

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.12.007

基于水-能-碳视角的供水系统碳足迹分析

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

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

摘 要: 本文根据城市供水系统工程项目类型构建了两种不同功能碳排放量化核算模型,并开展实际项目应用,在新建项目设计方案比选中同步实现量化分析。通过核算分析,运维阶段的碳排放量占全生命周期碳排放量的78.91%,其中电耗碳排放量占86.82%,药耗碳排放量占13.12%,是碳排放控制的重点。从处理工艺流程角度进行量化分析,送水泵房、取水泵房为主要的能耗碳排放单元,其净碳排放量分别占制水工艺段的51.91%、21.64%,为减碳的重点环节;模型应用案例水厂采取优选水泵、智慧化设计等典型减碳技术后,碳排放强度减少38.30%;在既有厂站设备更新项目中采用送水泵房碳排放历史数据与供水量、出厂平均水压以及原水pH进行多元线性回归分析,发现其碳排放强度与供水总量、出厂平均水压、pH等呈现显性相关。为进一步探究供水系统区域碳排放特点,本研究对南方某省自来水厂能耗进行核算评估及主要影响因素分析,结果表明,不同区域之间因地形、取水方式、供水方式、制水工艺不同而呈现显著的碳排放差异,自来水厂能源碳排放量与城市服务人口、供水规模、地区生产总值(GDP)、供水普及率等社会因素呈现显著性相关。

关键词: 供水系统; 碳排放评估; 水-能-碳

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)12-0044-07

Carbon Footprint Analysis of Water Supply System Based on Water-Energy-Carbon Perspective

LIU Yang^{1,2}, WEN Yuhong², CHEN Jiyi², WU Weihong², WANG Xiang²,
WU Yangchun², SHI Zhou¹

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

Abstract: This study developed two quantitative accounting models for carbon emissions based on water supply system project types and applied them to practical projects. In the selection of new project designs, quantitative analysis was integrated to compare alternatives. The results revealed that the operational phase contributed 78.91% of total life-cycle carbon emissions, with electricity consumption (86.82%) and chemical consumption (13.12%) identified as key emission sources. From a process flow perspective, the delivery pump house and intake pump house were the primary energy-intensive emission units, accounting for 51.91% and 21.64% of net carbon emissions in the water treatment process, respectively, marking them as key nodes for carbon reduction. The application of these models enabled

通信作者: 施周 E-mail: zhous61@163.com; 文字鸿 E-mail: wenyuhong96@163.com

the case study waterworks to reduce carbon emission intensity by 38.30% through optimized pump selection and the integration of smart design. For the equipment upgrades of existing waterworks (water supply station), a multiple linear regression analysis of historical carbon emission data from delivery pump stations, combined with water supply volume, average outlet pressure, and raw water pH, demonstrated significant correlations between carbon emission intensity and these variables. To explore regional carbon emission characteristics, energy consumption and influencing factors were evaluated for waterworks in a southern Chinese province. The results highlighted significant emission variations across regions due to topography, water intake methods, supply modes, and treatment processes. Additionally, energy-related carbon emissions in waterworks showed strong correlations with social factors such as the urban population served, water supply capacity, GDP, and water supply coverage rate.

Keywords: water supply system; carbon emission assessment; water-energy-carbon

城市供水系统是现代社会正常运转的生命线,也是能源消耗的主要组成部分^[1]。在水资源短缺、水源污染严重和城市饮用水生产环节减少碳排放量等多重制约下,为城市群供应符合标准的饮用水是城镇供水系统面临的现实挑战。随着国家“双碳”发展战略和城乡建设领域设备更新方案的出台,城市供水系统也将面临节水节能减碳的现实需求,如何从水、能、碳协同控制视角,全过程厘清城市供水系统碳足迹规律,识别节能减碳热点环节,构建全生命周期设计预测和现状运维碳排放量化核算模型并开展案例应用,为省级范围开展碳排放规律分析提供依据和建议,成为本研究的出发点。

