of Carbon Emission Management under the Guidance of Dual Carbon

Shu Jiang

Shandong Provincial Environmental Science Research Institute Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250109, China

## Abstract

The “dual carbon” goals have established a strategic framework for China’s ecological governance restructuring and carbon emission management modernization. This study examines the synergistic relationship between environmental governance and carbon management within the dual carbon strategy, demonstrating how these objectives reshape ecological governance, highlight carbon management’s central role, and reveal their intrinsic coordination mechanisms. Building on this analysis, the paper proposes three-dimensional pathways for ecological governance innovation—transforming governance philosophies, optimizing stakeholder structures, and establishing institutional mechanisms. Furthermore, it develops a comprehensive optimization strategy for carbon emissions across three dimensions: source control, process supervision, and end-of-pipe offsetting, providing theoretical references for advancing coordinated environmental governance and carbon management under the dual carbon framework.

## Keywords

ecological environment; “dual carbon” strategy; governance innovation; mechanism system

## 双碳导向下生态环境治理创新与碳排放管理分析研究

姜姝

山东省环科院股份有限公司, 中国·山东 济南 250109

## 摘要

“双碳”目标的提出为我国生态环境治理体系重构与碳排放管理模式升级提供了核心导向。本文基于“双碳”战略背景, 深入剖析生态环境治理与碳排放管理的耦合逻辑, 揭示“双碳”目标对生态环境治理的重塑作用、碳排放管理的核心地位及二者协同的内在动力。在此基础上, 从治理理念转型、主体结构优化和机制体系构建三个维度, 提出生态环境治理创新的实现路径; 并从源头管控、过程监管和末端抵消三个层面, 构建碳排放全流程优化策略, 为“双碳”目标下生态环境治理与碳排放管理的协同推进提供理论参考。

## 关键词

生态环境; “双碳”战略; 治理创新; 机制体系

## 1 引言

全球气候变暖引发的极端天气事件频发, 对生态系统稳定性和人类社会可持续发展构成严峻挑战, 碳减排已成为全球共识。我国提出“力争2030年前实现碳达峰, 2060年前实现碳中和”的“双碳”目标, 这不仅是应对全球气候变化的主动担当, 更是推动经济社会发展全面绿色转型、实现生态环境质量根本性改善的内在要求。传统生态环境治理模式以污染物末端治理为核心, 缺乏对碳排放的系统考量, 而单一的碳排放管理措施又难以与生态环境治理形成协同效应, 导致治理效率偏低、资源配置不合理等问题。基于此,

探索“双碳”导向下生态环境治理创新与碳排放管理协同推进的路径, 打破二者割裂的治理格局, 实现生态环境保护与碳减排的有机统一, 具有重要的理论价值和实践意义。本文力图厘清二者的耦合关系, 构建治理创新路径与管理优化策略, 为“双碳”目标的顺利实现提供支撑<sup>[1]</sup>。

## 2 “双碳”导向下的生态环境治理与碳排放管理耦合逻辑

### 2.1 重塑生态环境治理的“双碳”目标

“双碳”目标从治理理念, 治理范围和治理目标三个维度对传统生态环境治理体系进行了系统性重塑。传统治理在治理理念上以“控污降碳”分离为特征, 把污染物治理与碳减排看成独立任务, 治理资源分散。“双碳”目标引导治理理念向“协同控污降碳”转变, 凸显碳排放与污染物排放

【作者简介】姜姝(1985-), 女, 中国山东菏泽人, 本科, 高级工程师, 从事环境保护工程研究。

的同源性——化石能源燃烧既是碳排放的主要来源，也是大气污染物的重要成因，将碳减排纳入生态环境治理的核心框架，实现治理理念的根本性升级。在治理范围上，传统生态环境治理集中在工业废水，废气，固体废物等显性污染物上，治理边界比较明晰，而“双碳”目标下的治理范围将延伸至能源生产，产业发展，城乡建设，交通运输等领域，形成全行业，全领域的系统性治理格局，打破传统治理的领域壁垒。在治理目标上，传统治理以满足污染物排放标准、改善局部环境质量为核心目标，具有短期性和局部性特征；“双碳”目标则以实现生态系统碳收支平衡、推动可持续发展为长期目标，将短期环境质量改善与长期生态系统稳定相结合，构建了多层次、长周期的治理目标体系，推动生态环境治理从“被动应对”向“主动塑造”转型。

## 2.2 碳排放管理是生态环境治理的核心内容

碳排放管理贯穿于生态环境治理的全过程，是实现生态环境质量改善与可持续发展的核心抓手。从污染治理的角度看，碳减排与污染物治理存在显著的协同效应，通过优化能源结构、推动产业升级等碳排放管理措施，可同步减少二氧化硫、氮氧化物等大气污染物排放，降低污染物治理成本，提升生态环境治理的整体效率。从生态系统保护的角度看，碳排放管理不仅包括碳排放源的管控，还涵盖碳汇资源的保护与提升，而碳汇资源作为生态系统的重要组成部分，其保护与修复本身就是生态环境治理的关键内容。例如，森林、湿地等生态系统的保护与恢复，既能提升碳汇能力、助力碳减排，又能改善生物多样性、增强生态系统韧性，实现碳减排与生态保护的双赢。从治理成效的角度看，碳排放强度和总量是衡量生态环境治理成效的重要指标，“双碳”目标下，生态环境治理的成效不再仅以污染物浓度下降为单一标准，而是更多地与碳达峰、碳中和进展挂钩，碳排放管理的成效直接决定了生态环境治理的整体水平，成为生态环境治理体系中不可或缺的核心环节。

## 2.3 二者协同推进的内在动力

生态环境治理与碳排放管理的协同推进，源于二者在目标、主体和路径上的内在一致性，形成了相互促进、相互支撑的协同动力机制。在目标层面，二者均以实现人与自然和谐共生的可持续发展为最终目标，生态环境治理通过改善环境质量为碳减排提供良好的生态基础，而碳排放管理通过控制温室气体排放为生态环境治理减轻气候压力，二者目标同向、相互支撑。在主体层面，政府、企业、社会组织和公众均是二者的参与主体，政府通过制定政策法规引导协同方向，企业通过技术创新和生产转型落实协同任务，社会组织通过宣传动员凝聚协同共识，公众通过绿色生活方式参与协同实践，多元主体的协同参与形成了强大的治理合力。在路径层面，产业升级、能源转型、技术创新等路径既是生态环境治理的重要手段，也是碳排放管理的核心措施。例如，推动高耗能产业向低碳化转型，既能减少污染物排放，又能降

低碳排放量；发展可再生能源，既能替代传统高污染能源，又能减少碳排放，二者路径互通、相互促进，为协同推进提供了坚实的实践基础。

## 3 “双碳”导向下生态环境治理创新的路径构建

### 3.1 从“末端治理”到“系统低碳治理”

打破传统“先污染后治理”的末端治理思维，构建以源头防控为核心、全过程管控为支撑的系统低碳治理体系，是生态环境治理创新的首要路径。在源头防控层面，将碳排放标准纳入产业准入和规划编制的核心指标，建立“碳评+环评”协同审批机制，在产业布局、项目审批阶段就严格控制高碳项目准入，从源头遏制碳排放和污染物排放。同时，加强区域统筹规划，根据不同区域的生态承载能力、产业基础和碳减排潜力，制定差异化的低碳发展规划，推动区域间产业转移与生态补偿的协同推进，避免高碳产业跨区域转移。在过程管控层面，构建覆盖生产、流通、消费全链条的低碳治理机制，推动企业建立全生命周期碳足迹管理体系，将碳减排责任落实到生产经营的各个环节。

### 3.2 从“政府主导”到“多元协同共治”

改变传统生态环境治理中政府单一主导的治理模式，构建政府引领，企业主体，社会组织协同，公众参与的多元协同共治体系，是提升治理效能的关键创新方向。政府应发挥引领作用，通过建立完善的政策法规体系，建立统一的碳核算与环境监测标准，加大生态环境公共服务投入等方式，为多元主体参与治理提供制度保障和政策支持。同时，深化“放管服”改革，简化审批程序，鼓励社会资本参与生态环境治理和碳减排项目，激发市场活力。企业作为碳减排和污染治理的责任主体，应强化主体意识，将低碳发展理念融入企业战略规划，加大绿色技术研发投入，推动生产方式绿色转型，主动公开碳排放和污染物排放信息，接受社会监督。社会组织要发挥桥梁纽带作用，通过开展政策宣传、技术培训、公众教育等活动，凝聚社会共识，引导公众参与，并推动企业履行社会责任，加强行业自律<sup>[2]</sup>。

### 3.3 构建“制度保障—技术支撑—市场驱动”的协同机制

构建制度，技术，市场三位一体的协同机制，是生态环境治理创新与碳排放管理协同推进的重要支撑。在制度保障层面，建立健全“双碳”目标下的生态环境治理法律法规体系，完善碳达峰碳中和目标责任考核制度，将碳减排成效与生态环境质量改善情况纳入地方政府和企业的绩效考核体系，形成“双碳”目标下的生态环境治理法律法规体系。“硬约束”机制。同时，建立统一的碳核算与环境监测评估体系，规范碳排放和污染物排放数据的收集、统计和发布，确保数据的真实性和准确性，为治理决策提供科学依据。在技术支撑层面，构建以企业为主体、高校和科研机构为支撑的绿色

