碳中和目标下城市污水处理低碳转型策略

冯芷璇

（吉林建筑科技学院，吉林 长春 130114）

摘 要 城市污水处理行业是温室气体的重要排放源，同时具有较强的能源与资源回收利用潜力。在碳中和目标指引下推动行业低碳化发展，对助力“双碳”目标落地、支撑城市绿色低碳转型具有重要现实意义。本文对污水处理系统中直接或间接的碳排放进行归纳分析，就节能降耗、能源利用、资源回收、工艺改良四个方面提出相应解决办法。根据研究结论，将精确曝气、厌氧氨氧化、好氧颗粒体、膜法厌氧工艺等加以结合，辅以碳核算及厂网河整体调控，污水厂可望由传统“能耗型”类设施变为“能源工厂”和“资源枢纽”。而转型过程中应注意避免水质恶化、操作风险或成本过高这类问题，未来要着力开发新材料、设计智能方案及高值产品。

关键词 碳中和；城市污水处理；低碳转型；能源回收；厌氧氨氧化

基金项目：吉林省教育厅重点项目“寒区地源热泵水侧生物污垢的群体感应调控技术研究”（项目编号：JJKH20261934KJ）。

中图分类号：X703；TU992 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.021

0 引言

当前，我国气候治理工作持续推进，已明确提出2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和的战略目标，整体已进入低碳转型的关键攻坚阶段。城市污水厂是市政水环境治理中的关键设施，污水厂运行过程中的温室气体排放不容忽视。已有研究测算，污水处理行业碳排放量占总碳排放量的 7% ～ 8%，且随着处理率提高、排放标准趋严，这部分排放还在逐年上升[1]。但从另一视角下，污水里的有机物化学能和氮磷资源本身也可以回收利用，通过技术更迭，污水厂也能从“排碳大户”变成碳中和的贡献者。近年来，我国科研工作者围绕生物脱氮、功能材料、低碳工艺的研究层出不穷，但鲜有从全系统、全流程谈及污水厂的低碳转型策。基于此，本文分析污水厂的碳排放构成，整理主要低碳技术路径，指出落地中的难点与对策，为该行业技术升级和政策制定提供参考。

1 城市污水处理碳排放特征与核算体系

污水厂的碳排放并非常态性的处理阶段产物，而是收集、处理乃至污泥利用全过程的总和。就来源而言，一般可将所排碳划为直接型或间接型两类，二者在组成上差异显著。

直接排放主要来自生物处理过程中有机物的分解转化，涉及二氧化碳（CO_2）、甲烷（CH_4）和氧化亚氮（N_2O）。CH_4 和 N_2O 的绝对排放量虽然不及 CO_2 排放总量，但在百年尺度上，它们的增温潜势分别是 CO_2 的 28 倍和 265 倍，也正因如此，它们一直是污水厂减排管控里的主要靶标[2]；间接排放则主要是系统运行带出来的衍生排放。比如设备运转消耗的电和热，其背后对应上游化石能源燃烧后的排放；水处理用药剂、耗材，从生产、运输到废弃整个链条，都会释放二氧化碳。聚焦国内形势，污水厂普遍以传统活性污泥法为主，曝气环节耗电严重，间接排放常常占到总排放的 60% 以上，是行业最主要的排放来源[3]。

对于碳核算而言，目前常用的办法主要有三种：排放因子法、质量平衡法和现场实测法。在实际工程中，三种方式联用的核算体系逐渐成熟，是覆盖直接排放、间接排放和碳汇抵消的综合核算体系。最终，核算结果的精确度与进出水污染物浓度、污泥产量、曝气量、药耗以及当地电力结构相关。因此，建立标准化的数据采集、审核和质量控制，是科学制定低碳转型方案的前提。

2 城市污水处理低碳转型核心技术路径

2.1 节能降耗与智能控制技术

曝气环节是污水厂中的“用电大户”，电耗通常占全厂总电耗的 50% ～ 70%，成为节能改造的核心靶点。依托设备升级和智能调控双重维度，可在曝气环节实现精准节能：一方面更换高效节能曝气设备，把水泵、

作者简介：冯芷璇（1997-），女，硕士研究生，助教，研究方向：资源与环境。

污泥回流泵改为变频，替换高效电机，从硬件上降低设备的电耗；另一方面，加强溶解氧和氨氮的联合控制，根据进水水质、水量的实时波动调节曝气量，一般能够实现节电20%～30%，无效电耗大大减少。在工艺上，短程硝化反硝化、厌氧氨氧化这类自养脱氮低碳工艺，本身曝气需求小，无需额外投加有机碳源，能耗药耗可从源头降低。例如：借助功能载体材料把厌氧氨氧化功能菌群富集起来、维持其活性，反应器抗水质水量冲击的能力就能明显提高，这也是破解这项技术工程化稳定性不足、能大规模推广的关键[4]。

近年来，智慧水务在全球领航，城市污水处理的方式实现大规模转型，从以往传统方式转向通过大数据及机器学习的方式调节运行参数。采集水质、水量、溶解氧、氨氮等核心运行数据，进一步结合机理模型和数据驱动模型，便可对加药量、曝气量、污泥回流比这些关键参数进行优化和调整，提供了较为完整的数据链条。