1 城市供水系统全流程碳排放核算模型

1.1 规划设计阶段预测核算模型

城市基础设施系统的脱碳对于实现全球气候目标至关重要。如何在满足水质、水量、水压等安全服务目标和自身安全生产的基础上,实现全生命周期低碳排放是城市供水系统当前的重要任务。张怀宇^[2]分析了供水系统碳排放的计算方法,提出适用的全生命周期碳排放灰箱模型,并以虚拟县镇和虚拟城市等2个供水系统进行应用分析,获取了碳排放的影响因子和全国供水系统的碳排放情况。有效的核算评估模型可为设计咨询决策提供碳排放量化分析的数据基础,结合供水系统处理特点,供水系统碳排放主要体现为制水环节(含取水)、输配水环节、二次供水环节的电耗、药耗及物料运输产生的间接碳排放。参照《城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南》^[3],将供水系统碳排放量按照工艺流程分为全生命周期不同单元,具体如下:

① 规划建设阶段。该阶段主要预测项目施工周期内的碳排放量,包括化石燃料碳排放、电力消耗间接碳排放、材料消耗间接碳排放、运输间接碳排放。根据活动数据获取的难易度不同,碳排放量的计算方法可分为3种:a. 数据清单核算法,采用活动数据与相应排放因子进行核算;b. 根据设计规模进行估算;c. 根据投资金额进行估算。

② 运行维护阶段。该阶段核算内容根据供水子单元不同而略有差别:a. 制水环节(含取水)主要核算电耗、药耗、物料运输导致的碳排放量,以及碳补偿和碳汇量;b. 输配水环节主要核算电耗碳排放量;c. 二次供水环节主要核算电耗碳排放量。

③ 资产重置及拆除阶段。该阶段碳排放量核算方法与规划建设阶段类似,主要包括:a. 化石燃料碳排放量;b. 电耗间接碳排放量;c. 运输间接碳排放量;d. 材料回收碳补偿量(需有明确的建筑材料回收利用方案,否则替碳量不应计入本阶段)。

1.2 既有厂站工程运维阶段碳排放核算评估模型

在城市更新和设备更新背景下,面对既有供水系统厂站工程节能减碳改造现实需求,需结合厂区处理工艺,构建从取水到制水再到输配端的碳排放核算评估模型,便于识别碳排放重点环节和评估碳排放现状水平,利于从低碳化角度开展设备更新和工艺技改升级。结合现有核算评估方法^[3],构建既有厂站碳排放工艺单元核算内容:①取水设施主要核算电力消耗和材料消耗。②水处理设施的碳排放单元主要有格栅、混合絮凝沉淀、过滤、消毒、清水池、臭氧氧化、活性炭过滤、污泥处理及其他,主要核算电力消耗、材料消耗、运输过程的碳间接排

放量,以及化石燃料消耗的碳直接排放量。③碳减排量主要核算电能回收碳补偿量、热能回收碳补偿量以及植物碳汇。

2 核算模型的案例应用量化分析

在“双碳”目标和绿色发展背景下,节能减碳是实现供水行业高质量绿色转型的必经途径,碳核算评估是新(改)建项目实现碳排放控制的量化分析基础,因此从规划建设阶段预测分析和既有运行维护阶段量化评估是实现项目低碳优化设计改造的基础。通过核算模型对2个阶段进行碳足迹预演分析,其中电力排放因子参照生态环境部最新发布的全国电力平均二氧化碳排放因子(不包括市场化交易的非化石能源电量),取 $0.5942 \text{ kgCO}_2\text{-eq}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

2.1 新建项目应用场景碳排放预测分析

选取设计规模 $20 \text{ m}^3/\text{d}$ 、采用常规处理工艺的某新建给水厂工程作为研究案例,该水厂设计方案在进行水质水量调研和方案比选基础上,综合确定碳排放活动数据,具体见表1。

