

DOI:10.11918/202510020

# 城市水系统碳足迹管控研究进展

梁恒, 马子欣, 徐达梁

(城乡水资源与水环境全国重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090)

**摘要:**“双碳”目标背景下,城市水系统因其高能耗、高药耗、高碳排特征,成为碳足迹管控的重点领域,亟需探索低碳发展路径和可持续运维方案。为此,本研究聚焦饮用水厂、污水处理厂以及供排水管网等关键基础设施,梳理了城市水系统碳足迹的来源、特征和形成机制,总结了饮用水生产、污水处理以及供排水输送各环节碳减排的核心思路与可行策略。饮用水厂应从材料研发、工艺优化、智能管控及清洁能源替代等角度出发,重点控制其运行能耗及化学品用量;污水处理厂除以上措施外还需额外建设能源回收与资源利用模块,充分保障碳补偿策略的实施;供排水管网应以科学规划和布局为核心,源头水量削减、管道定期检修和动态压力调控为辅助,对输配水泵组能耗进行控制。最后,提出了协同推进碳足迹管控的实施框架与建议,为城市水系统的低碳转型与可持续发展提供理论与技术支撑。

**关键词:**城市水系统;碳足迹;管控策略;可持续发展

**中图分类号:** X-1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0367-6234(2025)12-0107-13

## Research progress in carbon footprint management in urban water systems

LIANG Heng, MA Zixin, XU Daliang

(State Key Laboratory of Urban-rural Water Resource and Environment (Harbin Institute of Technology), Harbin 150090, China)

**Abstract:** Under the "dual-carbon" goals, urban water systems, characterized by substantial energy consumption, chemical dosage, and carbon emissions, have emerged as a critical field for carbon footprint management and control, urgently requiring the exploration of low-carbon development pathways and sustainable operation and maintenance strategies. This study focuses on the key infrastructures of urban water systems, including drinking water treatment plants, wastewater treatment plants, and water supply and drainage networks. The main sources, characteristics, and formation mechanisms of carbon footprints within urban water systems are systematically reviewed. The core approaches and feasible strategies for carbon mitigation across drinking water production, wastewater treatment, and water conveyance processes are summarized. Drinking water treatment plants should focus on controlling operational energy consumption and chemical consumption by advancing material development, optimizing treatment processes, implementing intelligent operation, and adopting clean energy alternatives. Wastewater treatment plants, in addition to these measures, are required to incorporate additional energy recovery and resource utilization modules, ensuring the implementation of carbon offset strategies. Water supply and drainage networks should be anchored in scientific planning and rational spatial layout, supplemented by source wastewater reduction, routine pipeline maintenance, and dynamic pressure regulation to limit pumping energy. In addition, an implementation framework and recommendations for coordinated carbon footprint management and control in urban water systems are proposed, providing theoretical and technical support for the low-carbon transition and sustainable development of urban water systems.

**Keywords:** urban water systems; carbon footprint; management strategy; sustainable development

2020年9月,习近平在第七十五届联合国大会上提出“双碳”目标,为中国应对气候变化危机和可持续发展指明了方向。2025年联合国气候变化峰会上,中国进一步宣布新一轮国家自主贡献目标,即到2035年实现全经济范围温室气体净排放量比峰值下降7%~10%,力争做得更好。在此背景下,碳减排成为全国性的重点任务之一,各行业均高度重

视低碳发展策略的制定与落实<sup>[1]</sup>。城市是人口和经济产业的主要聚集地,承载着高强度的人类活动,是二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、甲烷(CH<sub>4</sub>)和氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)等温室气体生成和排放的主要场所<sup>[2]</sup>。中国城市碳排放比重高达85%,且随着城市化进程,这一比重将进一步增长<sup>[3]</sup>。

城市水系统是支撑城市稳定运行的重要公共基

收稿日期: 2025-10-13; 录用日期: 2025-11-10; 网络首发日期: 2025-11-24

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20251124.0811.002>

基金项目: 国家自然科学基金(52341001)

作者简介: 梁恒(1979—),男,教授,博士生导师

通信作者: 梁恒, hitliangheng@163.com

基础设施,承担着饮用水生产、供排水输送、污水处理、雨水调蓄等多重功能<sup>[4]</sup>。其运行依赖大量的能源输入,具有典型的高碳排特征。据统计,城市水系统每年约消耗全球电力总量的 4%,占社会碳排放总量的 2%~4%<sup>[5]</sup>。随着社会经济的持续发展,城市居民对饮用水水质、水量的要求日趋提高,污水处理规模及排放标准也逐步升级,城市水系统碳排放量呈进一步增长趋势<sup>[6]</sup>。为推动中国城市水系统迈入系统性减污降碳的新阶段,国家发展和改革委员会、住房和城乡建设部及生态环境部于 2023 年 12 月联合印发《关于推进污水处理减污降碳协同增效的实施意见》,为行业低碳发展提供了政策指引。因此,亟需开展面向城市水系统的碳足迹管理与减控研究,对实现城市低碳化发展与“双碳”目标具有重要意义。

本文立足城市水系统现状,聚焦城市饮用水厂、污水处理厂及供排水管网等关键碳排放节点,系统梳理了碳足迹的来源、排放特征及形成机制,明确了当前城市水系统各环节碳减排的主要路径,基于系统性角度提出了碳足迹管控的实施框架与建议。

## 1 城市水系统及其碳足迹概况

### 1.1 城市水系统及其碳足迹的概念与边界

城市水系统是城市范围内与水相关的物质流、基础设施及人类活动构成的复合整体<sup>[7]</sup>。该系统

以水循环为基础、水设施为载体、水安全为目标、水管理为手段,对城市居民生活保障和经济社会发展发挥着重要作用。根据服务对象和核心功能的差异,城市水系统可划分为水源系统、给水系统、用水系统、排水系统、回用系统和雨水系统<sup>[8]</sup>。各子系统间相互联系、物质流交互频繁,共同构建起城市水循环网络,支撑城市的稳定运转。

城市水系统碳足迹是指城市水循环过程中所产生的各类温室气体排放总量,通常经全球变暖潜势(GWP)换算后,以二氧化碳当量为单位进行量化<sup>[9]</sup>。严格而言,饮用水生产、污水处理、供排水输送、再生水利用、雨洪管理以及污泥处置等环节产生的温室气体均属于城市水系统碳足迹范畴。实际核算中,考虑到水系统结构以及温室气体生成、转化与排放过程的复杂性,通常会对碳足迹进行简化,仅聚焦以饮用水生产、污水处理和供排水输送为代表的\*\*关键碳排放环节<sup>[10]</sup>。碳循环视角下,城市水系统兼具碳源与碳汇的双重属性,是调节城市物质与能量代谢、促进区域碳平衡的重要系统单元<sup>[11]</sup>。

### 1.2 城市水系统的关键碳排放环节

饮用水厂、污水处理厂和供排水管网是城市水系统中能源消耗或温室气体生成的主要场所,其碳排放呈现强度高、来源多样、结构复杂的特征,既包括能源、化学品消耗引发的间接排放,又涵盖污染物降解、迁移、转化过程中产生的直接排放(图 1)。

