

高速公路收费站中的污水处理工艺与技术应用

向 婷, 李 楠

(汉中市南郑区城市管理局, 陕西 汉中 723199)

摘 要 高速公路收费站污水具有水量波动大、含油及特殊悬浮物的特点。本文构建“预处理—生物处理—深度处理—资源化”工艺体系, 预处理用细格栅与三级隔油控污, 生物处理以改良A2/O-MBR和生物接触氧化降解有机物, 深度处理借膜分离与芬顿氧化提标, 资源化实现雨水—污水回用。结合水质检验、运行效能、经济成本评估、环境影响评价四类分析方法, 验证工艺可使出水达标, 为收费站污水治理提供技术参考。

关键词 高速公路收费站; 污水处理; 预处理技术; 生物处理技术; 深度处理技术

中图分类号: U417; X7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.031

0 引言

在高速公路路网中, 收费站作为分散服务节点, 日均产生5~50 m³污水, 成分复杂且波动大。其中既包含工作人员生活产生的洗漱、餐饮废水, 也有车辆冲洗、地面清洁带来的含油污水, 远超自然水体自净能力。多数收费站地处城郊或偏远路段, 市政污水管网覆盖不足, 若直接排放, 污水中的油脂会在水体表面形成油膜, 隔绝空气与水的交换, 导致水生生物死亡; 同时, 污染物渗入土壤会堵塞孔隙, 破坏土壤结构, 进而威胁周边水源地安全与农作物生长, 且处理后水质需严格满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级A标准及地方特殊限值要求。因此, 研究适配的小型化、智能化处理工艺与技术, 既能精准应对其污水特性, 实现稳定达标排放, 又能通过水资源循环利用降低能耗, 兼具环保合规、资源循环与低成本运维价值, 对推动交通基础设施绿色转型、降低沿线区域生态环境风险具有重大的现实意义。

1 高速公路收费站中污水处理的重要性

高速公路收费站作为高速公路路网的分散式服务节点, 其污水具有“水量随车流量剧烈波动、水质成分复杂”的典型特征, 且多数收费站地处城郊或偏远区域, 市政污水管网覆盖不足, 缺乏针对性处理措施, 污水直排易引发多重环境风险, 直接威胁居民饮用水安全与农产品质量。从合规性角度看, 根据《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)及地方专项规范, 收费站污水需至少达到一级A标准排放, 部分敏感区域需提升至地表Ⅳ类水质, 合规处理是交通基础设施运营的基本前提。收费站平日常有广场冲洗、绿化灌溉等稳定的用水需求, 把处理后的污水转

换为中水进行回用, 能顶替30%~70%的市政用水, 在缺水地带或水资源紧缺路段, 可有效减少对市政供水的依赖, 实现“污水减量化—资源化”闭合循环管理, 同时符合交通领域低碳环保及可持续发展的行业走向, 具备环境、合规以及资源的三重核心价值^[1]。

2 高速公路收费站中的污水处理工艺与技术

2.1 预处理技术

高速公路收费站预处理技术以“拦截特殊污染物、均衡水质水量、降低后续工艺负荷”为核心目标, 针对污水中轮胎碎屑、塑料微粒等固体杂质及石油类物质设计专项处理单元。采用细格栅进行物理拦截, 格栅孔径严格控制在1~3 mm, 通过链条或耙齿式机械传动实现自动清渣, 可有效去除污水中粒径大于格栅间隙的悬浮物, 避免后续设备堵塞, 清渣频率可根据水质浊度动态调整。经过格栅处理的污水进入三级隔油装置, 该装置创新整合旋流分离与斜板沉淀技术: 先利用油与水的密度差异(油密度约0.85 g/cm³, 水约1 g/cm³), 让污水在旋流腔体内产生离心力, 使油滴向中心聚集实现初步分离; 再通过斜板组件的浅池效应, 大幅增长油滴停留时间, 强化微小油粒的碰撞聚合, 将石油类物质去除率提升至80%以上。污水随后流入调节池, 调节池容积需结合收费站日均污水量及流量波动特征精准设计, 通常按4~8小时水力停留时间计算, 规模较小的收费站可适当缩短至3小时。池内均匀布设2~3台潜水搅拌机, 避免污染物沉积, 实现水质均匀混合; 同时搭配液位传感器与自动阀门组成的控制系统, 实时调节出水流量, 平稳应对节假日车流量高峰导致的瞬时水量冲击, 保障后续处理工艺稳定运行。