技术创新体系,重点攻关能源清洁高效利用、碳捕集利用与封存、新能源开发、污染物协同治理等关键技术,推动绿色技术的产业化应用。同时,加强绿色技术的国际合作与交流,引进吸收国际先进绿色技术,提升我国绿色技术创新能力。

## 4 “双碳”导向下碳排放管理的全流程优化策略

### 4.1 聚焦产业与能源结构优化

产业与能源结构优化是实现碳排放源头减排的核心策略,通过推动产业升级和能源转型,从根本上降低碳排放强度。在产业结构优化层面,加快推动高耗能产业低碳转型,通过淘汰落后产能、推动技术改造、优化产品结构等方式,降低高耗能产业的碳排放占比。同时,大力发展战略性新兴产业,重点培育节能环保、新能源、新材料、高端装备制造等低碳产业,提升低碳产业在国民经济中的比重,推动产业结构向高端化、低碳化转型。此外,推动服务业绿色升级,发展绿色物流、绿色旅游、数字经济等低碳服务业,减少服务业领域的碳排放。在能源结构优化层面,坚持“先立后破”的原则,逐步降低化石能源占比,大力发展可再生能源。加大太阳能、风能、水能、生物质能等可再生能源的开发利用力度,推动可再生能源在电力、热力、交通等领域的广泛应用。

### 4.2 构建全链条精准管控体系

构建覆盖碳排放“产生—核算—监管—减排”全链条的精准管控体系,是提升碳排放管理效能的关键举措。在碳排放产生环节,建立重点行业、重点企业碳排放台账制度,明确碳排放源头的具体分布和排放特征,为精准管控提供基础数据。针对不同行业的碳排放特点,制定差异化的减排目标和管控措施,例如对工业行业重点控制化石能源消耗,对交通行业重点推广新能源汽车,对建筑行业重点提升建筑节能水平。在碳核算环节,完善碳核算标准体系,根据不同行业的生产工艺和排放特点,制定科学合理的碳核算方法,确保碳核算结果的准确性和可比性。加强碳核算能力建设,培养专业的碳核算人才,推动企业建立自主碳核算机制,提升碳核算的规范化水平。在碳监管环节,构建“线上监测+线下核查”的全方位监管体系,利用大数据、物联网、卫星遥感等先进技术,建立碳排放实时监测平台,实现对重点企业碳排放的动态监测。同时,加大线下核查力度,定期开展碳排放专项核查,严厉打击碳排放数据造假等违法行为,确

保减排措施落到实处。在碳减排环节,建立减排效果评估机制,对减排项目的减排量进行科学核算和评估,及时调整减排策略,确保减排目标的顺利实现<sup>[1]</sup>。

### 4.3 强化碳汇能力提升与碳排放抵消

提升碳汇能力、推动碳排放抵消,是实现“双碳”目标的重要补充路径,通过增加碳吸收来平衡碳排放,实现碳收支平衡。在生态碳汇提升方面,加强森林、湿地、草原等生态系统的保护与修复,加大植树造林力度,提高森林覆盖率和森林质量,增强森林生态系统碳汇能力。加强湿地保护与恢复,维护湿地生态系统的完整性和稳定性,提升湿地碳汇功能。合理利用草原资源,加强草原生态保护与建设,防止草原退化,提升草原碳汇能力。同时,探索农田生态系统碳汇提升技术,通过推广秸秆还田、测土配方施肥等技术,增加农田土壤碳储量。在碳汇交易与抵消方面,完善碳汇交易机制,将林业碳汇、湿地碳汇等生态碳汇项目纳入碳市场交易体系,建立碳汇项目开发、核证、交易的全流程管理规范,推动碳汇资源的市场化配置。鼓励企业通过购买碳汇额度抵消自身碳排放,实现碳排放总量控制目标。此外,加强碳汇技术研发,探索人工碳汇技术的发展与应用,提升碳汇能力的稳定性和可持续性。

## 5 结语

“双碳”目标的提出为我国生态环境治理与碳排放管理带来了前所未有的发展机遇,也提出了更高的要求。生态环境治理与碳排放管理之间存在紧密的耦合关系,“双碳”目标重塑了生态环境治理体系,碳排放管理是生态环境治理的核心内容,二者在目标、主体和路径上的一致性构成了协同推进的内在动力。为实现“双碳”目标,需从理念、主体和机制三个维度推动生态环境治理创新,构建系统低碳治理体系、多元协同共治格局和“制度—技术—市场”协同机制;同时,从源头、过程和末端三个层面优化碳排放管理策略,聚焦产业与能源结构优化、构建全链条精准管控体系和强化碳汇能力提升与碳排放抵消。

### 参考文献

- [1] 宋艳,刘禹卿,钱越,等.面向营运车辆碳排放监测管理的标准现状研究[J].公路交通科技,2024,41(S1):402-411.
- [2] 刘元莹,俞文帅,舒石洸.企业近零碳排放目标下的减排路径规划研究[J].节能,2024,43(10):95-97.
- [3] 付微,于诗琪.绿色金融对碳排放的影响效应研究[J].上海立信会计金融学院学报,2024,36(02):3-14.

# Analysis of Key Points of Environmental Electromagnetic Radiation Monitoring

Fuguang Tan

Lijiang Institute of Environmental Science (Lijiang Radiation Environmental Monitoring Station) Lijiang, Yunnan, 674100, China

## Abstract

With the advancement of science and technology, the continuous improvement of informatization has led to a complex and ever-changing electromagnetic environment, resulting in a steady increase in electromagnetic radiation levels. In this context, monitoring the electromagnetic environment and understanding radiation intensity have become crucial for social development. Relevant personnel need to integrate regional environmental factors and sources of electromagnetic radiation, employing appropriate monitoring technologies to collect data, thereby supporting the improvement of the electromagnetic environment monitoring system. This article begins with an analysis of regional environmental electromagnetic radiation, combines literature reviews to thoroughly examine the characteristics of electromagnetic radiation impacts, and then, based on China's existing standards and monitoring practices, analyzes key monitoring aspects to provide recommendations for current electromagnetic radiation monitoring.

## Keywords

regional environment; electromagnetic radiation; analysis

## 区域环境电磁辐射监测要点分析

谭福广

丽江市生态环境科学研究所（丽江市辐射环境监测站），中国·云南 丽江 674100

## 摘要

随着科学技术的发展，信息化水平不断提升，由此导致复杂多变的电磁环境，造成电磁辐射水平不断上升。此背景下，针对电磁环境进行监测，了解辐射强度就成为社会发展的重要一环，需要相关人员结合区域环境以及电磁辐射的来源，运用合适的监测技术获取数据，为电磁环境监测体系的完善提供支持。文章从区域环境电磁辐射入手，结合文献综述，深入分析电磁辐射的影响特点，然后在我国现有标准和监测实践基础上，分析监测的要点，为现阶段电磁辐射监测提供建议。

## 关键词

区域环境；电磁辐射；分析

## 1 引言

电磁辐射是一种看不到、摸不着的能量流，是一种因电场和磁场相互作用而产生的电磁波向周围发散和辐射的物理现象。根据波长和频率的不同，电磁辐射可以分为工频辐射、射频辐射、微波、红外线、可见光、紫外线等<sup>[1]</sup>。区域环境中，电磁辐射的来源十分广泛，包括自然与人为两方面。自然来源方面，主要来源包括太阳辐射、宇宙天体、地球静磁场与低频场、雷电宽频带电磁脉冲等；人为来源中，主要包括广播电视发射系统、移动通信基站、雷达系统、高压输变电设施、家用电器及工业设备等。电磁辐射是继水、大气、噪声、固废后的又一重要的环境因素。开展全过程规

范、可靠的电磁辐射监测显得尤为重要。

## 2 区域环境中电磁辐射的危害

城市居民长期在电磁辐射污染环境生活和工作，人体组织由于受到很强的电磁波作用，组织分子原始电场会产生变化，并对细胞生物分子运动造成严重的干扰。长期接触超标的电磁辐射者，可出现头昏、头痛、乏力、胸闷、心悸等神经衰弱综合征；心血管可见心律不齐、心动过缓等心电图改变；眼球晶状体点状或小片状混浊，严重者可形成白内障；男性性功能下降，女性内分泌紊乱，孕妇自然流产，胎儿发育畸形；免疫力低下；癌症发病率增加，儿童可诱发白血病<sup>[2]</sup>。

另外，在较强的电磁辐射环境下，长时间受到电磁影响会导致动植物无法正常生活。部分地区的电磁污染较为严重，周围植被生长也受到影响，成长缓慢<sup>[3]</sup>。

【作者简介】谭福广（1989-），男，中国云南丽江人，硕士，工程师，从事环境监测、环境科学研究。

### 3 区域环境电磁辐射监测的难点

#### 3.1 电离辐射来源较广、类型复杂

随着科学技术发展,区域环境中的电磁辐射可以来自信号站、广播塔、电子设备以及电力系统等,来源多样,难以监测。而且不同来源的电磁辐射信号强度与范围不同,对监测技术的要求也不同,也在一定程度上增加监测难度。