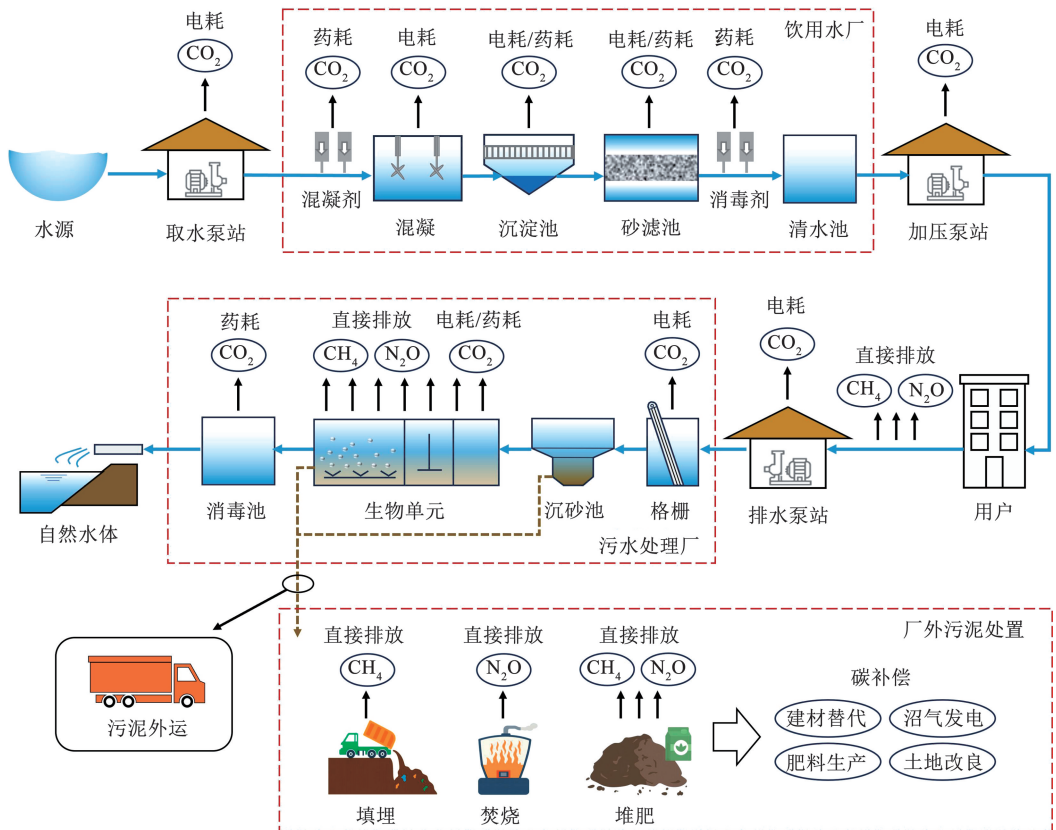


图 1 城市水系统的碳排放构成

Fig. 1 Carbon emission composition in urban water systems

饮用水厂内各处理单元在运行中高度依赖电力驱动,呈现典型能源密集型生产范式。同时,为保障水处理效果,水厂还需投加混凝剂、絮凝剂和消毒剂等化学药剂<sup>[12]</sup>。电力和化学品的消耗将以间接碳排放的形式计入饮用水厂,占饮用水厂总碳排放的90%以上。因此,当前针对饮用水厂的碳核算聚焦于电力与化学品相关的间接碳排放<sup>[13]</sup>。

污水处理厂的碳排放组成相对复杂,涉及厂内的污水处理、污泥处置以及厂外的电力和化学品生产过程<sup>[14]</sup>。目前,主流核算方法将污水处理厂碳排放划分为4个部分:1)污水处理过程中由污染物不完全降解而导致的 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 直接排放;2)工艺运行过程中电力和化学品消耗产生的间接碳排放;3)污泥处置产生的 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 直接排放;4)污泥资源化处置产生的碳补偿。其中,不完全硝化/反硝化产生的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放和与电力消耗相关的间接碳排放占据主导,占污水厂总碳排放量的88%~93%<sup>[15]</sup>。

供水管网连接着水源、饮用水厂、用户、污水处理厂以及受纳水体,具有输送路径长、排布复杂的特点。取水及输配水过程需要消耗大量电力来支持取水/加压泵组的运行,由此产生的间接碳排放是供水管网的主要碳排放源<sup>[16]</sup>。污水因组分复杂、污染物浓度高,易在排水管网的输送过程中发生生化反应,产生一定量的 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 并排入大气。中国排水管网 $\text{CH}_4$ 年排放量高达60~80 t,占排水系统总碳排放量的20%~37%<sup>[17]</sup>。相比之下, $\text{N}_2\text{O}$ 的排放量明显较低,且呈现多点源排放特征,对其总量的监测与核算难度较大,目前,尚未见定量研究的相关报道。

## 2 面向城市饮用水厂的碳减排路径

### 2.1 高性能净水材料与药剂研发

研发高性能净水材料和水处理药剂是控制饮用水厂碳排放的关键途径(图2(a))。通过表面涂覆、界面接枝及纳米材料掺杂等手段制备高通量、抗污染的新型膜材料,可有效降低膜单元运行能耗和清洗频率<sup>[18]</sup>。应用1,4-哌嗪二乙磺酸作为界面聚合反应的水相添加剂,实现了对单体扩散速率的精确调控,制备了具有高渗透性能和高亲水性的纳滤膜,与商业纳滤膜相比可降低产水能耗60%~90%,削减碳排放量约90%<sup>[19]</sup>。此外,基于壳聚糖、淀粉等天然高分子材料制备的绿色混凝剂可与传统金属混凝剂耦合使用,产生更强的混凝效果<sup>[20]</sup>。在以聚合氯化铝为核心的混凝体系中,添加低浓度壳聚糖(0.8 mg/L)可在保证出水水质的同时将药剂投加量由7 mg/L降至5 mg/L,与化学品消耗相关的间接碳排放下降约29%<sup>[21]</sup>。以材料和药剂升级为

核心的碳减排路径尤其适用于能源效率偏低的旧有水厂,有望在不产生额外土建成本的前提下有效控制碳排放。然而,新型净水材料与药剂的制备成本普遍较高,适用范围与存储条件相对苛刻,现有研究缺乏对其规模化应用效果、经济可行性与长期稳定性的系统验证,因而在实际工程中推广进程缓慢。

### 2.2 水源特征适配型工艺选择

随着社会经济的发展,城市居民对饮用水水质的要求不断升级,新建水厂/旧有水厂改造普遍趋向于增设深度处理工艺,通过延长工艺流程提升供水品质。膜技术具有高效分离、清洁绿色、模块化运维的优势,是当前主流的深度处理技术之一<sup>[22]</sup>。然而,大规模推广长流程工艺忽略了中国饮用水水源特征的空间差异性,可能在部分水厂中造成资源浪费与过高的碳排放<sup>[23]</sup>。如图2(b)所示,面向优质水源,可采用低压膜工艺直接过滤,如在村镇小型饮用水厂使用重力驱动型超滤技术,可节约90%以上的电力消耗<sup>[24]</sup>;面向季节性污染源,可将混凝、沉淀与超滤工艺耦合,通过调节混凝剂投量来应对水源水质的波动;对于水质较差或存在藻源污染的水源,可进一步在膜前引入臭氧活性炭工艺,实现污染物的梯度分离与去除<sup>[25]</sup>。从实施角度而言,饮用水厂设计阶段应充分考虑碳减排要求,统筹供水安全与低碳化发展趋势,科学选择净水工艺。然而,这一设计导向在现行规范体系下缺乏有力支撑,GB 50013—2018《室外给水设计标准》中与碳排放相关的条文尚待完善,亟需明确碳排放水平的定量约束条件与低碳化工艺设计的指导框架。

### 2.3 设备与药剂的智能优化控制

当前饮用水厂运行决策主要依赖工程经验,缺乏面向水质波动、环境条件变化等现实情况的动态调控。这种经验驱动的管理模式下,设备长期保持大功率运行,药剂也倾向于过量投加,不仅增加了与能源、化学品相关的碳排放,还将导致额外的设备损耗和生态风险<sup>[13]</sup>。研究表明,世界范围内超75%的饮用水厂存在能源效率低下的问题,平均吨水节能潜力达0.005 kWh<sup>[26]</sup>。如图2(c)所示,结合物联网、大数据及人工智能技术,可对泵组运行状态和药剂投加量进行动态调控,从而使泵组能耗降低6%~23%,并显著提升混凝剂、消毒剂等水处理药剂的净水效率(表1)。在饮用水厂中建设全流程智能控制系统,是从运行角度出发的碳足迹管理措施,其碳减排效益受到监测数据完整性、预测模型精度、优化算法适应性等因素影响。随着决策模型与智能算法的持续迭代,将进一步提升碳足迹管理能力。然而,实际工程中部分运行数据的缺失难以避免,对模型预

测精度与泛化能力造成不利影响<sup>[27]</sup>。目前,相关研究尚未引入迁移学习策略,以弥补数据缺陷并提升模型在复杂运行条件下的适应性。

### 2.4 清洁能源的应用

中国超 70% 的电力生产依靠煤炭等化石燃料,其不完全燃烧将释放大量温室气体。据统计,中国电网的平均碳排放因子(以二氧化碳当量计)为 0.608 kg/kWh,约为欧盟的 2.5 倍<sup>[34]</sup>,而太阳能、风能、地热能等清洁能源的电力生产碳排放因子均低于 0.1 kg/kWh<sup>[12]</sup>。饮用水厂作为高能耗基础设施,其碳排放水平受电力结构影响显著。因此,将清洁能源生产和转化模块引入饮用水厂,可实现外部电力的部分替代和有效的碳减排<sup>[35]</sup>。如图 2(d)所

示,太阳能光伏发电技术成熟、部署灵活,可通过在厂区屋顶或闲置土地布设太阳能光伏板,直接为加压泵、搅拌机等高能耗设备供电。世界范围内,在饮用水厂部署光伏系统产生的碳减排总量可达 570 ~ 950 t<sup>[36]</sup>。此外,高风速地区的部分水厂尝试通过风力涡轮机进行风能利用,进一步拓展清洁能源结构<sup>[37]</sup>。然而,清洁能源在饮用水厂的规模化应用目前仍受限于装机容量不足、供能稳定性较差和初期投资高等因素。实际工程中需因地制宜,综合考虑水厂地形、气候、用地资源等条件,配置合理的清洁能源形式。同时,清洁能源的应用需遵循“煤炭兜底”原则,保留外部电力输入通路,以确保在异常工况或极端气候下系统电力的稳定供应。

