重点产业园区减污降碳标准化案例研究

——以某省级重点化工园区污水处理厂为例

潘 建[1,2]，张艺缤[1]，邱 丹[3]，郑 兴[4]，陈冬梅[5]

（1. 建德市环保科技创新创业中心有限公司，杭州 311607；2. 杭州贝采催化剂有限公司，杭州 311607；
3. 建德市三江生态管理有限公司，杭州 311604；4. 浙江科技大学环境与资源学院，杭州 310023；
5. 阿卜杜拉国王石油研究中心，利雅得 11672）

摘要：化工类重点园区污水处理厂作为末端治理与低碳转型的关键单元，其减污降碳成效直接决定园区绿色发展水平。针对现有研究缺乏园区层面减污降碳标准化案例的系统总结与模式提炼的问题，以中国东部某省化工类重点产业园区污水处理厂为研究对象，构建了一个“技术耦合-流程标准化-效益协同-推广适配”的分析框架，系统梳理现有光伏与水处理技术耦合的减污降碳技术措施与应用成效，分析其“能源供给-污染降解-碳减排”的协同体系，针对废旧催化剂处置成本高、绿电利用率不足、水资源回用率低等问题，提出针对性改进优化建议，最后形成园区、行业和国家三级政策启示。研究成果旨在填补化工园区污水处理厂减污降碳标准化案例总结的空白，为中国类似化工、能源产业园区提供实践借鉴与理论支撑，助力园区绿色低碳转型与“双碳”目标的稳步实现。

关键词：省级重点化工园区；污水处理厂；催化氧化；减污降碳；标准化案例

中图分类号：F121.3；X321 **文献标志码**：A **文章编号**：1671－1807(2026)12－0086－08

在“双碳”目标引领下，中国相继出台了《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》《2030 年前碳达峰行动方案》《减污降碳协同增效实施方案》《关于“十四五”推动石化化工行业高质量发展的指导意见》等政策文件，将工业领域绿色低碳转型置于国家战略核心位置[1-4]。重点产业园区作为工业集聚发展的核心载体，贡献了全国 31%的二氧化碳排放[5]与 46%的工业污水排放[6]。它既是经济增长的引擎，也是污染与碳排放集中区域，随着工业企业入园趋势的不断加强，重点产业园区也将贡献更大比例的二氧化碳与污水排放，其减污降碳成效直接关系“双碳”目标如期实现。

化工类园区污水处理厂承担末端治理与低碳转型双重功能，当前面临两大突出瓶颈：一是化工废水成分复杂、难降解有机物浓度高且变化大，经传统工艺处理后难以稳定达标[7]；二是处理过程高度依赖化石能源，碳排放强度大[8]。近年来，催化臭氧氧化技术作为一种高效、低碳的高级氧化技术，通过催化剂催化臭氧产生氧化性极强的活性氧物质（reactive oxygen species，ROS），可快速降解污水中各类难生化降解有机物，同时具有能耗相对较低、二次污染小等优势，已广泛应用于印染、化工、制药等产业园区污水处理领域[9-10]；光伏发电作为清洁能源替代化石能源的重要路径，在园区污水处理厂规模化应用后可满足厂区用电需求，显著降低二氧化碳排放[11]，也有学者提出通过中水回用和资源回收降低碳排放[12]。以上技术耦合应用可实现“污染物深度去除＋能源低碳替代”的协同增效，具备广阔应用前景。然而，现有技术应用到园区时，虽然有关于化工园区低碳转型的研究[13-14]，也有关于重污染企业技术创新与减污降碳耦合的研究[15]，但是缺少园区层面减污降碳标准化案例的系统总结与模式提炼，难以为类似园区提供可复制、可推广的实践范式。

在此背景下，催化臭氧氧化技术与光伏绿电耦

收稿日期：2026-04-30

作者简介：潘建（1986—），男，浙江温州人，博士，高级工程师，研究方向为高级氧化法水处理技术研发和应用及能源与环境政策分析；张艺缤（1987—），女，新疆阿克苏人，硕士，经济师，研究方向为企业管理；邱丹（1985—），男，浙江杭州人，工程师，研究方向为水污染防治和水环境治理；郑兴（1973—），男，四川成都人 ，博士，教授，研究方向为污水深度处理回用和低碳节能技术；陈冬梅（1972—），女，安徽蚌埠人，硕士，高级研究员，研究方向为中国与海合会国家能源经济转型合作。

合应用,形成“污染物深度去除+能源低碳替代+资源循环利用”的协同模式,为破解上述难题提供新路径。本文以中国东部某省级重点化工产业园区污水处理厂为案例,系统解析减污降碳技术耦合机制、实施效果、标准化流程与优化方向,旨在进一步丰富化工园区污水处理厂减污降碳标准化案例研究,为中国重点产业园区绿色低碳转型提供理论支撑与实践指引。

