

设计经验

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2024. 24. 007

城镇供水系统低碳优化设计策略与应用

陈积义¹, 刘 阳^{1,2}, 施 周², 文字鸿¹, 龙毅湘¹, 吴阳春¹,
吴未红¹, 王 湘¹

(1. 湖南省建筑设计院集团股份有限公司, 湖南 长沙 410012; 2. 湖南大学 土木工程学院,
湖南 长沙 410082)

摘 要: 从城镇供水系统工艺特征角度开展了碳排放核算边界分析和特征识别,供水系统因处理工艺特点其主要碳排表现形式为间接碳排放,其中因购买电力而产生的碳排为主要碳排构成,其次为药耗及物料运输。从优化设计角度系统归纳提炼了减碳、替碳技术策略(减碳方面主要为需求减少、系统优化、能效提升等,替碳方面主要为光伏发电、水源热泵等),并以实际新建项目为例开展低碳优化设计。核算发现,设计阶段的低碳设计优化是决定案例水厂低碳运行的关键因素,采取精细化设计策略能最大程度带来减碳的投入产出比。基于减碳和替碳技术措施的集成应用,该案例水厂降碳比达到39.7%,其中精细化设计贡献率为61.94%,光伏发电技术贡献率为17.41%,精细化管控贡献率为17.65%,水源热泵技术贡献率为3%,通过投入产出分析,该项目低碳化设计内部收益率约27%。

关键词: 供水系统; 碳排放特征; 优化设计; 核算方法

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)24-0046-07

Low-carbon Optimization Design Strategy of Urban Water Supply System and Its Application

CHEN Ji-yi¹, LIU Yang^{1,2}, SHI Zhou², WEN Yu-hong¹, LONG Yi-xiang¹,
WU Yang-chun¹, WU Wei-hong¹, WANG Xiang¹

(1. Hunan Province Architectural Design Institute Group Co. Ltd., Changsha 410012, China;
2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: From the perspective of process characterization of urban water supply system, this study conducted boundary analysis and developed a framework for carbon accounting. The primary form of carbon emission in water supply system was indirect emissions, with electricity consumption being the dominant carbon hotspot, followed by chemical consumption and material transportation. From the perspective of optimization design, the strategies for carbon reduction and carbon replacement were systematically summarized and refined. The key technical strategy for carbon reduction included demand reduction, system optimization, and energy efficiency improvements. Regarding carbon replacement, the main strategy involved technologies such as photovoltaic power generation and water source heat pump. A low-carbon design optimization was implemented using a newly built project as a case study. Analysis of

the carbon accounting research indicated that low-carbon optimization during the design stage is a critical factor in achieving low-carbon operation for the waterworks. Adopting a refined design strategy maximized the input-output ratio of carbon reduction. By integrating carbon reduction and replacement technologies, the carbon reduction ratio of the waterworks in this case reached 39.7%, with a contribution rate of 61.94% for refined design, 17.41% for photovoltaic power generation technology, 17.65% for refined control, and 3% for water source heat pump technology. Furthermore, input-output analysis revealed an internal rate of return (IRR) of approximately 27% for the low-carbon design measures applied to this project.

Key words: water supply system; carbon emission characteristics; optimize design; accounting method

供水系统作为保障城镇居民正常生活的重要基础设施,实现全生命周期低碳设计及运行对于城乡建设领域“双碳”目标的完成具有重要意义。根据2018年《世界能源展望》(WEO),水务行业电力消耗约占全球电力消耗的4%,温室气体排放量约占总量的3%^[1]。城镇水务系统一方面面临扩容增量、支撑配套城镇化发展的重任,另一方面则面临减碳/降碳窗口期短、任务重的现状^[2]。在新型城镇化建设背景下,从设计前端开展基于低碳理念的优化设计,将是城镇水务行业实现节能降碳的重要途径。现阶段,对城镇水务系统降碳策略研究及水厂优化策略降碳效果鲜有报道,为此从城镇供水行业碳排放特征分析角度切入对其开展系统研究,并以某新建水厂为例,开展低碳优化设计策略比选量化研究和技术经济分析,以期对市政供水项目低碳化设计提供新的思路。

