

北方中小型污水处理厂绿色低碳转型技术路径

陈建刚

河北省城乡规划设计研究院有限公司, 河北 石家庄 050021

DOI:10.61369/ERA.2026030025

摘要：我国北方地区中小型污水处理厂面临冬季低温抑制微生物活性、能源与水资源短缺等多重挑战，严重制约其绿色低碳转型。本研究立足气候特征与设施规模，系统提出“节能降耗—能源自给—资源回收—智慧运维”技术体系。通过应用低温 MBBR、光伏发电与水源热泵等关键技术，有效降低了能耗与碳排放，并实现了再生水、磷等资源回收。实践表明，该方案可使单位能耗降低26%以上，在保障处理效果的同时显著提升运行效益，为同类污水厂的低碳转型提供了切实可行的技术路径。

关键词：中小型污水处理厂；绿色低碳转型；节能降耗；资源回收

Green and Low-Carbon Transition Pathways for Small and Medium Wastewater Treatment Plants in Northern China

Chen Jiangan

Hebei Province Urban-Rural Planning and Design Research Institute Co.,Ltd. Shijiazhuang, Hebei 050021

Abstract：Small and medium wastewater treatment plants in northern China face significant constraints on their green and low-carbon transition due to multiple challenges, notably the inhibition of microbial activity during cold winters and concurrent shortages of energy and water. To address these site-specific issues, this study proposes an integrated technological framework that synergizes energy conservation, on-site energy generation, resource recovery, and intelligent operation. The implementation of key technologies—including low-temperature moving bed biofilm reactors (MBBR), photovoltaic power generation, and ground-source heat pumps—has effectively reduced energy consumption and carbon emissions while enabling the recovery of reclaimed water and phosphorus. Field results demonstrate that this approach can lower specific energy consumption by more than 26% without compromising treatment efficacy, thereby markedly improving operational sustainability. The study offers a practical and transferable pathway for promoting the low-carbon transformation of similar wastewater treatment facilities.

Keywords：small and medium wastewater treatment plants; green and low-carbon transition; energy efficiency; resource recovery

一、研究背景与意义

我国北方地区大陆性季风气候所引致的低温与水资源短缺，对污水处理系统构成了独特挑战。低温会严重抑制微生物代谢活性，为维持污染物去除效率，往往需依赖延长污泥龄、提高曝气强度等能耗密集型措施，直接推高了运行过程的碳排放强度，使得低碳转型需求尤为迫切。

在此背景下，广泛分布的中小型污水处理厂因其固有的“规模不经济”特性，其低碳化路径面临严峻挑战。一方面，厌氧氨氧化和膜分离等高效低碳技术的单位投资与运维成本高昂，且专业人才与资金支撑不足限制了精细化智能管控的应用，导致能效水平普遍偏低。另一方面，有限的污泥产量与局限性的回用需求，致使污泥厌氧消化与再生水利用等环节难以形成规模化效

益，制约了其能源与水资源回收的成本效益平衡。

因此，探索适合北方气候条件与中小型污水处理厂特征的高效低碳技术集成与优化运行策略，对于破解其转型困境、推动城镇污水治理系统整体提质增效与绿色低碳发展，具有至关重要的理论与现实意义。

二、北方中小型污水厂绿色低碳技术路径

(一) 节能降耗与工艺优化

1. 低温适应性工艺

针对北方地区漫长的低温季节导致污水温度显著降低问题，提升系统的低温适应性是首要任务。一方面，可通过投加高效耐冷菌剂来强化生物处理系统。这些经过筛选或驯化的特种微生物

