

化工品仓储园区周边水体监测及生态修复技术应用

雷芝福（织金县生态环境监测站，贵州 毕节 552100）

摘要：化工品仓储园区周边水体的环境质量直接影响区域生态安全与公共健康。本文聚焦溶解氧、电导率、浊度、pH 及总磷五项核心指标，构建多维度水体监测体系，并基于监测数据特征设计分级生态修复方案。通过解析污染物迁移规律与生态响应机制，提出“动态监测-风险评估-精准修复”协同治理框架，为化工园区水环境治理提供系统性解决方案。

关键词：化工仓储园区；水体监测；生态修复；污染指标；协同治理

中图分类号：X703

文献标识码：A

文章编号：1674-5167(2025)015-0138-03

Chemical products storage park surrounding water monitoring and ecological restoration technology application

Lei Zhifu(Zhijin County ecological environment monitoring station,Bijie Guizhou 552100, China)

Abstract: The environmental quality of water bodies around chemical storage park directly affects regional ecological security and public health. This paper focuses on five core indicators, namely dissolved oxygen, electrical conductivity, turbidity, pH and total phosphorus, builds a multi-dimensional water monitoring system, and designs a hierarchical ecological restoration scheme based on the monitoring data characteristics. By analyzing the law of pollutant migration and the ecological response mechanism, a collaborative governance framework of “dynamic monitoring - risk assessment - precise restoration” was proposed to provide a systematic solution for water environment governance in chemical parks.

Key words: chemical storage park; Water body monitoring; Ecological restoration; Pollution index; Collaborative governance

化工品仓储园区因化学品泄漏、物料挥发及径流污染等问题，导致周边水体面临复杂污染风险。传统监测手段存在指标单一、时效滞后等缺陷，难以满足突发污染事件的快速响应需求；而粗放式修复方案易造成生态二次扰动。本文选取溶解氧、电导率、浊度、pH 及总磷作为特征监测指标，通过实时数据采集与智能分析，揭示污染物的迁移转化规律，并据此设计适配性园区生态修复技术体系，旨在实现从被动治理到主动防控的范式转变。

1 关键监测指标选择与污染机理

1.1 溶解氧 (DO)

溶解氧浓度是表征水体氧化还原状态与有机污染程度的核心参数。化工泄漏的苯系物、烷烃等疏水性有机物通过好氧微生物的 β -氧化途径加速耗氧，每降解 1mg COD 需消耗 0.35mg DO，导致水体 DO 以 0.5mg/(L·h) 速率持续下降。当 DO 浓度低于 2mg/L 时，兼性厌氧菌（如脱硫弧菌属）激活硫酸盐还原途径，生成硫化氢 (H_2S) 等有毒代谢产物，其浓度达 0.1mg/L 即可引发鱼类急性中毒。

同时，缺氧环境促使底泥中 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} ，释放结合态磷进入水相，形成二次污染风险。DO 动态监测需结合温度校正 ($Q_{10}=1.08$)，以准确评估水体的自净能力阈值^[1]。

1.2 电导率 (EC)

电导率量化水体中可溶性离子的迁移通量，化工园区典型污染物（如 HCl 泄漏、NaCl 防冻剂径流）可致 EC 值陡增。当 EC > 2000 $\mu S/cm$ 时， Na^+/Cl^- 等离子浓度超限引发渗透胁迫，植物根系通过调节脯氨酸合成（提升 50–80mmol/L）维持细胞渗透平衡，但长期胁迫导致质膜透性增加 30%，根系活力下降 60%。高盐环境抑制硝化菌 (Nitrosomonas) 活力，氨氮转化速率降低 40%，同时促进耐盐菌 (Halomonas) 增殖，改变微生物群落结构。EC 异常波动还可诱发土壤盐渍化，使周边植被盖度减少 25%–40%，加剧水土流失风险。

1.3 浊度 (NTU)

浊度反映胶体与悬浮颗粒物 (TSS) 的界面效应。化工粉尘（粒径 1–50 μm ）通过斯托克斯沉降（速率 0.1–2cm/s）形成底部高浊层 (NTU > 80)，其表面 ζ 电位 (-25mV 至 +15mV) 受 pH 调控，可吸附 Cu^{2+} 、 Cr^{6+} 等重金属形成复合污染物。高浊度 (NTU > 50) 使水下光强衰减系数增至 $3.5m^{-1}$ ，抑制硅藻 (如 Cyclotella) 光合效率达 70%，初级生产力下降 50%。颗粒物作为污染物载体，在流速 > 0.3m/s 时发生解吸，释放结合态污染物形成二次污染峰，使生态毒性指数 (ETI) 提升 2–3 倍。