1 供水行业碳排放特征分析

1.1 核算方法与边界

碳核算是城镇供水系统实现碳减排的基础条件,应贯穿于全生命周期。在我国,供水系统核算温室气体排放量主要参考活动因子法^[3]。在确定核算方法的基础上,根据城镇供水系统组成特征,可将核算边界按照供水流程分为4个边界系统:①构建从水源到水龙头的全系统工程核算边界,将供水系统视为整体进行评价,以水源-水厂-输配水-用户为全系统,碳排放来源分别为电耗、药耗、物料运输;②构建以厂站工程为主的核算边界,按从水源取水到水厂净化进行划分,碳排放来源分别为电耗、药耗、物料运输;③构建以管网(市政管网)为主的核算边界,从水厂出水到二次供水调节水池进行

划分,碳排放来源主要为电耗;④以二次供水为对象,从二次供水调节水池到用户进行划分,碳排放来源主要为电耗。针对不同的核算边界,可以分别核算其范围内的碳排放总量和强度,以便清晰地识别各系统范围内的碳足迹。

电耗、药耗及物料运输产生的碳排放量核算公式^[4]如下:

$$CES_d = (E_d \cdot EF_d) / Q \quad (1)$$

$$CES_{cl} = \sum_{i=1}^n (M_{cl,i} \cdot EF_{cl,i}) / Q \quad (2)$$

$$CES_{ys} = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^l (M_{ys,k,j} \cdot L_{ys,k,j} \cdot EF_{ys,j}) / Q \quad (3)$$

式中: CES_d 为电耗碳排放强度,kgCO₂-eq/m³; E_d 为评价年内系统总耗电量,kW·h; EF_d 为电力消耗碳排放因子,kgCO₂-eq/(kW·h); Q 为评价年内处理水量,m³; CES_{cl} 为药耗生产碳排放强度,kgCO₂-eq/m³; $M_{cl,i}$ 为评价年内第*i*种药剂使用量,kg; $EF_{cl,i}$ 为第*i*种药剂碳排放因子,kgCO₂-eq/kg; CES_{ys} 为物料运输碳排放强度,kgCO₂-eq/m³; $M_{ys,k,j}$ 为评价年内第*k*次运输中使用第*j*种方式的运输材料总量,t; $L_{ys,k,j}$ 为评价年内第*k*次运输中使用第*j*种方式的运输距离,km; $EF_{ys,j}$ 为第*j*种运输方式的碳排放因子,kgCO₂-eq/(t·km)。

1.2 碳排结构分析

根据上述分析,供水系统碳排放来源因其核算边界不同而呈现不同的碳排放特点,其主要来自三方面:一是电耗产生的间接碳排放;二是药耗产生的间接碳排放;三是物料运输产生的间接碳排放。从供水系统工艺流程来看,相较于污水处理工艺,其工艺段鲜有生化反应单元,输配水环节主要依靠动力驱动,仅备用电源(柴油机发电)或高有机质含

量污泥会产生直接的碳排放,参考《室外给水设计标准》(GB 50013—2018),我国大部分水厂均按双电源设计供电,启动备用电源的概率很低,其碳排放量可忽略不计;再者,城市水厂运行过程中,若污泥含有大量的有机物,主要归因于原水有机质大幅超标,在此情况下,该水源已经不适合作为饮用水水源,因此其直接碳排放也可以忽略。故供水系统中归属于排放主体自身活动而产生的碳直排影响在研究中远均可忽略。