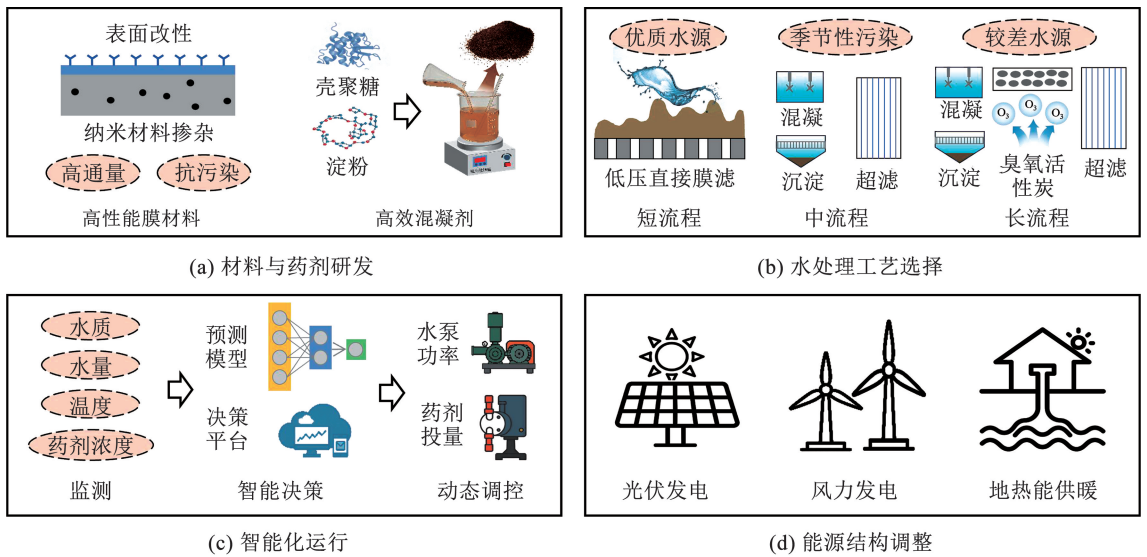


图 2 城市饮用水厂碳减排策略

Fig. 2 Carbon mitigation strategies for urban drinking water treatment plants

表 1 典型智能优化控制技术

Tab. 1 Typical intelligent optimization and control technologies

技术名称	优化对象	碳减排效益	文献
动态规划算法	泵组调度	泵组运行能耗降低 11%	[28]
神经网络算法	泵组调度	泵组运行能耗降低 6% ~ 14%	[29]
能源在线系统和数据包络分析	泵组选配和运行调度	泵组运行能耗降低 19%	[30]
可编程逻辑控制器辅助的变速驱动技术	泵组调度	泵组运行能耗降低 23%	[31]
渐进式分步机器学习	消毒剂投量	消毒剂用量减少 22%	[32]
遗传编程与多元统计分析	混凝剂投加比例	浊度去除效率提升 3% ~ 96%	[33]

## 3 面向城市污水处理厂的碳减排路径

### 3.1 低碳高效型污水处理技术

工艺选择是影响城市污水厂碳排放的关键因素之一,据统计,不同污水处理工艺的吨水碳排放强度相差 2 ~ 3 倍<sup>[38]</sup>。开发高效、低碳的处理技术有望大幅削减城市污水厂碳排放量。目前,相关研究主

要集中在高效脱氮、低碳化生物处理以及碳捕集与重定向 3 个方面(图 3(a))。

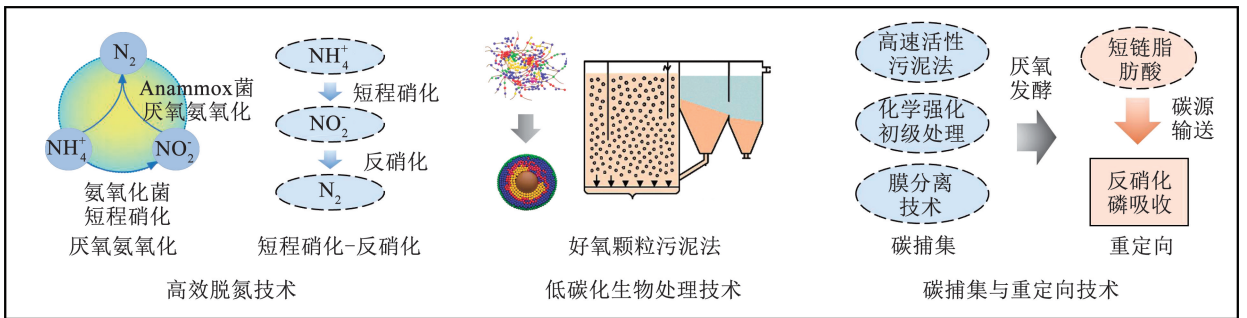
脱氮是污水处理的重要环节,传统脱氮工艺通常基于硝化/反硝化作用,需要高强度曝气和充足的有机碳源供应。同时,不完全反硝化将导致副产物 N<sub>2</sub>O 的产生,其 GWP 约为 CO<sub>2</sub> 的 298 倍,是污水厂的主要碳排放源之一<sup>[39]</sup>。高效脱氮技术通过自养

微生物作用实现氮代谢路径的转变,从而减少电力与化学品消耗,并促进氮素的完全转化<sup>[40]</sup>。目前,主流的高效脱氮技术包括厌氧氨氧化和短程硝化-反硝化等。其中,厌氧氨氧化是指厌氧条件下,自养微生物以亚硝酸盐作为电子受体,将氨氮直接转化为氮气的过程。该技术耗氧量极低,且无需外部有机碳源输入,碳减排效益显著(表 2)。北京排水集团已在北京市内 5 个污水及再生水处理厂中建设厌氧氨氧化试点工程,总处理规模 1.6 万 m<sup>3</sup>/d,每年可节约电耗 1 741 万 kWh,减少碳排放 1.05 万 t<sup>[41]</sup>。短程硝化-反硝化则利用亚硝酸盐氧化菌与硝化菌在氧亲和力和上的差异,将硝化过程控制在亚硝酸盐生成阶段,并直接对亚硝酸盐进行反硝化,有效缩短了反应流程,可减少约 25% 的曝气能耗和 40% 的碳源消耗。高效脱氮技术从根本上改变了生物单元内生化的路径,在展现出极高碳减排效益的同时,存在运维难度高、稳定性差、深度脱氮难等瓶颈问题,目前尚无法全面替代传统脱氮技术。工程实践中,需全面评估进水水质、排放标准及环境条件等因素,并考虑与常规工艺耦合运行。

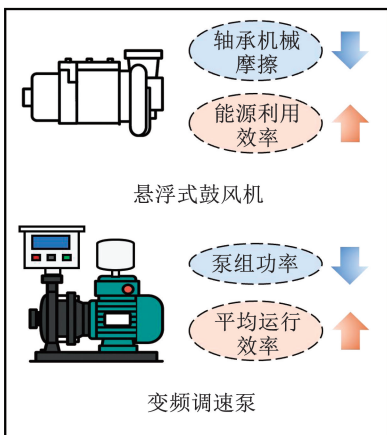
生物单元是污水处理的核心,其内部微生物活性不仅决定污染物去除效率,还影响后续单元的电力和化学品需求。低碳化生物处理技术通过强化微

生物作用提升反应效率,从而实现碳减排。好氧颗粒污泥法是典型的低碳化生物处理技术,其微生物富集度为传统活性污泥的 2~3 倍,具有更高的出水水质、更小的占地、更低的能耗和化学品用量,可降低约 7% 的间接碳排放(表 2),适用于序批式活性污泥法、膜生物反应器等既有工艺单元。吴家村污水厂是中国目前规模最大的好氧颗粒污泥污水处理工程(8 万 m<sup>3</sup>/d),于 2021 年完成改造,相比改造前采用传统活性污泥工艺,每年可节约电耗 146 万 kWh,实现碳减排 882 t<sup>[42]</sup>。尽管好氧颗粒污泥技术的碳减排潜力整体弱于高效脱氮技术,但其工程改造成本相对可控。

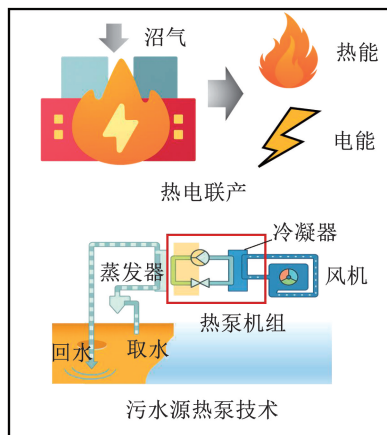
污水中固有的有机碳常在好氧阶段被降解,不仅增加了曝气能耗,还导致反硝化和磷吸收过程碳源不足。碳捕集与重定向技术的核心思路是在有机物进入好氧段之前,通过物理、化学或生物手段截留可降解有机物,并将其作为碳源重定向至下游厌氧/缺氧单元<sup>[42]</sup>。如表 2 所示,常见的碳捕集工艺包括高速活性污泥、化学强化一级处理以及膜分离技术<sup>[43]</sup>。这类工艺有效截留并富集了颗粒态、胶体态及溶解态有机物,通过厌氧发酵将其转化为短链脂肪酸,并输送至后续厌氧单元,可为反硝化过程和聚磷菌的磷吸收提供高质量碳源。