#### 3.2 存在频谱干扰与信号重叠问题

不同来源的信号之间会相互干扰,导致辐射信号之间的重叠,制约监测的精准度,存在技术问题。

#### 3.3 外界环境影响较大

电磁辐射监测环节,白天黑夜、气候、遮蔽物密集度等因素都会对区域内电磁信号强度产生影响,对监测技术有更高的要求。

#### 3.4 数据处理复杂

电磁辐射监测产生的数据量非常庞大,如何从中提取有效信息、分析辐射强度的分布、变化趋势以及可能的风险,是一个复杂的任务。

### 4 区域环境电磁辐射监测要点

辐射污染是一种能量流污染,看不到、摸不着,不易被直接感知。为此,国家生态环境部门专门出台了相关的规范和技术标准,主要以《电磁环境控制限值》(GB8702-2014)、《辐射环境保护管理导则 电磁辐射监测仪器和方法》(HJ/T10.2-1996)为主<sup>[4]</sup>,指导全国范围内的电磁辐射环境监测,为电磁辐射安全监管提供重要支撑,也为辐射污染防治提供重要数据信息,提高电磁辐射污染治理的针对性、实效性。实际来看,区域环境电磁辐射监测的要点主要体现在以下方面。

#### 4.1 监测前的准备工作

##### 4.1.1 确定监测的目标与范围

区域环境中的电磁辐射来源类型较多,监测开展前,相关人员必须确定监测的目标以及范围,为监测活动确定明确的方向。

电磁辐射监测一般以以下几种作为监测目标。首先,可以将现状调查与背景监测作为目标,例如对城市功能区(居住区、商业区、工业区等)进行网格化普查,以掌握某一区域在无特定新增源强情况下的电磁环境本底水平;然后,源项贡献监测也会是监测的目标。旨在评估某一特定电磁设施(如一座新建的移动通信基站或一条高压输电线路)对周边环境的辐射贡献。可以采用“有无对比法”,即在设施运行前后或在不同工况下进行测量;之后要重视投诉验证与纠纷仲裁监测,针对公众对特定地点电磁环境的投诉,进行现场测量,以验证其电磁辐射水平是否符合国家标准;此外在特定情况下还需进行科研性监测,主要为特定科学研究收集数据,需根据科研目标量身定制监测方案。

##### 4.1.2 人员与仪器准备

人员与设备的合理配置是保证工作质量和安全的核心。人员配置环节,需要明确岗位与职能,安排项目负责人、现场操作员、质量监督员、数据记录员等岗位,并安排相应的职能。所有人员必须持证上岗,经过专业培训后对监测的方案、设备的应用以及操作规程有一定了解后才能上岗。

仪器准备环节,应根据监测对象(工频或射频)选择合适的监测仪器,确保其频率响应范围覆盖待测源的主要频段。其次需要进行仪器校准,要求技术人员结合校准证书的复印件开展校准,确保设备在有效的校准周期内;之后要进行性能检查,仪器入场后应对其电池电量、零点检查、响应检查等性能进行监测,确保设备满足监测需求。

##### 4.1.3 区域环境背景调查

为确保监测点位满足要求,技术人员应在正式监测前对预监测点位进行背景调查,提前了解区域源强、地形地貌和气候条件等,评估是否存在突发状况影响监测结果。重点包括通信基站的运营商、频段、扇区朝向、挂高;广播电视台的方位、频率、功率;高压输电线路的电压等级、线路回数、塔型、边导线位置;变电站的电压等级、主变容量、布局等。监测时气象条件应符合仪器使用要求,通常要求在无雨、无雪、无雾、风速小于3级的天气下进行,以避免恶劣天气对测量结果造成干扰。

#### 4.2 现场监测的关键环节

事前准备后的现场监测是区域电磁辐射监测的关键,涉及面较广而且技术性较强,容易出现失误,就需要相关人员对该环节的要点进行分析,结合点位确认、测量与读数、质量控制与安全保障等环节,开展针对性的监测。

##### 4.2.1 点位确认

技术人员在监测前需要结合GPS或者其他地图软件精确定位,确保实际监测点位与布设点位一致,规避点位误差过大导致的辐射监测失准。点位布设要按照代表性、可比性、可行性等原则进行。针对不同的监测对象有不同的监测布设方法。主要有区域环境布设方法和针对不同源强的布设方法。区域环境布设方法又可分为网格布点法、功能区布点法和敏感区布点法。首先是网格布点法,主要适用于大范围的电磁辐射布点,需要将监测区域划分为若干大小均匀的网格,在网格中心或节点处设点测量;其次是功能分区布点法,主要适用于人类生产生活中电磁辐射影响的分析。该布点方法需要在文教区、居民区、商业区、工业区等不同区域分布点位,全面收集电磁辐射监测数据;然后是敏感目标重点布点法,适用于学校、医院以及养老院等敏感目标,或者是在教学楼、宿舍等人员长时间停驻的位置布设点位,重点监测区域电磁辐射的强度。不同源强的布设方法主要场景为高压输变电和移动通信站。高压输变电点位布设应沿垂直于线路走向或变电站围墙的廊方向布设。对于变电站,点

位为离测量外墙 5m 远布设,进线、出线处不设点位。测量高度通常为地面以上 1.5m-1.7m。对于输电线路,点位始于线路中心或边导线正下方,监测点间距一般为 5m,顺序测至距离边导线对地投影 50m 处为止。点位布设注意避开金属架构和高大植物。如沿线周围有敏感点,必须对线路走廊内及边缘的住宅、学校、幼儿园、医院等敏感建筑的阳台、窗口、屋顶等公众可到达区域进行重点监测,该数据直接关系公众暴露评估。变电站和输电线路重点关注工频电场和工频磁场的分布。移动通信站点布设应重点覆盖基站主瓣方向上的敏感目标。在距离天线不同水平距离,如 10m, 30m, 50m 处布点,垂直断面考虑建筑楼层的底层、中层和高层。在点位布设时建议考虑背景值的监测,背景值监测选取远离基站不受其干扰点位。在监测 5G 基站时,由于其波束赋形特性,需在多个位置进行较长时间测量以捕捉其时间平均功率密度。移动通信站点重点关注射频电磁场。

#### 4.2.2 测量与仪器规范操作

在测量开始前,针对不同的监测目标,需要记录监测时间、地点、仪器型号、探头型号、环境参数、电压等级、天线参数等内容,然后选择安装好合适的探头后,使仪器开机预热达到稳定状态。监测时仪器架设高度与位置的选择也会影响电磁辐射监测精准度,要求监测人员合理架设。实际监测中,仪器探头高度一般需要架设在离地面 1.5m 至 1.7m 之间,或 0.5m-1m 之间(儿童身高或成人坐姿),并且通过三脚架保持稳定,而且操作人员一般需要距离探头 2.5m 以外,避免人员对辐射信号产生阻挡。测量时,数据的读取需待数据稳定后开始记录。对于工频电磁场,在每个监测点位应连续读取不少于 5 个数据、每个数据的测量时长不少于 15 秒。对于射频电磁场,由于信号的波动,应适当延长监测时间,读取记录 15s 内稳定读数的最大值。需要注意的是测量射频电磁场时一般选用高峰时段测量,即: 05:00-09:00、11:00-14:00、18:00-23:00。

#### 4.2.3 质量控制

质量控制是保证监测结果精准的关键,需要全过程开展,保证各项操作均符合质量要求。首先要进行仪器性能核查,监测人员应在监测前、后等时间对仪器的性能检查,包括仪器的校准证书是否过期、零点校准、灵敏度检查等,保证仪器状态稳定。其次对于人员的要求,至少两名以上持证上岗人员共同完成。

### 4.3 数据处理与报告编制

#### 4.3.1 数据处理与分析

数据处理环节,监测人员首先需要通过数据筛查分析去除剔除明显其他干扰的异常值,以保证数据的代表性;其次对于可以直接读数的场强及功率密度,计算其平均值和标准差。如果监测了若干个频段,则需要依照国家标准要求计

算场强平方的加权合成,来评价其综合影响是否超出国家标准限值。如果对于监测点进行了长时间的监测,进行数据分析时,通过均值、方差、标准差等统计方法,结合图表等,分析辐射强度以及其变化趋势,并掌握电磁辐射的分布状况。也需要通过频谱分析,了解不同频段的电磁辐射强度分布,帮助判断辐射源的特点。在此基础上将得到的监测结果与国家标准《电磁环境控制限值》(GB8702-2014)中限定的公众暴露控制限值进行对比,评估区域内的电磁辐射是否符合标准。

#### 4.3.2 报告编制

报告编制作为完整监测的最后一环,需要通过以下步骤编写。首先,需要明确监测项目的名称、监测日期、监测对象、监测类型、监测依据、监测仪器、技术指标、监测环境、监测人员等。其次是监测结果,监测结果一般以表格的形式展示在监测报告中。需要注意的是监测结果需要与原始记录表相一致,原始记录能够溯源,全过程进行质量控制,并且保存原始记录待查。对于需要附监测图的源强监测,还需绘制清晰、准确的监测点位图,以便监测查验监测结果的准确性、真实性以及代表性。最后是人员的签字,一般需要进行四级审核签字,签字人包括报告编制人员、技术负责人、质量负责人、授权签字人等组成。如后续需要对监测结果进行评价,建议编制专业的结果分析报告,在此报告中体现评价结论,并就区域电磁环境管理等提出建设性建议。

## 5 结语

区域环境电磁辐射监测作为评价公众暴露控制限值的重要手段,监测数据的真实性、准确性、代表性直接关系到电磁辐射对人类健康影响。本文根据电磁辐射的来源特点,结合我国现有的标准和实践经验,阐述了区域电磁环境监测的技术要点,为提升电磁辐射监测提供了借鉴,也为电磁辐射精细化管理提供了参考。面对物联网、5G 等新技术带来的复杂电磁环境,监测技术规范、评价标准与管理理念也需与时俱进,向智能化、自动化和透明化方向发展。只有如此,区域环境电磁辐射监测技术才能更好地服务于环境管理、风险沟通和公共决策,为构建和谐、安全的电磁环境提供坚实的技术支撑。

### 参考文献

- [1] 王冠,缪尔康,徐辉,等. 区域环境电磁辐射监测技术研究 [J]. 辐射防护, 2024, 44 (03): 224-232.
- [2] 黎昌金,陈琦,李建龙. 电磁辐射的危害与防护探讨 [J]. 内江科技, 2018, 39 (09): 108-110+118.
- [3] 欧志海. 分析城市电磁辐射污染的产生原因与危害 [J]. 资源节约与环保, 2017, (02): 36+38.
- [4] 国家环境保护局. HJ/T 10.2-1996 辐射环境保护管理导则 电磁辐射监测仪器和方法[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.

