

污水处理厂碳排放核算及低碳运行策略研究

邵宁子

安徽中和能新能源有限公司 安徽 合肥 230000

摘要: 本文系统研究了污水处理厂碳排放核算方法与低碳运行策略。通过分析直接与间接碳排放来源,构建了涵盖核算边界、分类方法及强度评价的核算体系,并揭示了不同工艺与时空条件下的碳排放特征。针对减排需求,提出了工艺优化、能源管理、资源回收与智能管控四大低碳策略,为污水处理厂实现减污降碳协同增效提供理论支持与实践路径。

关键词: 污水处理厂; 碳排放核算; 温室气体; 低碳运行; 减排策略

引言

随着“双碳”目标推进,污水处理厂作为高能耗、高排放的市政设施,其低碳运行成为行业关注焦点。传统治污模式重水质达标、轻碳排放控制,亟需构建科学的碳排放核算体系。本文从碳排放机理出发,系统梳理核算方法与影响因素,探索低碳运行优化路径,对推动污水处理行业绿色转型、实现可持续发展具有重要意义。

1 污水处理厂碳排放机理与核算方法

1.1 污水处理过程碳排放来源分析

污水处理厂碳排放贯穿污水、污泥处理全流程,可分为直接排放与间接排放两大类。直接碳排放主要源自生物处理单元的微生物代谢反应,污水中含氮、含碳污染物在硝化、反硝化及有机物分解过程中,会直接生成 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等温室气体,同时污泥厌氧消化、堆放处置也会持续释放碳类气体。间接碳排放涵盖厂区生产运营全过程的外部能耗与物料消耗,主要包括水泵、曝气设备等机电设备运行消耗电力产生的碳排放,以及污水处理药剂采购、运输、投加过程伴随的隐性碳排放^[1]。此外,污泥外运处置、设备检修维护等附属环节也会产生少量间接碳排放。各类排放源相互叠加,构成污水处理厂完整的碳排放体系。

1.2 碳排放核算方法

当前污水处理厂主流碳排放核算方法包含实测法、物料衡算法、排放因子法三类,各类方法适配场景与核算精度存在显著差异。实测法依托在线监测设备与人工采样检测,实时采集厂区温室气体排放浓度、流量等数据,通过公式精准计算碳排放量,该方法核算精度最高,但对监测设备、检测技术及运维成本要求较高,适用于大型标准化污水处理厂。物料衡算法基于质量守恒

原理,追踪污水中碳、氮元素的输入、转化与输出全过程,结合污染物去除量核算温室气体产生量,贴合污水处理生化反应机理,专业性较强。排放因子法是目前应用最广泛的核算方式,依托国家及行业发布的权威碳排放因子,结合活动数据直接计算排放量,操作简便、普适性强,适合中小型污水厂及批量核算场景,也是行业核算体系的基础核心方法。

1.3 碳排放核算边界与范围界定

核算边界与范围的界定需遵循行业规范与碳中和标准。空间边界以厂区红线为核心,涵盖污水预处理、生化处理、深度处理、污泥处理等生产单元及配套附属设施,厂外管网等环节可选择性纳入。时间边界按自然年或运营周期划定,保障数据完整连续,规避季节性误差。排放范围依据温室气体核算体系划分,包含范围一直接排放、范围二外购电力与热力间接排放,精细化核算可纳入范围三隐性排放。统一的边界标准可有效规避核算漏项与重复计算问题^[2]。

2 污水处理厂碳排放核算体系构建

2.1 核算框架设计

核算框架以“边界清晰、分类明确、数据可控、评价全面”为原则,搭建闭环核算体系。框架分为基础数据收集、碳排放分类核算、数据校验分析、碳排放评价四大模块。基础数据收集模块整合污水处理量、进出水浓度、设备能耗、药剂消耗量、污泥产量及处置方式等核心运营数据。分类核算模块按直接与间接排放分类标准,匹配对应核算方法与因子完成排放量计算。数据校验模块通过行业横向对比与历史纵向比对,修正偏差、剔除异常数据。评价模块依托核算结果,结合碳排放强度指标完成综合评估,实现碳排放量化、标准化核算,图1所示。



污水处理厂碳排放核算框架流程图1

2.2 直接碳排放核算方法

污水处理厂直接碳排放主要为生化处理与污泥处置产生的温室气体排放，核算核心依托排放因子法与物料衡算法结合的组合模式。生化单元碳排放重点核算有机物降解、硝化反硝化过程产生的CO₂、CH₄、N₂O，根据污水COD、TN去除总量，结合污水处理专属碳排放因子，精准计算生化反应直接碳排放量。污泥处理单元涵盖污泥浓缩、脱水、厌氧消化、填埋焚烧等环节，不同处置工艺对应差异化排放因子，需结合污泥含水率、有机物含量、处置总量核算对应碳排放。核算过程中需区分不同工况的影响，针对低温、高负荷、低负荷等特殊运行状态，修正基础排放因子，同时剔除自然环境、设备故障等外部干扰因素，确保直接碳排放核算结果贴合厂区实际运行工况，提升核算精准度与真实性。