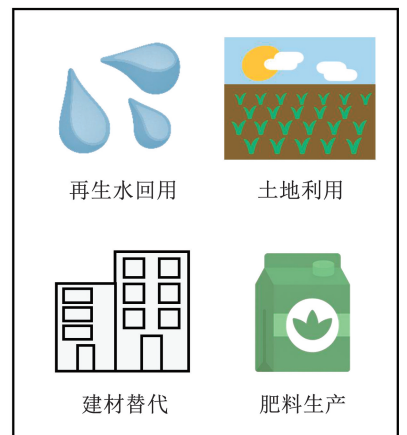
(a) 低碳高效型技术研发



(b) 设备优化



(c) 能源提取



(d) 资源回收与碳补偿

图 3 城市污水处理厂碳减排策略

Fig. 3 Carbon mitigation strategies for urban wastewater treatment plants

表 2 典型低碳高效型污水处理技术

Tab. 2 Typical low-carbon and efficient wastewater treatment technologies

技术类型	技术名称	碳减排效益指标	文献来源
高效脱氮技术	厌氧氨氧化	供氧需求下降 60%, 能耗降低 30%, 污泥量下降 80%, 且无需碳源投加, 碳排放削减 50% 以上	[39, 44]
	短程硝化-反硝化	曝气能耗下降 25%, 碳源消耗量下降 40%	[45]
	膜曝气生物膜反应器	N <sub>2</sub> O 排放因子由 0.72% 下降至 0.005 8%	[46]
低碳化生物处理技术	集成固定膜活性污泥工艺	N <sub>2</sub> O 排放因子由 3.5% 下降至 0.5%	[47]
	好氧颗粒污泥法	间接碳排放削减 7%	[44]
碳捕集技术	高速活性污泥	COD 捕集率 42% ~ 46%	[48]
	化学强化一级处理	COD 捕集率 55%	[49]
	高速活性污泥 + 厌氧膜生物反应器	COD 捕集率 43%	[50]

### 3.2 节能型设备的应用

曝气设备和污水提升泵是污水处理厂内主要耗能单元,分别约贡献全厂总电力的 15% 和 60%<sup>[51]</sup>。因此,提升其能源利用率是污水处理厂碳减排的重要途径(图 3(b))。当前,中国污水处理厂常用的曝气设备为离心鼓风机和罗茨风机,存在能源转化效率低的问题,对老旧设备进行升级已成为迫切需求。相比之下,悬浮式鼓风机由于消除了机械接触摩擦,运行能效显著提升,据统计,其能耗比罗茨鼓风机降低 25% ~ 35%,比传统离心鼓风机降低 10% ~ 20%<sup>[42]</sup>。将鼓风机更换为悬浮式鼓风机后,设备装机功率由 1 000 kW 降至 900 kW,而输出风量从 536 m<sup>3</sup>/min 提升至 588 m<sup>3</sup>/min,电能消耗量降低约 22%<sup>[52]</sup>。就污水提升泵而言,应用变频调速泵替换定速泵可有效降低泵组运行功率,调研结果显示,变频调节可使污水处理厂内水泵系统平均运行效率提升 20%,总能耗降低 5% ~ 30%<sup>[51]</sup>。设备的优化升级是污水厂内实现局部碳减排的重要措施,其土建工程量较小,具备较高的可实施性,可在污水厂设计、施工及后期改造等各阶段灵活推进。

### 3.3 热电联产与余热利用

市政污水和剩余污泥中有丰富的化学能和热能,对其进行提取和再利用能够有效降低污水处理厂对外部能源的依赖(图 3(c))。化学能回收通常依托于污泥厌氧消化与热电联产技术的结合,污水厂剩余污泥中有机质经厌氧消化生成沼气,再作为燃料进入热电联产系统,产出的电力直接供给厂内设备运行,余热则用于维持消化池温度<sup>[53]</sup>。该组合技术现已应用于中国多座污水处理工程,据统计,北京某污水厂通过化学能回收替代了全厂 18% ~ 20% 的总电耗,另有再生水厂应用热电联产技术每年产电约 3 300 万 kWh<sup>[54]</sup>。以剩余污泥为载体进入厌氧消化单元的 COD 占进水总量的 40% ~ 60%,

其中仅 20% 可转化为 CH<sub>4</sub>,化学能利用效率偏低<sup>[55]</sup>。因此,将餐厨垃圾等高有机质废弃物与污泥混合进行厌氧协同消化成为重要技术路径,可提升沼气产率 10% ~ 70%<sup>[56]</sup>,使污水厂自发电水平达到其能源需求的 130% ~ 180%<sup>[57]</sup>。此外,在厌氧消化前应用碳捕集技术能进一步提升 COD 提取效率,使污水中更多有机物由“污染物降解”转变为“能源化利用”。奥地利斯特拉斯污水厂通过结合碳捕集与协同消化技术,实现了 200% 的能源自给率<sup>[55]</sup>。

污水中余热的回收则基于污水源热泵技术,即利用污水中的大量低品位余热,经热泵系统提取并升温,用于区域供暖、污泥干化,甚至并入城市集中供热网络<sup>[58]</sup>。研究表明,该技术具备约 14.7% 的热能回收潜力。北京某再生水厂的污水源热泵系统,装机供热能力达 13 102 kW,可惠及超过 13 万 m<sup>2</sup> 的住宅与商业空间<sup>[59]</sup>。沈阳某污水厂通过污水源热泵向周边地区进行供暖,实现了煤炭消耗的大幅削减,累计减少二氧化硫(SO<sub>2</sub>)排放量 7.1 万 t,粉尘排放量 72.8 万 t,CO<sub>2</sub> 排放量 14.0 万 t<sup>[60]</sup>。

通过充分挖掘污水中的化学能和热能,污水处理厂有望由“能源用户”转变为“能源工厂”,不仅满足自身能源需求,还可向厂外用户输出多余能源。在这一过程中,与电力消耗相关的间接碳排放将呈现净负值,从而一定程度抵消厂内其他环节的碳排放,推动污水厂碳中和转型。然而,热电联产与污水源热泵技术的能源生产效率受污水和污泥理化性质影响显著,能源供应的稳定性难以保障,因此,在工程应用中存在一定局限性。此外,对市政污水进行热能提取将导致水温下降,可能抑制微生物活性,对后续生物处理效率造成不利影响。

### 3.4 资源回收驱动的碳补偿

市政污水经二级处理后可作为景观补水、农田灌溉用水和城市杂用水,实现对常规水资源的部分

替代(图 3(d))。这种再生利用为污水赋予了资源化属性,可产生一定的碳减排效益。研究表明,采用再生水替代自来水作为城市杂用水,可降低约 20% 的碳排放量<sup>[61]</sup>。

污水处理厂剩余污泥中富含大量有机质、无机质以及氮、磷等营养元素,可通过土地利用、建材替代和肥料生产实现资源化利用<sup>[62]</sup>(图 3(d))。将处理后的污泥作为土壤改良剂,可有效改善土壤结构,并为植物生长提供必要的营养元素;将焚烧后的污泥灰渣用于水泥、陶瓷、混凝土等建材制备,可在消纳污泥的同时降低对传统建材的需求,实现碳补偿;将污泥进行堆肥,可部分替代农业化肥的使用,降低

化肥生产过程的碳排放。如表 3 所示,污泥资源化利用的碳补偿效益显著,相比卫生填埋可削减 60%~90% 的碳排放。其中,肥料生产的碳补偿量较高,但由于堆肥过程产生的  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  通常难以充分收集,总碳排放量仍略高于土地利用和建材替代路径。相反,污泥用于砖材替代的碳补偿量虽相对有限,但砖材制备过程本身能耗和直接温室气体生成量均极低,以其为核心的污泥处置方案总碳排放量仅为填埋处理的 10%。污泥资源化利用是在污水厂外开展的碳减排路径,其实施方案受污泥特征、产品需求、运输条件等多因素影响,实际应用中需具体分析,综合决策。

表 3 典型污泥资源化回收方案

Tab. 3 Typical sludge resource recovery approach

处置方案	碳补偿(以二氧化碳当量计)/( $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}\text{DS}$ )	总碳排放/( $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}\text{DS}$ )	文献
石灰稳定化 + 运输 + 填埋	—	1 302	[63]
压滤至含水率 60% + 运输 + 填埋	—	1 992	[64]
重力浓缩 + 脱水 + 运输 + 填埋	—	1 723	[65]
石灰稳定化 + 运输 + 土壤改良	土地利用: -270	450	[66]
重力浓缩 + 脱水 + 干化 + 焚烧 + 水泥替代	建材替代: -170	431	[65]
离心脱水 + 干化 + 砖材替代	建材替代: -37	118	[67]
重力浓缩 + 脱水 + 堆肥 + 运输 + 化肥替代	肥料生产: -416	550	[65]
离心脱水 + 堆肥 + 城市绿化	肥料生产: -205	649	[68]