2.2 生物处理技术

高速公路收费站生物处理技术聚焦“高效降解有机物、同步脱氮除磷、适配分散运维场景”，结合污水低碳氮比、可生化性中等的特点，形成两类核心工艺体系。改良 A2/O-MBR 组合工艺在传统厌氧—缺氧—好氧工艺的底子上优化结构，在厌氧段里填充悬浮的填料，增大微生物可附着的面积，加大对复杂有机物的水解酸化力度，提升污水的可生化水平；缺氧段采用间歇曝气的方式，经过控制使溶解氧浓度达到 0.2 ~ 0.5 mg/L，引导微生物开展短程反硝化进程，减少碳源的消耗，进而提高总氮去除效率；好氧段完成后与 PVDF 中空纤维膜组件相衔接，膜的实际孔径为 0.1 μm ，借助膜的筛分功能达成泥水高效分离，杜绝活性污泥流失，系统运行过程中膜通量维持在 15 ~ 20 LMH，经该工艺处理后污水 COD 可降至 50 mg/L 以下，氨氮控制在 5 mg/L 以内。生物接触氧化法则以“低运维强度、高抗冲击能力”为优势，反应器内填充组合软填料，填料比表面积超过 2 000 m^2/m^3 ，使反应器内微生物浓度达到活性污泥法的 3 倍，通过曝气系统提供充足氧气，微生物在填料表面形成生物膜，高效降解污水中的有机物，减少设备维护工作量，对水量波动适应性强，在收费站污水处理中 BOD 去除率稳定保持在 90% 以上，满足分散式处理场景的运维需求^[2]。

2.3 深度处理技术

高速公路收费站深度处理技术以“水质净化升级、适配回用需求、降低环境风险”为核心，针对生物处理后污水中残留的难降解有机物、微量污染物及悬浮物，构建多元化处理体系。MBR 膜分离技术作为核心深度处理单元，在生物处理段膜组件基础上进一步优化运行参数，通过精准控制膜清洗周期与方式，维持膜通量稳定，确保出水浊度低于 0.5 NTU，水中悬浮物与微生物几乎完全去除，处理后水质可直接满足洗车、绿化等回用场景要求，且该技术采用模块化设计，占地面积较传统深度处理工艺减少 40%，适用于收费站有限的场地条件。针对回用标准要求更高、含难降解污染物的污水，采用砂滤及活性炭吸附组合工艺作为补充方案，砂滤单元采用石英砂这种滤料，凭借截留与吸附功能去除水中细小的悬浮颗粒，把出水浊度降到 1 NTU 以下；活性炭吸附单元凭借活性炭多孔结构，吸附污水里残余的有机物、颜色及异味物质，进一步增进水质的感官指标水平，该组合工艺在雨水回收处理当中应用效果极为显著，可让回收的雨水达到景观用水的既定标准。针对污水中少量表面活性剂、石油类等难

降解污染物，芬顿氧化技术通过在酸性条件下投加硫酸亚铁与过氧化氢，生成具有强氧化性的羟基自由基，实现对难降解有机物的氧化分解；改良型流体化床芬顿工艺通过载体颗粒的流化作用，强化反应传质效率，减少 70% 的污泥产量，降低了固废处置成本。