2.3 间接碳排放核算方法

污水处理厂间接碳排放主要源于能源消耗与物料消耗两大维度。能源间接碳排放以厂区电力、热力、水资源消耗数据为基础，结合区域电网及热力供应碳排放因子，核算设备运行、供暖、生产用水等环节的碳排放量。物料间接碳排放主要核算絮凝剂、消毒剂等药剂的采购、运输及投加过程碳排放，依据年消耗量与单位药

剂排放因子完成量化计算^[3]。此外，精细化核算体系还补充设备运维、耗材更换、污泥外运等隐性排放，全面覆盖非生化反应类碳排放，弥补单一能耗核算的局限性，保障核算体系的完整性。

2.4 碳排放强度评价指标

碳排放强度评价指标是量化低碳运行水平、对比不同厂区碳排放效率的核心依据。核心指标为单位污水处理碳排放强度，即处理单位体积污水产生的总碳排放量，衡量厂区基础治污低碳水平。辅助指标包含单位污染物去除碳排放强度，分别核算去除单位COD、氨氮、总氮对应的碳排放量，评价污染物治理过程的碳排放效率。综合低碳效益指标结合碳排放量、能耗量、资源回收量构建复合评价体系，可有效区分工艺与运维差异，为低碳改造、工艺优化提供量化评价标准^[4]。

3 污水处理厂碳排放特征分析

3.1 不同工艺类型的碳排放特征

不同污水处理工艺的碳排放存在显著差异。传统活性污泥法曝气能耗高、污泥产量大，碳排放强度中等偏上，间接排放占比突出。A²/O工艺硝化反硝化过程N₂O排放偏高，直接排放占比较大。MBR膜工艺膜组件能耗高、药剂消耗量大，间接排放显著偏高，总碳排放强度居高不下。氧化沟工艺运行稳定、能耗可控，碳排放总量小，直接与间接排放配比均衡，低碳优势明显。SBR工艺采用序批式间歇运行，无二沉池及污泥回流系统，碳排放介于氧化沟与传统活性污泥法之间。间歇曝气降低了平均能耗，但设备频繁启停易造成瞬时能耗升高；因无独立缺氧区，脱氮效率有限，N₂O排放略高于氧化沟，整体碳排放强度中等^[5]。不同工艺碳排放对比如表1所示。

表1 不同污水处理工艺碳排放特征对比

工艺类型	碳排放强度	直接排放占比	间接排放占比	主要排放环节	低碳适配性
传统活性污泥法	中等偏上	35%~45%	55%~65%	曝气系统、污泥处理	一般
A ² /O工艺	中等	50%~60%	40%~50%	硝化反硝化过程	偏弱
MBR膜工艺	高	25%~35%	65%~75%	膜组件能耗、药剂消耗	较差
氧化沟工艺	较低	40%~50%	50%~60%	曝气转刷、污泥处置	优良
SBR工艺	中等	40%~50%	50%~60%	间歇曝气、搅拌设备	中等

3.2 碳排放的时空分布特征

污水处理厂碳排放具有明显时空分布差异。时间维度上，碳排放呈季节性波动，夏季水温高、微生物活性强，直接排放量大幅提升；冬季低温环境下，需加大曝气与药剂投加，间接排放显著增加。空间维度上，碳排放集中于生化处理单元，曝气池、缺氧池温室气体释放

量最大，是直接排放核心区域；提升泵房、风机房为间接排放核心区域；污泥处理车间呈局部集中、持续释放特征；预处理及深度处理单元碳排放量相对较低，整体空间分布层级清晰、差异显著。

3.3 碳排放影响因素分析

污水处理厂碳排放是水质、工况、设备、运维、工

艺等多因素耦合作用的结果。进水水质是核心内源因素, COD、氨氮、总氮浓度越高, 直接排放总量越大。运行工况直接影响能耗水平, 曝气时长、污泥回流比等参数不合理会造成能源浪费。设备性能是重要硬件因素, 老旧设备能耗效率低, 会大幅增加间接碳排放。此外, 季节温度、运维管理水平、药剂投加量、污泥处置方式均会影响碳排放。精细化运维管控与合理参数调控可有效降低无效碳排放, 是低碳优化改造的关键切入点^[6]。