注:污泥量以干固体质量(DS)表示,即污泥完全干燥后剩余的固体质量。

## 4 面向城市供排水管网的碳减排路径

### 4.1 供排水管网的规划与布局

合理的规划与布局是城市供排水管网低碳运行的关键(图 4(a))。供水管网需从区域整体角度统筹规划管网布设,最大限度降低输送距离和扬程,实现设备的节能<sup>[16]</sup>。现阶段,区块化逐渐成为国际主流的城市供水管网布设方案,分区供水可有效减少管网内压力和流量的波动,提升运行稳定性,保障水泵的能源效率<sup>[69]</sup>。排水管网的规划应重点关注输送过程中污染物的降解与转化行为<sup>[70]</sup>。针对排水管网过长或分布过密区域,发展分散式污水处理设施,可有效减少长距离输送导致的直接碳排放。同时,合理规划雨污分流制排水管网,可避免雨水进入污水处理厂造成处理负荷增加和有机碳源稀释,提升污水处理系统能效<sup>[16]</sup>。

### 4.2 海绵城市建设驱动的源头水量削减

现阶段,中国城市排水系统中普遍存在雨污管网混接现象,大量雨水在降雨时直接进入污水管网,导致污水厂处理水量短期内急剧增加,设备能耗随之上升<sup>[71]</sup>。同时,雨水稀释会使污水厂进水的有机

碳源浓度下降,削弱生物处理单元的脱氮除磷能力,进而增加外源碳投加需求,造成额外的碳排放。如图 4(b)所示,海绵城市建设过程中,通过设置透水铺装、雨水花园、绿色屋顶等低影响开发设施,可实现对城市雨水的有效收集、下渗与自然净化,从源头削减雨水径流总量和峰值流量,进而降低雨污混接导致的排水输送与污水处理负荷<sup>[72]</sup>。以长江和京杭运河交汇处某区域为研究对象,模拟计算建设海绵城市前后的碳排放情况,结果显示,在占地 10.9 万  $\text{m}^2$ 、平均降水量 1 020 mm 的区域内,大规模修建绿色屋顶、透水铺装及植被缓冲带,每年可消纳约 4.9 万  $\text{m}^3$  雨水,削减碳排放量 1.13~1.16  $\text{t}$ <sup>[73]</sup>。同时,经净化的雨水可进入回用系统,用于景观补水、城市杂用水等非饮用需求<sup>[74]</sup>。海绵城市建设尤其适用于降雨量较高地区,早期多应用于中国南部城市,近年来,全球气候变化导致北方降雨量增加,其应用范围逐步向北扩展。低影响开发设施的建设需与城市总体规划相协调,或在既有建成区通过局部改造与补充设施实现落地。

### 4.3 管道的检修与管理

随着城市供排水管网系统复杂度的提升,爆管、

漏损等事故发生频率增加,已成为制约城市水系统低碳化发展的重要问题<sup>[75]</sup>。城市供水管网多采用压力输送模式,输配过程中常因管道内部流速过大、压力分布不均而出现漏损<sup>[69]</sup>。即便在以英国为代表的发达国家,每年供水管网故障率也高达 170 次/1 000 km,自来水损耗率超过 22%,造成严重的能源与水资源浪费<sup>[75]</sup>。城市排水管网虽依靠重力输送,但污水中有机质在输送过程中会分解产生  $\text{CH}_4$  气体,其在管道内积聚同样会导致爆管隐患和额外的碳排放。此外,排水管网普遍存在错接、漏接与混接现象,部分污水未经处理直接进入自然水体,在增加水环境风险的同时,有机质在自然水体中厌氧分解也将加剧碳排放<sup>[76]</sup>。因此,开展城市供排水管网定期漏损检测和事故检修成为保障系统低碳运行的必要措施(图 4(c))。

#### 4.4 数智化监测与压力调控

泵组能耗是城市供水管网的主要碳排放来源。当前,供水系统内加压泵组通常保持设计工况运行,或仅依据经验进行分时段的粗放式调节<sup>[77]</sup>。然而,受水量波动和实际运行条件的影响,这种缺乏动态适应性的运行模式往往导致泵组的能源利用效率偏低。2017 城市供水统计年鉴数据显示,中国城市供水管网机泵平均运行效率仅为 50% ~ 75%,输配水单位能耗普遍高于  $370 \text{ kWh}/(\text{km}^3 \cdot \text{MPa})$ ,相比  $350 \text{ kWh}/(\text{km}^3 \cdot \text{MPa})$  的行业优化目标仍有较大差距<sup>[78]</sup>。构建数智化平台、通过智能算法实现运行状态的实时监测和泵组参数的自适应调控是解决该问题的有效途径(图 4(d))。Liu 等<sup>[79]</sup>通过遗传算法优化水泵运行参数,将供水系统能源效率提高

15%,日均碳排放量降低约 0.36 t。晏毅<sup>[80]</sup>应用粒子群算法和仿真分析对供水泵组进行优化调度,降低电能消耗约 9%。胡诗苑等<sup>[81]</sup>开发基于自注意力机制的强化学习算法,动态调控供水管网压力,相比粒子群算法进一步降低能耗约 26%。在供水加压泵组智能控制体系内,针对多种环境状态预训练的强化学习方法,相较迭代次数受限的传统启发式算法表现出更优的调控性能。随着强化学习算法的开发和升级,泵组智能控制带来的碳减排效益有望进一步提升。

数智化平台可根据回传信息对管网进行异常识别与漏损定位,有效减少水资源的浪费。Liu 等<sup>[82]</sup>开发了基于遗传算法和反向传播神经网络的水力模型,对中国东部某地区供水管网进行漏损定位,误差范围仅为 14.5 ~ 121.7 m,每日可减少漏损水量约  $9\ 684 \text{ m}^3$ 。Guo 等<sup>[83]</sup>应用轻量级神经网络模型对流量为  $40 \sim 80 \text{ m}^3/\text{h}$  的小规模输水管网进行漏损检测与定位,准确度可达 97.4%。Zhou 等<sup>[84]</sup>结合管道参数、运行工况以及压力波的时域和频域特征,建立了基于贝叶斯优化的三模态深度学习模型,实现了对管网漏损位点和漏损量的实时、高精度预测( $R^2 > 0.88$ )。总体而言,现有预测模型与优化算法已能较好地满足管网漏损监测的精度要求,但模型训练通常依赖全面的输入特征和充足的样本量,多采用监督学习方式,对数据集的完整度与标注质量要求较高。实际工程中,受限于复杂的现场条件,往往难以满足模型训练所需的样本规模与质量,导致预测精度下降。因此,亟需对模型输入特征进行简化或开发基于无监督模型的漏损识别方案,以提升模型普适性。

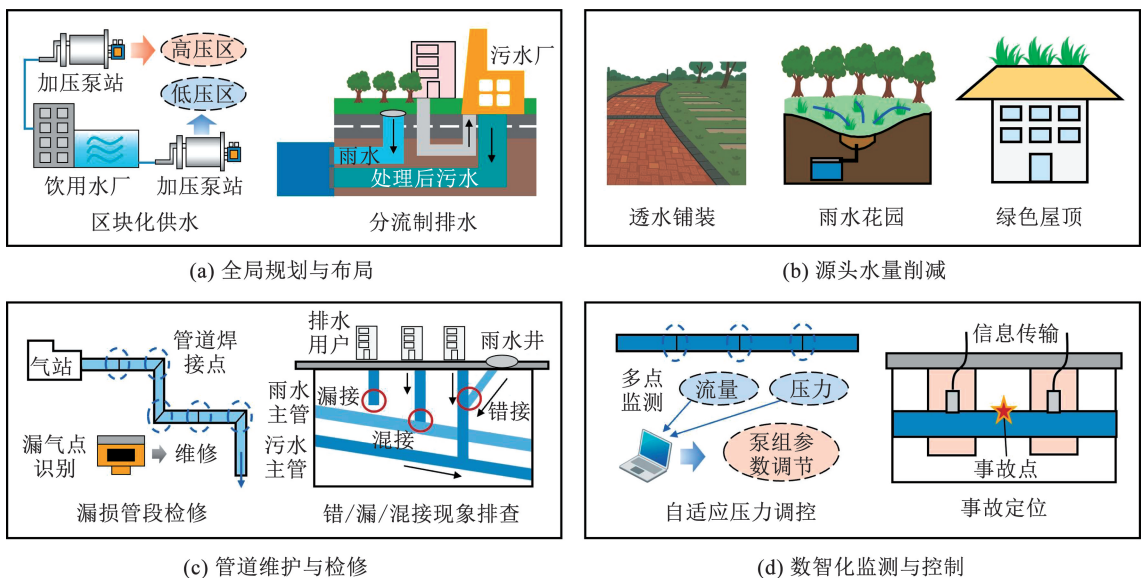


图 4 城市供排水管网碳减排策略

Fig. 4 Carbon mitigation strategies for water supply and drainage networks

## 5 协同推进城市水系统碳足迹管控

城市水系统是城市范围内以水循环为核心的复合整体,涵盖饮用水生产、输配水、污水处理、再生利用与排放等多个环节,各环节间相互耦合,存在密切的物质流动与能量交换<sup>[85]</sup>。因此,推进城市水系统碳足迹管控,不仅需要针对各高碳排环节采取精准的减排措施,还应从全系统视角出发,形成上下游联动、跨部门协同的综合管控框架(图5)。

