

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.14.004

# 北京市某大型水务集团碳中和规划与实践

姚大伟, 张建新, 张荣兵, 石磊, 葛勇涛, 于丽昕, 白宇,  
张文超, 刘达克, 李长会  
(北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100044)

**摘要:** 为响应我国实现碳中和目标,2021年北京市某大型水务集团(以下简称“集团”)率先在全国水务行业发布《碳中和规划》和《碳中和实施方案》,旨在引领我国水务行业绿色转型,推动水务行业更高质量发展。详细介绍了碳中和规划核算边界及方法、规划的总体要求和实施举措。围绕“管理创新,推进绿色低碳运营”“技术创新,实现清洁能源替代”“生态服务创新,实现生物固碳”三个方面,详细阐述了碳减排措施及应用效果。预计到2025年,集团碳排放强度较2020年下降20%,其中存量减碳和绿能替代贡献比例各为10%。到2035年,碳排放强度较2020年下降40%,其中存量减碳和绿能替代贡献比例各为20%。到2050年,碳排放强度较2020年下降80%以上,其中存量减碳20%,集团自身绿能替代20%,根据北京市绿电消纳安排外购绿电40%;剩余20%通过购买碳汇等市场化机制完成碳中和,基本实现近零碳排放。

**关键词:** 污水处理; 碳中和; 规划; 实践

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)14-0019-06

## Carbon Neutrality Plan and Practice of a Large Water Group in Beijing

YAO Da-wei, ZHANG Jian-xin, ZHANG Rong-bing, SHI Lei, GE Yong-tao,  
YU Li-xin, BAI Yu, ZHANG Wen-chao, LIU Da-ke, LI Chang-hui  
(Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100044, China)

**Abstract:** In order to achieve China's carbon neutrality goal, a large water group in Beijing took the lead in releasing the *Carbon Neutrality Plan* and *Carbon Neutrality Implementation Plan* in the national water industry in 2021. The objective is to lead the green transformation of China's water industry and promote its higher quality development. This paper introduced the accounting boundary and methodology of the carbon neutral plan, outlining the detailed requirements of the plan and implementation measures. The content had elaborated on carbon emission reduction measures and their application effects, focusing on three aspects: management innovation promoting green and low-carbon operation, technological innovation realizing clean energy substitution, and ecological service innovation realizing biological carbon fixation. By 2025, the carbon emission intensity would be reduced by 20% compared to 2020, with stock carbon reduction and green energy substitution contributing 10% respectively. By 2035, the carbon emissions intensity would be reduced by 40% compared to 2020, with stock carbon reduction and green energy substitution contributing 20% respectively. By 2050, the carbon emission intensity would be reduced by more than 80% compared to 2020, comprising 20% stock carbon

通信作者: 葛勇涛 E-mail: geyongtao@bdc.cn

reduction, 20% own green energy substitution, and 40% outsourcing of green electricity as per Beijing's green electricity consumption arrangement. The remaining 20% carbon reduction will be offset through market-oriented mechanisms such as acquiring carbon sinks, allowing the group to achieve near-zero carbon emissions.

**Key words:** sewage treatment; carbon neutrality; plan; practice

在“碳达峰、碳中和”战略背景下,我国污水处理行业节能降耗、低碳发展的需求日益突出<sup>[1]</sup>。我国目前是全球碳排放第一大国,排放量占到全球的25%以上,其中污水处理行业碳排放量占全社会总排放量的1%~2%,是不可忽视的减排领域<sup>[2]</sup>。尽管城市污水处理技术的研究与应用历经100多年的发展,污水处理厂的功能也从传统的污染物削减逐渐演变为城市的能源厂、肥料厂、水源厂,但在应对全球气候变化的大背景下,碳减排、碳中和成为水务行业发展新的历史使命。而我国污水处理行业普遍存在因污水处理出水标准高而导致的碳排放强度大、企业清洁能源利用低、水环境治理领域深度减排技术研发及标准支撑明显不足等问题,需要通过管理创新(实现降碳)、科技创新(实现替碳)、生态服务创新(实现固碳)<sup>[3-7]</sup>进行系统化解决。碳中和规划是实现碳中和目标的重要顶层设计,是引领方向的必要支撑,但纵观我国水务行业研究现状,还缺乏相关研究案例。