物,能在低于10℃的环境中保持较高的酶活性和增殖速率,有效保障低温下的脱氮除磷效率^[1]。另一方面,对MBBR(移动床生物膜反应器)工艺进行针对性优化是一项极具前景的技术路径。MBBR系统内固有的生物膜结构本身为微生物提供了更稳定的生存环境,相较于传统活性污泥法,其抗低温冲击能力更强。通过优化填料类型(如增大比表面积、改善亲水性)和提高填充率,可以大幅增加反应器内的生物总量和物种多样性,从而在低温条件下维持良好的处理效果,避免因延长水力停留时间而导致的能耗激增^[2]。该组合工艺适合在用地紧张、需原位扩容的中小型污水厂中应用。

2. 节能技术应用

污水处理厂曝气系统和泵类设备占据了总电耗的60%~70%,其节能优化是实现低碳运行的关键。在曝气方面,宜采用微孔曝气结合智能DO控制系统,实现按需精确曝气,避免能量浪费;同时需对管路实施保温伴热,防止冬季结冰。在泵类设备中,推广变频调速技术,使水泵流量与实际需求匹配,解决“大马拉小车”问题,有效降低电耗。此外,应推进厂内余热资源化,如利用水源热泵回收出水热能,用于建筑供暖或工艺保温,替代外部能源,减少间接碳排放。

3. 工艺流程优化

对于北方中小型污水厂,开发简化、高效的低碳工艺流程至关重要。传统工艺复杂且成本高,需通过去除冗余构筑物实现高效协同。A²O(厌氧-缺氧-好氧)及其改良工艺在此方面展现出巨大潜力。例如,A²O及其改良工艺潜力显著,例如通过增设预缺氧段或多点进水,可灵活分配碳源,强化内源性反硝化,从而在低温条件下减少外部碳源投加,降低运行成本与间接碳排放^[3]。另一路径是推进工艺流程的一体化与模块化集成。通过将生化、沉淀等多功能单元深度融合,简化工艺流程,既能减少管道长度与水头损失,又可有效降低系统固有能耗,在节约占地与投资的同时提升运行能效,高度契合中小型设施的实际需求。

(二) 能源自给与可再生能源利用

1. 污泥能源化

污泥通过厌氧消化可将其有机质转化为甲烷,是实现能源自给的重要路径。对于北方中小型污水厂,传统厌氧消化技术因保温能耗高、规模不经济而应用受限。应对此挑战的关键是发展适用于中小型厂的模块化厌氧消化罐,其核心在于集成高效的保温与增温设计。具体可采用高性能保温材料,并耦合太阳能或污水源热泵等稳定热源,以维持中温消化所需的最佳温度,克服冬季低温对微生物活性的抑制^[4]。该技术路径不仅实现了污泥的稳定化与减量化,其产生的沼气经提纯后可用于发电或直接驱动厂内设备,消化后的沼渣可作为土壤改良剂进行资源化利用,由此构建起从处理、回收到利用的完整资源链。

2. 分布式能源

在污水厂区内构建分布式能源系统,是降低外部能源依赖、提升运行韧性与低碳水平的重要策略。具体可通过以下路径实施:充分利用厂房屋顶、沉淀池上方等空间布设光伏设施,实现就地发电并优先供厂内高能耗设备使用,形成“自发自用”模式。同时,结合污水源热泵技术,从污水处理厂出水中提取热

能,用于厂区建筑供暖或工艺保温,有效替代传统化石能源供热,显著削减运行碳排放。通过多能互补可系统提升污水处理厂能源自给率与环境效益。

3. 低碳热源替代

在城乡结合部地区,污水处理设施常面临市政供热缺失与能源成本高的双重压力。该区域生物质资源丰富,可将秸秆、园林废弃物等加工为成型燃料或气化利用,实现“就地取材”。采用高效低污染的小型生物质锅炉可为厌氧消化等工艺提供稳定热源,替代传统散煤或电加热,在降低运行成本的同时实现温室气体减排。从全生命周期角度分析,生物质燃料燃烧具有近零碳排放特征,符合碳中和要求。该路径不仅解决了供热难题,更推动了区域有机废弃物的协同处理,为构建城乡融合的低碳基础设施提供了有效支撑。