根据供水系统主要碳排特点及图1所示供水系统碳排放IPO量化计算示意图,控制供水系统碳排放量应以减少电耗、药耗及材料运输为主要目的,间接实现减碳。

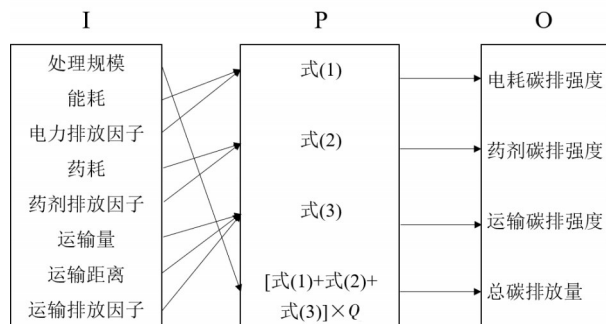


图1 供水系统碳排放IPO量化计算示意

Fig.1 Quantitative calculation diagram of carbon emission in water supply system

2 供水系统降碳策略及技术路径

从工程全生命周期视角看,供水系统包含建设阶段、运维阶段和资产拆除阶段,虽然运维阶段碳排放量在工程全生命周期中占比最高^[4],但由于设计策略直接决定了项目的资源消耗与运维特性,设计阶段的降碳策略运用对运维阶段系统降碳效能的影响不容忽视。从郴州市东江引水工程案例来看,在设计阶段,通过优选高海拔优质水源,采用全程重力自流供水方案,项目投产后吨水电耗仅为湖南省常规水厂的3%,节能降碳效能明显。因此,在实际项目设计过程中应充分考虑低碳化运维的影响因素,在保证水质安全的前提下,从规划设计阶段开展系统化的降碳决策分析,控制系统的整体电耗和药耗水平,通过低碳优化设计降低供水系统的碳排放水平。基于以上碳排特征结构分析,将供水系统降碳途径具体归结为减碳、替碳、碳汇三大类型。

2.1 减碳

① 需求减量

a. 节水控制:采用节水卫生器具,实行DMA分区计量,开展合理梯度计价,对二次供水单元实行高品质水压控制^[5]。

b. 漏损管控:实施管网更新,采用先进阀门、计量设备、水压水质监测设备,优化调控水厂加压压力,安装物联网感知设备以提高管网信息反馈水平等^[6-7]。

c. 自用水量控制:设计过程中实行排泥水零排放,实现全回用,深度处理单元敷设超越管等措施减少自用水量。

d. 非传统水源利用:提高雨水、再生水的利用率,减少传统自来水需水量^[8]。

城市用水需求量的减少能从根本上降低水产水规模,从而减少供水系统全流程建设和运行成本,进而达到减少电耗、药耗等碳排放的目的。

② 系统优化

a. 优选水源:优先选择高水头、水质优良、距用水区近的水源。

b. 合理分区:充分考虑地形地势及距离等特点,科学分区,有效降低系统能耗。

c. 低碳优化设计:以低碳化为目标,采用AI算法辅助决策,科学制定管网方案,可较大程度上实现节能减碳目标^[9]。

将供水系统视为一个系统工程整体考虑,从水源选择、供水分区划分、管网优化布置等方面开展低碳优化设计,减少系统能耗、药耗实现碳减排。

③ 能效提升

a. 选用新型低碳工艺设备:选用效率更高、能耗更少的高效处理工艺或新型设备^[10]。

b. 采用精细化设计:充分调研和预测水质、水量、水位变化趋势,优化选泵参数,根据实时采集的信息优化工艺运行参数,减少不必要的能耗与药耗^[11-12]。

c. 采用更为节能的设备和集成化技术:采用永磁电机、变频技术、智能双曲变频泵、数字泵等^[13-14],降低能耗。

d. 采用数智化设计:利用BIM数字孪生技术实现建造和运维过程的可视化,植入智能加药、智能排泥、智能反冲洗、智能消毒、泵组优化智能控制等信息化模块,减少系统电耗和药耗^[15-16]。

采用新型工艺和设备提升设备能效比,降低电耗,优化处理环节,如调整滤池的反冲洗频次、增加膜法的前处理工艺,以降低其能耗,实现碳减排。此外,增设智慧水务信息模块,利用数字化技术降低运维管控成本,从而实现碳减排。

2.2 替碳

① 光伏发电技术

水厂为光伏技术的使用提供了很好的应用场景,特别是有一、二泵房的水厂,由于水厂耗电量比较大,光伏系统产生的电能一般都可以自行消纳,具有良好的投资效益^[4]。使用低碳的电能可直接降低供水系统的碳排放量,如架设光伏、在供水系统中设置水轮发电机,实现可再生能源的利用;以及外购水电、生物质能电等低排放因子的电能。

② 水源热泵技术

水源热泵技术能够以较少的能量,从水中提取较大的热能或向水中转移较大热能,具有良好的节能效果^[4]。水源热泵能直接提取水厂厂界内地下水热源或周边取水热源,从而实现综合楼等辅助生产设施的冷热源供给。