1 理论框架与研究设计

1.1 理论框架

本文构建了一个“技术耦合-流程标准化-效益协同-推广适配”的分析框架。该框架四模块层层递进,核心逻辑是“以技术耦合为基础,以流程标准化为保障,以效益协同为目标,以推广适配为落地路径”,如图1所示。

技术耦合(核心层):作为整个框架的基础,是连接各模块的核心纽带。核心是光伏与水处理的双向协同,光伏为催化氧化等水处理单元提供清洁稳定的动态电能,破解其高能耗痛点;催化氧化高效降解污染物,优化光伏能源利用场景,避免空间和能源闲置,形成“供能-反应”的良性传导,为后续流程标准化、效益协同提供技术支撑。

流程标准化(规范层):是保障技术耦合稳定运行、效益可复制的关键。通过设计、运行、监测三大环节的标准化,避免因操作不规范、参数波动导致的技术效果不稳定,确保不同污水处理厂应用该耦合技术时,能实现较好的减污降碳效果,为效益协同和推广适配奠定基础。

效益协同(价值层):是框架的核心目标,也是技术推广的核心动力。聚焦减污、降碳、经济三大效益,三者相互联动——减污可降低后续处理负荷、促进中水回用,间接减少能耗与碳排放;降碳可契合“双碳”政策,获得政策支持,降低环保成本;经济与环境效益的提升,进一步推动技术的持续应用,实现“减污降碳+成本优化”的协同共赢。

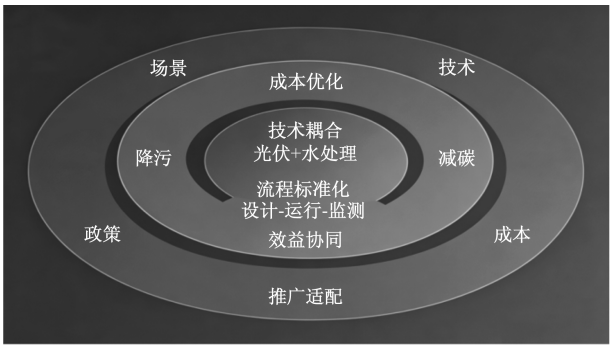


图1 “技术耦合-流程标准化-效益协同-推广适配”分析框架

推广适配(落地层):是实现框架落地、技术规模化应用的关键。立足污水处理厂实际场景,从政策、场景、技术、成本四个维度适配——适配不同规模、不同水质的污水处理厂,兼容现有工艺减少改造投入,贴合环保政策降低推广门槛,实现规模化推广,真正助力污水处理厂减污降碳转型。

整体而言,该框架既明确了光伏与水处理单元耦合的核心逻辑,又规范了运行流程、明确了价值目标和落地路径,解决了当前耦合技术应用中“运行不规范、效益不明确、推广难度大”的痛点,为污水处理厂减污降碳技术的规模化应用提供了理论支撑。

1.2 研究设计

1.2.1 研究方法

选取典型案例(东部某省级重点化工园区污水处理厂),系统调研案例中减污降碳技术的应用现状、实施流程、运行参数,分析技术耦合效果、存在问题及优化方向,提炼可复制、可推广的经验,为类似园区污水处理厂提供实践指引,主要数据来源如下。

减污成效数据:对该园区污水处理厂开展持续监测,监测周期涵盖2022—2025年每年1月(冬季)、4月(春季)、7月(夏季)、10月(秋季),累计监测时长跨度4年;监测指标选取化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)、氨氮(ammonia nitrogen, NH_3-N)、总氮(total nitrogen, TN)、总磷(total phosphorus, TP)四项常规排污指标,共采集水样482组,每组样品均同步采集污水处理厂进水与出水各1份,分别进行分析。为了研究催化臭氧氧化过程对难降解COD的去除效果,分别在2025年1月、4月、7月和10月取了四组样品,研究了生化过程和催化臭氧氧化过程对COD去除的贡献。

节能降碳数据:该园区污水处理厂于2025年5月配套建设光伏绿电接入系统,本文监测了2025年7月、10月和2026年1月的光伏发电量(含自用电量和上网电量),结合污水处理厂电量使用情况进行后续分析。

1.2.2 案例概况

(1)某省级重点化工园区概况。某省级园区位于中国东部沿海地区,是省级重点化工园区,规划面积约7.8 km^2,主导产业包括有机硅、有机胺、香精香料、医药中间体等,先后获得首批市级高新技术产业园区、省首批新材料高新技术产业基地、省

级功能性新材料高新技术产业园、首批国家级高新技术产业基地拓展区、省化工园区(集聚区)、省工业循环经济示范区等称号,规划产值目标为500亿元。该园区于2019年全面启动园区“污水零直排区”创建工作,并于当年12月高标准通过验收,该工作被生态环境部作为典型案例向全国推广。