# Analysis of Atmospheric Environmental Pollution Monitoring and Environmental Protection Methods

Chunjuan Long

Ecological Environment Monitoring Station of Liangping District Chongqing City, Chongqing, 405200, China

## Abstract

Against the backdrop of modern industrial development, air pollution has become increasingly severe, causing serious phenomena such as smog, acid rain, and ozone layer depletion. These issues not only disrupt ecological balance but also threaten human health, posing significant challenges to sustainable human development. Therefore, relevant authorities must strengthen air pollution monitoring by optimizing the application of traditional monitoring technologies, three-dimensional monitoring systems, and remote sensing techniques. This will enable detailed understanding of air pollution conditions, providing crucial data for formulating pollution control strategies and environmental protection plans. This article analyzes air pollution monitoring methods and proposes scientifically sound measures to effectively improve air quality, enhance environmental protection efficiency, and promote balanced development between human society and the ecological environment.

## Keywords

atmospheric environment; pollution monitoring; environmental protection method

## 大气环境污染监测及环境保护方法分析

龙春娟

重庆市梁平区生态环境监测站, 中国·重庆 405200

## 摘要

现代化工业发展背景下, 大气环境污染日益严重, 造成严重的雾霾、酸雨、臭氧层空洞等现象, 不仅打破生态环境平衡, 且威胁人体健康, 非常不利于人类社会的长远发展。因此, 相关部门要做好大气环境污染监测工作, 对传统监测技术、立体监测技术、遥感监测技术等进行优化应用, 详细掌握大气环境污染情况, 为后续污染治理、环境保护方案的提出提供数据依据。文章主要对大气环境污染监测方法进行分析, 并提出科学合理的空气污染治理措施, 有效改善空气环境质量, 提升环保效能, 促进人类社会与生态环境的平衡发展。

## 关键词

大气环境; 污染监测; 环境保护方法

## 1 引言

近年来, 我国空气质量日益下降, 需要加大环境监测强度, 详细掌握大气环境污染数据, 为后续环保法律法规的制定提供数据依据, 优化环保方案措施, 有效改善空气环境质量, 为人们创造良好的生存环境, 强化民众生活幸福感。

## 2 大气环境污染监测内容

现代化社会发展背景下, 我国工业化水平提高, 三废排放量逐渐增加, 对生态环境造成严重破坏, 甚至引发臭氧层空洞、酸雨等问题, 对人体健康造成极大威胁, 不利于地球生态资源的可持续发展<sup>[1]</sup>。其中, 大气环境污染来源主要有汽车尾气排放、燃煤、扬尘等, 污染成分复杂多样, 覆盖范围广, 较难治理。此外由于空气流动性, 导致大气污染物向更大范围扩散, 进一步加大了治理难度。

大气环境污染监测可以为大气污染防治的开展提供详细的数据参考, 保障污染防治工作的针对性和有效性。其中常见的大气环境污染监测内容有氮氧化物、颗粒物, 二氧化硫等, 具体如表 2 所示。大气污染对生态环境、人类健康造成严重印象, 一旦大气污染物渗流到土壤、水体中, 会导致水体富营养化和土壤酸化, 危害动植物正常生长和繁衍, 严重破坏生态平衡。此外污染物落入到水体中会破坏水生生物栖息地; 二氧化碳、甲烷等大气污染物会引起全球气候变暖, 引发海平面上升、生态系统变化等, 严重情况下还会引发极端天气事件。大气环境污染也会引发人类身体疾病, 如空气中的细颗粒物、臭氧等刺激人体呼吸系统, 甚至引发呼吸道感染、哮喘等疾病; 多环芳烃、苯等污染物会极大癌症发生几率; 铅、汞等重金属污染物会影响神经系统发育和功能, 降低人类认知能力; 臭氧、二氧化硫会削弱人体免疫系统, 加大感染疾病几率。

表2 大气污染物分类及其主要来源

污染物分类	典型的污染物	来源
氮氧化物	一氧化氮、二氧化氮	汽车尾气、发电厂、工厂排放、燃煤锅炉
挥发性有机化合物	苯、甲烷、乙烯	石油化工、印刷、涂料、溶剂使用、汽车尾气
氮氧化物	氮	化肥农药、畜禽粪便分解、农田排水等农业活动
颗粒物	PM <sub>10</sub> 、PM <sub>2.5</sub>	燃煤和油燃料、工业排放、道路尘埃、建筑工地
二氧化硫	二氧化硫	燃煤和石油燃煤、发电厂、工厂、锅炉、钢铁厂
一氧化碳	一氧化碳	汽车尾气、工厂排放、家庭烧煤
臭氧	臭氧	交通排放、工业活动
重金属	铅、汞	燃煤、金属冶炼、废水排放、废弃物处理

### 3 大气环境污染监测技术要点

#### 3.1 传统检测技术

在大气环境污染监测工作中，需要严格按照相关技术规范要求，科学布设监测点位，其中监测指标主要有一氧化碳、臭氧、二氧化硫、二氧化氮、PM<sub>2.5</sub>、气象参数等，并结合不同污染物特性的不同，采取差异化的监测方法。如采用国内重量法监测固体颗粒物，即利用具备切割功能的采样器，通过恒定速度提取一定体积的空气，并将其捕集到既定质量的过滤器上，对过滤前后的质量进行称量，进而计算固体颗粒物浓度；利用分光光度法监测二氧化硫，即利用测定被测物质特定波长，来判断空气中的二氧化硫浓度，该方法灵敏性较高，抗干扰能力强，可以保障监测精度；利用化学发光法监测氮氧化物，即多孔玻璃板吸收管内装入吸收液，并将其与三氧化铬-砂子氧化管，然后按照每分钟0.3L的流量进行采样，且要避免光操作，当吸收液呈现微红色后就需要停止采样，进而计算氮氧化物浓度，该方法灵敏度较高<sup>[2]</sup>。

#### 3.2 立体监测技术

新时代，要对数字化、信息化技术进行优化应用，进而创新大气环境污染监测方法，构建立体化监测模式，并在移动智能设备的辅助作用下实现实时动态监控。地基遥感监测技术属于常见的监测手段，其方法主要包含红外、波段监测技术等，该方法主要是依据不同大气污染成分的太阳吸收光谱也存在一定差异性，进而采集光谱数据，进而帮助工作人员详细掌握不同污染物的种类、浓度等数据；车载监测技术，就是以汽车为载体，安装专业监测设备，按照相关技术规范要求，把车辆驶入到被测监测区域，进而提升监测工作效率，通过该方法能够对大气数据变化进行动态监测，进而精准预测和判断环境污染移动情况，为后续污染防治工作的开展提供精准数据依据；机载遥感监测技术，就是利用利用飞机为载体搭载专业监测设备，在大气平流层采集空气数据，精准测量污染情况，为后续环境保护、污染治理提供数据支撑。

#### 3.3 构建物联网环境监测系统

在大数据、物联网技术支持下，构建完善的环境监测系统，促进大气环境污染监测的高效开展。在物联网技术支

持下，能够实现监测系统硬件设备拥有更多接口，保障设备通用性，以便适用智能设备种类、协议的多样化需求，使其在各种场合都能够实现环境数据的高效化采集和处理；在系统软件运行过程中，要充分发挥大数据技术的数据收集、挖掘和分析功能，助力海量监测数据的高效处理和存储。该系统在大气环境污染监测中的应用，能够实现环境二维监测，促进环境污染全方位巡检，并通过三维方式对监测数据进行可视化展现。

#### 3.4 遥感监测技术

遥感监测技术属于非接触大气环境监测方法，能够对特定区域进行跟踪测量，实现环境监测工作的动态化、全面覆盖化。通过遥感监测技术的应用，能够对各类污染数据进行全面采集和分析，如污染物构成、浓度、扩散、变化趋势等情况，同时还能够详细采集臭氧总量、干湿沉降、温室气体等数据，结合以上数据精准评估和判断空气质量<sup>[3]</sup>。在遥感监测工作中，要详细分析空气环境污染成分，以便精准预测辐射、臭氧量等变化趋势；臭氧层遥感监测中，能够精准把控臭氧层变化情况和趋势，详细了解不同高度范围臭氧层分布情况，绘制臭氧层图；在对居住区进行遥感监测时，能够对该区域的大气环境情况进行动态监测，如利用该技术监测热岛分布情况，为精准把控和防治空气污染提供数据依据。