因此,为贯彻北京市“碳达峰、碳中和”相关要求,深入贯彻落实北京市在实现碳达峰、“碳中和”上争当“领头羊”的要求,2021年北京某水务集团(以下简称“集团”)率先在全国水务行业制定并发布《碳中和规划》,旨在通过建立顶层设计,持续强化管理创新、科技创新、生态服务创新,加大推动资源回收和绿色能源利用,实现绿色低碳生产,促进碳减排工作取得新的突破,推动水务行业更高质量发展,积极引领水务行业绿色转型,助力我国碳中和目标实现,同时为水务行业提供案例借鉴。

## 1 碳中和规划核算边界及方法

一般来说,城镇污水处理过程中的碳排放主要分为直接排放和间接排放。依据北京市地方标准《二氧化碳排放核算和报告要求 其他行业》(DB 11/T 1787—2020)及北京市生态环境局《北京市碳排放单位二氧化碳排放核算和报告指南》,计算二氧化碳排放量(履约范围),主要包括:天然气、汽油、柴

油等使用产生的直接碳排放;耗电产生的间接碳排放。

### 1.1 碳排放核算边界

《北京市碳排放单位二氧化碳排放核算和报告指南》指出:“在北京市碳排放权交易试点期间,参与北京市二氧化碳排放权交易试点的企业只核算其北京市行政辖区内固定排放设施的化石燃料燃烧、工业生产过程、废弃物处理产生的二氧化碳直接排放和消耗电力产生的二氧化碳间接排放”。依此确定碳排放核算边界如下:①碳排放的计算范围为再生水厂、泵站等厂界内部。②仅限于再生水厂运行过程中产生的碳排放,不包括建设和拆除过程。③污泥止于脱水完成。④污水止于排入受纳水体。⑤再生水止于配水泵房总出水管。⑥仅计算处理过程中固定排放设施的化石燃料燃烧直接CO<sub>2</sub>排放量和电力消耗间接CO<sub>2</sub>排放量,污水处理直接排放的CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O不计入碳排放核算。⑦再生水回用和污泥资源化利用暂未考虑生态碳汇,仅作为支持集团实现碳中和的辅助间接措施。

### 1.2 碳排放核算方法

根据北京市碳排放核算及履约相关要求确定碳排放量,其中直接碳排放量包括供暖、食堂使用天然气、液化石油气等,以及生产设施使用汽油、柴油产生的碳排放当量;间接碳排放量为耗电产生的碳排放碳量。

碳排放总量计算公式如下:

$$W = \sum_{i=1}^n P_i + Q \quad (1)$$

$$P_i = \frac{A_i \times B_i \times C_i \times D_i \times K}{N} \times 10^{-3} \quad (2)$$

$$Q = A \times R \quad (3)$$

式中:W为碳排放总量,t/a;P<sub>i</sub>为第i种燃料的直接碳排放量,t/a;Q为电耗间接碳排放量,t/a;A<sub>i</sub>为第i种燃料的消耗量,t/a或10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/a;B<sub>i</sub>为第i种燃料的低位热值,GJ/t或GJ/10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>;C<sub>i</sub>为第i种燃料的单位

热值含碳量,  $\text{tC/TJ}$ ;  $D_i$  为第  $i$  种燃料的碳氧化率, %;  $K$  为  $\text{CO}_2$  分子质量, 取 44;  $N$  为碳分子质量, 取 12;  $A$  为电能消耗量,  $\text{MW}\cdot\text{h/a}$ ;  $R$  为电能间接排放系数,  $\text{tCO}_2/(\text{MW}\cdot\text{h})$ 。

碳排放核算折算系数取值如表 1 所示。

表 1 碳排放核算折算系数

Tab.1 Conversion coefficient of carbon emission accounting

燃料品种	直接排放系数			间接排放系数/ $[\text{tCO}_2\cdot(\text{MW}\cdot\text{h})^{-1}]$
	燃料低位热值	单位热值含碳量/ $(\text{tC}\cdot\text{TJ}^{-1})$	碳氧化率/%	
一般烟煤	19.57 GJ/t	26.18	85	
汽油	44.8 GJ/t	18.9	98	
柴油	43.33 GJ/t	20.2	98	
液化石油气	47.31 GJ/t	17.2	98	
天然气	389.31 GJ/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	15.3	99	
电力				0.604