③ 余能回收技术

通过管道式安装水轮发电机,可利用市政管网富余压力发电^[4],市政管网余压通常被浪费,设置余能回收系统可回收富余能量,减少系统电耗,实现碳减排目的。

2.3 碳汇

采用植物碳汇技术,在厂区绿化设计中,设计高低乔灌木错落搭配,贯彻海绵理念,利用绿色生物滞留设施形成固碳效应。从目前的研究情况来看,供水系统实现自身的碳平衡比较困难,近期可通过减碳、替碳行动来实现减碳,远期较理性的做法还是通过植树造林、植被恢复等措施,吸收大气中的二氧化碳,从而最终实现行业的碳中和。

3 低碳优化设计实践

3.1 项目概况

某水厂总处理规模 $40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 近期规模为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 采用取水方式优化、工艺优选、构筑物叠合式节地设计、生产废水全收集全处理、厂区内种植乔灌木形成碳汇等策略确定总体设计方案, 具体的工艺流程如图2所示。根据供水系统核算边界分析, 该案例核算边界为取水到送水泵房产水工艺段。

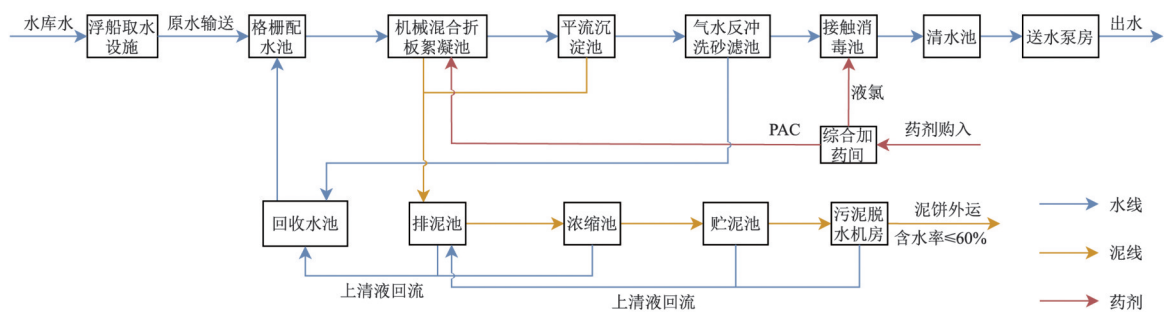


图2 案例水厂工艺流程

Fig.2 Process flow diagram for the case waterworks

3.2 原设计碳排放解析

根据供水系统碳核算方法及案例水厂的核算

边界,收集该水厂原设计方案的碳排放活动数据,具体如表1所示。

表1 某水厂原设计方案碳排放活动数据

Tab.1 Carbon emission activity data of original design scheme for the case waterworks

项目	近期实际供水量/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	电耗总计/ ($\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{d}^{-1}$)	PAC投加量/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	液氯投加量/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	污泥产量/ ($\text{t} \cdot \text{d}^{-1}$)	药剂运输距 离(估算)/km	沉泥运输距 离(估算)/km
数值	20	64 934	20(均值)	3(均值)	13.65	15	20

根据核算方法,将案例数据代入核算公式,计算结果如下:电耗产生的间接碳排放量预计为 $2\,035 \text{ tCO}_2\text{-eq/a}$ (占比 94.84%),其中取水泵站为 $6\,510 \text{ tCO}_2\text{-eq/a}$ (占比 30.34%),给水处理(含配套)为 $3\,590$

$\text{tCO}_2\text{-eq/a}$ (占比 16.73%),送水泵站为 $10\,250 \text{ tCO}_2\text{-eq/a}$ (占比 47.77%);药耗产生的间接碳排放量约 $1\,100 \text{ tCO}_2\text{-eq/a}$,占比 5.13% ;物料运输产生的间接排放量预计 $6 \text{ tCO}_2\text{-eq/a}$,占比 0.03% 。原设计中电耗与