### 4 大气环境保护与污染治理方法

#### 4.1 强化环保宣传

为了提升大气环境保护效果，需要构建完善的环境保护体系，强化环保宣传力度，尤其要结合人们日常活动情况组织开展专项宣传活动，确保人们能够详细了解大气污染危害，并掌握环境污染治理方法和环境保护方法，充分认识到环境保护工作的重要性，并积极参与到环保活动中，同时在日常生产、生活中自觉规范约束自身行为，减少环境污染现象的出现。在具体工作中，政府部门要充分发挥自身的职能作用，健全环保规章制度，促进环保工作的规范化、高效化开展，有效提升群众环保意识。在政府部门带动下，在企业、社区广泛开展环保政策宣传工作，并在日常宣传工作中融入绿色环保知识，加强社会各界对环保工作的重视程度，

提升整体社会的环保意识。政府部门要积极鼓励企业参与到环保工作中,并结合企业实际生产经营情况,助力企业构建完善的排污降耗体系,有效控制污染物排放量。鼓励广大群众积极参与环境管理监督工作中,每个人都要积极监察日常生活、生产中的大气环境情况,及时向相关反馈异常情况,强化环境监测效能。要积极创新环保宣传方法,利用大数据、云计算深度挖掘监测数据内在联系,共享环保信息,有效拓展环保信息覆盖范围。环保部门与环境监测中心、教育宣传部门联动开展环保活动日,引导民众走进监测中心,近距离了解雾霾、泥石流的发生机制,有效提升环保教育效果。此外还可以利用微博、微信等新媒体渠道进行环保宣传,提升信息传播速度,助力社会各界人士树立科学的环保意识,强化环保监督效果。通过电视、报纸、广播、张贴横幅等传统方式进行广泛宣传;或者制作网络网页、软件等进行宣传;组织开展环保活动、辐射监督检查活动等,确保公众能够深刻认识到环保工作的重要性。

#### 4.2 完善网格监测

在大气环境污染监测中,要结合实际情况,科学布置点位,提前安排专业人员深入实地开展现场勘察工作,进而对监测目标区域的大气污染程度、建筑物分布、交通情况等等进行详细了解,进而科学合理的布设监测点位的位置和数量,保障监测数据的完整性、准确性采集。此外还需要优化监测围控点,尤其在明确监测范围后,需要强化处理周围监测工作,详细掌握大气污染可能对污染防治工作带来的影响,进而针对性设置检测站,详细记录围控点情况<sup>[4]</sup>。当空气中的污染物种类、浓度过高,致使污染物超过大气净化能力,引起大气重度污染,针对这种情况需要对目标区域内的工厂、化工厂等情况进行详细调查,在周边建设检测站,详细了解废物排放情况,如果发现污染超标情况,需要采取合理的污染治理和环保措施。汽车尾气是引起空气污染的主要因素之一,需要把道路污染纳入大气网格化监测,对车辆尾气排放情况进行实时监测,及时处理超标现象。

#### 4.3 强化污染治理

为了改善空气质量,需要强化大气污染治理力度,如组织开展蓝天保卫战,针对不同区域空气污染情况的不同,采取针对性、差异化的治理措施,实现空气污染治理工作的精细化管控,对空气质量进行精准预报,实现联动治污,促进区域与区域之间的协同合作,尤其要对交通、工业、扬尘等污染进行重点防控<sup>[5]</sup>。此外,要加大渣土车监管力度,设卡检测,确保渣土车按照规定安装密闭盖板,避免带泥行驶,防止灰尘泄漏,严禁车辆进入城区,设置充足的冲洗车

辆设备。要组织开展碧水保卫战,建设工业污水集中处理设施,构建城市污水处理厂,对现有的城镇污水管网进行改造,有效提升工业污水、城市生活污水达标排放。要科学管控和修复土壤污染,建设农村生活污水集中处理设施,有效空气污水排放。

#### 4.4 优化调控工业布局

燃煤、化工废气排放是引起大气污染的主要因素之一,企业污染具有隐蔽性、点多面广、动态变化等特点,治理难度较大,需要加大违规治理强度,制定完善的污染防治、保护环境方案,有效改善环境质量,实现生态环境治理工作的常态化。在大气环境治理和保护中,需要优化产业布局设计,调整能源结构,促进产业绿色化发展。如鼓励铁合金行业兼并、重组、改造,促进产业集中化、规模化发展,减少能源消耗;改进焦化行业落后的工艺装备,引进大型现代化焦炉<sup>[6]</sup>。此外,还需要优化调整产业结构,控制高排放、高耗能、低水平项目发展,严禁违规新增水泥、钢铁行业产能;积极发展新能源、节能环保等新兴产业,关停整合燃煤锅炉、落后燃煤小热电,积极鼓励企业升级改造媒体发生炉、砖瓦窑等;优化大气污染防治惠企措施,鼓励重点工业企业高质量发展,并结合不同地区情况,强化违规排放企业整治工作,有效改善空气质量。

### 5 结语

综上所述,为了改善空气环境质量,需要加大大气环境污染监测工作,对传统监测技术、立体监测技术、遥感监测技术等进行优化应用,详细掌握大气污染成分种类、浓度等,进而提出针对性的污染治理措施,加大环保宣传力度,优化调控工业布局,促进环保效果的提升。

#### 参考文献

- [1] 张雪梅.探索农业机械化技术推广与农机维修中存在的问题及对策[J].河北农机,2025,(06):81-83.
- [2] 张远姝.现阶段基层农业机械化发展推广中存在的问题与对策[J].河北农机,2025,(05):76-78.
- [3] 张君君.基层农业机械化技术推广工作存在的问题及对策[J].种子科技,2023,41(19):124-126+129.
- [4] 姚瑶,施杨.大气环境污染监测及环境保护举措分析[J].环境与发展,2020,32(08):164+166.
- [5] 徐能学.基层农业机械化技术推广工作存在的问题及处理对策研究[J].时代农机,2020,47(05):22-23.
- [6] 于海峰.基层农业机械化技术推广中存在的问题及其解决对策[J].南方农业,2019,13(29):152-153.

# Research on Optimization of Industrial Water Treatment Production Process Based on Membrane Separation Technology

Shipu Feng

Guoneng Zhejiang Ninghai Power Generation Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang, 315600, China

## Abstract

Industrial wastewater is complex in composition and has a high concentration of pollutants. Traditional treatment processes are difficult to achieve the dual goals of efficient purification and resource recovery. Membrane separation technology, as a new type of separation technology based on the principle of selective osmosis, achieves efficient separation of pollutants from water through the retention function of membranes. It features high separation accuracy, simple operation and environmental friendliness, and has been widely applied in industrial wastewater treatment, seawater desalination, pure water preparation and other fields. However, problems such as membrane fouling, high treatment costs, and weak resistance to shock loads have restricted its large-scale application in industrial production. Therefore, conducting research on the optimization of industrial water treatment processes based on membrane separation technology holds significant practical significance and engineering value for enhancing treatment efficiency, reducing operating costs, and promoting the recycling of industrial water resources.

## Keywords

Membrane separation technology; Industrial water treatment; Process optimization; Membrane fouling control; resource recycling

## 基于膜分离技术的工业水处理生产工艺优化研究

冯世镛

国能浙江宁海发电有限公司, 中国·浙江 宁波 315600

## 摘要

工业废水成分复杂、污染物浓度高,传统处理工艺难以实现高效净化与资源回收的双重目标。膜分离技术作为一种基于选择性渗透原理的新型分离技术,通过膜的截留作用实现污染物与水的高效分离,具有分离精度高、操作简便、环境友好等特点,已广泛应用于工业废水处理、海水淡化、纯水制备等领域。然而,膜污染、处理成本高、抗冲击负荷能力弱等问题,制约了其在工业生产中的规模化应用。因此,开展基于膜分离技术的工业水处理工艺优化研究,对提升处理效率、降低运行成本、推动工业水资源循环利用具有重要的现实意义与工程价值。

## 关键词

膜分离技术; 工业水处理; 工艺优化; 膜污染控制; 资源回收

## 1 引言

随着中国工业经济的高速发展,钢铁、化工、电子等工业行业的用水量与排水量持续攀升,据《2024年中国水资源公报》数据显示,2023年全国工业用水量达1057亿立方米,占总用水量的19.2%,而工业废水排放量占全国废水总排放量的34.5%,其中部分废水含有重金属、难降解有机物等污染物,若未经有效处理直接排放,将对水资源环境造成严重破坏,同时也加剧了水资源供需矛盾。在此背景下,开发高效、稳定、经济的工业水处理技术,实现水资源的循

环利用,已成为工业领域践行“双碳”目标、推动绿色转型的必然要求。

## 2 膜分离技术的基本原理与分类

### 2.1 核心分离原理

膜分离技术的核心原理是利用膜的选择性渗透作用,在压力差、浓度差或电位差等驱动力作用下,使水体中的污染物与水实现分离。膜作为分离介质,其孔径大小、表面电荷特性及亲疏水性等参数,直接决定了分离效率与截留效果。与传统分离技术相比,膜分离过程具有无相变、能耗低、分离精度可控等优势,可实现从微米级悬浮物到纳米级离子的高效截留。