(2)园区污水处理厂概况。园区工业废水处理量约1.05万t/d,主要污染物为COD、氨氮、总磷及部分难降解有机物(如精细化工中间体等),进水COD浓度波动范围为80～120 mg/L(个别高达200 mg/L),常规生化法处理之后不能满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准。园区为严格落实减污降碳要求,推动环保治理技术升级,先后引入催化臭氧氧化技术、推进绿电接入工程,助力园区实现污染物减排与碳排放削减双重目标。

该园区污水处理厂一期建成于2009年,二期扩建于2017年,扩建后处理规模1.05万t/d,主要承担该园区工业废水及周边少量生活污水的处理任务。该厂处理工艺为“格栅＋调节池＋厌氧池＋好氧池＋二沉池＋催化氧化＋过滤＋消毒”,污水经处理后可达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准,难降解COD在催化氧化单元得到有效去除。为响应减污降碳协同要求,该厂于2025年5月配套建设绿电接入系统,采用“自发自用余电上网”运营模式,实现了难降解污染物深度去除与能耗优化,成为园区减污降碳标准化示范工程。

2 技术耦合与标准化实施

2.1 水处理技术选型

结合某省级重点化工园区污水污染物特征及减污降碳需求,该园区污水处理厂采用“生化单元＋催化臭氧氧化单元＋消毒”的组合工艺,聚焦污水深度处理,兼顾处理效果与能耗控制。其中,催化臭氧氧化单元主要用于去除水中的难生化降解有机物。

为验证该催化臭氧氧化单元的适配性,开展了对比实验:选取园区典型污水水样(二沉池出水,COD＝60 mg/L),分别采用直接臭氧氧化和催化臭氧氧化实验,实验条件控制为臭氧投加量60 mg/L、反应时间30 min、pH＝7.5、水温为室温,实验结果显示,催化臭氧氧化对COD去除率达10%～30%,而直接氧化处理不能去除COD(有时,COD甚至升高),验证了催化臭氧氧化单元对该园区污水处理的适配性与优越性。

2.2 工艺设计

基于水处理技术选型,确认该园区污水处理厂的处理工艺流程为:进水→粗格栅/细格栅→厌氧池→好氧池→二沉池→催化臭氧氧化池→过滤池→消毒池→排放。其中,臭氧采用曝气盘输入方式,确保臭氧与污水充分接触。

结合园区污水污染物浓度变化及减污降碳需求,在设计之前优化了核心运行参数,尤其探究了催化氧化单元臭氧投加量、水力停留时间、pH值对难降解COD去除率的影响。结合实验结果,确定污水处理单元核心运行参数:臭氧投加量为60 mg/L,水力停留时间为30 min,反应pH值控制在7.0～8.0,水温范围为10～40 ℃。该参数设置可确保难降解COD去除率满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准。

另外,依托园区2025年绿电接入系统,该污水处理厂已使用光伏绿电,年发电量约159万kWh,绿电使用占该污水处理厂总使用电量的25%以上,进一步降低化石能源消耗带来的碳排放。

2.3 标准化实施流程

该园区减污降碳标准化应用流程,分为前期调研、技术选型与工艺设计、设备安装与调试、标准化运行、维护与优化5个环节,确保技术应用的规范性、稳定性和高效性,为其他园区提供可复制的操作范式。

2.3.1 前期调研

开展园区污水排放现状调研,明确污水排放量、典型污染物种类及浓度范围,重点检测难降解有机物含量及波动规律,分析现有污水处理技术的不足;结合园区减污降碳目标,确定催化臭氧氧化技术的应用场景、处理目标;调研园区绿电资源、水资源循环利用潜力,为工艺设计和参数优化提供依据。

2.3.2 技术选型与工艺设计

根据前期调研结果,结合园区产业特征和减污降碳需求,选型适配的生化法、催化臭氧氧化技术等处理单元,确定组合工艺方案;进行工艺参数设计,通过单因素实验优化臭氧投加量、反应时间、催化剂装填量等核心参数,同步设计绿电接入、水资源循环利用等配套系统,确保工艺设计兼顾处理效果与能耗控制。

2.3.3 设备安装与调试

按照工艺设计方案,建设或安装生化池、催化

反应池、中水回用设备等核心设备,配套建设绿电接入设施;设备安装完成后,进行空载调试、负载调试,通过实验优化运行参数,确保设备运行稳定,污水处理效果达到设计目标,能耗控制在合理范围。

2.3.4 标准化运行

建立标准化运行管理制度,明确操作人员岗位职责、操作流程;按照优化后的运行参数,定期监测污水处理效果、能耗、催化剂活性等指标,建立运行台账;优先使用绿电,合理调整运行参数,应对污水污染物浓度波动,确保减污降碳效果稳定。