表1 某水厂设计碳排放活动数据

Tab.1 Design carbon activity data in a waterworks

项目	设计活动数据
药剂	聚合氯化铝(PAC) 单位投加量为 17.5 mg/L ,投加总量为 1277.5 t/a ,运输距离为 15 km
	液氯 单位投加量为 2.9 mg/L ,总投加量为 209.1 t/a ,运输距离为 15 km
运输出厂污泥	污泥总量为 4234.9 t/a ,运输距离为 20 km
厂区电耗	耗电量为 $1563.4 \text{ 万 kW}\cdot\text{h/a}$
碳补偿	厂区光伏板发电量为 $172.6 \text{ 万 kW}\cdot\text{h/a}$

在项目规划设计阶段引入碳排放核算模型,可在前期对项目全生命周期碳排放量进行预测。案例工程全生命周期碳排放情况如表2所示。其中,规划建设阶段碳排放量采用投资金额估算算法计算,资产重置与拆除阶段碳排放量按照规划建设阶段等量碳排放估算,运行维护阶段碳排放量按50年运行周期计算。从全生命周期阶段碳排放量来看,运行维护阶段碳排放量占78.91%,是主要的碳排放阶段,因此现有研究主要集中在运行维护阶段碳排放及碳减排过程。在原设计方案中,取水泵扬程和送水泵房日变化系数均按最不利情况考虑,深入调研后发现其水泵选型还存在优化空间,经精确计算后选取功率较小的水泵,可在保证供水安全的前提

下大幅降低运行维护阶段的电耗,经预测,运行维护阶段碳排放强度由原方案的 $0.2146 \text{ kgCO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$ 下降至现方案的 $0.1646 \text{ kgCO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$,降幅高达30.38%。在优化方案基础上增加光伏发电、水源热泵、智能化管控减碳技术,预测净碳排放强度为 $0.1324 \text{ kgCO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$,碳排放强度减少38.30%。

表2 案例工程全生命周期碳排放核算

Tab.2 Carbon emission accounting for the whole life cycle for case project

全生命周期	碳排放强度/ $(\text{kgCO}_2\text{-eq}/\text{m}^3)$	全生命周期排放总量/ $\text{万 tCO}_2\text{-eq}$	比例/%
规划建设阶段	—	6.46	10.55
运行维护阶段	0.1646	60.08	—
	-0.0322	-11.74	—
	0.1324	48.34	78.91
资产重置与拆除阶段	—	6.46	10.54

案例工程运行维护阶段单体构筑物年碳排放量预测如图1所示。从碳排放类型来看,电耗碳排放量最大,为 $10434 \text{ tCO}_2\text{-eq/a}$,占86.82%;药剂消耗碳排放量为 $1577 \text{ tCO}_2\text{-eq/a}$,占13.12%;运输碳排放量仅为 $7 \text{ tCO}_2\text{-eq}$,占0.06%,碳排放比例构成与现有相关研究类似^[3-4]。从厂区功能分区来看,制水处理工艺线碳排放量最大,为 $10549 \text{ tCO}_2\text{-eq/a}$,约占87.78%;污泥处理工艺线碳排放总量为 $939 \text{ tCO}_2\text{-eq/a}$,约占7.81%;办公区碳排放量为 $530 \text{ tCO}_2\text{-eq/a}$,约占4.41%。制水处理工艺线设计采用泵组优化智能控制、智能加药絮凝、智能反冲洗、智能消毒等智慧管控模块,并通过光伏发电反哺电耗,预计可形成碳减排量 $1967 \text{ tCO}_2\text{-eq/a}$,占16.37%;办公区设计采用水源热泵输出热能取代空调系统以及光伏发电反哺电耗,预计形成碳减排 $215 \text{ tCO}_2\text{-eq/a}$,占1.79%;污泥处理工艺线设计采用智能排泥以及光伏发电反哺电耗,预计可形成碳减排量 $166 \text{ tCO}_2\text{-eq/a}$,占1.38%。