注：排放系数参考北京市地方标准《二氧化碳排放核算和报告要求 其他行业》(DB 11/T 1787—2020)。

2 规划总体要求

2.1 指导思想

为响应国家在 2030 年实现碳达峰、2060 年实现碳中和的目标,将实现碳达峰后稳中有降作为集团“十四五”新发展阶段践行新发展理念的重要抓手,将谋划碳中和愿景作为实现高质量发展的重要支撑。统筹处理好发展和减排、整体和局部、短期和中长期关系,强化碳排放总量和强度双控机制,以科技创新和转化应用引领能源低碳革命,推动企业绿色转型,在北京市和污水处理行业碳达峰、碳中和行动中发挥示范引领作用,率先实现碳中和目标。

2.2 规划思路

通过“存量减碳、绿能替代、增加碳汇”三方面的措施,推动碳中和目标实现。一是运营管理创新实现降碳,通过实施厂网一体化运营调度、精细化运营管理、设备效能提升、智慧化管理模式,提升管理水平和效能,减少存量碳排放。二是科技创新实现替碳,推动自主创新低碳技术——厌氧氨氧化和好氧颗粒污泥技术转化应用,在企业内部搭建沼气热电联产、水源热泵、分布式光伏发电等绿色低碳技术应用平台,培育绿色产业,实现低碳绿色生产和绿能替代。三是生态服务创新实现固碳,大力推动再生水回用和污泥资源化利用,实现生态固碳。

2.3 规划目标

到 2025 年,碳排放量和碳排放强度较 2020 年下降 20% 以上(存量减碳和绿能替代贡献比例各为 10%);新能源和可再生能源的比重由 5% 左右提高到 15% 以上(绿能替代);能源利用效率持续提升,单位污水处理电耗较 2020 年下降 10% 以上(存量减碳)。到 2035 年,碳排放量和碳排放强度力争较 2020 年下降 40%(存量减碳和绿能替代贡献比例各为 20%);新能源和可再生能源的比重力争达到 25%(绿能替代);能源利用效率持续提升,处理单位污水电耗力争达到国际领先水平(存量减碳)。到 2050 年,碳排放量和碳排放强度较 2020 年下降 80% 以上(存量减碳基本持平,绿能替代 80%),通过购买绿电、碳汇、碳捕集利用和市场化机制完成剩余碳排放量的中和;新能源和可再生能源的比重提升至 80% 以上,能源利用效率持续提升,单位污水处理电耗进一步下降,基本实现近零碳排放。

3 实践举措

3.1 管理创新,推进绿色低碳运营

① 加强厂网一体化流域调度。构建“集团、流域、污水厂”三级生产调度平台,形成从生产系统数据采集、分析、建模到智能应用的全流程数据驱动体系,实现快捷、高效的生产调度。充分发挥污水厂和管网统筹管理的优势,将北京中心城区污水厂按服务区位划分为清河、坝河、通惠河和凉水河四大流域,利用泵站、闸井等管网设施统筹调配流域间及流域内污水厂水量,提升低能耗和低药耗污水厂的水量,降低高能耗和高药耗污水厂的水量,实现低碳经济运行。汛期根据降雨量和进厂液位变化情况,对泵站、管网、污水厂进行统一调度,均衡污水厂负荷,降低上游管网液位,最大程度为管网腾容,降低合流制溢流污染,改善汛期河道水环境质量。

② 精细化运营管理。持续开展精细化调控研究,采用全流程控制、全要素研究,通过高效脱氮除磷、多点进水、氧化沟转刷控制等一系列措施,深挖污水潜能,进一步降低能耗。推行生产过程精细控制,高效运行精准控制系统,提升工艺运行的效率和保障度,提高节能降耗水平。加强绩效考核,严控电耗、药耗等考核指标,促使工艺优化调控,降低运行成本和节能降耗。

执行“一厂一策”运行策略,根据多年运行经



验,形成全年分季节整体调控策略和基于单元精确调控的系统性、全流程“绿色”控制标准,在“精准达标”的前提下,实现“能耗最优”。制定汛期工艺调控策略:“三降一控一增强”,即降进水泵房液位、初沉池泥位和二沉池泥位,控制生物池溶解氧浓度,增加生物池和反硝化生物滤池碳源投加量,增强系统脱氮能力,增加处理水量,强化污染物削减。集团所属再生水厂降雨期间均达到最大负荷,其中采用A<sup>2</sup>O工艺的污水厂运行负荷可达130%以上,采用A<sup>2</sup>O+砂滤/滤布滤池工艺的污水厂运行负荷可达120%,采用MBR工艺的污水厂运行负荷可达100%。再生水厂能够最大程度地处理来水,减轻降雨期间溢流污染。

