

重心向城市边缘和丘陵缓坡地带转移，取水路径延长、能耗上升。以湖南省为例，2021 年农业灌溉用水达 175 亿立方米，占全省用水量的 57%，其中城市群外围农业区贡献约 62%。农业空间转移与灌溉方式变更造成区域间水资源调配

失衡，在城乡水资源调度中引发结构性压力转移，使城市群水资源管理协调任务更为复杂，表 1 为土地利用变化对水源需求压力影响分析表。

表 1 土地利用变化对水资源需求压力影响分析表

	影响维度	指标内容	2010年	2020/2021年	变化趋势	备注
1	生活用水增长	人口总规模（万人）	2470.0	3150.0	上升27.5%	武汉、长沙、南昌三市合计
2	生活用水增长	日均生活用水量（万吨）	237.0	325.0	增加88万吨	以武汉市为例
3	生产用水结构	第三产业用水占比（%）	13.0	28.0	增加15个百分点	以长沙市为例
4	生产用水结构	高新区工业用水量（万吨）		8400.0	工业园集中用水	南昌高新区2021年数据
5	农业灌溉变化	农业用地面积变化（万公顷）		-26.4	减少12.8%	武汉都市圈为主
6	农业灌溉变化	农业灌溉用水量（亿立方米）		175.0	灌溉压力转移	湖南省数据

5 土地利用变化对水资源承载平衡关系的影响分析

5.1 供需失衡区域中水资源承载力的阶段性超载

长江中游城市群局部地区因城市扩张和产业集中所导致的供需错位，使水资源承载系统进入阶段性高压运行状态。以武汉市为例，其年平均可用水资源总量约为 90 亿立方米，而 2022 年城市总用水量达 104 亿立方米，超载率超过 15%。高峰期日供水需求突破 380 万吨，接近供水极限。长沙、宜昌等城市在工业与生活用水同步增长背景下，调水依赖性显著上升，其中长沙市外调水占比从 2012 年的 4.6% 提升至 2022 年的 16.2%。城市圈边缘地带由于水利基础设施薄弱和水源地布局分散，局地性缺水现象频发，2021 年鄂州城乡供水不均问题影响居民用水达 4 万人次。阶段性水资源超载直接反映出土地利用布局与水资源承载力之间的错配矛盾，成为区域可持续发展面临的重要瓶颈。

5.2 土地空间结构失衡加剧区域水环境风险暴露

土地开发密集区域由于绿地与水体比例下降，生态涵养空间严重不足，加剧了水资源系统的环境压力。武汉城市圈高强度开发区绿地率普遍低于 30%，远低于国家生态安全底线指标。长沙湘江新区因建设用地集聚与湿地缩减，2021 年城区污水外排总量达 2.3 亿吨，处理能力不足导致周边水体污染指数上升 12%。南昌红谷滩新区近年土地开发强度指数维持在 0.72 以上，年均地表径流系数高达 0.76，引发雨污混排、黑臭水体增多等环境风险。土地空间结构布局不合理使得水资源调控体系面临系统性失衡，城区排水不畅、水体污染与地下水回补不足形成闭环风险。污染物负荷在缺乏缓冲生态空间的情况下快速汇入水系，放大了承载系统的脆弱性与不确定性。

5.3 土地利用转型与水资源承压格局的耦合演化路径

土地利用从传统低密度向高密度、复合型结构演变过

程中，水资源承载格局同步发生深层调整。以武汉光谷为代表的新兴城市片区，近年来产业与人口快速集聚，土地开发率由 2010 年的 41% 提升至 2022 年的 68%，用水总量年均增长率达 4.2%。新型城市功能区往往伴随集中供水、集中排水系统建设，形成集中式用水高地。与之相对的城乡交界区和外围农业区则面临水源匮乏与灌溉滞后问题，形成明显的水资源承压分异格局。土地利用转型促使区域水资源分布与需求热点脱节，需建立多层次调配机制加以协调。以南昌市为例，其城市核心区与周边农村年用水强度差异超过 6 倍，水资源承载能力空间均衡性显著不足，构成水生态系统高风险演化路径的重要环节。

6 结语

长江中游城市群在城市化与产业结构演变过程中，土地利用格局的深刻变化对区域水资源承载力产生了持续且深远的影响。建设用地扩张、不透水面增多与生态空间压缩，显著削弱了水资源的自然涵养与调蓄能力，同时推动了用水量持续上升与结构日趋复杂，供需矛盾不断加剧。水资源承载系统呈现阶段性超载、区域性失衡与结构性脆弱特征。科学引导土地利用结构优化，强化生态空间保护与水资源约束下的空间规划耦合，将是提升区域可持续发展能力的关键路径。

参考文献

[1] 温建华,郭静,李龙,王雪超.长江中游城市群城市用地低碳利用效率及其影响因素研究[J].经济地理, 2025,45(05):85-92.

[2] 刘进,唐慧,苏昌贵,李晓红.长江中游城市群公共文化设施的空间分布特征及其影响因素[J].经济地理,2025,45(05):85-92.