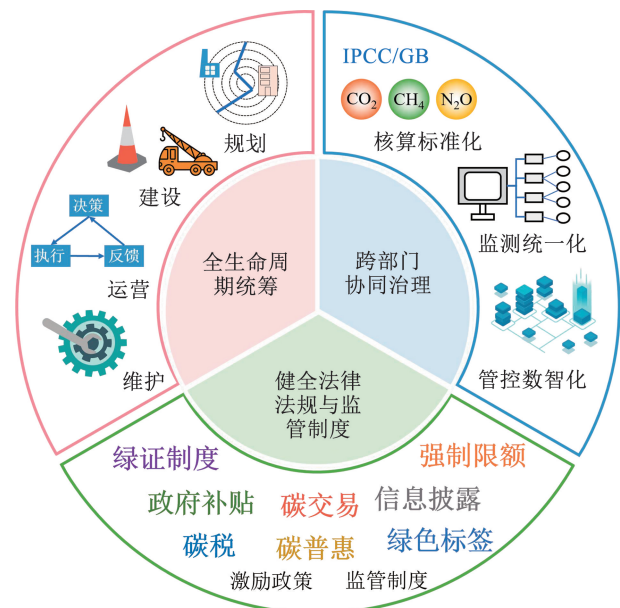


Fig. 5 Strategic framework for carbon footprint management in urban water systems

遵循城市水系统开放发展、动态生长的特征,需要将全生命周期理念应用于碳足迹管理工作。统筹规划、建设、运营、维护各个环节,综合设计全周期、跨部门的闭环管理体系,从顶层设计推动城市水系统碳足迹管控<sup>[86]</sup>。此外,需健全水系统碳排放相关法律法规,形成科学、透明且高效的管理体系,避免职能分割与政策碎片化,进而推动跨部门、跨区域的深度协同治理<sup>[86]</sup>。

从实践角度而言,应首先面向城市水系统建立规范化的碳核算方法和统一的监测体系,以支撑各部门碳排放数据的获取,为跨部门协同决策提供科学依据<sup>[87]</sup>。其次,需要构建面向水系统的全流程数智化管控平台,借助人工智能算法对各部门运行参数进行统筹调控与低碳化管理。同时,应从激励与监管双维度出发开展制度建设,通过财政补贴、碳交易机制、绿色信贷等手段引导水务机构使用低碳型技术与装备。

## 6 结语

城市水系统碳足迹管控既需要在具体环节开展

针对性治理,又需要从系统整体层面进行统筹优化。重点关注以饮用水厂、污水处理厂以及供排水管网为代表的关健基础设施,制定针对性减排策略。以材料研发、工艺优化、智能管控及清洁能源替代为核心,控制饮用水生产和污水处理过程的能源、化学品用量;通过建设能源回收与资源利用模块进一步提升污水处理过程的碳补偿能力;以合理规划与布局为核心,辅以源头水量削减、管道定期检修和动态压力调控,综合控制供排水输送过程泵组能耗。在碳足迹实际管控中,应充分把握水系统的耦合性与动态性,通过全生命周期统筹、跨部门协同治理以及监管制度的系统构建实现碳足迹优化。未来工作还需加强对城市水系统上下游设施间相互影响的考量,推动整体性的运行与协调。建设低影响开发设施、优化排水管网水力条件等措施均有望改善污水厂进水特征,提升生化反应效率,降低外部碳源依赖,实现前端与末端协同减碳,推动城市水系统低碳发展。

## 参考文献

- [1] VOUSDOKAS M I, MENTASCHI L, VOUKOUVALAS E, et al. Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 2360. DOI: 10.1038/s41467-018-04692-w
- [2] MIAO L. Examining the impact factors of urban residential energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions in China: evidence from city-level data[J]. Ecological Indicators, 2017, 73: 29. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.09.031
- [3] OU J, LIU X, WANG S, et al. Investigating the differentiated impacts of socioeconomic factors and urban forms on CO<sub>2</sub> emissions: empirical evidence from Chinese cities of different developmental levels[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 226: 601. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.123
- [4] 申若竹, 黄绵松, 郑乔舒, 等. 城市水系统智慧运营顶层设计[J]. 环境工程, 2023, 41(11): 6  
SHEN Ruozhu, HUANG Miansong, ZHENG Qiaoshu, et al. Top-level design for intelligent operation of urban water systems[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(11): 6. DOI: 10.13205/j.hjgc.202311002
- [5] 武一奇, 尹小青. 市政给排水系统碳排放标准研究[J]. 环境工程, 2024, 42(11): 146  
WU Yiqi, YIN Xiaqing. Study on standards on carbon emission in municipal water supply and drainage systems[J]. Environmental Engineering, 2024, 42(11): 146. DOI: 10.13205/j.hjgc.202411016
- [6] 郑轶雨, 马军, 魏婷, 等. 城市水务系统碳排放测算及减碳对策分析: 以成都市为例[J]. 环境工程学报, 2023, 17(6): 1778  
ZHENG Yili, MA Jun, WEI Ting, et al. Carbon emission measurement and carbon reduction strategy analysis of urban water system: a case study of Chengdu water system[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(6): 1778. DOI: 10.12030/j.cjee.202210101

- [7] TSATSOU A, FRANTZESKAKI N, MALAMIS S. Nature-based solutions for circular urban water systems; a scoping literature review and a proposal for urban design and planning[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 394: 136325. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136325
- [8] 龚道孝, 郝天, 莫罹, 等. 统筹推进城市水系统治理方法研究[J]. *给水排水*, 2022, 58(11): 1  
GONG Daoxiao, HAO Tian, MO Li, et al. Methodology of comprehensively promote urban water system governance[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 58(11): 1. DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2022.06.21.0002
- [9] 陈珊. 基于 LCA 理论的污水厂碳足迹核算及碳平衡研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2023  
CHEN Shan. Carbon footprint accounting and carbon emission reduction analysis of sewage plant based on LCA theory [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2023. DOI: 10.27108/d.cnki.ghehu.2023.000565
- [10] 蔡姗姗, 王黛瑶, 王成坤, 等. 碳中和背景下城市再生水利用实践与思考[J]. *给水排水*, 2024, 60(增刊2): 422  
CAI Huahua, WANG Daiyao, WANG Chengkun, et al. Practice and thinking on urban reclaimed water utilization in the context of carbon neutrality [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2024, 60(Sup.2): 422. DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2024.08.29.0006
- [11] 陈芄宇, 黄心蕊, 詹健. 基于 LCA 的城镇水务系统碳减排研究进展[J]. *净水技术*, 2025, 44(2): 44  
CHEN Pengyu, HUANG Xinrui, ZHAN Jian. Research progress on carbon emission reduction of urban water utilities system based on LCA[J]. *Water Purification Technology*, 2025, 44(2): 44. DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.02.005
- [12] LI F, ZHANG X, HUANG J, et al. Greenhouse gas emission inventory of drinking water treatment plants and case studies in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 912: 169090. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169090
- [13] YATEH M, LI C, LI F, et al. Understanding the influence of energy and chemical use on water treatment plants carbon emissions accounting[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2025, 69: 106669. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.106669
- [14] LI L, WANG X, MIAO J, et al. Carbon neutrality of wastewater treatment; a systematic concept beyond the plant boundary [J]. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2022, 11: 100180. DOI: 10.1016/j.ese.2022.100180
- [15] ABULIMITI A, WANG X, KANG J, et al. The trade-off between N<sub>2</sub>O emission and energy saving through aeration control based on dynamic simulation of full-scale WWTP [J]. *Water Research*, 2022, 223: 118961. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118961
- [16] 郭恰, 陈广, 马艳. 城市水系统关键环节碳排放影响因素分析及减排对策建议[J]. *净水技术*, 2021, 40(10): 113  
GUO Qia, CHEN Guang, MA Yan. Analysis on influencing factors of carbon emission in key processes of urban water system and suggestions for emission reduction [J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(10): 113. DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2021.10.016
- [17] 马若涵, 李胃彦, 蔡腾, 等. 市政排水管网非二氧化碳温室气体排放与控制研究进展[J]. *环境工程*, 2024, 42(11): 1  
MA Yuohan, LI Zhouyan, CAI Teng, et al. Research progress on emission and control of non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases in municipal drainage networks [J]. *Environmental Engineering*, 2024, 42(11): 1. DOI: 10.13205/j.hjgc.202411001
- [18] ALMANASSRA I W, JABER L, MANAWI Y, et al. Recent advances in 2D materials for improved performance and antifouling characteristics of ultrafiltration membranes [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 488: 151029. DOI: 10.1016/j.cej.2024.151029
- [19] LU X, LIU B, ZHU X, et al. Multiple modulating energy-efficient nanofiltration membranes during high-quality drinking water towards high mineral/organic matter selectivity [J]. *Desalination*, 2024, 588: 117970. DOI: 10.1016/j.desal.2024.117970
- [20] WANG C, SHI C, SHI F, et al. Chitosan aided polyaluminium ferric silicate (PAFS) coagulant for treatment of wool scouring wastewater [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(5): 113662. DOI: 10.1016/j.jece.2024.113662
- [21] ZHANG Z, JING R, HE S, et al. Coagulation of low temperature and low turbidity water; adjusting basicity of polyaluminum chloride (PAC) and using chitosan as coagulant aid [J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 206: 131. DOI: 10.1016/j.seppur.2018.05.051
- [22] SCHURER R, SCHIPPERS J C, KENNEDY M D, et al. Enhancing biological stability of disinfectant-free drinking water by reducing high molecular weight organic compounds with ultrafiltration posttreatment [J]. *Water Research*, 2019, 164: 114927. DOI: 10.1016/j.watres.2019.114927
- [23] 周同, 罗海江, 孙聪, 等. 中国农村饮用水水源地水质状况研究[J]. *中国环境监测*, 2020, 36(6): 89  
ZHOU Jiong, LUO Haijiang, SUN Cong, et al. Study on the water quality of rural drinking water sources in China [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2020, 36(6): 89. DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2020.06.14
- [24] PRONK W, DING A, MORGENROTH E, et al. Gravity-driven membrane filtration for water and wastewater treatment; a review [J]. *Water Research*, 2019, 149: 553. DOI: 10.1016/j.watres.2018.11.062
- [25] CHANG H, ZHU Y, YU H, et al. Long-term operation of ultrafiltration membrane in full-scale drinking water treatment plants in China: characteristics of membrane performance [J]. *Desalination*, 2022, 543: 116122. DOI: 10.1016/j.desal.2022.116122
- [26] MAZIOTIS A, MOLINOS-SENANTE M. Understanding energy performance in drinking water treatment plants using the efficiency analysis tree approach [J]. *npj Clean Water*, 2024, 7(1): 13. DOI: 10.1038/s41545-024-00307-8
- [27] YU W, ZHOU Z, YANG Y, et al. Artificial intelligence in chemical dosing for drinking water treatment; a systematic review of algorithmic applications, implementation frameworks, and future challenges [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2025, 13(5): 118936. DOI: 10.1016/j.jece.2025.118936
- [28] WANG D, ZHANG P, MA H, et al. Intelligent collaborative optimal scheduling for water intake-supply pump groups in drinking water treatment plants [J]. *International Journal of Energy Research*, 2024, 2024(1): 7800284. DOI: 10.1155/2024/