进一步深化案例工程单体构筑物碳排放量核算,结果表明送水泵房、取水泵房为主要的能耗碳排放单元,其净碳排放量分别占制水工艺段的51.91%、21.64%。絮凝沉淀单元为主要的药剂碳排放单元,其净碳排放量占制水工艺段的15.63%。气水反冲洗砂滤池单元是除一、二泵房外的第三能耗单元,净碳排放量占5.51%。规划建设阶段直接

影响项目全生命周期的碳排放,因此在设计时应融入低碳化运维理念,采取精细化设计、提升设备能

效、智慧化设计、利用可再生资源等低碳策略,以有效降低项目全生命周期碳排放量^[3,5-6]。

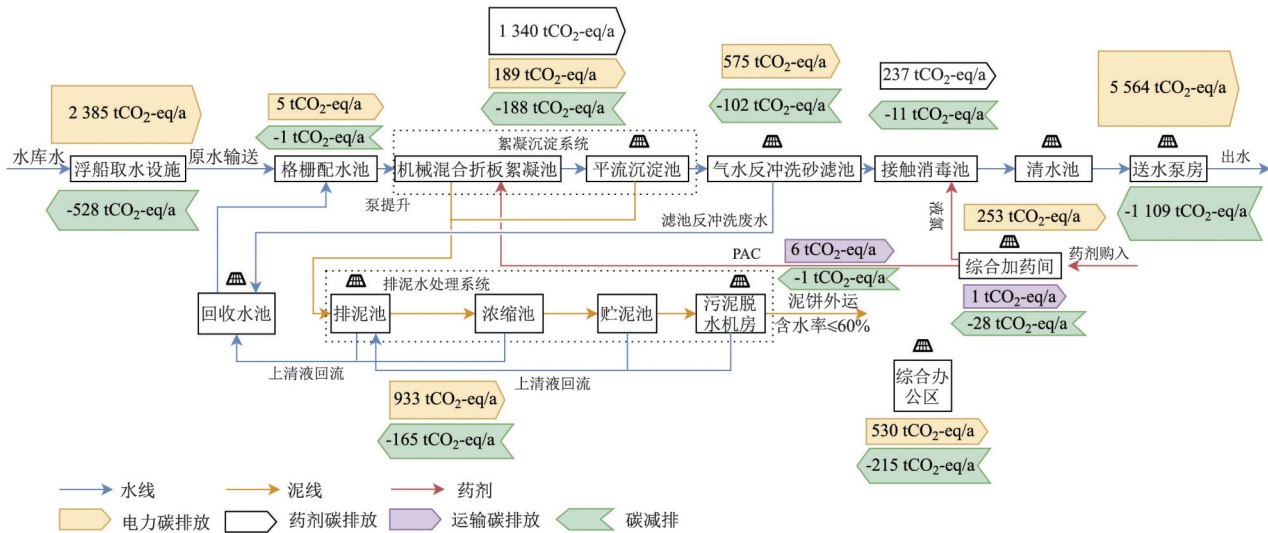


图1 案例工程单体构筑物碳排放预测

Fig.1 Carbon emission prediction for individual structures of case project

2.2 既有厂站项目应用场景碳评估分析

针对设备更新类水厂低碳化改造项目,结合上述案例厂站工程碳排放规律分析,动力消耗和药耗造成的碳排放是主要的碳排放环节,本研究获取了某给水厂送水泵房电耗及药剂投加量的实际运营数据,利用厂站工程运维阶段碳排放核算模型进行评估分析。该厂2021年—2023年月均碳排放强度如图2所示。