2.3.5 维护与优化

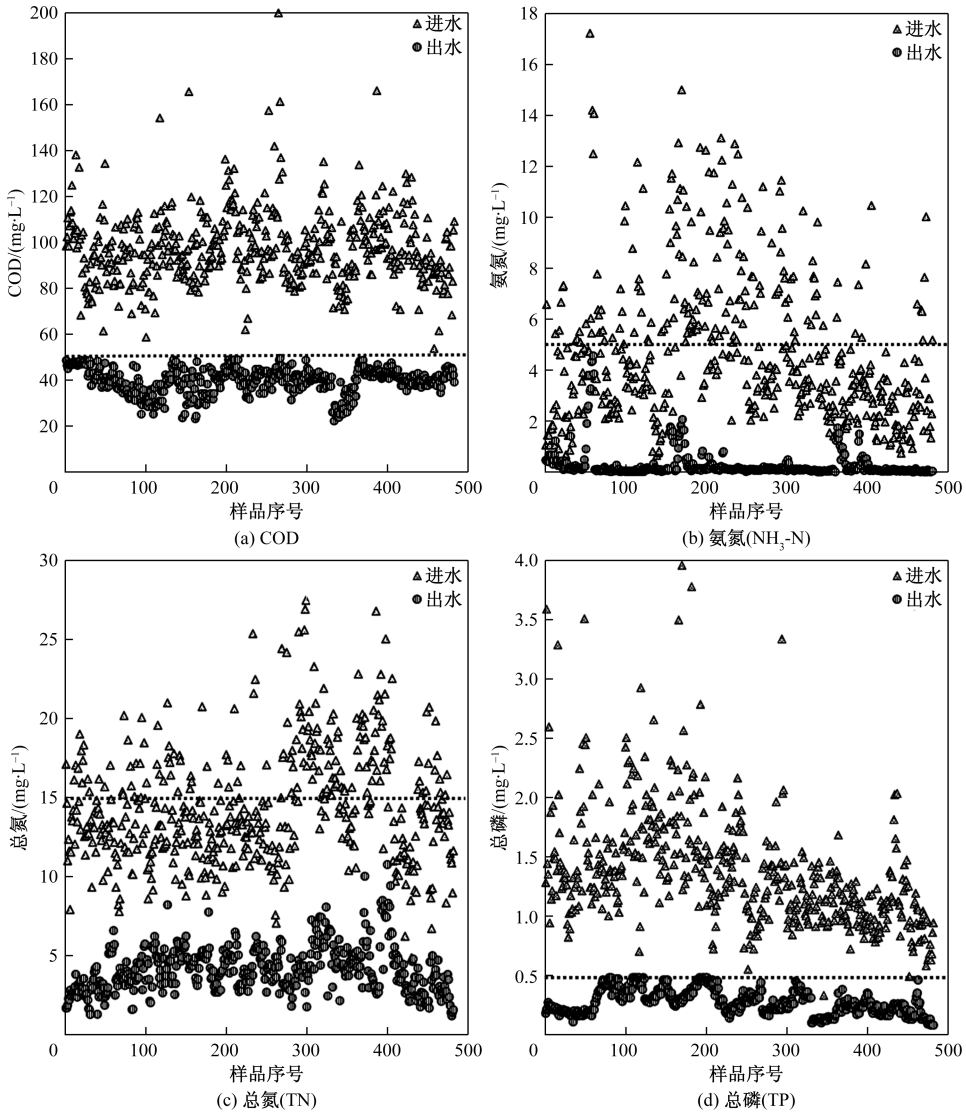
建立污水处理厂各单元定期维护、检测制度,及时进行催化氧化池的反冲洗、再生或更换;定期检修臭氧发生器、风机、水泵等设备,确保设备正常运行;监测减污降碳效果,分析运行过程中存在的问题,结合园区产业升级和政策要求,持续优化工艺参数和运行模式,提升技术应用的经济性和高效性。

3 案例成效

3.1 减污成效

该污水处理厂化学需氧量(COD)、氨氮(NH_3-N)、总氮(TN)、总磷(TP)的去除效果如图2所示。

该污水处理厂进水COD在54～200 mg/L波动(84.2%的进水COD都在80～120 mg/L),波动较大,平均值为98 mg/L,处理之后的出水COD为22～50 mg/L,平均值为40 mg/L,均满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准的要求(50 mg/L);结合该污水处理厂进水量,可以核算出该污水处理厂每天可以减排COD 0.14～1.40 t,所监测的16个月共减排279.2 t COD,