2.2 能源回收：推动污水厂从耗能主体向产能主体转变

污水中有机物蕴含的化学能，理论上可达处理全过程能耗的3倍～5倍，具备能源自给的开发潜力[5]。目前成熟度较高、应用前景较广的能源回收路径主要有三类：污泥厌氧消化产沼气、污水源热泵供热制冷、微生物燃料电池产电。在这三类中，污泥厌氧消化是现阶段应用最广的产能技术。该技术可以通过中温或高温厌氧消化将污泥中的有机物转化为甲烷沼气，转化后的产物可用于厂区发电与供热，实现能源的就地利用。该应用在北欧部分污水处理厂已实现了能量盈余，丹麦某厂采用“厌氧消化+热电联产”系统，能源自给率超过150%[6]。我国国内大型污水处理厂虽已逐步推广该工艺，但因为受到污泥有机质含量偏低、消化效率不高、配套不完善等约束条件，整体能源回收率仍有很大的提升空间。但这项技术给我们提供了可行性的思路，未来可通过污泥预处理强化、多物料共消化与高效搅拌优化等方式，来提高沼气产气率与能源转化效率。此外，污泥脱水液中高浓度氮磷的处理也会增加能耗，需将污泥处理与污水处理作为整体进行协同优化。

污水源热泵利用污水水温全年相对稳定的特点提取冷热能量，可为厂区办公区、污泥消化池等设施供暖制冷，显著降低外部电、热消耗，能效比优于传统热泵系统。微生物燃料电池在降解有机物的同时可直接产电，虽目前功率密度较低、尚未工程化，但作为前沿产能技术仍具研发价值。此外，污泥热解气化、藻类培养产油等途径目前仍处于试验阶段。部分大型污水厂已尝试将沼气提纯后并入天然气管网或作为车用燃料，进一步拓展了能源产品的利用途径。

2.3 资源循环：氮磷回收与再生水高值化利用

污水里的氮、磷，一方面是水体富营养化的主要原因，另一方面又是紧缺的战略资源。以磷为例，全球磷矿储量有限、分布又不均匀，从污水中把磷高效回收出来，既有环境效益，也关乎资源安全[7]。目前工程上常用的是鸟粪石结晶法和磷酸钙沉淀法，能把磷加工成符合农用标准的缓释磷肥；氮则可通过气提制成硫酸铵，或经膜浓缩做成液态有机肥——污染物便能变成可用的资源。在实际应用中，回收产品还需满足农用标准，严格把控重金属与持久性有机污染物含量；而功能材料的吸附与催化作用，对于氮磷回收效率的提升、产品品质的改善也有显著影响。目前，我国城市污水进水碳氮比偏低，传统生物脱氮常常需要添加额外碳源，既增加药耗也间接增加碳排放；若可将氮磷回收与生物脱氮工艺耦合起来，可在减少外加碳源的同时，实现资源回收，真正实现能源的高效利用。再生水利用是资源循环的另一重要路径。采用达标尾水用于城市绿化、工业冷却、地下水回补及市政杂用，可替代新鲜水、缓解供水压力，并降低供排水系统能耗。因此，在未来，构建“污水—能源—农业—城市”的耦合体系，推动资源化由单技术应用走向系统化、集成化，是完成资源循环的重要路径。

2.4 工艺创新：新型低碳生物处理工艺研发与应用

传统活性污泥法以较高能耗与药耗保障出水水质，已较难适配碳中和发展要求，工艺原理革新是低碳转型的核心突破口。目前行业主要推广对象是好氧颗粒污泥以及厌氧膜生物反应器、厌氧氨氧化工艺[8]。

好氧颗粒污泥按结构来说是致密体，沉降效率高、能同时去除氮和磷，所占面积小、能耗也较低，处理流程可简化[9]。厌氧膜生物反应器以厌氧方式处理污水，把有机成分变作沼气，又达到清洁、发电及减泥三重目的[10]。厌氧氨氧化不依赖额外的有机碳源，可使曝气能耗减少近60%，对城市污水是可行的自养脱氮法。从长远看，应结合好氧颗粒污泥、AnMBR和厌氧氨氧化加以智能调控，形成由节能至产能、最后到资源利用的三位一体低碳处理方案。现在好氧颗粒污泥已做了一些市政污水中试，AnMBR对低温低浓度污水的适应性也逐渐被验证。

3 低碳转型的政策机制与系统协同保障

从整体角度说，有关低碳技术的开发及利用已经很紧迫，但要实现其大规模运用仍需政策、市场和系统配合。

首要的准备工作是统一核算方法，按行业要求来设计碳核算所依据的标准及方法学，将直接、间接乃至替代性的减排都纳入监测—报告—核查（MRV）范围，使核算有共同的参照点，由此获得对交易、对项目、对成效进行分析的数据资源。现在应把市场化激励机制的完善当作重点来抓。对已达到标准的低碳改造宜作碳交易处理，同时辅以补贴或税收上的便利，把能量自持、资源回收效率高的项目列入政策扶持范围。不过不能只依赖经济手段来调动减排积极性，核心是改变目前按单厂划分改造任务的习惯：采用厂网河整体思路，统一安排泵站、调蓄池及污水流程诸项技术细节，使各环节配合良好、不因厂内节支而系统多耗能，真正实现区域低耗、总体碳排减少的效果。