药耗产生的碳排放量占比较大,是该水厂的主要碳排放量,因此通过节能控药策略是实现低碳优化设计的主要思路。

3.3 设计优化策略及效能分析

3.3.1 优化措施

通过深入研究项目情况,在原设计已进行系统优化设计、排泥水回用、节水控制和总体供水规模需求减量控制基础上,从减碳和替碳两方面进行优化设计。

① 减碳措施

a. 取水泵房精细化设计,优化选泵。原设计根据水库死水位 55 m 进行选泵($Q=3\,055.56\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=180\text{ kPa}$ 、 $N=400\text{ kW}$,共设 4 台,3 用 1 备),深入调研发现,该水库为调节型水库,平时均按正常运行水位 70 m 运行,只有待进水池检修时,水库水位才会随运行时间的推移逐步降低,低水位运行时间最长为 7 d,因此,原设计按最不利因素考虑,所选水泵扬程偏大,运行效率较低。优化设计中,根据高水位(70 m)选泵,死水位(55 m)校核,水泵参数 $Q=3\,240\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=160\text{ kPa}$ 、 $N=200\text{ kW}$,共 4 台(3 用 1 备),水泵功率明显减小,具有良好的节能降碳效益。经核算,年电耗减少 $356.72\times 10^4\text{ kW}\cdot\text{h}$,碳排放量减少 $3\,063\text{ t CO}_2\text{-eq}$,反哺减碳效能贡献率为 14%,年运行成本节约 249 万元。

b. 送水泵房精细化设计,优化选泵。原设计根据经验选定日变化系数为 1.4(GB 50013—2018 中 4.0.9 条规定日变化系数取 1.2~1.6),选定的水泵 Q 为 $4\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 、 H 为 420 kPa 、 $N=630\text{ kW}$,共设 4 台(3 用 1 备)。深入调研发现,该市现有水厂最高日时变化系数约 1.28,因此,水泵的选型可按时变化系数为 1.28 来考虑(该水厂建成运行后,城市供水规模更大,变化系数将更小),水泵 $Q=3\,600\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=350\text{ kPa}$ 、 $N=500\text{ kW}$,共设 4 台(3 用 1 备)。可以看出,优化设计后水泵流量和运行功率都将减小,有利于降能耗和减碳排。通过核算,年碳排放量减少 $2\,211\text{ t CO}_2\text{-eq}$,反哺减碳效能贡献率为 10%,年运行成本节约 180 万元/a。

c. 精细化管控,降本增效。设计采用智慧化运管平台辅助运维,实现智能加药絮凝、智能排泥、智能反冲洗、智能消毒、泵组优化智能控制等。参照《城镇智慧水务技术指南》,平台介入后各智能模块可节省的能耗比例^[17]如表 2 所示(研究中均取平均

值计算)。总体估算如下:全年药耗节省 192.36 t,年碳排放量减少 $118.3\text{ t CO}_2\text{-eq}$,减碳效能贡献率为 0.55%,年运行成本节约 47.40 万元;全年电耗减少 $162.84\times 10^4\text{ kW}\cdot\text{h}$,年碳排放量减少 $1\,398.3\text{ t CO}_2\text{-eq}$,反哺减碳效能贡献率为 6.52%,年运行成本节约 113.99 万元;全年材料运输间接碳排放量减少 $1.0\text{ t CO}_2\text{-eq}$,年运行成本节约 1.49 万元。

表 2 智能模块能耗节省比例

Tab.2 Energy consumption savings ratio of intelligent module

工艺环节	可采用的智能控制	预计节约的能耗或药耗/%
原水取水	水平衡智能控制	电耗 2~3
	泵组优化智能控制	电耗 5~15
絮凝沉淀	智能加药絮凝	药耗 5~20
	智能排泥	能耗及药耗 5~10(节约排泥水 10%~20%)
过滤	智能反冲洗	电耗 5~10
消毒	智能消毒	药耗 3~6
加压输配	泵组优化调度模型	电耗 5~15

② 替碳措施

a. 光伏发电技术。利用综合楼、絮凝沉淀清水池、滤池、脱水机房、加药间、变配电间屋顶(建筑屋面总面积 $11\,200\text{ m}^2$)铺设 550 Wp 单晶硅组件,共计 3 213 块,采用“自发自用、余电上网”的消纳模式,可实现 1.767 MW 屋顶分布式光伏发电规模。光伏发电系统总投资约 800 万元,建成后年均发电量约 $172.6\times 10^4\text{ kW}\cdot\text{h}$,占项目年总用电量的 10.26%,年碳减排量约 $1481.9\text{ t CO}_2\text{-eq}$,减碳效能贡献率为 6.9%,年运行成本节约 120.82 万元。