图中虚线代表该污水处理厂的排污标准:COD限值=50 mg/L,氨氮限值=5 mg/L,总氮限值=15 mg/L,总磷限值=0.5 mg/L

图2 污水处理厂水质相关指标的去除效果

2022—2025 年共减排约 838 t，成效明显。该污水处理厂进水的氨氮和总氮的数据分布更加分散，并且有 63.9%的进水样品已经满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准的要求(氨氮 5 mg/L，总氮 15mg/L)，处理难度相对较低，处理之后的氨氮和总氮分别为 0.02～4.58 mg/L 和 1.20～10.78 mg/L，满足排放要求；结合该污水处理厂进水量，可以核算出该污水处理厂在监测期内分别减排 21.6 t 氨氮和 49.6 t 总氮，2022—2025 年分别减排约 65 t 氨氮和 149 t 总氮。该污水处理厂对总磷的排放要求更加严格(0.5 mg/L)，污水处理厂进水总磷在 0.34～3.96 mg/L 波动，平均值 1.38 mg/L，且 99.6%超出排放要求，但是出水的总磷明显降低，为 0.09～0.49 mg/L(平均值 0.28 mg/L)；结合该污水处理厂进水量，可以核算出该污水处理厂在监测期内减排总磷 5.21 t，4 年减排总量约为 16 t。

该污水处理厂生化过程和催化臭氧氧化过程对 COD 的去除效果如图 3 所示。4 批样品中，进水 COD 为 89～122 mg/L，催化臭氧氧化过程可以去除 9～24 mg/L 的 COD，去除率为 10%～22%。去除的 COD 数量虽然不多，但是前期实验发现，这部分 COD 是极难降解的有机物，直接排放会对环境生态系统造成风险，所以这部分 COD 的去除不仅满足了排放要求，还可以降低对生态系统的影响。

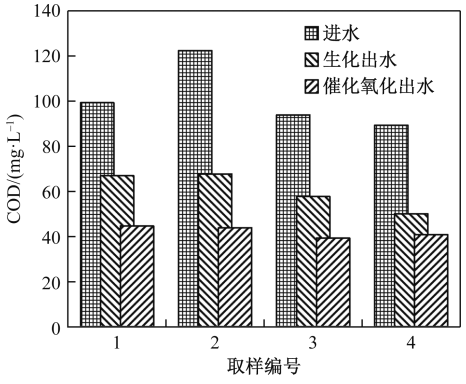


图 3　污水处理厂进水、生化单元出水和催化氧化单元出水化学需氧量(COD)浓度

3.2　降碳成效

园区污水处理厂光伏发电统计图如图 4 所示。在所监测的三个月中，发电量分别为 23.0、14.7 和 10.0 万 kWh，夏季(7 月)的发电量明显高于秋季(10 月)和冬季(1 月)，并且分别有 56%、64%和 73%的发电量自用，说明大部分光伏发电电量用于污水处理厂自身运维，这种“自发自用余电上网”运

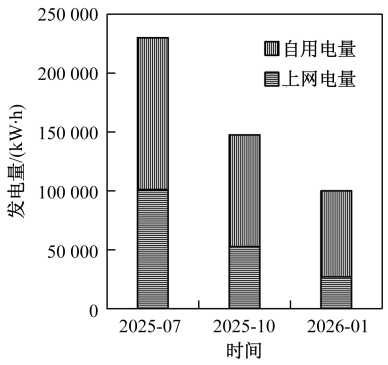


图 4　园区污水处理厂光伏发电电量

营模式的经济性是最好的[16]。据统计，该园区污水处理厂年度光伏发电量约为 159 万 kWh，按照《2024 年全国电力碳足迹因子》[17]中的全国电力平均碳足迹因子 0.577 7 $kgCO_2e/kWh$ 和光伏发电碳足迹因子 0.052 0 $kgCO_2e/kWh$ 计算，折合减少碳排放约 836 t/年，说明园区污水处理厂降碳效果显著。如果考虑输配电(含线损)，按照光伏发电自用 60%(即 95.4 万 kWh)和因子 0.032 7 $kgCO_2e/kWh$ 计算，则可以多减排 31 t 碳(园区污水处理厂总计降碳 867 t/年)。由于该园区污水处理厂暂无储能单元，光伏发电采用直接供给用电器使用或者上网的方式，暂不考虑由于储能系统波动对实际供电效率的影响。

3.3　资源循环与经济效益

实验数据表明，催化臭氧氧化技术的应用使污水中 COD 排放浓度从约 60 mg/L 降至 50 mg/L 以下，处理后污水稳定达到排放标准，同时可以满足国标《城市污水再生利用 绿地灌溉水质》(GB/T 25499—2010)的要求。因此，该园区污水处理厂出水可满足园区绿化灌溉等需求，资源化潜力大，该污水处理厂管理方拟后续开展中水回用相关工作。未来，如果中水回用率达到 20%，则年均回用中水约 77 万 t，可节约新鲜水资源成本约 185 万元(按 2.4 元/t 计算)，经济效益显著，可推动形成“治污-降碳-资源化”闭环，助力园区实现产业升级与生态保护协同推进。

