

# Research on Environmental Wastewater Pollution Treatment Models and Innovations

Zheng Zhou

Hubei Junbang Environmental Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430030, China

## Abstract

With the rapid development of industrialization and urbanization, water pollution has become increasingly prominent. Exploring efficient and innovative wastewater treatment models is crucial for ensuring water environment safety and sustainable development.

## Keywords

wastewater pollution control; Technology integration; Process optimization; Intelligent monitoring; Resource recycling and utilization

# 基于环境废水污染治理模式与创新研究

周政

湖北君邦环境技术有限责任公司，中国·湖北 武汉 430030

## 摘要

随着工业化和城市化的快速发展，水体污染问题日益突出，探索高效创新的废水治理模式对保障水环境安全和可持续发展至关重要。本文聚焦环境废水污染治理的前沿模式与技术路径，系统分析当前治理体系面临的核心瓶颈，如治理效率不足、技术适用性受限、运行成本偏高以及管理机制协同困境等关键问题，并深入探究其技术与管理层面的深层成因。研究基于污染源解析与治理全过程分析，针对性提出融合物理、化学与生物技术的综合治理策略与智能化管理创新方案。重点突破高效低耗处理工艺、精准化控制体系与资源化利用协同优化等关键技术节点，建立具备环境适应性和经济可行性的治理新模式。

## 关键词

废水污染治理；技术集成；过程优化；智能监控；资源循环利用

## 1 引言

水资源是生命之源、生产之要、生态之基。然而，伴随社会经济的迅猛增长与工业化、城镇化的深入推进，大量工业废水、生活污水和农业面源污染无序排放，导致水体富营养化、毒性污染物富集及水生态系统退化等环境问题日益加剧，严重威胁着水环境安全、饮用水源保障及人居健康水平。废水污染治理已成为当前环境保护领域最为严峻和紧迫的挑战之一。传统废水处理模式在处理效率、运行成本、适应性及资源回收等方面存在显著短板，亟需结合科技发展前沿与多学科交叉融合进行系统性创新。

## 2 废水污染治理基础与模式演进

### 2.1 废水污染治理的核心内涵与发展历程

废水污染治理是指运用物理、化学、生物等多种技术手段，将工业生产过程和人类生活活动中产生的污水中有毒

有害物质及过量的营养物质进行有效去除或转化，使处理后的水质达到排放标准或特定回用要求，并在此过程中努力实现资源的回收再利用，最大限度地减少对自然水体和生态环境的负面影响。自工业革命以来，从最基础的沉淀、筛除等简单物理处理方式起步，治理技术经历了漫长而深刻的革新历程。核心驱动力的不断演变深刻重塑着治理格局：早期主要应对传染病防控需求，逐步发展到以有效削减常规有机污染物、悬浮固体等核心指标为核心，再到如今高度关注难降解有毒有害污染物、氮磷营养盐的深度去除以及水资源化、能源化利用等关键维度。

### 2.2 当前主流治理模式及典型技术应用格局

目前全球废水治理体系呈现出多技术路线并存与交融发展的显著特征，形成了处理层级分明、功能目标互补的应用格局。在主流末端处理技术方面，活性污泥法及其丰富的改良变形技术依然是构筑城镇生活污水和可生化性良好工业废水处理的主力军，通过精准调控微生物种群结构与生化反应条件，承担着核心有机物氧化分解与生物脱氮除磷重任。物理化学技术体系作为不可或缺的重要支撑环节，特别是以沉降为核心机理的混凝沉淀法以及各类筛滤材料构

【作者简介】周政（1993-），男，中国湖北武汉人，本科，工程师，从事水污染、环评、环保等研究。

成的过滤拦截技术，在高效去除悬浮物、胶体物质方面持续发挥关键基础作用。针对特征污染物的强化处理需求日益紧迫，高级氧化技术的战略地位不断提升。

### 3 废水污染治理的深层挑战

#### 3.1 技术瓶颈制约处理效率与达标保障

现有废水处理技术在高效性与适应性维度仍面临显著瓶颈性挑战，制约整体处理效果稳定提升。在处理日益复杂的混合污染水体时，常规的生物活性污泥技术在处理富含难降解有机化合物、具有生物毒性特征污染物（如制药残留、农药中间体等）时暴露效力不足的弱点，生化系统抗冲击能力不足问题在工业废水周期性波动冲击下尤为突出。深度处理环节所依赖的高级氧化技术，虽对难降解组分具有特定破除能力，但在工程尺度运行时往往伴随着高昂的药剂投加成本或电能消耗，反应体系对水体复杂基质存在选择性干扰效应，氧化效率易受水中溶解性天然有机物、无机盐离子等共存物质抑制，导致运行经济性大幅下降<sup>[1]</sup>。膜分离技术作为保障高水质的重要壁垒，其系统运行的稳定性、使用寿命及成本效率受到膜面顽固性污染结垢的严重制约。