4 污水处理厂低碳运行策略

4.1 工艺优化减排策略

工艺优化是源头减碳的核心手段。首先优化生化反应参数, 精准调控曝气时长、溶解氧浓度、污泥龄、回流比等, 适配进水水质波动, 减少过度曝气与无效生化反应带来的排放与能耗。其次开展工艺升级改造, 将高能耗工艺优化为低耗高效工艺, 强化脱氮除磷效率, 降低 N_2O 释放。同时优化污泥处理工艺, 采用低温厌氧消化、高效脱水技术, 减少污泥产量及处置过程碳排放。通过工艺适配性优化, 从污染物转化、污泥处置全流程降低无效碳排放, 实现低碳化升级。

4.2 能源管理与节能降碳策略

能源消耗是间接碳排放的主要来源。首先开展设备节能优化, 更换高能耗老旧设备, 采用变频调速设备, 根据进水负荷自动调节运行功率, 规避恒速运行造成的能源浪费。其次搭建精细化能源管控体系, 分区、分时统计能耗数据, 定位高能耗点位, 针对性优化运行模式。同时推广清洁能源替代, 配套建设光伏、风电等分布式能源系统, 降低外购电力碳排放^[7]。另外优化热力、水资源循环利用模式, 减少生产用水与供暖能耗, 全方位压缩间接碳排放, 构建高效、节能、低碳的能源运行体系。

4.3 资源回收减排策略

资源回收利用可实现废弃物资源化转化, 抵消碳排放。污水资源回收方面, 通过中水深度处理技术, 将达标尾水转化为再生水, 用于设备清洗、绿化浇灌、工业回用, 减少新鲜水资源消耗。污泥资源回收是核心减碳环节, 通过厌氧消化产生沼气, 用于发电、供暖, 实现能源自给; 将稳定化污泥制成有机肥、路基材料, 规避填埋、焚烧产生的大量碳排放。同时可回收污水中氮、磷资源, 实现营养盐循环利用, 形成“处理-回收-利用”的低碳闭环, 有效降低综合碳排放强度。

4.4 智能管控减排策略

依托智能化、数字化技术搭建智慧运维体系, 是实现精准降碳的关键手段。搭建厂区智能监控平台, 部署水质、能耗、气体排放在线监测设备, 实现碳排放与运行工况的动态监测。利用大数据与人工智能算法构建智能调控模型, 根据进水负荷、季节温度变化, 自动优化曝气、回流、加药等运行参数, 替代人工经验调控, 规避能耗浪费与超额碳排放。同时搭建碳排放数字化核算系统, 自动统计、核算、分析碳排放数据, 实现动态监管与溯源优化。智能管控可实现全流程精准运维、按需调控, 保障污水厂长期稳定低碳运行。

结束语

综上所述, 污水处理厂低碳运行需从核算体系构建到减排策略实施全方位推进。本文基于核算方法揭示了不同工艺及时空条件下的碳排放特征: 夏季直接排放偏高、冬季间接排放突出, 氧化沟工艺低碳优势明显, 为差异化减排提供了依据。结合工艺优化、节能降耗、资源回收与智能管控, 可有效降低碳排放强度。然而, 受限于当前监测条件与数据可得性, 核算精度仍存在不确定性, 排放因子的本地化修正与多因素耦合模拟有待深入。未来应持续完善核算标准体系, 推动数字化监测技术应用, 提升数据可获取性与模型精度, 助力行业实现减污降碳协同增效。

参考文献

- [1]向岑,陈时熠.污水处理厂碳排放核算与碳减排措施的综述[J].环境科技, 2025, 38(1):68-73.
- [2]涂倩倩,沈鹏飞,刘鸣燕,等.城镇污水处理厂碳排放核算方法及特征[J].净水技术,2024,43(6):52-62.
- [3]李学瑞,贾建伟,党晓宏,等.西北某污水处理厂碳排放核算及碳减排潜力分析[J].给水排水,2025,51(1):64-69.
- [4]许生辉,高国文,吴奥,等.某城镇污水处理厂碳排放核算及碳减排策略分析[J].绿色矿冶,2025,41(4):106-112.
- [5]孙强强,罗凡,杜至力,等.不同生化工艺小城镇污水处理厂碳排放特征研究[J].广东化工,2023,50(13):160-163,144.
- [6]袁佳双,邱爽. IPCC AR6相关甲烷研究进展分析及对中国的启示[J]. 气候变化研究进展,2024,20(3):327-336.
- [7]邱巨龙,刘树洋,王华,等. 污水处理厂温室气体排放核算与减排路径研究[J]. 环境监测管理和技术,2024, 36(3):83-87.