光伏与水处理技术耦合，尤其通过光伏为催化氧化单元提供清洁稳定的可再生能源，强化臭氧氧化体系的活性物种生成，可实现污水中难降解污染物的深度去除(减污)；同时替代化石能源消耗、减少温室气体排放并回收水资源，还能减少输电过程中的能量损耗，优化污水处理厂碳足迹，最终实现减污降碳协同增效，构建“能源供给-污染降解-碳减排”的协同体系。

4 实践瓶颈与优化路径

4.1 核心瓶颈

4.1.1 废旧催化剂处置费用高

该园区污水处理厂采用的催化剂,虽然催化效果良好、寿命较长,但使用之后的废旧催化剂再生能耗较大,如果作为固废处置,则处理成本更高。参考国内其他使用催化臭氧氧化工艺的厂家,目前多采用更换催化剂的方法,这直接增加了运行成本。

4.1.2 绿电利用率有待提升

园区污水处理厂绿电接入系统的光伏组件装机容量有限,除去上网电量,污水处理厂的绿电使用率为25%~43%,污水处理厂大部分用电仍依赖传统电网供电,绿电使用率还有进一步提升空间。

4.1.3 暂未规模化进行中水回用

该园区污水处理厂出水的化学需氧量、氨氮、总氮、总磷等相关指标虽然可达到《城市污水再生利用 绿地灌溉水质》(GB/T 25499—2010)相关标准,并满足园区绿化灌溉等需求,但是暂未实施规模化中水回用,目前污水处理厂出水经检验合格后直接外排,中水的资源回用率还有较大提升空间。

4.1.4 技术标准化推广适配性有待提升

该园区污水处理厂的生化处理+催化臭氧氧化技术应用流程虽已形成标准化模式,但该模式是基于该园区的产业特征(以精细化工、化工新材料、医药中间体为主)和污水污染物排放特点设计的,对于不同产业类型(如能源工业园区)、不同污染物浓度的园区,其技术选型、工艺参数、运行模式难以直接套用,标准化推广的适配性有待提升。

4.2 优化措施

4.2.1 优化催化剂选型,研发再生工艺

联合科研机构或者相关单位开展长效高效催化剂研发,延长催化剂使用寿命,降低使用成本;同时,根据已有的催化剂再生技术研究[18],优化规模化再生工艺,降低再生能耗,建立催化剂再生生产线,实现催化剂的循环利用,减少废旧催化剂的处置费用。目前已有研究表明,某种铝基催化剂再生费用仅为更换催化剂费用的38.0%~43.6%[19],说明使用再生催化剂具有良好的经济效益。

4.2.2 完善绿电利用体系,提升绿电使用率

扩大园区光伏组件装机容量,提升绿电供应能力;配套建设储能系统,存储光伏富余电力,结合绿电使用监测数据,可以有效减少绿电浪费,确保污水处理厂50%以上用电由光伏提供;同时,加强与电网企业协同,优化绿电调度模式,进一步降低化石能源消耗带来的碳排放。

4.2.3 评估生态健康风险,提升中水回用水平

根据中水回用相关标准和园区需求,确认中水回用的水量和水质;在园区污水处理厂内开辟试验田,利用回用水进行灌溉,评估中水回用的效果和潜在风险,编写适合该园区的《中水回用作业指导书》;推广中水回用措施,同时密切监测中水水质,降低中水回用风险。

4.2.4 完善标准化推广体系,提升适配性

虽然不同产业类型的废水具有不同污染物及其浓度,但是催化氧化技术产生的ROS理论上都可以快速降解这些有机物,所以该技术具有比较广泛的适应性。基于该园区污水处理厂的应用经验及实验数据,结合不同产业园区的产业特征、污水污染物排放特点,分类制定生化法、催化臭氧氧化等技术减污降碳标准化应用指南,明确不同场景下的技术选型、工艺设计、参数设置、维护要求等,形成差异化的标准化模式;同时,开展案例推广培训,分享应用经验和实验数据,助力类似园区快速适配该技术,实现减污降碳协同增效。

5 结论与启示

5.1 结论

某省级重点化工园区污水处理厂创新性地引入生化法+催化臭氧氧化组合技术处理污水并搭配光伏绿电接入等配套措施,突破传统局限,构建“污水处理+减污降碳”一体化模式,出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准,推动污水处理技术向高效化、低碳化升级,为园区污水深度处理技术创新提供范本。