由图2可知,送水泵房电耗碳排放强度为 $0.083\ 2\sim0.096\ 1\ \text{kgCO}_2\text{-eq/m}^3$,月均电耗碳排放强度略有起伏,但整体较为平缓,仅在2023年8月—11月出现明显的峰值,送水泵房年均电耗碳排放强度依次为 $0.085\ 4$ 、 $0.087\ 1$ 、 $0.089\ 5\ \text{kgCO}_2\text{-eq/m}^3$ 。在药耗碳排放中,液氯碳排放强度较平缓,而PAC碳排放强度波动较大,但未发现明显的季节差异。根据分析,其原水水质存在波动,2021年—2023年的年均药耗碳排放强度依次为 $0.007\ 4$ 、 $0.009\ 8$ 、 $0.009\ 5\ \text{kgCO}_2\text{-eq/m}^3$,2022年相较于2021年涨幅较大,而后趋于平缓。整体上,该厂总体碳排放强度呈上升趋势,这是因为2022年以来该水务公司要求出厂水浊度严格限制在 $0.5\ \text{NTU}$ 以下,从而加大了投矾频率,使得PAC用量升高,同时滤池反冲洗频率加大,造成回流泵机组启闭频率和开启时间增加,总耗电量增大,总碳排放强度也相应增加。

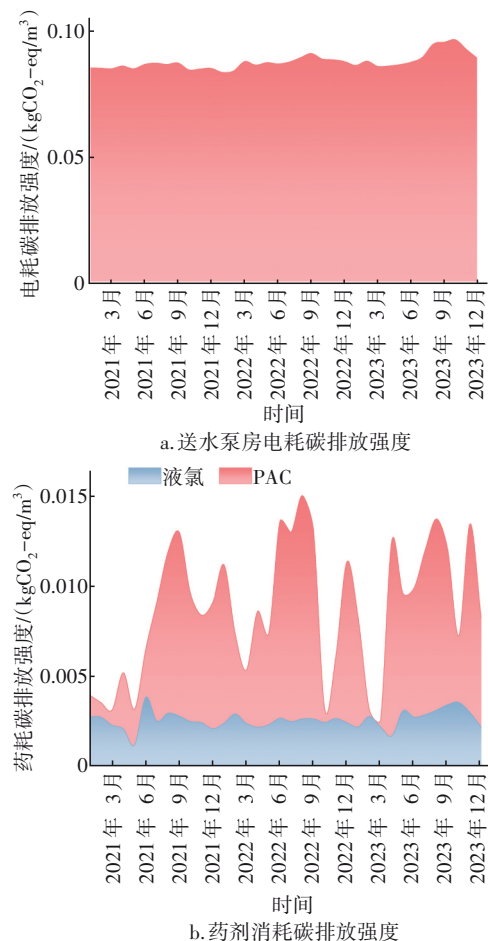


图2 某给水厂实际运行碳排放强度

Fig.2 Carbon emission intensity of actual operation of a waterworks

基于前述分析,为进一步明确各项参数对碳排放强度水平的影响,本研究选取2022年每日的原水水质参数和配水参数与日均碳排放强度指标进行相关性分析,结果如表3所示。

表3 水质参数和配水参数与碳排放强度的皮尔逊相关系数

Tab.3 Pearson correlation coefficient between water quality, distribution parameters and carbon emission intensity

项目	相关性系数		
	PAC碳排放强度	液氯碳排放强度	送水泵房电耗碳排放强度
原水浊度	0.428**	0.150**	0.032
原水氨氮	-0.020	0.226**	-0.073
原水pH	-0.055	-0.176**	0.327**
供水量	0.370**	0.122*	0.555**
出厂平均水压	0.286**	0.052	0.532**

注:*表示在置信度(双侧)为0.05时,相关性显著;**表示在置信度(双侧)为0.01时,相关性显著。

由表3可知,PAC碳排放强度主要受到原水浊度的影响($P<0.01$),一般来说原水浊度越大,为保证出水浊度满足规范要求,水厂会增加投矾频率使得PAC碳排放强度增加。此外,PAC碳排放强度还受到供水量和出厂平均水压的影响($P<0.01$)。液氯碳排放强度与3项原水指标显著相关($P<0.01$),但线性相关性不强。送水泵房电耗碳排放强度与配水参数均存在显著正相关关系($P<0.01$)。为深入分析碳排放强度与指标参数的相互关系,本研究对送水泵房电耗碳排放强度与供水量、出厂平均水压以及原水pH进行多元线性回归分析,建模前使用标化残差法对离群数据进行清洗,结果表明,多元线性回归方程拟合度 $R^2=0.586$,说明供水量和出厂平均水压可解释58.6%的送水泵房电耗碳排放强度变异,可解释性较强,供水量、出厂平均水压和原水pH均为统计性显著影响因素($P<0.001$),所选变量方差膨胀因子(VIF)均偏小,说明不同因素间共线性不强,杜宾-沃森检验值为1.490,接近2,说明观测值具备相互独立性。因此,该方程构建有效,具体如下:

$$CES_s = -0.008 + 4.418 \times 10^{-4} Q_s + 1.131 P_s + 0.006 pH_s \quad (1)$$

式中: CES_s 为送水泵房电耗碳排放强度, $\text{kgCO}_2\text{-eq/m}^3$; Q_s 为日送水规模, $\text{万 m}^3/\text{d}$; P_s 为日均供

水压力, MPa ; pH_s 为原水pH。

综上可知,给水厂运行时,运营单位需系统开展碳排放核算分析,根据核算结果可明确重点碳排放位点,做到针对性减碳;对于历史核算数据可进行纵向比较,及时反馈减碳效果,反映设备损耗,提高运营水平。在本案例中,原水水质、配水参数均为重要影响因素,建议后续运营时采取原水水质调控、合理分配输配水量、合理调控出厂水压等低碳措施,降低给水厂运营碳排放水平。

3 供水系统碳排特征解析:以南方某省为例

3.1 南方某省整体供水情况

本研究采用问卷调查的形式收集了2018年南方某省城市自来水厂的相关资料,并根据同年统计年鉴对该省供水信息进行总结。2018年,该省实际运行城市自来水厂共181座,设计供水量50.8亿 m^3/a ,实际供水量37.5亿 m^3/a ,其中设计供水能力 $<5\text{万 m}^3/\text{d}$ 的小型自来水厂占49.17%; $5\text{万 m}^3/\text{d} \leq$ 设计供水能力 $<10\text{万 m}^3/\text{d}$ 的中型自来水厂占23.20%;设计供水能力 $\geq 10\text{万 m}^3/\text{d}$ 的大型自来水厂占27.62%。取水水源以地表水为主,地表江河水占68.51%,地表水库水占26.52%,地下水水源占4.97%。绝大部分自来水厂采用常规处理工艺(81.77%),小部分自来水厂采用臭氧-活性炭深度处理工艺(9.94%)。在排泥水处理方面,36.46%的自来水厂仅简单处理后排放,35.91%未处理直接排放,17.68%经过深度处理后循环回用。

3.2 南方某省给水厂水-能-碳区域分布

根据调查问卷收集的2018年度该省自来水厂电费成本数据,按照电价为0.7元/($\text{kW} \cdot \text{h}$)折算后可得年度耗电量,以此为基础数据计算该省2018年度自来水厂能耗碳排放情况。整体上看,该省城市自来水厂平均电耗为0.3088 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,平均碳排放强度为0.1835 $\text{kgCO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$,碳排放总量为57.70万 $\text{tCO}_2\text{-eq}/\text{a}$ 。整理该省各地自来水厂碳排放数据,结果如图3、4所示。

从碳排放总量看,a市作为省会城市,贡献了最高的碳排放量,占比高达30.73%,其后依次为d市(8.65%)、g市(7.81%)、l市(7.61%)。碳排放总量贡献最低的是n市,仅占1.58%,与其处于同一等级的还有i市(2.50%)和c市(2.93%)。从碳排放强度看,h市和m市的碳排放强度均较高,分别为0.243、

0.242 kgCO₂-eq/m³。h市自来水厂电耗可达0.408 4 kW·h/m³,居于全省最高水平。整理分析发现,h市超过25%的供水水源为地下水,因此其取水以及曝气能耗相对较高,碳排放水平也相应最高。碳排放强度水平位于最低档的城市有n市和j市,分别为0.091、0.065 kgCO₂-eq/m³。研究发现,n、j两市均为山地型城市,供水方式多为重力供水,j市自来水厂电耗仅为0.109 9 kW·h/m³,远小于该省平均水平,除少数以地下水为原水的水厂外,其余大部分为重力流供水,因此输配水能耗较低,碳排放强度水平最低。