- 7800284
- [29] ZHANG Z, KUSIAK A, ZENG Y, et al. Modeling and optimization of a wastewater pumping system with data-mining methods [J]. *Applied Energy*, 2016, 164: 303. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.11.061
- [30] TORREGROSSA D, HANSEN J, HERNÁNDEZ-SANCHO F, et al. A data-driven methodology to support pump performance analysis and energy efficiency optimization in waste water treatment plants [J]. *Applied Energy*, 2017, 208: 1430. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.09.012
- [31] DEBENEDICTIS A, HALEY B, WOO C K, et al. Operational energy-efficiency improvement of municipal water pumping in California [J]. *Energy*, 2013, 53: 237. DOI: 10.1016/j.energy.2013.02.012
- [32] WANG Y Q, WANG H C, XIAO Z J, et al. Machine learning strategy secures urban smart drinking water treatment plant through incremental advances [J]. *Water Research*, 2025, 280: 123541. DOI: 10.1016/j.watres.2025.123541
- [33] PARK S, BAE H, KIM C. Decision model for coagulant dosage using genetic programming and multivariate statistical analysis for coagulation/flocculation at water treatment process [J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2008, 25(6): 1372. DOI: 10.1007/s11814-008-0225-9
- [34] 宁礼哲, 张哲, 蔡博峰, 等. 2020 年中国区域和省级电网温室气体排放因子研究 [J]. *环境工程*, 2023, 41(3): 222  
NING Lizhe, ZHANG Zhe, CAI Bofeng, et al. Research on China's regional and provincial electricity GHG emission factors in 2020 [J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41(3): 222. DOI: 10.13205/j.hjgc.202303030
- [35] LIN B, AHMAD I. Analysis of energy related carbon dioxide emission and reduction potential in Pakistan [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 143: 278. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.113
- [36] YATEH M, LI F, TANG Y, et al. Energy consumption and carbon emissions management in drinking water treatment plants: a systematic review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 437: 140688. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.140688
- [37] SOSHINSKAYA M, CRIJNS-GRAUS W H J, VAN DER MEER J, et al. Application of a microgrid with renewables for a water treatment plant [J]. *Applied Energy*, 2014, 134: 20. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.07.097
- [38] XI J, GONG H, ZHANG Y, et al. The evaluation of GHG emissions from Shanghai municipal wastewater treatment plants based on IPCC and operational data integrated methods (ODIM) [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 797: 148967. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148967
- [39] DUAN H, ZHAO Y, KOCH K, et al. Insights into nitrous oxide mitigation strategies in wastewater treatment and challenges for wider implementation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(11): 7208. DOI: 10.1021/acs.est.1c00840
- [40] GAO M, SUN S, SHAO C, et al. Engineered stable partial nitrification/endogenous partial denitrification-anammox process for enhanced nitrogen removal from low carbon-to-nitrogen ratio wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2025, 428: 132466. DOI: 10.1016/j.biortech.2025.132466
- [41] 张海亚, 李思琦, 黎明月, 等. 城镇污水处理厂碳排放现状及减污降碳协同增效路径探讨 [J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(6): 2053  
ZHANG Haiya, LI Siqi, LI Mingyue, et al. Carbon emission analysis of municipal wastewater treatment plants and discussion on synergistic path of pollution and carbon reduction [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(6): 2053. DOI: 10.12153/j.issn.1674-991X.20230040
- [42] SONG X, LI P, ZHANG B, et al. Realization approaches for constructing energy self-sufficient wastewater treatment plants: a review [J]. *Carbon Neutrality*, 2025, 4(1): 21. DOI: 10.1007/s43979-025-00133-y
- [43] WU Z, ZHU Z, ZHANG X, et al. New insights into carbon capture and re-direction technologies for wastewater resource recovery: a critical review [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 59: 105105. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105105
- [44] TONG Y, LIAO X, HE Y, et al. Mitigating greenhouse gas emissions from municipal wastewater treatment in China [J]. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2024, 20: 100341. DOI: 10.1016/j.es.2023.100341
- [45] YAN P, SHI H X, CHEN Y P, et al. Optimization of recovery and utilization pathway of chemical energy from wastewater pollutants by a net-zero energy wastewater treatment model [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 133: 110160. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110160
- [46] KINH C T, SUENAGA T, HORI T, et al. Counter-diffusion biofilms have lower N<sub>2</sub>O emissions than co-diffusion biofilms during simultaneous nitrification and denitrification: insights from depth-profile analysis [J]. *Water Research*, 2017, 124: 363. DOI: 10.1016/j.watres.2017.07.058
- [47] MANNINA G, EKAMA G A, CAPODICI M, et al. Integrated fixed-film activated sludge membrane bioreactors versus membrane bioreactors for nutrient removal: a comprehensive comparison [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 226: 347. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.08.006
- [48] GULHAN H, HAMIDI M N, ABDELRAHMAN A M, et al. Long term experiences in a pilot-scale high-rate activated sludge system with lamella clarifier: effluent quality and carbon capture [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, 49: 103138. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103138
- [49] RAHMAN A, DE CLIPPELEIR H E, THOMAS W, et al. A-stage and high-rate contact-stabilization performance comparison for carbon and nutrient redirection from high-strength municipal wastewater [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 357: 737. DOI: 10.1016/j.cej.2018.09.206
- [50] LIANG M, LU X, LIU P, et al. Tapping the energy potential from wastewater by integrating high-rate activated sludge process with anaerobic membrane bioreactor [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 333: 130071. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.130071
- [51] 李云, 蒋进元, 白璐, 等. 污水处理厂能耗评估与优化现状 [J]. *工业水处理*, 2018, 38(9): 1  
LI Yun, JIANG Jinyuan, BAI Lu, et al. Present situation of the energy consumption evaluation and optimization in wastewater treatment plants [J]. *Industrial Water Treatment*, 2018, 38(9): 1
- [52] 谢荣焕, 梁文逵, 刘爱辉, 等. 空气悬浮风机在污水厂节能降耗中的应用 [J]. *中国给水排水*, 2014, 30(15): 108