2.4 资源化技术

高速公路收费站污水处理资源化技术以“适配场景用水需求、降低市政供水依赖”为核心，聚焦水资源循环利用。雨水—污水双源回收利用技术把雨水收集与污水深度处理单元整合起来，把收费站顶棚、广场硬化路面当作雨水汇水区域，通过导流槽与沉淀池初步截下雨水中的泥沙、落叶，然后引入砂滤—活性炭吸附组合系统把悬浮物与异味去除，与储水设施相接通。该技术可将雨水与达标处理污水统筹储存，优先用于广场地面冲洗、收费亭外保洁，水质需满足浊度低于 1 NTU、COD 低于 30 mg/L，实际应用中可实现年节水量 1 700 吨以上，投资回收期控制在 6 ~ 8 个月。中水回用系统则以深度处理后污水为水源，依据《城市污水再生利用 城市杂用水水质》标准优化处理流程，经 MBR 膜处理与紫外消毒后，进一步通过离子交换树脂去除钙镁离子，使出水硬度低于 150 mg/L，适配绿化灌溉、卫生间冲厕及设备冷却用水场景。系统通过智能分水阀组实现“回用—排放”自动切换，回用率稳定维持在 70% 以上，减少污水排放量，降低周边水体环境压力。部分收费站还探索污泥资源化路径，将污水处理产生的脱水污泥与园林枯枝落叶混合堆肥，实现“污水—污泥—绿化”闭环循环，进一步提升资源利用效率^[3]。

3 应用效果分析方法

3.1 水质检验方法

水质检验方法围绕“全流程管控、适配场景需求”构建，针对收费站污水日均水量波动超 10 倍、含轮胎屑屑与石油类等特殊污染物的特点，分预处理、生物处理、深度处理三阶段，精准设定差异化检测指标与技术路径，避免单一检测方法难以覆盖复杂水质的问题。预处理阶段重点检测悬浮物与石油类，二者直接影响后续工艺稳定性。悬浮物采用重量法，取 100 mL 水样通过 0.45 μm 微孔滤膜过滤，经 103 ~ 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重后称重，计算去除率以确保格栅拦截效果；为应对车流高峰水质突变，两类指标每日常规检测 1 次，节假日或车流量超平日 1.5 倍时，检测频次增至 2 次，数据实时同步至中控系统。生物处理阶段聚焦 COD、BOD5、氨氮、总氮、总磷，COD 用重铬酸钾法测定氧化

降解量, 氨氮用纳氏试剂分光光度法显色检测, 每2日开展1次实验室分析, 查验有机物降解与脱氮除磷的成效, 深度处理及出水的阶段, 采用浊度仪在现场对浊度进行检测, 用总有机碳分析仪测定溶解性有机物, 粪大肠菌群借助多管发酵法培养计数, 每周实施1次全指标检测, 保证出水符合排放或者可回用的标准。增加冲击负荷检验, 模拟节假日3倍水量冲击, 连续24小时监测COD与悬浮物波动, 若指标变异系数 $<15\%$, 判定系统抗冲击能力达标, 为水质稳定提供双重保障。

3.2 运行效能分析方法

运行效能分析方法以“稳定性、适配性、高效性”为核心, 适配收费站无人值守与分散式运维场景。负荷适应性分析通过采集年度水量数据, 划分低、中、高三个区间, 对比不同负荷下出水达标率与设备运行状态, 若各区间达标率均 $\geq 95\%$ 且设备无过载停机, 说明负荷适配性合格。设备效率分析针对核心组件选定关键指标, 算出膜组件运行1年的通量衰减率, 要是衰减率 $<20\%$, 膜寿命就算达标了; 曝气系统开展氧利用率检测工作, 用溶氧仪对比进气量和水中DO的实际增量, 只要利用率 $>25\%$, 便是高效运行; 自动化设备统计PLC故障响应时间与远程操控成功率, 延迟 <5 分钟、成功率 $>98\%$ 符合运维需求。工艺参数优化采用单因子变量法, 如调整缺氧段DO至 $0.2\sim 0.5\text{ mg/L}$ 监测总氮去除率, 改变活性炭吸附层流速至 $5\sim 10\text{ m/h}$ 分析DOC去除效果, 以此确定最优运行参数, 提升系统整体效能^[4]。