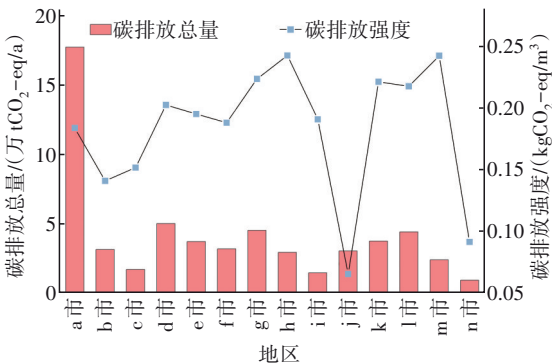


图3 南方某省各地给水厂碳排放量与碳排放强度分布
Fig.3 Distribution of carbon emissions and carbon emission intensity of waterworks in a southern province

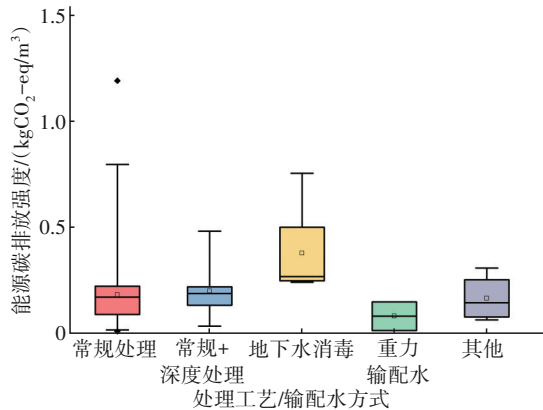


图4 南方某省不同工艺给水厂能源碳排放强度分布
Fig.4 Distribution of energy-related carbon emission intensity of waterworks with different processes in a southern province

另外,按不同净水工艺分类,采用常规工艺的自来水厂平均碳排放强度为0.175 1 kgCO₂-eq/m³,位于最低水平;增加臭氧-活性炭深度处理工艺的自来水厂平均碳排放强度略高于常规工艺水厂,平均碳排放强度为0.193 2 kgCO₂-eq/m³;采用地下水

消毒处理工艺的自来水厂碳排放强度最高,平均为0.372 6 kgCO₂-eq/m³。

3.3 影响因素分析

本研究对自来水厂能源碳排放量与供水人口、供水管网长度、年供水量、地区生产总值(GDP)、城镇化率、供水普及率6个指标进行相关性分析,结果如表4所示。

表4 自来水厂能源碳排放量影响因素分析

Tab.4 Analysis of influencing factors on energy-related carbon emissions in waterworks

影响因素	城市公共供水服务人口	供水管网长度	年供水量	供水普及率	城镇化率	GDP
相关性系数	0.853**	0.626*	0.955	0.377	0.725*	0.964**

注:*表示在置信度(双侧)为0.05时,相关性显著;**表示在置信度(双侧)为0.01时,相关性显著。

由表4可知,能源碳排放量与上述指标均呈正相关关系。自来水厂能源碳排放量与城市公共供水服务人口、年供水量、GDP、城镇化率均呈极显著正相关关系($P<0.01$),而与供水管网长度呈显著正相关关系($P<0.05$),供水普及率对自来水厂能源碳排放量影响不大($P>0.05$)。供水服务人口数量差异会影响日常生活供水量,人口越多所需供水量越大,制水过程中的能耗碳排放量也越大;年供水量与制水能耗直接相关,其值越高说明该地区自来水生产量越大,相应产生的碳排放量越大;GDP反映了地区经济发展水平和消费能力的差异,进而导致人均用水量及供水品质存在差异,地区经济越发达,人均用水量越高。为保证高品质出水,部分自来水厂会增设深度处理工艺,使得制水电耗增加,随之能耗碳排放量增加;城镇化率越高,城市居民对自来水的需求量也越大,自来水供应量增加,制水能耗碳排放量也相应增大;城市供水管网建设在一定程度上反映了供水覆盖范围,进而影响供水能力,增加能耗碳排放量。