b. 水源热泵技术。假设每年 12 月—次年 2 月进行供热,7 月—9 月进行制冷,提取温差为 $5\text{ }^\circ\text{C}$,提取水量为日处理水量的 10%,则冬季向外供热时碳减排量为 $4\,432\text{ t CO}_2\text{-eq}$ 、夏季向外供冷时碳减排量为 $654\text{ t CO}_2\text{-eq}$,全年碳减排量为 $5\,077\text{ t CO}_2\text{-eq}$,碳减排强度为 $0.0695\text{ kgCO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$,碳减排贡献率高达 23.66%。但是,在实际运行过程中因其低品位热源只能用作厂区内综合楼的冷热源供给,并不能完全消纳全部能量,其最终减碳投资效能受应用终端影响。实际计算中,只考虑综合楼空调动力系统的替碳作用,年度碳排放量减少 $254\text{ t CO}_2\text{-eq}$,反哺减碳 1.19%。

3.3.2 优化后碳排情况

通过精细化设计、智慧运维、绿能替代等策略

的应用,该设计方案碳排放量化数据如表 3 所示。

表 3 优化设计后案例水厂碳排情况
Tab.3 Carbon emission of the case waterworks
after optimized design

项目		碳排放强度/ (kgCO ₂ -eq· m ⁻³)	年碳排放量/ (10 ⁴ tCO ₂ -eq· a ⁻¹)	比例/%
电力	取水泵站	0.037	0.268	20.73
	给水处理 (含配套)	0.039	0.282	21.82
	送水泵站	0.088	0.644	49.82
材料	药剂	0.013	0.098	7.58
	运输	0.000 02	0.000 1	0.01
给水污泥	运输	0.000 1	0.000 5	0.04
总计		0.177	1.292 6	100.00

3.3.3 投资回报分析

相较于原设计方案,通过精细化设计、智慧运维、绿能替代等技术策略,该工程系统减碳 39.7%,投资成本增加 2 380 万元,年运行成本节约 734 万元。通过投资回报分析,在项目规划设计阶段引入低碳设计优化理念尤为重要,不仅能较大程度节省造价,且具备明显的减碳潜力和较低的边际成本(内部收益率为 27%)。因此,设计阶段的低碳优化设计是决定项目低碳运行的关键因素,通过精细化设计、优化选泵能实现较高的减碳能效比。

4 结论与展望

供水系统碳排结构特征分析表明,供水系统的碳排主要为间接排放,主要包括电耗、药耗及物料运输产生的间接碳排。案例水厂实践表明,在保证水质安全的前提下,采取精细化设计、智慧化管控、光伏发电、水源热泵等低碳策略,降碳比达到 39.7%,减碳技术应用内部投资收益率为 27%,具有较好的降本增效协同减碳效益。供水系统是一个完整的闭环系统,目前基于供水系统的全流程碳排放分析和技术集成应用还有待进一步研究,且送水泵房的核算边界在管网端的重复计算问题亟待进一步厘清。

参考文献:

[1] IEA. World Energy Outlook 2018[EB/OL]. (2018-11-01)[2023-10-11]. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>.
[2] 刘然彬,于文波,张梦博,等. 城镇水务系统碳核算与