3.3 经济成本分析方法

经济成本分析方法覆盖“全生命周期”, 结合收费站规模差异量化成本与收益。初始投资成本按设备、土建、安装分类核算, 小型收费站(日处理 $5\sim 10\text{ m}^3$)模块化系统约 $15\sim 20$ 万元, 较传统土建工艺节省 30% ; 中型站($10\sim 50\text{ m}^3$)含雨水回收系统需额外投入 $8\sim 12$ 万元。运行成本拆解为能耗、药剂、运维三类, 能耗按风机、泵等设备月耗电量结合电价计算, 小型系统约 $0.8\sim 1.2\text{ 元/m}^3$; 药剂成本根据PAC($50\sim 100\text{ mg/L}$)与次氯酸钠($0.5\sim 1\text{ mg/L}$)投加量及市场价核算, 约 $0.3\sim 0.5\text{ 元/m}^3$; 运维费按季度巡检与年度膜清洗计算, 小型站年支出 $1\sim 2$ 万元。收益计算含节水与补贴, 回用率 70% 的中型站年节水收益超 $5\ 000$ 元, 部分地区每吨达标水可获 $1\sim 2$ 元补贴。投资回收期按“初始投资 \div (年节水收益+年排污费减免)”计算, 小型站常规场景约13年, 配套光伏发电可缩短至10年以内。开展敏感性分析, 模拟电价上涨 10% 或膜

寿命延长1年对成本的影响, 可为项目经济性优化提供依据。

3.4 环境影响分析方法

环境影响分析方法通过“量化减排、评估循环、验证周边”三维度, 凸显收费站污水处理的生态价值。污染物减排量按“进水浓度—出水浓度—处理水量”计算, 日处理 10 m^3 的站点, COD年减排量可达 900 kg 以上, 石油类超 300 kg , 进一步换算为对周边水体的污染负荷削减率。资源循环效益聚焦水资源与能源, 中水回用率 70% 的中型站年节水超 $5\ 000\text{ m}^3$, 配套 20 kW 顶棚光伏年发电 2.5 万度, 减少碳排放约 15 吨; 污泥处理采用脱水后与枯枝落叶堆肥, 含水率降至 80% 以下可减少 70% 外运量, 实现固废资源化。周边环境验证通过现场监测与公众调研, 检测土壤石油类含量, 运行后若从 50 mg/kg 降至 10 mg/kg 说明土壤污染控制有效; 调研周边居民对水体清澈度、异味改善的满意度, $>90\%$ 则表明环境感知效果良好, 全面衡量处理系统对周边生态的积极影响^[5]。

4 结束语

本文系统梳理了收费站污水处理工艺与分析方法, 可精准破解其“分散运维难、水量波动大、含油污染物难降解”的治理难点。整套工艺形成全链条解决方案, 预处理通过细格栅与隔油装置严控污染物负荷, 深度处理采用膜过滤或高级氧化技术提升出水水质, 资源化环节将达标水回收用于地面冲洗、绿化灌溉, 全方位保障应用效果。未来可进一步优化智能管控系统, 结合AI算法实时分析进水水质、水量数据, 自动调整曝气强度、药剂投加量等关键参数; 同时强化光伏供电、低碳药剂等低碳技术集成, 推动收费站污水治理向更高效、低耗、绿色的方向发展, 为交通领域环保升级提供可参考的技术范式。

参考文献:

- [1] 郑倩. 复合酶生物促进剂-组合型生物包处理高速公路收费站污水[J]. 福建交通科技, 2024(11):161-164.
- [2] 梁耀恒. 高速公路收费站给排水设计研究[J]. 西部交通科技, 2016(05):36-37,93.
- [3] 张程皓, 郝艳. 西北地区高速公路收费站生活污水水质特征调查研究[J]. 清洗世界, 2024,40(07):55-57.
- [4] 赵越. 山西省高速公路服务区污水处理工艺适用性研究[J]. 山西交通科技, 2023(06):100-102,120.
- [5] 缙栋栋. 浅析小型污水处理设备在甘肃高速公路工程中的应用现状[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020,16(10):12-15.