此外，有关市政、生态环境、能源及农业的各部门要做好协同安排，要促进跨部门合作与社会共治。同时需制定更明确的沼气或再生水、氮磷类有机肥使用标准；从资源利用的角度来说，应对再生水、污泥、磷回收物制定相应标准。另外，应以绿色债券、碳金融手段等新思路来推动绿色融资，使低碳改造所涉资金获得较优、较易取得的成本保障。

4 城市污水处理低碳转型的挑战与应对对策

现阶段，我国的低碳技术路线基本是可行的，实际困难多属于工程类问题，而经济性是最直接的障碍。采用厌氧氨氧化或 AnMBR 工艺前期投资成本较大，对中小型污水处理厂来说，单靠资金自筹不能很好地解决升级难题，很多好技术因而未被广泛采用。但如把合同能源管理、环境绩效合同这类方法引进来，又让社会力量承担部分投资、部分运营责任，便可在不使厂方立即负担重增的情况下达成成本分担、风险缓解的目标，由此为中小厂转型找到可行方案。其次，有关资源化产品安全及相应标准的论述应视为一体。资源化所涉的污染残留、出水水质、产品合格率诸项风险都应考虑，而在线监测（针对出水、再生水、肥料及碳基物）和生物毒性预报是应对这类问题的必要手段。当再生水被用作生态或景观用水时，必须对病原体及微量污染物在长时期内的累积做较充分的分析与预测。目前，有关再生水回用、氮磷材料、污泥碳基物的标准体系尚未统一，市场接纳因而有其限制。所以有必要把制定标准、认证办法及应用说明提上议事日程，界定质量限值、使用条件与检测方式，使市场获得通路。此外，有关运维能力滞后的事实也应予以重视。按现在的情况看，各类智能控制及新式调控方法使运行维护变得更为复杂，知识缺口尚存。以数字孪生技术来应对这种困难是可行的思路，它能做远端分析、自动调节或早期告警，不必完全依靠现场实践，因而有助于培养、造就素质优良、分工明确的运维类工作人员。

5 结束语

从碳中和思路来看，现有城市污水处理体系正经历改造或优化。污水厂要完成的任务已不只限于水质达标，其技术及方法趋向低碳循环、资源回收的方向。厌氧氨氧化、好氧颗粒污泥、智能调控、膜处理诸项技术若能成熟地配合使用，能量自持、资源循环、低排放状态在将来是可望现实的。低碳转型不是对某类工艺作简单更新，而是有关材料、流程、制度及管理的整体设计。要使技术、市场、标准三者协调运作，兼顾运行安全与水体质量，促成全链条低碳发展，推动“双碳”目标实现。

参考文献：

[1] 雷久鸣 . 全球碳排放变化趋势研究及对中国环境管理制度的启示 [J]. 环境科学与管理 ,2026,51(02):27-31.

[2] 陶璇,操家顺,周亮,等 . 小型城镇污水处理厂温室气体排放特征研究 [J]. 环境工程 ,2026,44(09):202-213.

[3] 蒙小俊,葛光环,蒙欣 .“双碳”背景下城市污水低碳处理技术与资源化利用分析 [J]. 工业水处理 ,2026,46(03):33-46.

[4] 李怡珊,王慧倩 . 简述生活污水短程硝化厌氧氨氧化工艺的快速启动与稳定维持机制 [J]. 皮革制作与环保科技,2026,07(12):13-15.

[5] 杨媛,邓伟航,胡以松,等 . 碳捕获 - 厌氧消化耦合技术回收城市污水能源研究进展 [J]. 环境工程 ,2023,41(05):213-221.

[6] 于文豪,路冬雪,刘亚青,等 . 温度对纤维素厌氧消化产甲烷性能与微生物群落演替的驱动作用 [J/OL]. 生态学杂志 ,1-15[2026-09-18][2026-09-21].https://link.cnki.net/urlid/21.1148.q.20260916.1326.002.

[7] 张荣新,刘祎,傅金祥,等 . 鸟粪石沉淀法处理高浓度氮磷废水研究进展 [J]. 环境污染与防治 ,2024,46(08):1175-1183.

[8] 赵孟雷 . 双碳背景下城镇污水处理厂处理技术分析与展望 [J]. 广州化工 ,2026,54(02):23-25,141.

[9] 王香莲,贾春芳,马林,等 . 好氧颗粒污泥技术在小处理规模下的适用性研究：以农村分散式污水处理为例 [J/OL]. 环境工程学报 ,1-12[2026-09-15][2026-09-21].https://link.cnki.net/urlid/11.5591.x.20260915.1042.003.

[10] 索联锋,胡星,王泽天 . 厌氧动态膜生物反应器对污水厂尾水脱氮性能研究 [J]. 工业用水与废水 ,2026,57(04):70-76.