- XIE Ronghuan, LIANG Wenkui, LIU Aihui, et al. Application of turbo blower to energy saving and consumption reducing in WWTP [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(15): 108. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2014.15.027
- [53] RANI A, SNYDER S W, KIM H, et al. Pathways to a net-zero-carbon water sector through energy-extracting wastewater technologies[J]. *npj Clean Water*, 2022, 5(1): 49. DOI: 10.1038/s41545-022-00197-8
- [54] 常纪文, 井媛媛, 耿瑜, 等. 推进市政污水处理行业低碳转型, 助力碳达峰、碳中和[J]. *中国环保产业*, 2021(6): 9  
CHANG Jiwen, JING Yuanyuan, GENG Yu, et al. Promote the low-carbon transformation of municipal sewage treatment industry and facilitate the realization of emission peak and carbon neutrality [J]. *China Environmental Protection Industry*, 2021(6): 9. DOI: 10.3969/j.issn.1006-5377.2021.06.002
- [55] 刘智晓. 未来污水处理能源自给新途径: 碳源捕获及碳源改向[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(8): 43  
LIU Zhixiao. Carbon capture and carbon redirection: new way to optimize the energy self-sufficient of wastewater treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(8): 43. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2017.08.008
- [56] FENG K, YANG L, CHEN L, et al. Enhanced methane production from the co-digestion of food waste and thermally hydrolyzed sludge filtrate [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 342: 118169. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118169
- [57] ZUPANCIC G D, URANJEK-ZEVART N, ROS M. Full-scale anaerobic co-digestion of organic waste and municipal sludge [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2008, 32(2): 162. DOI: 10.1016/j.biombioe.2007.07.006
- [58] HEPBASLI A, BIYIK E, EKREN O, et al. A key review of wastewater source heat pump (WWSHP) systems [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 88: 700. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.08.065
- [59] WEHBI Z, TAHER R, FARAJ J, et al. A short review of recent studies on wastewater heat recovery systems: types and applications [J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 896. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.07.104
- [60] 孙集平. 城市污水中的热能回收及利用研究[J]. *环境保护与循环经济*, 2009, 29(4): 38  
SUN Jiping. Study on heat energy recovery and utilization in urban wastewater [J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2009, 29(4): 38. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1021.2009.04.014
- [61] 张辰, 王盼, 杨雪, 等. 双碳背景下城镇污水系统减碳技术研究与应用[J]. *给水排水*, 2024, 60(10): 1  
ZHANG Chen, WANG Pan, YANG Xue, et al. Research and application of carbon reduction technology in municipal wastewater systems under the dual carbon background [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2024, 60(10): 1. DOI: 10.13789/j.cnki.wwel964.2024.08.01.0011
- [62] 乔翊嵩, 顾登海, 卢广亮, 等. 城镇生活污水处理厂污泥资源化利用研究进展[J]. *工业水处理*, 2025, 45(7): 1  
QIAO Chisong, GU Denghai, LU Guangliang, et al. Research progress on sludge resource utilization in urban domestic sewage treatment plants [J]. *Industrial Water Treatment*, 2025, 45(7): 1. DOI: 10.19965/j.cnki.iwt.2024-0671
- [63] HOUILLON G, JOLLIET O. Life cycle assessment of processes for the treatment of wastewater urban sludge: energy and global warming analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2005, 13(3): 287. DOI: 10.1016/j.jclepro.2004.02.022
- [64] LIU B, WEI Q, ZHANG B, et al. Life cycle GHG emissions of sewage sludge treatment and disposal options in Tai Lake Watershed, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 447: 361. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.01.019
- [65] 李哲坤, 张立秋, 杜子文, 等. 城市污泥不同处理处置工艺路线碳排放比较[J]. *环境科学*, 2023, 44(2): 1181  
LI Zhekun, ZHANG Liqiu, DU Ziwen, et al. Comparison of carbon emissions in different treatment and disposal process routes of municipal sludge [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(2): 1181. DOI: 10.13227/j.hjcx.202204146
- [66] GUO D, LI B, YU W, et al. A system engineering perspective for net zero carbon emission in wastewater and sludge treatment industry: a review [J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2024, 46: 369. DOI: 10.1016/j.sp.2024.02.033
- [67] CHEN Y C, KUO J. Potential of greenhouse gas emissions from sewage sludge management: a case study of Taiwan [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 129: 196. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.04.084
- [68] GOURDET C, GIRAULT R, BERTHAULT S, et al. In quest of environmental hotspots of sewage sludge treatment combining anaerobic digestion and mechanical dewatering: a life cycle assessment approach [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 143: 1123. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.007
- [69] 刘晴靓, 王如菲, 马军. 碳中和愿景下城市供水面临的挑战、安全保障对策与技术研究进展[J]. *给水排水*, 2022, 58(1): 1  
LIU Qingliang, WANG Rufe, MA Jun. Challenges of urban water supply and discussions on the strategic solution with related technology developments of urban water quality under the vision of carbon neutrality [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 58(1): 1. DOI: 10.13789/j.cnki.wwel964.2022.01.001
- [70] CHEN J, WANG H, YIN W, et al. Deciphering carbon emissions in urban sewer networks: bridging urban sewer networks with city-wide environmental dynamics [J]. *Water Research*, 2024, 256: 121576. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121576
- [71] BAI Y, XU A, WU Y H, et al. Portrait of municipal wastewater of China: inspirations for wastewater collection, treatment and management [J]. *Water Research*, 2025, 277: 123321. DOI: 10.1016/j.watres.2025.123321
- [72] SANTOS T D, PACHECO F A L, FERNANDES L F S. A systematic analysis on the efficiency and sustainability of green facades and roofs [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 932: 173107. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173107
- [73] 贾玲玉. 海绵城市建设的低影响开发技术配置优化与碳减排研究[D]. 天津: 天津大学, 2017  
JIA Lingyu. Study on the configuration optimization and carbon emission reduction of low impact development in sponge city [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017
- [74] HAN J, WANG C, DENG S, et al. China's sponge cities alleviate urban flooding and water shortage: a review [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2023, 21(3): 1297. DOI: 10.1007/s10311-022-01559-x

- [75] BARTON N A, FAREWELL T S, HALLETT S H, et al. Improving pipe failure predictions: factors affecting pipe failure in drinking water networks[J]. *Water Research*, 2019, 164: 114926. DOI: 10.1016/j.watres.2019.114926
- [76] 谷俊鹏, 曹玉梅, 潘铁津. 城市排水管网运维效能提升策略研究[J]. *中国给水排水*, 2024, 40(16): 29  
GU Junpeng, CAO Yumei, PAN Tiejin. Research on strategy of improving the operation and maintenance efficiency of urban drainage pipeline network[J]. *China Water & Wastewater*, 2024, 40(16): 29. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.16.005
- [77] MA H, WANG X, WANG D. Pump scheduling optimization in urban water supply stations: a physics-informed multiagent deep reinforcement learning approach[J]. *International Journal of Energy Research*, 2024, 2024(1): 9557596. DOI: 10.1155/2024/9557596
- [78] 蒲政衡, 赵平伟, 冯偲慙, 等. 基于深度学习的供水管网实时智能调度研究[J]. *给水排水*, 2022, 58(11): 166  
PU Zhengheng, ZHAO Pingwei, FENG Simin, et al. Intelligent real-time scheduling of water distribution system based on deep learning[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 58(11): 166. DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2022.05.11.0012
- [79] LIU Y, MA X, LI Y, et al. Water pipeline leakage detection based on machine learning and wireless sensor networks[J]. *Sensors*, 2019, 19(23): 5086. DOI: 10.3390/s19235086
- [80] 晏毅. 基于用水量预测的供水泵站优化运行及控制[D]. 成都: 西华大学, 2023  
YAN Yi. Optimal operation and control of water supply pumping station based on water consumption prediction[D]. Chengdu: Xihua University, 2023. DOI: 10.27411/d.cnki.gscgc.2023.000934
- [81] 胡诗苑, 高金良, 钟丹, 等. 供水管网实时优化调度深度自注意力强化学习框架[J]. *给水排水*, 2023, 59(7): 135  
HU Shiyuan, GAO Jinliang, ZHONG Dan, et al. Deep self-attention reinforcement learning framework for real-time optimal scheduling of water distribution network[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 59(7): 135. DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2023.02.06.0003
- [82] LIU H, ZHANG J, AN W, et al. Operational efficiency improvement in a water supply network: machine learning-enhanced leakage identification and water resource conservation[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2025, 75: 107924. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.107924
- [83] GUO P, ZHENG S, YAN J, et al. Leak detection in water supply pipeline with small-size leakage using deep learning networks[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 191: 2712. DOI: 10.1016/j.psep.2024.10.011
- [84] ZHOU Y, ZHANG Y, WAN W, et al. Deep multimodal fusion techniques for transient-based leakage detection in water pipelines[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2025, 201: 107494. DOI: 10.1016/j.psep.2025.107494
- [85] 陶相婉, 莫罹, 龚道孝, 等. 雄安新区城市水系统全周期管理机制研究[J]. *给水排水*, 2021, 57(11): 77  
TAO Xiaowan, MO Li, GONG Daoxiao, et al. Research on full cycle management mechanism of urban water system in Xiong'an New Area[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 57(11): 77. DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2021.11.013
- [86] ZHOU Y, HAN J, ZHOU Y. Synergizing carbon trading and water management for urban sustainability: a city-level multi-objective planning framework[J]. *Applied Energy*, 2024, 359: 122637. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.122637
- [87] LIU Y, MAUTER M S. High-resolution carbon accounting framework for urban water supply systems[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(19): 13920. DOI: 10.1021/acs.est.2c04127

(编辑 刘 彤)