(1)工程实现生态、经济、社会三大效益统一:2022—2025年累计减排COD 838 t、氨氮65 t、总氮149 t、总磷16 t,年减碳约867 t,后续中水回用将进一步提升水资源循环利用率;标准化运行与绿电接入降低运维成本,同时改善区域生态、保障群众环境安全,树立园区绿色转型典范。

(2)实践中形成“前期调研-技术选型-安装调试-标准化运行-优化维护”完整流程,针对催化剂处置、绿电利用等问题提出优化措施,构建了可复制、可推广的标准化案例,为类似产业园区减污降碳提供可落地的实践参考。

(3)理论层面,该工程完善了工业园区绿色转型标准化理论体系,填补了同类技术标准化应用的理论空白,推动园区绿色转型从经验型向标准化、

科学化转变，为后续同类工程提供理论指导。

5.2 启示

水处理技术与光伏绿电耦合形成的“污染物深度去除＋能源低碳替代＋资源循环利用”协同模式，结合中国东部某省级重点化工产业园区污水处理厂案例实践，为重点产业园区绿色低碳转型提供了实践样本，结合减污降碳协同增效政策导向，从园区、行业、国家三个层面提炼如下政策启示。

(1)园区层面：聚焦落地实施，打造示范标杆。作为产业集聚的核心载体，化工产业园区应将耦合技术作为污水处理厂绿色转型的核心抓手，推动技术落地与示范引领。一是强化规划引领，将光伏与水处理耦合技术纳入园区污水治理、能源利用专项规划，结合园区闲置空间统筹布局光伏组件，根据水质特征规划催化氧化等处理单元，实现“污水治理＋绿电供给”一体化布局。二是完善配套保障，出台园区专项扶持政策，对污水处理厂耦合技术改造给予资金补贴、能耗补贴，简化项目审批流程，降低企业改造投入成本；同时建立园区内技术共享机制，推广案例中的标准化流程，带动园区内所有污水处理设施逐步实现技术升级。三是强化监测考核，将耦合技术的减污降碳效果纳入园区环保考核指标，倒逼污水处理厂规范运行，确保耦合模式发挥实效，打造“园区级减污降碳示范标杆”。

(2)行业层面：强化标准引领，推动协同发展。立足污水处理行业与新能源行业协同发展需求，以耦合技术为突破口，完善行业标准与产业生态。一是加快标准体系建设，结合案例中的标准化流程，牵头制定光伏与水处理耦合技术的设计规范、运行标准、监测标准，解决行业内技术应用不规范、效果参差不齐的问题。二是推动产业协同，搭建污水处理企业、光伏企业、环保技术企业的合作平台，促进技术集成与成果转化，推动耦合技术的规模化应用，降低其使用成本；同时引导行业内企业加强技术研发，优化耦合系统的适配性，推动技术向小型化、智能化升级，适配不同规模污水处理厂的需求。三是加强行业宣传与培训，推广案例中的成功经验，提升行业内企业对耦合技术的认知度，引导企业主动采用耦合技术，推动污水处理行业从“达标排放”向“减污降碳协同”转型。

(3)国家层面：完善顶层设计，强化政策赋能。围绕“双碳”目标与污水治理高质量发展要求，从顶层设计层面为耦合技术推广提供政策支撑，推动重点产业园区绿色转型。一是完善政策体系，将光伏与水处理耦合技术纳入国家绿色低碳技术推广目录，出台针对性的财政补贴、税收减免政策，鼓励重点化工产业园区、大型污水处理厂开展技术改造；同时将耦合技术的应用与碳配额、绿电交易挂钩，提升企业应用积极性。二是强化顶层统筹，协调环保、能源等部门，形成政策合力，推动污水处理与新能源产业深度融合，将“污染物深度去除＋能源低碳替代”纳入重点产业园区绿色转型考核指标，倒逼园区加快技术升级。三是加大研发投入，设立国家层面专项科研资金，支持耦合技术的核心技术攻关(如针对不同水质特征的高效催化剂研发、光伏与催化系统智能联动控制等)，同时鼓励科研机构与企业合作，丰富标准化案例研究，为全国重点产业园区污水处理厂减污降碳提供理论支撑与实践指引，推动中国污水处理行业实现绿色低碳高质量发展。

参考文献

[1] 中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[EB/OL]. [2026-04-28]. https://www.gov.cn/zhengce/202203/content_3635518.htm.

[2] 2030年前碳达峰行动方案[EB/OL]. [2026-04-28]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.

[3] 生态环境部，国家发展改革委，工业和信息化部，等. 减污降碳协同增效实施方案[EB/OL]. [2026-04-28]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-06/17/content_5696364.htm.

[4] 工业和信息化部，国家发展改革委，科技部，等. 关于“十四五”推动石化化工行业高质量发展的指导意见[EB/OL]. [2026-04-28]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-04/08/content_5683972.htm.