减碳/降碳规划方法[J]. 中国给水排水,2023,39(8): 1-10.
LIU Ranbin, YU Wenbo, ZHANG Mengbo, *et al.* Carbon accounting and reduction planning in urban water sector[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39 (8):1-10 (in Chinese).
[3] 李成,马顺君,贺鑫,等. 典型给水厂运行碳排放核算与碳减排路径[J]. 给水排水,2023,49(7):1-7.
LI Cheng, MA Shunjun, HE Xin, *et al.* Carbon emission calculation and carbon emission reduction path of typical waterworks operation[J]. Water & Wastewater Engineering,2023,49 (7):1-7 (in Chinese).
[4] 中国城镇供水排水协会. 城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2022:71-88.
China Urban Water Association. Guidelines for Carbon Accounting and Emission Reduction in the Urban Water Sector [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022: 71-88 (in Chinese).
[5] 赵锂,刘永旺. 建筑水系统微循环重构关键技术研究与应用[J]. 给水排水,2019,45(1):1-3.
ZHAO Li, LIU Yongwang. Research and application on microcirculation reconstruction technology of building water system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019,45(1):1-3 (in Chinese).
[6] 杨海燕,侯少轩,张学茸,等. 基于点-线-网-智慧的供水管网漏损系统化控制措施研究[J]. 给水排水, 2022,48(9):130-138.
YANG Haiyan, HOU Shaoxuan, ZHANG Xuerong, *et al.* Research on systematic control measures for leakage of water supply network based on point-line-net-wisdom [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48 (9) : 130-138 (in Chinese).
[7] 周晨. 沈阳市和平区供水管网节能及减漏改造方案研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022: 36-52.
ZHOU Chen. Research on Energy Saving and Leakage Reduction Modification Scheme of Water Supply Network in Heping District of Shenyang [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022: 36-52 (in Chinese).
[8] 孙晓峰,王金丽,黄鹏,等. 天津生态城三区合一水资源平衡与高效利用模式[J]. 中国给水排水,2020,36 (2):26-33.
SUN Xiaofeng, WANG Jinli, HUANG Peng, *et al.* Balanced and efficient utilization model of water resources in the three districts of Tianjin Eco-city [J].

- China Water & Wastewater, 2020, 36(2): 26-33 (in Chinese).
- [9] 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, 49(7): 135-139.
- 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, 49(7): 135-139 (in Chinese).
- [10] 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, 48(1): 1-12.
- 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, 48(1): 1-12 (in Chinese).
- [11] 周飞祥,闫一,刘广奇. 常州市城乡一体化供水中需水量预测的研究与思考[J]. 给水排水, 2020, 46(6): 42-47.
- ZHOU Feixiang, YAN Yi, LIU Guangqi. Research and reflection on the water demand prediction in urban and rural integrated water supply in Changzhou [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(6): 42-47 (in Chinese).
- [12] 赵潇然,汪力,李阔,等. 供水系统水泵机组节能改造方法与工程实例[J]. 给水排水, 2022, 48(2): 1-5, 12.
- ZHAO Xiaoran, WANG Li, LI Kuo, *et al.* Methods and applications on energy conserving reformation of pump units in water supply system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(2): 1-5, 12 (in Chinese).
- [13] 谢社平,吴桂珍. 高效永磁同步电机在泵站节能改造中的应用[J]. 给水排水, 2021, 47(S1): 34-37.
- XIE Sheping, WU Guizhen. Application of high-efficiency permanent magnet synchronous motor in energy-saving reconstruction of pumping station [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(S1): 34-37 (in Chinese).
- [14] 冯亚军,孙倩雯,于广其,等. 高压变频器技术在水厂水泵改造中的应用[J]. 净水技术, 2021, 40(6): 154-157.
- FENG Yajun, SUN Qianwen, YU Guangqi, *et al.* Application of high voltage inverter technology in pump reconstruction of water treatment plant [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(6): 154-157 (in Chinese).
- [15] 游庆元,吴胜华,陈超明. 管网压力控制模型与供水系统低碳实时调度——智慧水务在低碳实时调度领域的应用[J]. 城镇供水, 2019(5): 35-41.
- YOU Qingyuan, WU Shenghua, CHEN Chaoming. Pipeline network pressure control modeling and low-carbon real-time dispatch of water supply systems—application of intelligent water services in low-carbon real-time dispatch [J]. City and Town Water Supply, 2019(5): 35-41 (in Chinese).
- [16] 邓京楠,罗惠云,王宇婷,等. BIM技术在智慧水厂改扩建中的研究与应用[J]. 净水技术, 2019, 38(10): 8-15.
- DENG Jingnan, LUO Huiyun, WANG Yuting, *et al.* Study and application of BIM technology on reconstruction and expansion of smart waterworks [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(10): 8-15 (in Chinese).
- [17] 中国城镇供水排水协会. 城镇智慧水务技术指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023: 60-72.
- China Urban Water Association. Guidelines for Urban Smart Water [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2023: 60-72 (in Chinese).

作者简介:陈积义(1983—),男,湖南常德人,硕士,教授级高级工程师,国家注册设备工程师(给水排水),国家注册咨询工程师(投资),主要从事给水排水设计和研究方面的工作。

E-mail:252510952@qq.com

收稿日期:2023-12-12

修回日期:2024-01-30

(编辑:丁彩娟)