#### 3.2 治理成本高企与经济可持续性存忧

废水处理全过程面临着高昂的设施建设投入成本和连续性的运行维护成本双重压力，对治理技术的规模化推广普及构成实质性障碍。基于高级氧化反应技术或依赖高压驱动的高精度反渗透膜系统，其关键设备、功能性催化剂、专用分离膜材料初始购置费用昂贵，且伴随显著的电能消耗需求，成为运营成本结构中居高不下的重要组成部分。污水处理厂作为耗能大户，其曝气单元为保障生化反应氧源充足普遍消耗系统运行总电耗的 50% 甚至更高，能源转化效率偏低问题普遍存在；同步进行的化学药耗，如为促进絮凝沉淀效果投加的聚合氯化铝或聚丙烯酰胺、为完成反硝化过程添加的外部有机碳源甲醇或乙酸钠、为调节反应酸碱性投入的酸碱中和剂及为控制膜污染使用的次氯酸钠氧化剂等，形成了持续性的药剂支出流线。高有机物浓度污水处理过程伴随大量剩余污泥产生，其后续需要经历浓缩、机械脱水、化学调质调理直至最终的焚烧处置或卫生填埋处理，这一链条在构筑物、专用脱水压滤设备、耗能巨大的热干化系统投入以及外部处置费用方面构成了极其沉重的附加成本负担。

#### 3.3 管理粗放与精准调控需求凸显

现行废水治理体系在运营管理维度存在明显的精细化不足问题，过程调控主要依赖离线人工实验室取样结合简单仪表读数，实时性与精确度远不能满足现代化优化运行需求。受制于监测点位稀疏、获取频率有限（多为数小时或数天间隔一次）的常规理化指标数据（如 COD、氨氮、总磷、SS 等），管理者难以捕捉处理流程内发生的动态波动和隐蔽性异常状况。工艺调控模式呈现显著的滞后性与经验主导色彩；操作人员常基于历史运行参数模板或过往经验法则来

设定曝气强度、药剂投加量、污泥排放周期等核心运行参数，难以与进水水质水量的短时剧变特征、季节性波动因素以及处理系统内微生物菌群活性状态变化实现精准及时地匹配响应，导致过程控制时常出现控制不足或过量投人现象。

### 4 创新治理策略与技术路径优化方案

#### 4.1 强化核心工艺组合与膜技术集成创新

突破单一工艺限制，精心设计具备深度净化能力的协同处理系统至关重要。重点优化组合工艺效能，通过在传统好氧活性污泥处理线后端无缝耦合深度氧化单元，如加载廉价 Fe/Cu 基催化材料的臭氧高级氧化系统或集成过硫酸盐活化氧化反应器，针对性地实现对难降解有机分子和新兴微污染物的高效破坏矿化。提升膜技术综合性能与抗污能力，推进新型抗污染复合膜材料研制和应用，特别是通过基膜表面精准接枝两性离子聚合物或构建仿生水化层结构增强膜亲水性与抗蛋白质/腐殖酸黏附性能；同时，创新设计具有在线脉冲曝气冲洗与周期性化学增强反冲功能的智能膜污染控制模块，将其深度内嵌于膜生物反应器或集成式膜分离成套设备内部<sup>[2]</sup>。在主流工艺处理线末端整合高品质膜技术屏障（“生物处理 + 臭氧氧化 + 纳滤”构成完整处理链），最大限度挖掘不同处理单元的协同去污潜能，显著提升对关键有毒有害污染物、顽固性化学品的协同去除率，满足日益严苛的排放指标与高品位再生水（如化学需氧量 COD < 30mg/L，氨氮 NH3-N < 1.5mg/L）生产要求。

#### 4.2 优化能源利用与构建生态治理体系

系统性降低处理系统能源与资源消耗是创新治理体系的核心方向。实施曝气系统智能化精准控制升级，大规模部署溶解氧 DO 在线传感网并集成至自适应反馈调节控制平台，联动调节鼓风机风量阀门开度与曝气头布设密度分布，实现基于微生物实际耗氧需求差异的动态曝气强度匹配；同步推进采用微孔高效增氧曝气器替代传统大孔粗放曝气装置，提升氧气在水体中的体积传质效率至传统设备的 1.5 倍以上<sup>[3]</sup>。大力推广分布式生态治理技术在具备空间条件的区域实践应用，科学构建复合型人工湿地处理系统，精细搭配挺水植物芦苇、香蒲，沉水植物狐尾藻，以及挺水层下具有高效脱氮除磷功能的功能性火山岩、沸石或钢渣基质填料层，高效利用太阳能驱动下的植物吸收固定、基质吸附截留及根际微生物代谢转化三维协同过程实现污染物的低成本自然净化；同时，将经适当预处理的市政或农畜废水导入特定高光效微藻培育平台（如跑道池、封闭光生物反应器），实现污染物资源化利用同时生产高值藻类生物质原料供应产业链下游。