[5] 陈吕军. 做好碳达峰碳中和工作，工业园区必须做出贡献[N]. 中国环境报，2021-03-10(003).

[6] 生态环境部. 2023年中国生态环境统计年报[R]. 北京：生态环境部，2024.

[7] TIAN M，CHANG J，DING J，et al. Impact of coexisting components on the catalytic ozonation of emerging contaminants in wastewater[J]. Separation and Purication Technology，2025，362：131847.

[8] 王金南，阮梓纹，蔡博峰. 中国零碳园区建设内涵及其实现路径和战略研究[J]. 中国环境管理，2025(5)：8-15.

[9] PAN J，NIU X，YANG H，et al. Pilot test of Mn-Fe/Al_2O_3 catalytic ozonation in tertiary wastewater treatment[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering，2024，12：111937.

[10] HAN S，WANG W，XU Z，et al. Research and perspective of heterogeneous catalytic oxidation by ozone in

the removal of pollutants from industrial wastewater: a review[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2025, 147: 20-38.

[11] SHAO Q, YI Y, LI C, et al. Chen. Study on low-carbon electricity consumption strategy for photovoltaic power generation wastewater plant based on convolutional neural network[J]. Renewable Energy, 2025, 253: 123590.

[12] MO W, ZHANG Q. Can municipal wastewater treatment systems be carbon neutral?[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 112: 360-367.

[13] YU X, WANG L, HU W, et al. Low-carbon transition of phosphorus chemical industrial parks: a global systematic review[J]. Global Environmental Change, 2026, 96: 103080.

[14] MASSARD G, LEUENBERGE H, DONG T D. Standards requirements and a roadmap for developing eco-industrial parks in Vietnam[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 188: 80-91.

[15] 易佳敏, 王金龙, 杨伶. 重污染企业技术创新与减污降碳耦合协调研究[J]. 科技和产业, 2024, 24(6): 132-139.

[16] 王花, 范丽佳, 苏斌, 等. "双碳"背景下分布式光伏运营模式分析[J]. 科技和产业, 2024, 24(5): 187-191.

[17] 生态环境部. 2023 年中国生态环境统计年报[R]. 北京: 生态环境部, 2024.

[18] 秦志凯, 付丽亚, 李敏, 等. 焙烧再生废旧臭氧催化剂处理石化废水生化出水[J]. 环境科学研究, 2023, 36(4): 724-733.

[19] 尹宝河, 常淑斌, 战树岩, 等. Ce-Co-Fe/Al_2O_3催化剂污染与再生机理研究[J/OL]. 工业水处理, 1-21[2026-04-30]. https://doi.org/10.19965/j.cnki.iwt.2025-0701.

Standardized Case Study on Pollution Reduction and Carbon Mitigation in Key Industrial Parks: A Case Study of a Wastewater Treatment Plant in a Provincial Key Chemical Industrial Park

PAN Jian[1,2], ZHANG Yibin[1], QIU Dan[3], ZHENG Xing[4], CHEN Dongmei[5]

(1. Environmental Technology Innovation Center of Jiande, Hangzhou 311607, China; 2. Hangzhou Bertzer Catalyst Co., Ltd., Hangzhou 311607, China; 3. Jiande Sanjiang Ecological Management Co., Ltd., Hangzhou 311604, China; 4. School of Environment and Natural Resources, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China; 5. King Abdullah Petroleum Studies and Research Center, Riyadh 11672, Saudi Arabia)

Abstract: As a critical unit for end-of-pipe treatment and low-carbon transition in key chemical industrial parks, the pollution reduction and carbon mitigation performance of the park's wastewater treatment plant (WWTP) directly determines the level of green development of the park. In view of the lack of systematic synthesis and pattern extraction of standardized cases of pollution reduction and carbon mitigation at the park level in existing research, taking the WWTP of a key chemical industrial park in a province of eastern China as the research object, an analytical framework of "technology coupling-process standardization-benefit synergy-promotion and adaptation" was constructed. The existing pollution reduction and carbon mitigation technical measures and performances of coupling photovoltaic technology with water treatment technology were systematically reviewed, the collaborative system of "energy supply-pollutant degradation-carbon mitigation" was analyzed. Improvement suggestions are proposed to address issues such as high disposal costs of used catalysts, insufficient utilization of green electricity and low water reuse rates. Finally, three-tier policy implications at the park, industry and national levels are derived. The research aims to fill the gap in the summary of standardized cases of pollution reduction and carbon mitigation in WWTPs of chemical parks, provide practical reference and theoretical support for similar chemical and energy industrial parks in China to facilitate the green and low-carbon transformation of parks as well as the steady achievement of the "dual carbon" goals.

Keywords: provincial key chemical industrial park; wastewater treatment plant; catalytic oxidation; pollution reduction and carbon mitigation; standardized case