4 结论与展望

① 为厘清供水系统碳排规律,本文根据项目建设类型分别构建两种碳排放量核算模型,为新建项目方案优化决策和既有项目碳排水平评估提供量化核算支撑。

② 模型在新建项目设计方案比选中同步实现量化分析应用,通过核算分析,运维阶段的碳排

放占全生命周期的78.91%,其中电耗占86.82%,药耗占13.12%,是碳排放控制的重点;从处理工艺流程角度进行量化分析,送水泵房、取水泵房为主要的能耗碳排放单元,其净碳排放量分别占制水工艺段的51.91%、21.64%,为减碳的重点环节,模型的应用赋能案例水厂通过优选水泵、智慧化设计等典型减碳技术实现碳排放强度降低38.30%。

③ 模型在既有厂站设备更新项目中实现评估应用,通过送水泵房碳排放历史数据与供水量、出厂平均水压以及原水pH多元线性回归分析,其碳排强度与供水总量、出厂平均水压、pH等呈现显著相关。

④ 利用供水系统核算模型对南方某省自来水厂进行调研分析,发现不同区域之间因地形因素、取水方式、供水方式、制水工艺不同而呈现显著碳排差异。此外,供水系统能源碳排放量与城市服务人口、供水规模、GDP、供水普及率等社会因素呈现显著性相关。

⑤ 在实际操作中,由于数据收集体系和标准的不完善,碳排放活动水平数据的获取和排放因子的选取具有较大的自主权,这在一定程度上会影响核算结果的精确度和可比性。给水厂活动水平数据可以通过水厂能源消费记录或热力购售结算凭证/电网结算、电表度数、水厂生产原始记录、统计台账、统计报表、财务明细等获取,随着国内城乡建设领域碳排放核算及计量标准体系进一步健全,以及基于本土实测法因子修订论证,将进一步提高供水系统评估体系核算精度和置信水平。

参考文献:

- [1] 郝士博. 城市给排水系统能耗调查及评估[D]. 南京:东南大学, 2018: 1-5.
- HAO S B. The Survey and Study of Urban Water Supply and Drainage System Energy Consumption[D]. Nanjing: Southeast University, 2018: 1-5 (in Chinese).
- [2] 张怀宇. 我国公共供水系统温室气体排放与碳减排探讨[J]. 给水排水, 2023, 49(11): 16-24.

ZHANG H Y. Discussion on greenhouse gas emission and carbon reduction of China's public water supply systems[J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(11): 16-24 (in Chinese).

- [3] 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: 20-70.

China Urban Water Association. Guidelines for Carbon Accounting and Emission Reduction in the Urban Water Sector [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022: 20-70 (in Chinese).

- [4] 张翔宇, 胡建坤, 马凯, 等. 给水厂典型工艺碳排放特征与影响因素[J]. 环境科学, 2024, 45(1): 123-130.

ZHANG X Y, HU J K, MA K, et al. Carbon emission characteristics and influencing factors of typical processes in drinking water treatment plant [J]. Environmental Science, 2024, 45(1): 123-130 (in Chinese).

- [5] 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 Y J, SUN Q W, YU G Q, 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).

- [6] 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 Q Y, WU S H, CHEN C M. Pipe network pressure control model and low-carbon real-time scheduling of water supply system [J]. City and Town Water Supply, 2019(5): 35-41 (in Chinese).

作者简介:刘阳(1983—),男,湖南益阳人,博士研究生,高级工程师,咨询工程师(投资)、一级注册建造师、一级注册消防工程师,主要从事市政工程咨询、研究和项目管理工作。

E-mail: 156025843@qq.com

收稿日期: 2024-08-31

修回日期: 2024-12-26

(编辑:丁彩娟)