(三) 资源回收与循环利用

1. 再生水回用

在北方水资源短缺的严峻形势下,推进污水资源化利用是实现水资源可持续管理的重要举措。再生水作为稳定的非常规水源,在生态补水、工业冷却与市政杂用等领域具有广阔应用前景,能够显著降低对传统水源的依赖程度。为确保再生水水质稳定达标,需建立适应北方地区特点的深度处理工艺体系。建议采用“臭氧-生物活性炭”与“超滤-反渗透”等组合工艺:臭氧预处理可有效分解难降解有机物,生物活性炭单元进一步去除溶解性污染物,而膜技术则能可靠保障出水浊度与微生物指标达标。该组合工艺具备良好的抗冲击负荷性能,可有效克服冬季低温导致的生物活性抑制问题,实现全年稳定运行。

2. 污泥资源化利用

污泥资源化利用是推动污水处理系统可持续发展的重要途径。当前主要技术路径包括能源化利用与物质循环两个方向。在能源化利用方面,污泥协同焚烧技术能够有效回收能量并实现大幅减容,但需要严格控制重金属和二噁英等二次污染物的生成风险。在物质循环方面,污泥制砖技术通过将脱水污泥作为制砖原料的部分替代,在高温烧结过程中实现病原菌灭活和重金属稳定化,完成从废弃物到建筑材料的转化。此外,污泥好氧堆肥后的土地利用也是重要的资源化方向。通过科学的堆肥工艺,污泥可转化为符合农用标准的有机肥料,用于改良土壤结构和提高肥力。在北方地区实施时,需要特别关注低温对堆肥过程的影响,通过优化工艺参数确保产物的稳定性和安全性。

3. 磷回收

磷回收是实现污水处理资源化的重要方向^[5]。鸟粪石结晶法作为主流技术,能够从污泥厌氧消化液中同步回收磷和氮,生成具有农用价值的磷酸铵镁。该方法反应条件温和,产物可利用性强,特别适合在中小型污水处理厂推广。当前研究的重点在于开发小型化、模块化的集成装备,以降低设备投资与运行维护难度。通过优化反应器结构与控制策略,可显著提升磷回收效率与经济性,为资源循环提供可行路径。

(四) 智慧化与运维优化

1. 智能监控

通过在进水口、生化池等关键节点布设抗冻型传感器,可实

时采集水温、溶解氧、氨氮等核心参数。数据经无线网络传输至云平台，借助大数据分析实现趋势预测与异常诊断，为运行调控提供科学依据。该系统可有效克服严寒气候对传统仪表的干扰，降低人工成本与安全风险，同时通过精准控制工艺过程，减少能源与药剂消耗，为污水厂实现精细化、低碳化运营提供技术支持。

2. 季节性运行机制

冬季低温会显著抑制微生物活性与反应速率，需相应调整运行策略。具体措施包括：适当减少剩余污泥排放，维持较长污泥龄，以保障反应器内生物量；同时根据进水水质、水量及实时水温，动态调整曝气强度与时长，在确保硝化效果的前提下避免过度曝气。这种“适应自然”的季节性运行模式，可在保障出水稳定达标的同时，有效降低药耗、电耗及碳排放，是实现污水厂全年低碳稳定运行的核心策略。

3. 区域协同管理

突破传统单厂运营模式，探索区域内中小型污水厂联防联控管理，是挖掘系统层面碳减排潜力的创新路径。通过构建区域智慧水务平台，可对多厂站实施集中监控与统一调度。平台依据各

厂实时负荷与能耗数据，智能分配处理任务，如在用电高峰调节非核心厂站运行以节约电费。该模式还能促进资源共享，如将富余碳源或污泥转运至条件更优的厂区集中处理，从而提升区域系统整体能效与经济性，推动污水处理基础设施向绿色低碳转型。