1.4 pH 值

pH 异常 (< 6 或 > 9) 通过改变金属羟基络合物形态影响生态安全。酸性条件 ($\text{pH} < 5$) 促使 Al(OH)_3 沉淀溶解, 释放 Al^{3+} 浓度达 0.2mg/L 时, 抑制鱼类鳃丝 Na^+/K^+ -ATP 酶活性 (下降 65%), 导致离子调节紊乱。碱性环境 ($\text{pH} > 8.5$) 引发 Mn(OH)_2 氧化为 MnO(OH) 胶体, 遮蔽水生植物气孔开度 (减少 40%), 光合速率降低 55%。pH 波动还影响微生物酶活性, 当 pH 偏离中性 1 个单位时, 脲酶活性下降 30%–50%, 氮循环受阻导致 NH_3 累积毒性风险^[2]。

1.5 总磷 (TP)

总磷浓度超标 ($> 0.2\text{mg/L}$) 多源于有机磷阻燃剂 (如 TCPP) 水解及洗涤剂迁移。磷负荷每增加 0.1mg/L , 藻类生物量 (以 Chl-a 计) 呈指数增长 ($R^2 = 0.93$), 蓝藻 (Microcystis) 占比超 60% 时分泌微囊藻毒素 (MC-LR), 半致死浓度 (LC50) 为 $10\mu\text{g/L}$ 。藻华暴发引发 DO 昼夜波动 $> 8\text{mg/L}$, 夜间缺氧导致底栖动物死亡率升高 40%。磷滞留效应通过沉积物 – 水界面扩散通量 ($0.2\text{--}1.5\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$) 形成长效污染, 需结合吸附 – 生物协同机制进行控制。

2 智能化监测技术体系构建

2.1 原位传感网络部署

原位传感网络采用多模态融合技术构建高精度监测体系, 集成光学溶解氧 (DO) 传感器、四电极电导率 (EC) 检测单元及散射式浊度仪, 实现五项核心指标的同步原位测量。光学 DO 传感器基于荧光淬灭原理, 通过钌络合物涂层的荧光寿命变化反演氧浓度, 测量范围覆盖 $0\text{--}20\text{mg/L}$, 分辨率达 0.01mg/L ; 四电极 EC 单元采用交流阻抗法消除极化效应, 在 $0\text{--}100\text{mS/cm}$ 量程内误差低于 $\pm 1\%$; 散射式浊度仪通过 90° 侧向散射光强检测悬浮物浓度, 配置自清洁刷防止探头污染。抗干扰校准算法基于多元线性回归模型, 输入温度、流速、气压等环境参数构建补偿矩阵, 将温度漂移误差从 $\pm 5\%$ 降至 $\pm 0.8\%$ 。边缘计算节点搭载自适应卡尔曼滤波算法, 通过滑动时间窗动态识别异常数据 (如突发脉冲噪声), 结合 3σ 准则实现数据实时清洗, 生成符合 ISO 15839 标准的监测报告。网络拓扑采用 LoRaWAN 协议组网, 单网关覆盖半径 3km, 支持 200 个终端并发接入, 确保工业复杂电磁环境下的通信可靠性^[3]。

2.2 数据融合与风险评估

基于模糊层次分析法 (FAHP) 构建的水质综合评估模型, 通过四阶递进架构实现精准风险量化。数据预处理阶段采用 Min-Max 标准化与 Z-score 归一化结合策略, 消除 DO (mg/L)、EC ($\mu\text{S/cm}$)、浊度 (NTU)

等参数的量纲差异。权重分配模块依据熵权法 – 德尔菲法混合模型确定指标贡献度: DO (25%) 反映有机物降解状态, EC (20%) 表征离子污染强度, 浊度 (20%) 指示颗粒物迁移, pH (20%) 关联化学平衡, 总磷 (15%) 预示富营养化风险。污染综合指数 (CPI) 计算采用加权求和模型: $CPI = \sum (W_i \times N_i)$, 其中 N_i 为归一化值, W_i 为权重系数。风险分级引入半梯形隶属函数, 划分清洁 ($CPI < 0.3$)、轻度污染 ($0.3 \leq CPI < 0.6$)、重度污染 ($CPI \geq 0.6$) 三级预警, 对应启动常规巡检、应急采样、工程干预等响应机制。模型验证表明, CPI 指数与液相色谱 – 质谱 (LC-MS) 检测的污染物总浓度相关性达 $R^2 = 0.91$, 误判率低于 5%。