【作者简介】冯世镛(1982-),男,中国浙江苍南人,硕士,工程师,从事电厂化学及环保专业研究。

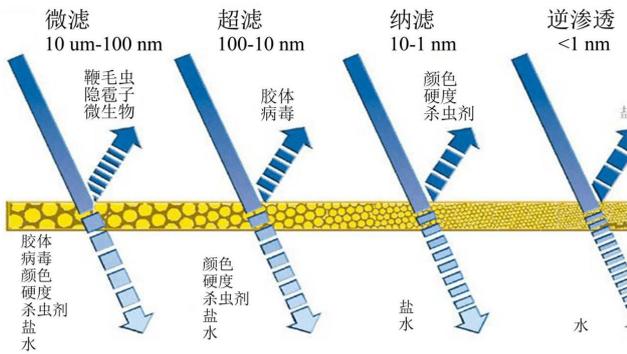


图1 膜分离技术原理

## 2.2 主要技术类型及应用特性

根据膜孔径大小与分离机理的差异,工业水处理中常用的膜分离技术可分为微滤(MF)、超滤(UF)、纳滤(NF)、反渗透(RO)及电渗析(ED)等,各类技术的应用特性如下:

**微滤(MF):**微滤(MF)的膜孔径范围为 $0.1\text{--}10\ \mu\text{m}$ ,是处理流程的“前置卫士”,主要截留水体中肉眼可见的悬浮物、胶体颗粒及活性污泥、藻类等微生物,其运行依赖 $0.01\text{--}0.2\text{MPa}$ 的压力差驱动,能耗较低。该技术操作简便、成本可控,在工业水处理中多用于预处理环节,核心作用是保护后续精密膜组件免受大颗粒磨损。例如在化工废水处理系统中,MF可高效截留悬浮颗粒,将出水悬浮物含量稳定控制在 $1\text{mg/L}$ 以下,为后续深度处理筑牢基础。

**超滤(UF):**超滤(UF)的膜孔径缩至 $0.001\text{--}0.1\ \mu\text{m}$ ,截留精度显著提升,可有效捕获蛋白质、多糖等大分子有机物,以及细菌、病毒等微生物,操作压力需提升至 $0.1\text{--}0.5\text{MPa}$ 。其应用场景广泛覆盖食品加工、循环水回用等领域,在啤酒厂废水处理中表现突出——啤酒生产产生的废水中含大量有机残渣,经UF处理后,不仅浊度大幅降低,COD去除率更可达 $85\%$ 以上,处理后的水可直接用于厂区绿化或设备冲洗。

**纳滤(NF):**纳滤(NF)膜孔径仅 $0.0001\text{--}0.001\ \mu\text{m}$ ,兼具超滤的截留性能与反渗透的脱盐潜力,可精准截留二价及以上离子、染料等小分子有机物,操作压力为 $0.5\text{--}1.5\text{MPa}$ 。在印染废水处理中,NF展现出独特优势,既能实现染料与盐的高效分离,染料截留率超 $98\%$ ,又能回收废水中的盐资源循环用于染色生产,既降低污染物排放,又节约原料成本,实现环保与效益的双赢。

**反渗透(RO):**膜孔径小于 $0.0001\ \mu\text{m}$ ,能截留几乎所有离子、小分子有机物及微生物,操作压力为 $1.0\text{--}4.0\text{MPa}$ ,是目前海水淡化、超纯水制备的核心技术。在电子工业中,RO+EDI(电去离子)组合工艺可将水的电阻率提升至 $18\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ 以上,满足芯片生产的高纯水需求。

**电渗析(ED):**利用离子交换膜的选择透过性,在电场作用下实现离子的定向迁移,主要用于高盐废水脱盐,操作压力较低( $0.2\text{--}0.5\text{MPa}$ )。在煤化工高盐废水处理中,ED可将盐含量从 $10000\text{mg/L}$ 降至 $1000\text{mg/L}$ 以下,为后续

蒸发结晶减少能耗。

## 3 工业水处理中膜分离工艺的应用现状与瓶颈

### 3.1 应用现状

目前,膜分离技术已在化工、电子、钢铁、食品等多个工业领域实现规模化应用,形成了“预处理+膜分离+深度处理”的典型工艺模式。以化工行业为例,采用“混凝沉淀+UF+RO”工艺处理农药生产废水,可使COD去除率达到 $92\%$ ,氨氮去除率超过 $95\%$ ,处理后的水可用于生产循环补水;在电子工业中,“预处理+RO+EDI”工艺已成为超纯水制备的标准流程,占电子工业纯水制备系统的 $70\%$ 以上。

从应用规模来看,2024年中国工业水处理膜市场规模达到380亿元,其中RO膜占比最高( $45\%$ ),其次为UF膜( $25\%$ )和NF膜( $15\%$ )。在政策推动下,膜技术在高盐废水处理、再生水回用等领域的应用比例持续提升,如京津冀地区工业企业再生水回用率已达到 $40\%$ ,其中膜分离技术占主导地位<sup>[1]</sup>。

### 3.2 主要瓶颈问题

#### 3.2.1 膜污染问题突出

膜污染是制约膜分离工艺稳定运行的核心问题,主要包括无机污染(钙、镁离子形成的结垢)、有机污染(腐殖酸、油脂等吸附)及生物污染(微生物滋生形成的生物膜)。工业废水中污染物成分复杂,膜污染速率远高于市政污水,如煤化工废水处理中,RO膜运行3个月后通量即下降 $50\%$ ,需频繁进行化学清洗,不仅缩短膜寿命(从3年降至1.5年),还增加了化学药剂消耗与污泥排放量。

#### 3.2.2 处理成本偏高

膜分离工艺的成本主要包括膜组件购置成本、能耗成本及运行维护成本。目前,中国高端膜组件(如抗污染RO膜)仍依赖进口,单价达到 $800\text{--}1200\ \text{元}/\text{m}^2$ ,占设备总投资的 $30\%\text{--}40\%$ ;在能耗方面,RO工艺的单位能耗为 $2.5\text{--}4.0\text{kWh}/\text{m}^3$ ,高于传统生物处理工艺( $0.5\text{--}1.0\text{kWh}/\text{m}^3$ );此外,膜清洗、药剂消耗等维护成本占运行成本的 $25\%$ 以上,导致工业企业应用意愿受限。

#### 3.2.3 抗冲击负荷能力弱

工业废水的水质、水量波动较大,如化工企业间歇生产导致废水中COD浓度在 $500\text{--}5000\text{mg/L}$ 之间波动,传统膜分离工艺难以适应这种冲击,易出现膜通量骤降、截留率下降等问题。例如,某印染厂因染料投料波动,导致进入UF系统的废水pH值从 $7.0$ 升至 $11.0$ ,24小时内UF膜通量下降 $60\%$ ,需停机进行酸洗恢复,造成生产损失。

#### 3.2.4 资源回收效率低

工业废水中含有大量可回收资源(如重金属、贵金属、化工原料等),但传统膜工艺多以水质净化为目标,资源回收效率较低。例如,电镀废水中含有镍、铜等重金属,采用

单一 RO 工艺仅能实现水的回用,重金属离子浓缩于浓水中,需进一步处理,无法直接回收利用;食品加工废水中的蛋白质、多糖等资源,因膜截留精度不足或工艺设计不合理,回收率低于 50%<sup>[2]</sup>。

## 4 基于膜分离技术的工业水处理工艺优化策略

### 4.1 预处理工艺优化, 强化污染物去除

预处理是控制膜污染的关键环节,通过优化预处理工艺,可有效去除水体中的悬浮颗粒、胶体、有机物及部分离子,降低膜污染风险。具体优化措施包括:

一是采用“混凝-吸附-微滤”复合预处理工艺。针对高有机物工业废水,在混凝环节选用聚合氯化铝(PAC)与聚丙烯酰胺(PAM)复合药剂,投加量分别为 50-80mg/L 和 1-2mg/L,可使 COD 去除率提升至 60% 以上;吸附环节采用改性活性炭,其比表面积达到 1200m<sup>2</sup>/g,对腐殖酸等有机物的吸附容量提升 30%;后续微滤工艺可进一步去除絮体颗粒,使进入 UF 系统的废水 SDI(污染指数)降至 3 以下,显著降低膜污染速率。

二是针对高盐废水,增设软化预处理单元。采用石灰-纯碱软化法,去除水中的钙、镁离子,控制钙离子浓度低于 50mg/L,可有效防止 RO 膜结垢;对于含硅废水,添加聚合硫酸铝铁作为除硅剂,除硅率达到 90% 以上,避免硅垢在膜表面沉积。

三是引入高级氧化预处理技术。对于难降解有机物含量高的工业废水(如制药废水),采用芬顿氧化或臭氧氧化技术,氧化降解大分子有机物,使废水 B/C 比从 0.2 提升至 0.5 以上,不仅降低膜有机污染风险,还提高了后续工艺的可生化性。

### 4.2 膜组件优化, 提升性能与寿命

#### 4.2.1 膜材料改性与新型膜开发

通过膜材料表面改性,提升膜的抗污染性与分离性能。采用亲水性改性技术(如接枝聚乙二醇),使 RO 膜表面接触角从 85° 降至 30° 以下,减少有机物吸附;采用抗污染涂层技术,在 UF 膜表面涂覆纳米二氧化钛涂层,利用其光催化作用抑制微生物生长,生物污染速率降低 40%。

开发新型膜组件,如中空纤维帘式 MBR 膜,采用 PVDF(聚偏氟乙烯)材料,膜丝直径从 0.5mm 增至 0.8mm,抗拉强度提升 50%,同时优化膜丝排列方式,使曝气效率提升 20%,减少膜丝缠绕与污染;另外,新型正渗透(FO)膜的开发,以浓度差为驱动力,单位能耗仅为 RO 膜的 1/3,在高盐废水处理中具有广阔应用前景<sup>[3]</sup>。