③ 推广智慧化管理模式。通过在线仪表与数学模型实时在线模拟仿真及调控,形成基于数学模型的工艺预警和决策调控的专家分析系统,建立提前预警和调控机制,实现工艺优化,达到节能降耗的目的。构建精确曝气、精确除磷和精确碳源投加等系列智慧控制系统,实现了生物池溶解氧精确控制以及精细化药剂投加,提高了精细化运营管理水平,降低了能耗。

④ 全面提升设备效能。以能源管理体系为主要抓手,结合各污水厂工艺设备运行特点,制定符合集团实际的设备能源管理体系。推广能源管理系统,实现设备系统化管理。摸排各单位设备效能,有效实施电能管理。对100 kW以上设备进行逐台监控,50 kW以上设备进行组合监控,20 kW以上设备进行区域监控,并建立设备状态分析系统,优化设备运行,切实提高能效。同时,通过调整现有设备启停、运行逻辑,创造高效的运行工况条件,提高设备能效。推进重点用能设备的节能增效,以泵、风机、离心脱水机、除臭等设备为重点,实施精准控制,加强日常监管和节能评价,提升设备能效。持续实施曝气系统、膜擦洗风机、离心脱水机等重点设备的节能改造。

在存量减碳方面,通过实施厂网一体化运营调度、精细化运营管理、智慧化管理模式和设备效能提升,综合提升管理水平和效能。与2020年相比,2023年集团单位水处理碳排放量降低8.5%,单位污水处理电耗降低12.8%,碳源和除磷药剂的投配率分别降低40.6%和18.7%。随着节能降耗措施的持续发力,集团碳排放强度即单位水处理碳排放

量将进一步降低,到2025年,集团碳排放强度较2020年下降10%;到2035年,集团碳排放强度较2020年下降20%,后续基本持平。

### 3.2 技术创新,实现清洁能源替代

① 利用沼气热电联产技术,实现能源回收利用。集团共建设5座污泥处理中心,总设计处理能力达6 128 t/d,采用热水解+高级厌氧消化+板框脱水技术路线,实现了污泥的无害化、稳定化、减量化、资源化。污泥厌氧消化过程中产生的沼气可进行热电联产,实现污泥中的能源回收利用。沼气发电利用可减少外来电能消耗,对发电机余热高效回收利用,可为水解工艺及全厂建筑采暖供热,实现“电”和“热”两种能源的回收利用。目前,集团5座污泥处理中心均实施了热电联产工程,总装机功率达到25.6 MW。到2025年,实现5座污泥处理中心沼气的全部回收利用,沼气产量约 $8\,000\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ ,生产锅炉自用约50%,富余沼气预计年发电量 $8\,000\times 10^4\text{ kW}\cdot\text{h}$ ,二氧化碳减排量达 $4.8\times 10^4\text{ t/a}$ 。推动餐厨垃圾与污泥协同处理,到2035年,5座污泥处理中心持续提高运行负荷,预计年发电量 $1.28\times 10^8\text{ kW}\cdot\text{h}$ ,二氧化碳进一步减排。

② 推广水源热泵项目,使用可再生能源供热制冷。水源热泵作为一种高效的热能交换设备,可从再生水中获取低品位热能,经电力驱动压缩机做功输出高品位热能。冬季,提取水源中的低位热能为用户供热;夏季,将用户室内的热量提取至水源,达到制冷的效果。

集团所属再生水厂均安装并使用水源热泵系统,供办公区、生产区域的夏季制冷和冬季供暖。目前,水源热泵机房共计30个,总装机容量为37 MW,总服务面积为 $39.5\times 10^4\text{ m}^2$ 。“十三五”时期,水源热泵项目累计替代天然气 $5\,850\times 10^4\text{ m}^3$ ,二氧化碳减排量达到 $4.4\times 10^4\text{ t}$ 。此外,集团持续推进水源热泵的社会推广应用,运营东升科技园和专家国际花园/公馆3个水源热泵项目,供热、制冷面积总计 $60\times 10^4\text{ m}^2$ ,年供热、制冷总量为 $40\times 10^4\text{ GJ}$ 。“十三五”时期累计替代天然气 $6\,000\times 10^4\text{ m}^3$ 左右,二氧化碳减排量达 $4.5\times 10^4\text{ t}$ 。

③ 建设分布式光伏发电项目,实现清洁能源替代。充分利用再生水厂初沉池、曝气池、膜池、清水池等构筑物上方空间,建设光伏发电设施,实现削峰填谷、清洁发电,将污水处理厂打造成为“绿色