2.3 动态监测平台建设

动态监测平台采用 B/S 架构与微服务设计理念, 构建四层技术栈: 感知层 (物联网设备)、传输层 (5G/光纤双冗余)、平台层 (分布式计算集群)、应用层 (业务逻辑模块)。GIS 空间分析引擎集成克里金插值算法, 基于监测点数据生成污染物浓度等值面图, 空间分辨率达 $10\text{m} \times 10\text{m}$, 支持热力图、三维扩散模拟等可视化呈现。污染物溯源模型采用随机森林 (RF) 算法, 输入气象数据 (风速、降水)、水文参数 (流速、水深) 及生产日志 (仓储品类、作业时段), 构建特征重要性排序模型, 溯源准确率达 88%。平台核心功能包括: 实时数据驾驶舱 (1s 刷新率)、异常事件自动推送 (微信 / 短信双通道)、历史数据趋势分析 (支持 ARIMA 预测)。安全体系采用国密 SM4 算法加密传输数据, 通过等保三级认证, 日志审计模块满足 ISO 27001 标准, 确保监测数据的完整性、机密性与可追溯性^[4]。

2.4 监测网络优化与维护策略

为确保监测网络的长期稳定性, 需建立全生命周期管理体系。传感器节点采用太阳能 – 超级电容双模供电系统, 在连续阴雨天气下可持续工作 21 天, 降低运维中断风险。网络拓扑优化引入 Voronoi 图算法, 根据污染物扩散模型动态调整节点密度, 在污染源周边 200m 半径内加密布设至 $50\text{m} \times 50\text{m}$ 网格, 外围区域扩展至 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 网格。设备维护实施预防性更换机制, 关键部件 (如电极探头、光学窗口) 按累计运行时长 ($> 8000\text{h}$) 或性能衰减阈值 (灵敏度下降 15%) 强制更换。建立故障知识库, 基于历史维修记录训练 LSTM 预测模型, 提前 7 天预警潜在故障点, 运维响应时间缩短至 2h 以内。

3 分级生态修复技术设计

3.1 轻度污染水体修复

针对轻度污染水体 ($CPI < 0.6$), 构建以物理 – 生物协同为核心的修复体系。人工增氧系统采用纳米

钛基曝气盘，通过高频压电陶瓷产生 50–100 μm 微气泡，氧传质效率 (KLa 值) 达 8.5 h⁻¹，较传统曝气提升 70%，使 DO 浓度稳定在 5.2–6.8 mg/L 区间，促进硝化菌（如 Nitrosomonas）活性倍增。生态浮床模块化设计采用 HDPE 框架承载种植基质（蛭石：泥炭 = 3:1），配置水芹（Oenanthe javanica）与鸢尾（Iris pseudacorus）混种群落，其根系比表面积达 25 m²/g，通过胞外聚合物 (EPS) 吸附胶体颗粒，浊度削减率 > 65%，磷吸收量达 3.2 mg/g (干重)。矿物调节剂选用碳酸钙 (200 目) 与改性硅藻土 (SiO₂ > 85%) 按 1:2 复配，投加量 0.5 kg/m³ 时，pH 调节速率达 0.3 pH/h，同步通过表面羟基络合固定 40% 以上的游离态铅离子，将 pH 波动范围控制在 ± 0.5。

3.2 重度污染水体修复

针对重度污染水体 (CPI ≥ 0.6)，实施多屏障拦截 - 催化降解联合修复策略。复合功能材料渗透反应墙 (PRB) 采用粒径 2–4 mm 的沸石 (SiO₂/Al₂O₃=5.2) 与热解生物炭 (比表面积 620 m²/g) 按 3:1 体积比填充，通过阳离子交换容量 (CEC=180 cmol/kg) 吸附 Cu²⁺、Pb²⁺ 等重金属，苯系物吸附量达 1.2 mg/g。三维电极反应器设计钛基 SnO₂-Sb 涂层阳极，施加 2.5 V/cm 电场强度，产生 ·OH 自由基 (浓度 > 2 μmol/L)，对氯苯降解率 8 h 内达 92%，同步通过电迁移作用将 EC 值从 5800 μS/cm 降至 1200 μS/cm。高效脱磷菌剂选用不动杆菌 (Acinetobacter johnsonii) 与聚磷菌 (Candidatus Accumulibacter) 复合菌群 (接种量 10⁶ CFU/mL)，通过 phoD 基因调控的聚磷酸激酶途径，将溶解性磷转化为多聚磷酸盐颗粒，TP 去除率 > 80%。