#### 4.2.2 膜组件结构优化

优化膜组件内部流道设计,提升传质效率,减少浓差极化。将传统 RO 膜组件的平行流道改为螺旋流道,使水流扰动增强,浓差极化系数从 0.8 降至 0.3;采用错流过滤方式替代死端过滤,控制膜表面流速在 1.5-2.0m/s,及时带走膜表面污染物,膜通量稳定率提升 35%。

此外,针对不同水质特点选择合适的膜组件类型,如处理含油废水时选用板式 UF 膜,其表面光滑、易清洗,油污去除率达到 99%;处理高粘度废水时选用管式膜组件,避免膜孔堵塞,运行稳定性提升 50%。

### 4.3 运行参数优化, 实现高效低耗运行

通过正交试验与响应面法,优化膜分离工艺运行参数,确定最佳操作条件。在 RO 工艺中,针对化工废水处理,优化操作压力为 2.5MPa、温度为 25℃、pH 值为 6.5,此时 COD 去除率达到 98%,单位能耗降至 2.8kWh/m<sup>3</sup>,较传统参数节省能耗 15%;在 UF 工艺中,控制跨膜压差为 0.15MPa、反洗周期为 30 分钟、反洗时间为 60 秒,膜通量衰减速率降低 30%。

引入智能控制技术,实现运行参数的实时调控。通过在线监测水质指标(COD、浊度、SDI 等)与膜运行参数(通量、压力、温度等),构建模糊控制模型,当废水浊度突然升高时,系统自动提升混凝剂投加量并降低膜运行通量,避免膜污染加剧;利用 PLC 控制系统实现膜清洗的自动化,根据膜污染程度精准控制清洗药剂浓度与清洗时间,化学药剂消耗减少 20%。

### 4.4 系统集成优化, 提升资源回收效率

#### 4.4.1 “膜+”组合工艺构建

构建“膜+吸附”“膜+离子交换”“膜+蒸发结晶”等组合工艺,实现水质净化与资源回收的双重目标。在电镀废水处理中,采用“UF+NF+离子交换”组合工艺,UF 去除悬浮物,NF 截留重金属离子,离子交换柱回收浓缩液中的镍、铜离子,重金属回收率达到 95% 以上,回收的金属盐可直接回用于电镀生产;在煤化工高盐废水处理中,采用“RO+ED+蒸发结晶”组合工艺,RO 实现水回用,ED 进一步浓缩盐溶液,蒸发结晶得到工业级氯化钠,盐回收率达到 90%。

#### 4.4.2 浓水资源化利用

针对膜分离工艺产生的浓水,开发分级处理与资源化技术。对于低浓度浓水(盐含量 < 5000mg/L),采用“高级氧化+UF”工艺处理后回用于循环水系统;对于高浓度浓水(盐含量 > 10000mg/L),采用正渗透(FO)技术进一步浓缩,浓缩液用于蒸发结晶制盐,淡水回用于生产;在制药废水浓水处理中,采用纳滤膜分级截留,分离出的有机溶剂(如甲醇、乙醇)经精馏回收后重新用于生产,资源回收收益覆盖处理成本的 60%<sup>[4]</sup>。

## 5 结语

本文通过对膜分离技术在工业水处理中的应用研究,明确了膜污染、处理成本高、抗冲击负荷弱等核心瓶颈问题,并从预处理、膜组件、运行参数及系统集成四个维度提出优化策略。未来,膜分离技术在工业水处理中的发展方向趋向低碳化发展,开发低能耗膜技术,如正渗透、膜蒸馏,结合新能源,如光伏、风电供电,实现水处理过程的碳中和,构

建“水质净化-资源回收-梯级利用”的一体化工艺体系，实现工业废水的资源化循环利用，推动工业绿色低碳转型。

### 参考文献

- [1] 侯亚洲.反渗透设备在工业水处理中的应用及维护[J].设备管理与维修,2024,(18):79-81.
- [2] 谭冲,李俊生,尹煜泓.食品工业废水处理技术及工程实例[M].化学工业出版社:202407:218.
- [3] 顾跃雷.膜分离技术在工业水处理中的应用[J].山西化工,2024,44(04):184-185+246.
- [4] 李剑锋.膜分离技术在工业水净化中的应用研究[J].信息记录材料,2020,21(01):25-26.

# Ecological Reconstruction Technology and Vegetation Restoration Strategy of Soil and Water Conservation in Mine Waste Land

Jianfeng Wang

Water Affairs Bureau of Qinzhou District, Tianshui City, Gansu Province, Tianshui, Gansu, 741000, China

## Abstract

The degradation of abandoned mining lands constitutes a global environmental challenge. Prolonged mining activities have caused soil degradation, soil erosion, and vegetation destruction, severely compromising ecosystem stability. Soil and water conservation coupled with vegetation restoration are recognized as pivotal technologies for rehabilitating these areas. This study examines current practices and challenges in ecological reconstruction techniques for abandoned mining lands, while analyzing key strategies for vegetation recovery. Through case studies, we propose tailored soil and water conservation and vegetation restoration solutions, aiming to provide theoretical foundations and practical guidance for mine ecological restoration. Research findings demonstrate that implementing scientific conservation measures and plant restoration strategies can effectively enhance ecological functions, restore biodiversity, and promote sustainable development of regional ecosystems.

## Keywords

mine abandoned land; soil and water conservation; vegetation restoration; ecological reconstruction; environmental remediation

## 矿山废弃地水土保持生态重建技术与植被恢复策略

王建锋

甘肃省天水市秦州区水务局, 中国·甘肃 天水 741000

## 摘要

矿山废弃地的生态环境恶化是全球性环境问题之一。长期的矿山开采活动导致土壤退化、水土流失和植被破坏,严重影响生态系统的稳定性。水土保持与植被恢复被认为是改善矿山废弃地生态环境的关键技术。本文探讨了矿山废弃地水土保持与生态重建技术的现状与挑战,分析了植被恢复的关键技术和策略。通过案例分析,提出了适合矿山废弃地水土保持和植被恢复方案,旨在为矿山生态修复提供理论支持和实践指导。研究表明,采用科学的水土保持措施和植物恢复策略,能够有效提升矿山废弃地的生态功能,恢复生物多样性,并推动区域生态环境的可持续发展。

## 关键词

矿山废弃地; 水土保持; 植被恢复; 生态重建; 环境修复

## 1 引言

矿山废弃地是由于矿产资源开采及其后续活动造成的土地荒废和生态破坏区域。水土流失、土壤贫瘠、植被覆盖率低、物种缺失等问题严重影响了废弃地周围的生态环境。随着矿山资源的开采日益增多,废弃地的生态问题愈发突出。近年来,随着生态修复理念的引入,矿山废弃地的水土保持与植被恢复逐渐成为生态重建的重要手段。

水土保持技术通过减少水土流失、改善土壤质量、促进水分保持等方式,有效保护生态环境。植被恢复则是通过选择适宜的植物种类,恢复区域的生态功能,改善土壤结构

和人文条件,逐步恢复生物多样性。然而,矿山废弃地的特殊性和复杂性,使得水土保持与植被恢复面临一系列挑战。因此,如何科学选择和实施水土保持与植被恢复技术,成为解决矿山废弃地生态问题的关键。

本文将重点探讨矿山废弃地水土保持生态重建技术与植被恢复策略,分析其技术方法与实施效果,并提出优化的改进措施。

## 2 矿山废弃地生态环境问题与修复需求

### 2.1 矿山废弃地的主要生态问题

矿山开采活动通常对环境造成严重破坏,导致矿山废弃地面临多种生态问题。首先,水土流失与土壤退化是矿山废弃地最为突出的生态问题。矿山开采过程中,植被被破坏,土壤结构受到破坏,导致土壤贫瘠,水土流失加剧,最终形

【作者简介】王建锋(1978-),男,中国甘肃天水人,工程师,从事生态修复技术研究。

成沙化和荒漠化现象。其次，矿山废弃地的植被破坏严重，生态系统的稳定性受到威胁。由于缺乏有效的植被覆盖，生物栖息地消失，导致生物多样性丧失，生态功能退化。最后，矿山开采过程中产生的废渣、废水及其他污染物严重污染土壤和水源，加剧了生态退化。这些生态问题不仅影响矿山周边的环境，也对更广泛的生态系统造成长期的负面影响。

## 2.2 生态修复的目标与意义

矿山废弃地的生态修复旨在恢复土壤质量、水文功能和植被覆盖，从而恢复区域的生态系统。首先，通过水土保持技术，修复矿山废弃地的土壤结构，提升土壤肥力和水源涵养能力，改善水文条件，有助于恢复自然水循环和土壤的自我修复能力。其次，通过植被恢复，促进植物生长，提供生物栖息地，提升区域生物多样性，恢复生态系统功能。植被不仅能改善土壤质量，还能防止水土流失，增加地表覆盖度，稳定土壤结构。最终，水土保持与植被恢复的综合措施将增强生态系统的自我修复能力，提高生态系统的抗逆性和可持续性，从而为矿山废弃地的长期生态稳定奠定基础。

## 2.3 水土保持与植被恢复的挑战

矿山废弃地的水土保持和植被恢复面临诸多挑战。首先，矿山废弃地的地质条件通常较为复杂，土壤贫瘠，且岩石和砂石较多，修复工作难度较大，需要针对性技术方案。其次，由于土壤贫瘠，矿山废弃地的植物适应性差，许多植物难以生长，这使得恢复过程缓慢且复杂。大多数植物需要较长时间才能适应恶劣的土壤条件，且生长过程中常常面临水分不足、养分匮乏等问题。最后，矿山废弃地的修复通常需要较长的时间和高额的投入，且修复过程需要协调多个方面的资源，如资金、技术和劳动力等。因此，矿山废弃地的修复不仅是一项长期工程，也是一项系统工程，要求各方的紧密合作与长期支持。