[3] 李锐.长江中游城市群人一地一水系统耦合的时空演变特征与协同调控研究[D].导师：吕添贵.江西财经大学,2025.

[4] 曾思.长江中游城市群土地利用碳排放效率的时空演变及影响因素研究[D].导师：尹传斌.江西财经大学,2025.

Application progress of new sensors in automatic monitoring of pollution sources

Qifeng Wu¹ Yongbin Zhao²

1. Inner Mongolia Lvyuan Environmental Protection Technology Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia, 017010, China

2. Ordos Ecological environment Monitoring and Control Center, Ordos, Inner Mongolia, 017010, China

Abstract

The advancement of novel sensor technologies is fundamentally transforming the architecture and operational mechanisms of automated pollution source monitoring systems. Sensors featuring multi-parameter synchronization, high sensitivity, and low power consumption have been widely adopted across emission sources, significantly enhancing real-time monitoring capabilities, measurement accuracy, and coverage efficiency. The convergence of electrochemical, optical, and biological sensor technologies now addresses complex detection challenges for gaseous, liquid, and particulate pollutants. Concurrently, the deepening integration of sensors with data acquisition systems, edge computing, and remote transmission infrastructure has enabled intelligent and networked online monitoring platforms. This paper examines the evolutionary taxonomy, technical advantages, system integration pathways, and current applications of emerging sensors in automated pollution source monitoring. It further explores development bottlenecks and future optimization strategies, providing theoretical foundations and practical references to enhance ecological environment monitoring capabilities.

Keywords

new sensor; pollution source monitoring; multi-parameter detection; system integration; real-time response

新型传感器在污染源自动监控中的应用进展

吴启峰¹ 赵永彬²

1. 内蒙古绿研环保科技有限公司, 中国·内蒙古 鄂尔多斯 017010

2. 鄂尔多斯市生态环境监测监控中心, 中国·内蒙古 鄂尔多斯 017010

摘要

新型传感器技术的发展正在重塑污染源自动监控系统的结构与功能体系。基于多参数同步采集、高灵敏度与低功耗设计的传感器在各类污染物排放源中获得广泛应用, 显著提升了监测的实时性、准确性与覆盖能力。电化学、光学、生物等多类型传感器技术不断融合, 适应了气态、液态与颗粒污染物的复杂检测需求。与此同时, 传感器与数据采集、边缘计算、远程传输等系统集成的深入推进, 使污染源在线监控平台更具智能化、网络化特征。本文围绕新型传感器的分类演进、技术优势、系统集成路径及应用现状, 梳理其在污染源自动监控中的典型实践, 并探讨其发展瓶颈与未来优化方向, 为提升生态环境监测能力提供理论支撑与技术参考。

关键词

新型传感器; 污染源监控; 多参数检测; 系统集成; 实时响应

1 引言

污染源自动监控系统作为环境治理体系的重要技术支撑, 其核心在于实现污染排放全过程、全类型、全时段的精准监管。传统传感设备受限于测量精度、响应速度及适应能力, 难以胜任当前日益复杂的环境管理需求。新型传感器凭借材料升级、工艺改进与结构微型化优势, 在精准监测多种污染因子的同时实现实时传输与远程控制, 推动了污染源监测方式的根本变革。随着多源数据融合与边缘处理能力的不断

增强, 传感器系统的智能化、网络化水平显著提高, 为自动监控平台带来更强的稳定性与响应力。深入研究新型传感器在污染源监控中的应用进展, 有助于构建面向未来的环境监测技术体系与管控机制。

2 新型传感器技术发展概况

传感器技术经历了从单参数测量向多功能协同监测的快速转型, 当前主流类型包括电化学传感器、光学传感器、生物传感器、热导传感器等, 各自具备独特的响应特性与适用场景。在系统结构设计上, 不同类型传感器正逐步走向模块化与集成化, 通过微系统加工技术将检测、处理、传输等功能集中于单一平台, 显著降低了安装复杂度与维护成本。

【作者简介】吴启峰(1987-), 男, 蒙古族, 中国内蒙古兴安盟人, 本科, 工程师, 从事环境保护与监测研究。

为了提升数据精度与稳定性,复合型传感器结构被广泛采用,具备自校准、自诊断与多维数据融合功能。当前集成趋势不仅体现在硬件平台的融合,还延伸至与数据系统、边缘计算装置的深度耦合,为污染源自动监控的协同感知与精准识别提供了新型技术支撑^[1]。

3 污染源自动监控的技术需求

3.1 主要污染物种类与监控指标体系

污染源排放的污染物具有多样性与复合性,涉及气态污染物如二氧化硫、氮氧化物、挥发性有机物,颗粒类污染物如PM_{2.5}、PM₁₀,以及水中污染物如氨氮、重金属、COD等。针对不同污染物特性,监控指标体系需涵盖浓度、排放速率、排放时长等参数,同时满足环保部门对数据传输频率、精度等级和法律合规的要求。新型传感器在监测维度上实现了从单参数向多指标的扩展,能够捕捉污染变化的细节动态,为源头治理与区域联防联控提供支持。构建覆盖多污染介质、多排放特征的指标框架是提升自动监控有效性的前提,也是推动感知系统标准化发展的基础。