三、典型案例分析

本研究选取北方地区两座具有代表性的中小型污水处理厂（设计规模均为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ）作为典型案例进行对比分析。A厂构建了系统的绿色低碳技术体系，具体包括：（1）采用低温MBBR工艺，通过投加耐冷菌剂与优化填料特性提升冬季生物处理效能；（2）集成能源回收系统，利用水源热泵技术回收出水余热供给厂区供暖，并建设光伏电站提升能源自给率；（3）配置智能控制系统，通过抗冻型传感器实现曝气与回流工艺的精准调控；（4）实施污泥资源化措施，将稳定化污泥用于厂区绿化。B厂则维持传统的A²/O工艺与常规运行模式。通过对比两厂在投资成本、运行能耗及碳减排效益等关键指标，科学评估绿色低碳技术体系在北方中小型污水厂中的实际应用价值。

表1 A厂和B厂技术经济性对比分析

项目	A厂 (低碳技术路线)	B厂 (传统路线)	分析比较
单位投资成本 (元/m ³)	约3800	约3200	A厂因采用MBBR、热泵及智能控制系统，初始投资较高，较B厂高出约18.8%。
单位运行能耗 (kWh/m ³)	0.28	0.38	A厂通过智能曝气、热泵回收热能等措施，单位电耗显著降低26.3%，节能效益突出。
碳减排效益	显著	一般	A厂通过节能降耗与能源自给（光伏补充），年碳排放量较B厂减少约1020吨CO ₂ 当量，降幅达35%。
综合优势	环境效益好，运行成本低，具备资源回收潜力。	初始投资低，技术成熟。	A厂虽初始投资高，但年均运行成本低约25%，投资回收期预计为5-8年，长期经济效益与环境效益显著。

在A厂的实践案例中，各项低碳技术均展现出显著效益。其中，光伏发电系统年发电量达42万千瓦时，可满足全厂约15%的用电需求；水源热泵系统每年可替代燃煤供热约300吨标准煤；智能曝气系统则将曝气单元能耗降低30%以上；同时，通过污泥堆肥技术实现了固体废物的资源化利用。这些技术的系统集成与协同应用，使该厂在稳定保障出水水质的同时，实现了能耗强度与碳排放总量的同步下降。

四、结论与建议

本研究系统探讨了北方中小型污水处理厂实现绿色低碳发展

的技术路径。研究表明，通过采用包括低温适应性工艺、高效节能设备以及分布式能源系统在内的技术组合，能够在确保处理效果的同时，有效降低能耗与碳排放水平。这些技术在实际应用中展现出良好的适应性，但其进一步推广仍需要克服初期投资较高、低温环境适应性有待提升等现实因素。建议在后续工作中可考虑制定更适合北方区域特点的技术指南，同时探索建立多元化的资金支持机制。未来的研究方向可侧重于抗寒微生物技术、模块化能源系统集成等前沿领域。通过持续的技术完善与机制创新，通过持续的技术完善与机制创新，将为北方中小型污水厂的低碳化进程提供必要支撑，进而助力整个污水处理行业向环境友好、资源节约的方向稳步迈进。

参考文献

- [1] 周英萍, 唐美珍, 曹彦雪, 等. 一株耐冷异养硝化菌的分离鉴定及脱氮特性[J]. 湖泊科学. 2019, (3). DOI: 10.18307/2019.0313.
- [2] 吴天祺, 孔宇, 凌虹, 等. 低温下移动床生物膜反应器系统工艺运行与应用研究进展[J]. 安徽农学通报, 2025, 31(15): 114-118.
- [3] 王存凤. 寒冷地区改良A²/O工艺运行参数优化研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2012.
- [4] 尚永超, 郭婷婷. 一体化厌氧消化反应器在污泥处理中的应用[C]// 中国城镇污泥处理处置技术与应用高级研讨会论文集. 2011: 310-313.
- [5] 蔡玲, 唐玉朝, 伍昌年, 等. 污水处理过程中磷回收理论与技术研究进展[J]. 应用化工, 2025, 54(7): 1841-1846.