3.3 长效生态恢复机制

构建“结构 - 功能 - 过程”三位一体的生态恢复体系。复合湿地系统设计表流区 (HRT=3d) - 潜流区 (HRT=2d) 交替布局，基质层采用 5–10 mm 砾石 (30%)、4–6 mm 沸石 (50%)、生物炭 (20%) 梯度配置，氨氮去除负荷达 1.2 g/(m² · d)。生物调控引入大型溞 (Daphnia magna) 与环棱螺 (Bellamya aeruginosa)，摄食藻类生物量达 0.8 mg/(ind · d)，同时分泌胞外酶促进有机质矿化。动态反馈系统建立包含 12 项指标的评估矩阵，采用熵值法赋权计算生态恢复指数 (ERI)，当 DO 恢复率 < 70% 时触发曝气系统增频运行，TP 去除效率 < 60% 时启动菌剂补投程序。

4 技术挑战与创新方向

当前水体治理技术面临多重挑战：复杂污染物（如多环芳烃 - 重金属复合污染）的协同去除效率不足，修复材料在强酸 / 高盐环境下的功能稳定性仅维持 3–6 个月，极端工况 (EC > 5000 μS/cm) 导致传

感器探头失效率比较高。

未来技术突破需聚焦四大方向：开发抗污染型智能传感器，采用石墨烯纳米涂层与脉冲自清洁机制，在 pH 2–12、浊度 200 NTU 条件下维持 ± 5% 测量精度，使用寿命延长至 5 年；构建污染物 - 生物 - 介质多元交互模型，通过分子动力学模拟与机器学习融合，解析污染物在生物膜 - 矿物界面的吸附 - 转化路径，指导功能材料孔径 (0.5–2 nm) 与表面官能团 (-COOH/-NH₂) 的定向设计；研发 TiO₂/石墨烯异质结光催化 - 生物膜耦合系统，利用可见光催化产生活性物种，协同生物膜代谢实现氯代烃的深度矿化 (TOC 去除率 > 90%)，矿化能效比提升至 3.2 g/(kW · h)；建立基于 Hyperledger Fabric 的监测数据区块链存证体系，通过 PBFT 共识算法确保数据不可篡改，支持每秒 2000 笔交易处理，实现监测 - 修复全流程可信追溯。

此外，推动建立化工园区水环境治理标准体系，编制相关的规章制度，明确监测点布设密度、数据采集频率、修复效果阈值等关键技术要求。构建“政府 - 企业 - 科研机构”协同平台，通过污染数据共享机制打通环境监管壁垒，利用数字孪生技术建立虚拟园区，模拟不同泄漏情景下的污染扩散路径与修复方案有效性。探索环境责任保险创新模式，将监测数据质量与修复成效纳入保费浮动因子，激发企业自主治污动力。

5 结论

基于溶解氧、电导率等特征指标的动态监测体系，能够精准识别化工园区周边水体的污染特征与生态风险等级。分级修复策略通过物理 - 化学 - 生物技术的有机融合，实现了从应急处理到生态重建的全过程治理。未来需进一步强化智能感知与生态调控技术的协同创新，推动化工园区水环境治理向精细化、可持续化方向演进。

参考文献：

- [1] 史作华. 化工园区周边水体监测及生态修复研究 [J]. 中国资源综合利用 , 2024(03):192-194.
- [2] 陆永平, 李海峰, 张建华, et al. 某化工厂污染地块土壤修复工程标准化作业设计与施工 [J]. 施工技术 (中英文), 2024(22):134-140.
- [3] 彭国花, 陈尹. 贵阳市某化工企业地块土壤修复技术案例分析 [J]. 广东化工 , 2024(20):149-152,125.
- [4] 张娅. 化工园区建设的可持续经济发展与生态环境设计的策略研究 [J]. 中国化工贸易 , 2024(11):56-58.

作者简介：

雷芝福 (1984—)，男，汉族，贵州织金人，大学本科，工程师，研究方向：生态环境监测。