# 3 矿山废弃地水土保持技术与实施方案

## 3.1 水土保持技术概述

水土保持技术是保护土地资源、减少水土流失、恢复生态功能的核心手段。植被防护措施是最基本和有效的水土保持方法之一，通过种植本地植被或改良植被，能够显著增强土壤的稳定性，减少雨水对土壤的冲刷，防止水土流失。此外，植物根系的发达能加固土壤，促进水分渗透，改善土壤结构。工程措施如拦水坝、排水沟、坡面加固等，常用于防止水土流失，尤其是在坡地或流域的水土保持中。拦水坝可有效阻止水流速度，减少水土流失，排水沟可引导多余的水流，而坡面加固则增强了坡面土壤的抗侵蚀能力。土壤改良技术通过添加有机肥料、石灰、磷肥等材料，可以有效改善土壤结构，提高土壤的肥力，促进植物的生长，同时增强土壤的保水性和透气性。这些水土保持技术相辅相成，协同作用，共同促进土地的可持续利用。

## 3.2 矿山废弃地水土保持实施方案

矿山废弃地水土保持的实施方案通常基于地形地貌的

分区施治，通过精细化的技术应用，因地制宜地选择最适合的水土保持措施。根据矿山废弃地的地形特征，实施分区管理，可以有效针对不同区域的土壤条件和水文环境选择合适的技术，如坡面地带可使用坡面加固技术，平坦地区可通过植被恢复提高地表覆盖度。在实施过程中，多措施综合应用是常见的方案，结合植被恢复、工程措施和土壤改良等多种技术手段，形成一个全面的治理体系。例如，土壤改良可以在植被恢复过程中为植物生长提供营养支持，工程措施则在关键位置提供必要的结构支持，保证长期稳定。与此同时，建立长期的监测与反馈机制至关重要。通过安装生态监测系统，定期评估水土保持措施的效果，能够及时发现问题并调整修复方案，确保治理效果的持续性和稳定性，最终实现矿山废弃地的生态恢复和土地资源的可持续利用。

## 3.3 水土保持技术应用案例分析

黄土高原的水土保持工程是典型的成功案例。该地区由于自然条件差，水土流失严重，生态环境恶化。通过植树造林和草地恢复等措施，成功减缓了水土流失，提升了生态环境质量。植树造林有效增加了地面覆盖，防止了土壤的侵蚀，草地恢复则通过植被根系加固土壤，减少了水土流失，恢复了该地区的生态平衡。此外，长江上游地区的水土保持与植被恢复工作同样取得了显著成效。该区域通过治理水源涵养林和人工湿地恢复，改善了水土保持效果，增加了生物多样性和水源涵养能力。这些措施不仅提高了当地的生态功能，还增强了区域内水源的稳定供应，促进了生态系统的自我修复。两者的成功应用表明，结合植被恢复、工程措施与水土保持技术的综合治理，能够有效解决水土流失问题，改善生态环境，增强生态系统的功能。

# 4 矿山废弃地植被恢复策略

## 4.1 植被恢复的基础与意义

植被恢复的基本目标在于通过恢复原生态植被或引入适宜植物，改善矿山废弃地的土壤结构、增加植物覆盖度并恢复生态功能。原生态植被的恢复有助于恢复土地的自然状态，减少水土流失、提高土壤肥力，增强生态系统的稳定性和自我调节能力。而引进适宜植物，特别是那些对贫瘠土壤和极端环境具有较强适应性的植物，可以确保恢复过程的顺利进行。选择适应性强的植物，如耐旱、耐贫瘠的物种，是植被恢复中的关键步骤。特别是在矿山废弃地的修复过程中，这些植物能够较快地在恶劣环境中生根发芽，逐步改善土壤条件，为其他植物的生长创造更好的环境。因此，植物的适应性和恢复能力是保证植被恢复成功的关键。

## 4.2 植被恢复策略与实施

植被恢复策略需要根据具体情况灵活选择自然恢复与人工恢复相结合的方式。在可能的情况下，应鼓励自然恢复，使自然环境能够逐渐恢复其生物多样性和生态功能。然而，在一些条件较差或恢复进展缓慢的区域，人工恢复措施仍然至关重要。通过人工干预，如选择合适的植物、施加必要的

肥料或进行水源调节,能够加速恢复进程并提高成功率。尤其是种植本地植物和耐污染植物,对于确保植被的稳定性和生态多样性具有重要意义。优先选择本地植物,不仅能更好地适应当地环境,还能减少生态系统的异化,增强植物群落的生物多样性。同时,对污染有较强耐受性的植物则有助于改善污染土地的土壤条件,降低污染物浓度,促进生态修复。为了全面恢复生态系统的多样性,除了植被恢复,还需注重动物栖息地的恢复,帮助恢复生态链的健康发展,促进物种间的相互作用和生态平衡。

### 4.3 植被恢复策略应用案例分析

黄土高原的植被恢复项目成功案例展示了通过种植本地耐旱植物及草种有效恢复植被覆盖,减少水土流失的典型经验。在黄土高原,由于长期的水土流失和荒漠化,植被覆盖度极低。通过种植耐旱的本地植物,结合水土保持措施,逐步恢复了该地区的植被,显著降低了风沙对土壤的侵蚀,改善了当地的水文环境,推动了生态系统的恢复。此外,在北方沙化地区,通过人工林种植和草地恢复的方式,成功改善了沙漠化地区的植被状况,增加了生物多样性。这些区域的植被恢复工作不仅提高了当地土壤的持水能力,防止了沙漠化的扩展,还为多种动植物提供了栖息地,增强了生态系统的整体功能。上述案例表明,科学合理的植被恢复策略在矿山废弃地修复和沙漠化治理中具有重要的实践意义,能够有效促进生态环境的可持续发展。

## 5 水土保持与植被恢复技术的综合应用

### 5.1 综合技术体系的构建

生态工程与水土保持技术的结合能够有效提升矿山废弃地修复的效果。通过综合措施,如植被恢复、土壤修复和水源管理等,可以增强生态系统的自我修复能力。建设生态屏障和廊道也是重要手段,能够恢复生态系统的连通性,防止生物栖息地的孤立和退化。通过这一方式,不仅可以提高生物多样性,还能为动植物提供迁徙通道,增强生态系统的稳定性。此外,在水土保持与植被恢复过程中,政府、科研机构、社区和企业等多方参与,形成协同治理,是保障修复效果的关键。各方资源的整合能够确保技术的落地与实施,推动可持续的生态恢复和修复工作。

### 5.2 水土保持与植被恢复效果评估

建立完善的生态监测体系,是评估水土保持和植被恢复效果的重要步骤。通过实时监测土壤质量、植被覆盖度、水文情况等关键指标,能够及时调整修复措施,确保项目实

施的长期效果。此外,评估植被恢复对生物多样性和生态服务功能的提升,是衡量修复成效的核心内容。通过调查分析植被恢复后物种的多样性变化和生态功能的恢复情况,可以有效评估修复效果和生态系统的恢复程度。这不仅帮助识别当前修复策略的优势和不足,还为未来的生态恢复提供了科学依据和指导。

### 5.3 案例分析与优化建议

通过分析矿山废弃地修复的成功案例,可以提炼出行之有效的修复模式,并为不同地区的修复提供借鉴。成功的案例往往采用了综合技术和协同治理的策略,充分结合了当地的生态特点和实际需求,提供了技术解决方案和管理经验。基于实际修复工作中的经验教训,技术方案的优化和改进显得尤为重要。通过因地制宜地选择修复技术,如土壤改良、植物选择、生态工程措施等,能够提高修复的效率和效果。在不同地理和气候条件下,灵活调整技术方案,针对性地实施水土保持和植被恢复工作,能够有效提升矿山废弃地修复的综合效果。

## 6 结语

矿山废弃地水土保持与植被恢复是解决生态退化问题的重要环节。因此,采取科学合理的水土保持措施和植被恢复策略,能够有效改善矿山废弃地的生态环境,防止水土流失,减少风沙侵蚀,恢复土壤的自然功能。同时,通过植被恢复,不仅可以增加地表覆盖度,稳定土壤,还能提高生物多样性,促进生态系统的自我修复。常见的水土保持措施包括修筑防护林带、梯田、蓄水池等,而植被恢复则应选择适应性强的本土植物,逐步恢复生态功能。随着技术的不断发展,新的修复技术和方法不断涌现,如利用生态工程技术、土壤改良剂、种子覆膜等手段,提高恢复效果。未来,矿山废弃地的修复技术将进一步完善,为生态环境保护和可持续发展提供更加坚实的基础,促进生态文明建设的实现。

### 参考文献

- [1] 曾金元,张沛沛,郝婧,等.煤矿废弃地生态重建的物种适宜性筛选研究[J].煤炭加工与综合利用,2015,(03):76-80+30.
- [2] 李聪聪.基于生态修复理念的露天矿废弃地景观重塑[D].北京林业大学,2022.
- [3] 孔令旭.唐山文喜采石场废弃地生态修复效果评价与景天属等植物的适应性研究[D].北京林业大学,2022.
- [4] 任丽华,邹桂霞,李凤鸣,辽西半干旱区矿业废弃地复垦与生态重建关键技术[J].农村经济与科技,2012,23(12):22-25.