能源工厂”。目前,已在3座再生水厂建成光伏发电站设施,总装机容量18.7 MW,年发电量 $2\,400\times 10^4\text{ kW}\cdot\text{h}$ ,二氧化碳年减排量 $1.5\times 10^4\text{ t}$ 。到2025年,新增3座再生水厂光伏发电项目,装机容量约13.5 MW,预计年发电量 $1\,500\times 10^4\text{ kW}\cdot\text{h}$ ,二氧化碳年减排量9 000 t;到2035年,在其他具备条件的污水厂继续推广光伏发电项目,装机容量约18.5 MW,年发电量约 $1\,500\times 10^4\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。到2035年,实现光伏总装机容量约50 MW,年发电总量预计达到 $5\,400\times 10^4\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。

④ 研发应用厌氧氨氧化技术,实现滤液处理低碳运行。与传统污水处理工艺相比,厌氧氨氧化技术(Anammox)可节省20%以上的占地、投资和运行费用,节约能耗30%以上,节约药剂90%以上。在5座污泥处理中心建成世界上最大规模的厌氧氨氧化污泥消化液脱氮工程,总处理规模 $15\,900\text{ m}^3/\text{d}$ ,每年可节省电耗 $1\,500\times 10^4\text{ kW}\cdot\text{h}$ ,二氧化碳减排量9 000 t,为解决污泥高浓度消化液的世界性难题提供了一条全新、高效、可靠的技术途径。

⑤ 研发应用好氧颗粒污泥技术,实现节能降耗。好氧颗粒污泥技术是当前世界上最先进的生物处理技术之一,与传统絮状活性污泥法相比,其生化反应效率高,可实现处理水量增加20%以上,节约电耗15%以上,节约药耗50%以上。2022年8月,集团建成国内最大规模( $8\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ )的再生水厂好氧颗粒污泥城市污水处理项目,与传统活性污泥技术相比,该再生水厂每年可节约电量 $116\times 10^4\text{ kW}\cdot\text{h}$ ,减少二氧化碳排放700 t。基于该试点的成功经验,该技术在北京市某规模为 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的再生水厂进行了推广应用。

综合上述措施,2023年集团可再生能源占比已达6%。在绿能替代方面,随着后续沼气热电联产项目集中投运、餐厨协同和光伏发电项目的推广应用,预计可以完成碳中和规划目标:到2025年,碳排放强度较2020年下降10%(可再生能源占比15%以上);到2035年,碳排放强度较2020年下降20%(可再生能源占比25%以上);到2050年,碳排放强度较2020年下降80%以上(可再生能源占比80%以上)。同时,根据《北京市碳达峰实施方案》(京政发〔2022〕31号),北京市相关部门正在积极开展外部绿电进京及利用消纳工作,推动北京市完成碳达峰、碳中和目标,此举也将助力集团达成碳中和规划目标。

### 3.3 生态服务创新,实现生物固碳

① 大力推广再生水回用,促进经济循环低碳发展。建设首善一流的城市再生水运营服务体系,构建高水平、全覆盖、智慧化的再生水利用配置系统,再生水回用于景观环境、河道补水,改善了城市景观环境,具有生态环境效益;再生水回用于工业领域、市政杂用,节省了新鲜水源,间接减少了城市自来水处理设施的投资、运行及碳排放。集团年生产高品质再生水约 $10\times 10^8\text{ m}^3$ ,是北京市第二水源。针对北京水资源短缺现状,实现再生水的100%全回用。到2025年,实现工业用水应供尽供,供水覆盖率提升至100%;实现河湖、景观生态补水应补尽补,河道补水占比提升至60%;实现园林绿化用水应替尽替,再生水配置率提升到30%。到2035年,再生水管网区域补短板,形成区域性管网系统,实现工业用水应供尽供,河湖、景观生态补水应补尽补,园林绿化用水应替尽替。

② 推动污泥资源化利用,提升生态固碳能力。污泥资源化产品含有丰富的有机质、N、P、K等营养元素及植物所必需的各种微量元素,能够改良土壤结构,增加土壤肥力,促进作物的生长,并增加林木绿期。集团每年生产高品质污泥营养土40余万吨,实现100%资源化利用,广泛应用于林地、矿山修复、园林绿化等土地利用,通过污泥资源化利用实现生态固碳,实现污水处理厂向“资源工厂”转变。持续推动污泥资源化利用,到2025年本地资源化利用率达到20%以上,降低污泥资源化利用过程中的碳排放量。