#### 4.3 强化精确曝气控制与优化碳源投加策略

以数据驱动手段实现核心单元精细化运行是提升效率的关键突破口。构建全过程智能曝气决策支持系统，在污水处理厂生物池关键位置网络化部署高精度溶解氧（DO）在

线传感器阵列、氧化还原电位(ORP)监测探针及氨氮实时分析仪表,运用多源数据融合技术与隐马尔可夫过程建模算法精准量化微生物群落的瞬时代谢活性状态;据此设计基于前馈预测控制和反馈闭环调节耦合的优化曝气策略,动态调整各生物池分区进气阀门开度与各时段风机运行频率配置,达成在稳定维持生化反应所需最佳溶氧浓度区间(通常设定为1.5-2.0mg/L)条件下最大幅度降低鼓风机电能消耗。同步推行优化碳源精准投加控制机制,在生物脱氮除磷单元关键位置部署硝酸盐在线分析仪监测反硝化过程末端硝酸盐浓度水平变化,结合机器学习算法对进水可生化有机碳源含量(BOD<sub>5</sub>)进行快速预测评估,据此智能调控外碳源计量泵投加速率与投加点位选择;在确保脱氮效率达标前提下,显著削减甲醇等高成本商品化有机碳源过量投加造成的浪费(控制硝酸盐残留值稳定低于5mg/L即可避免过量投加),从而大幅降低药剂开支与潜在二次污染风险。

#### 4.4 构建大数据驱动的智能水质预警平台

深度融合物联网技术与智能分析赋能治理体系升级。建立全域覆盖的水质关键参数实时监测网络,在重要厂站出水节点、管网关键交汇点位及受纳水体敏感断面批量布设高集成度多参数水质在线监测浮标站或固定式监测站,持续自动采集包括化学需氧量COD、氨氮NH<sub>3</sub>-N、总磷TP、pH、溶解氧DO、浊度NTU等核心指标的分钟级数据流。构建基于云服务的废水治理数据汇聚分析平台,统一汇聚处理设施运行过程数据(如泵阀状态、流量、液位、曝气强度、污泥回流量与剩余排放量等参数)、在线监测站点数据及实验室定期采样检测结果,通过流计算引擎进行多源异构数据清洗融合处理。开发集成多种智能算法的水质动态评估预测模块,应用时间序列预测模型预判未来数小时水质变化趋势,采用聚类分类算法分析异常排放特征指纹模式,建立关键指标超标风险概率评估模型;依托该平台实现治理全链条的透明化监控与早期污染事件预警响应,支持管理人员制定精准的工艺调控决策和应急处理调度方案。

#### 4.5 推进污泥低碳干化与资源回收技术应用

实现剩余污泥无害化处置并深度挖掘资源价值势在必行。实施污泥低碳高效热干化技术改造工程,在传统热干化

工艺前端串联运行新型太阳能辅助预干化系统,利用大型曲面聚光集热器和导热油循环系统提供初级干化阶段所需的基础热能来源,可使进入后继热能密集型热干化工序前的污泥含水率从80%有效降低至50%水平,整体工艺可节约化石燃料消耗量达35%以上。大力推进污泥中高附加值资源的提取转化应用进程,以大型城镇污水处理厂为依托基地,规模化建设高级厌氧消化反应器网络并配备精细化温度及水力停留时间控制模块(通常中温消化控制在35±2℃,停留时间约20-25天),最大化提升污泥有机质向生物甲烷CH<sub>4</sub>的转化速率与产气效率指标;将富磷污泥灰渣经特定化学浸提技术处理后(常用稀酸溶解或碱熔工艺),转化为高纯度的磷酸铵镁或过磷酸钙结晶产品回流至磷肥产业链条内部;同时对干化稳定后的污泥进行安全性与养分特性评估,经特定加工后作为土壤改良基质或低风险级别园林绿化肥料在严格控制条件下施用。

### 5 结语

本论文系统剖析了废水污染治理现存的技术瓶颈与管理困境,立足污染物高效去除、资源能源循环利用与智慧化运维协同的发展趋势,提出了综合治理创新策略体系。通过深度融合强化氧化处理、膜分离、精确曝气控制与智能预警等关键技术手段,构建兼具深度净化、低碳运行和智慧管控特性的治理新模式。未来研究应继续围绕高效微污染物靶向降解技术、污水蕴含化学能梯级回收耦合工艺、全域智慧治理云平台功能深化及区域水生态安全风险评估与管控框架构建等方向持续探索实践,强化环境、经济、社会效益的协同优化,为中国乃至全球水环境保护与可持续发展目标的最终实现贡献创新方案与技术支撑。

### 参考文献

- [1] 姚鹏,牛靖.资源节约型城市创建,企业策略选择与水环境治理[J].财经研究,2023,49(4):79-93.
- [2] 王子义,张嫄,刘根深,等.微生物燃料电池污废水处理及能源化研究进展[J].净水技术,2024,43(11):29-38.
- [3] 王永锋,薛媛.资源型城市环境污染,经济增长与绿色转型发展研究——基于某L市的环境库兹涅茨曲线实证分析[J].甘肃金融,2023(9):34-39.