3.2 高频采样与实时响应能力的需求分析

污染排放具有突发性与波动性特点,在短时间内可能出现浓度峰值或排放异常,传统低频采样模式难以及时发现。为提升监管实时性与应急响应能力,高频采样与快速响应应成为污染源监测的重要性能指标。新型传感器普遍具备毫秒级采样响应能力,能够对污染物浓度的瞬时变化进行动态记录,同时通过连续数据流形成趋势预警机制。响应性能的提升依赖于传感器核心材料对目标物质的选择性敏感性、信号处理速度以及与边缘处理设备的高效协同。实现高频实时数据的稳定采集与传输,不仅为排放行为监管提供依据,也为污染模型构建与调控策略制定奠定了数据基础。

4 新型传感器在污染源监控中的典型应用

4.1 电化学传感器在气态污染物监测中的应用

电化学传感器利用工作电极对特定气体发生氧化还原反应产生电信号的原理,可实现对SO₂、NO_x、CO、O₃等多种气态污染物的高灵敏度检测。该类传感器响应速度快、体积小、制造成本低,适合大范围部署,特别适用于污染源排放口及厂界空气质量监控。通过优化电极材料结构和电解质组成,提升对目标气体的选择性与稳定性,降低交叉干扰风险。传感器模块通常搭配温湿度补偿机制与实时校准算法,保证复杂环境中的准确性与一致性。在应用层面,电化学传感器广泛嵌入固定监测设备、移动监测平台与智能网格系统,为污染扩散趋势分析与风险响应调度提供了关键数据支持,图1为嵌入式污染源在线监测系统剖析图。

4.2 光学传感器在颗粒物与重金属监测中的运用

光学传感器通过散射、吸收或荧光等光学效应感知颗粒物或金属离子浓度变化,具备非接触、高精度与实时性的优势。在颗粒物监测中,激光散射型传感器能精确测量

PM_{2.5}、PM₁₀等粒径分布及质量浓度,适用于烟尘排放源与环境背景浓度分析。在重金属检测中,光谱分析技术如原子吸收、激发光谱等被集成至在线检测模块,能够实现 Pb、Cd、Hg 等元素的快速筛查与定量评估。传感器系统在保证灵敏度的同时,通过背景光干扰补偿与光路自校准技术增强现场适应性。光学传感器已广泛应用于水体与大气中多形态污染物的连续监控,为污染负荷评估和治理成效评价提供了精细化数据来源^[2]。

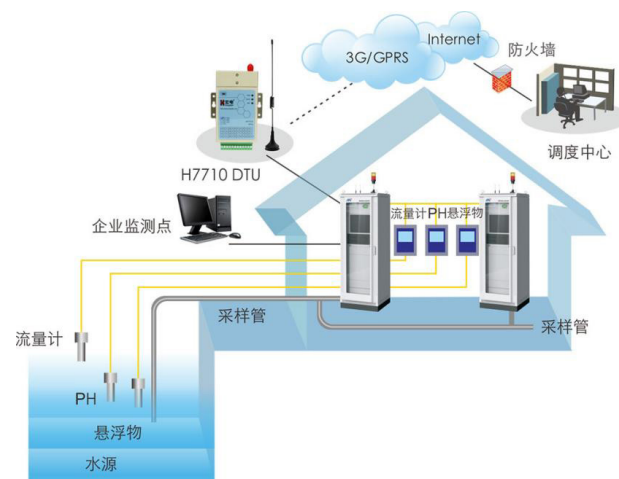


图1 嵌入式污染源在线监测系统剖析图

5 新型传感器集成系统建设与网络化发展

5.1 传感节点布局优化与数据协同机制

污染源分布具有空间离散性与排放不确定性,合理规划传感节点布局可显著提升监测覆盖率与数据准确率。在一座面积为80平方公里的工业园区中,通过部署120个空气质量传感节点与45个水质监测点位,实现了90%以上的污染源监测覆盖率。节点间采用Mesh自组织网络结构,具备动态路径修复能力,数据丢包率控制在2%以内。节点与节点间通过1秒内时钟同步机制共享采样时间戳,便于跨区域数据融合与污染源溯源建模。各节点设有本地缓存与数据优先级机制,当网络拥堵时能优先上传高风险数据包,构建高效、鲁棒的数据协同网络体系。

5.2 传感器集成平台与边缘计算能力融合

传感器集成平台通过模块化结构整合多种监测单元、信号调理电路与通信模块,构建具备独立处理能力的微系统。边缘计算单元被部署在采集端,每秒处理数据条目达3000组,可实现5种污染物因子的趋势分析与异常识别。在日处理1.2GB数据量的监测系统中,边缘节点过滤掉95%的冗余数据,仅将核心参数上传至中心服务器,节省带宽同时提升响应速度。在断网或低信号区域,边缘设备支持48小时数据缓存与本地事件报警,具备断续式运行能力。通过FPGA与低功耗处理器协同运行,系统整体功耗控制在5W以下,为分布式部署与长期运行提供技术保障^[3]。