2023年,生态环境部发布《关于印发<温室气体自愿减排项目方法学 造林碳汇(CCER-14-001-V01)>等4项方法学的通知》(环办气候函〔2023〕343号),公布了造林碳汇、并网光热发电、并网海上风力发电和红树林营造共4项方法学。目前我国仅此4项可进行温室气体自愿减排量核算认定和交易。集团正在积极推动再生水回用和污泥资源化利用自愿减排方法学编制,但目前国内暂无权威核算方法,北京市碳排放核算及履约相关要求也未考虑这方面碳汇,故碳排放核算未考虑再生水回用和污泥资源化利用碳汇量,仅作为支持集团实现碳中和的辅助间接措施。

#### 4 结语

综上,到2025年,集团碳排放强度将比2020年下降20%,其中存量减碳和绿能替代贡献比例各为10%。到2035年,碳排放强度将比2020年下降40%,其中存量减碳和绿能替代贡献比例各为20%。到2050年,碳排放强度将比2020年下降80%以上,其中存量减碳20%,自身绿能替代20%,根据北京市绿电消纳安排外购绿电40%,剩余20%通过购买碳汇等市场化机制完成碳中和,基本实现近零碳排放。在“增加碳汇”方面,根据再生水回用和污泥资源化利用生态碳汇属性,推动温室气体自愿减排项目方法学编制,激励企业自愿减排并通过碳排放权交易获利。

我国水务行业应致力于全生命周期的低碳转型,构建顶层设计,在水环境治理中通过管理创新、科技创新、生态服务创新加大碳减排力度,着力做好低碳运营的“减法”和开发利用再生能源的“加法”,不断实现水环境治理模式从传统的高能耗治水向低碳绿色治水转变。

#### 参考文献:

- [1] 赵刚,唐建国,徐竟成,等.中美典型污泥处理处置工程能耗和碳排放比较分析[J].环境工程,2022,40(12):9-16.  
ZHAO Gang, TANG Jianguo, XU Jingcheng, *et al.* Comparative analysis on energy and carbon emission of typical sludge treatment projects in China and the United States[J]. Environmental Engineering, 2022, 40(12): 9-16 (in Chinese).
- [2] 戴晓虎,张辰,章林伟,等.碳中和背景下污泥处理处置与资源化发展方向思考[J].给水排水,2021,47(3):1-5.  
DAI Xiaohu, ZHANG Chen, ZHANG Linwei, *et al.* Thoughts on the development direction of sludge treatment and resource recovery under the background of carbon neutrality [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(3): 1-5 (in Chinese).
- [3] 马博雅,孙立坤,杨春维.碳中和背景下我国污水处理技术思考[J].应用化工,2022,51(10):2997-3000.  
MA Boya, SUN Likun, YANG Chunwei. The feasible wastewater treatment technology in China under the background of carbon neutrality [J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(10): 2997-3000 (in Chinese).
- [4] 吕利平,李航,李伟,等.碳中和在污水处理厂的实践途径与应用进展[J].工业水处理,2022,42(11):1-6.  
LÜ Liping, LI Hang, LI Wei, *et al.* Practice approach and application progress of carbon neutrality in wastewater treatment plant [J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(11): 1-6 (in Chinese).
- [5] 宋新新,刘杰,林甲,等.碳中和时代下我国能量自给型污水处理厂发展方向及工程实践[J].环境科学学报,2022,42(4):53-63.  
SONG Xinxin, LIU Jie, LIN Jia, *et al.* The development direction and practice of energy self-sufficiency sewage treatment plants in China under carbon neutral era [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(4): 53-63 (in Chinese).
- [6] 谢铮铮,刘刚.城市污水处理厂碳中和路径解析[J].环境工程,2023,41(9):181-186.  
XIE Chengcheng, LIU Gang. Road map for constructing carbon neutral wastewater treatment plants [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(9): 181-186 (in Chinese).
- [7] 孙猛,杨佳林,肖彭誉,等.城市污水低碳和资源化技术进展与新趋势[J].环境工程学报,2023,17(6):1748-1760.  
SUN Meng, YANG Jialin, XIAO Pengyu, *et al.* Progress and new trend of low carbon and resource recovery technologies for municipal wastewater treatment plants [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(6): 1748-1760 (in Chinese).

作者简介:姚大伟(1981-),女,河北保定人,硕士,工程师,主要研究方向为碳中和、污水及污泥处理及其资源化利用。

E-mail: yaodw@bdc.cn

收稿日期:2024-01-02

修回日期:2024-04-10

(编辑:丁彩娟)