

文章栏目：面向减污降碳协同增效的污水处理系统运行管理研究与实践专题  
DOI 10.12030/j.cjee.202210101 中图分类号 X703 文献标识码 A

郑轶丽, 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): 1778-1787. [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): 1778-1787.]

# 城市水务系统碳排放测算及减碳对策分析：以成都市为例

郑轶丽<sup>1</sup>, 马军<sup>2</sup>, 魏婷<sup>1,✉</sup>, 王盼盼<sup>2,3</sup>, 熊文兰<sup>4</sup>, 游罗丹<sup>1</sup>

1. 成都市市政工程设计研究院有限公司, 成都 610023; 2. 哈尔滨工业大学环境学院, 城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090; 3. 哈尔滨工业大学重庆研究院城市水系统中心, 重庆 401151; 4. 成都市水务局, 成都 610000

**摘要** 城市水务系统是单位产值能耗较高且与各行各业联系紧密的行业。在“双碳”背景下, 开展碳排放核算及减碳策略研究是水务系统高质量发展的重要内容。通过构建成都市水务系统碳排放框架, 基于大量统计数据, 对水务系统中各个环节(取、制、供、排等)产生的直接及间接碳排放进行统筹核算。结果显示, 2019年成都市水务系统碳排放总量约为 70.3 万吨(以 CO<sub>2</sub> 计), 主要碳排放领域为污水处理系统, 其中的污水处理及污泥处理处置环节的碳排放贡献最为突出。基于核算结果, 对水务系统减污降碳目标及实现路径进行系统分析及定量测算, 提出包括“节水优先、高效管网、源头提质、低碳工艺及能源回用”的五大策略推进水务系统减碳转型, 为成都市及类似城市的“双碳”水务系统建设提供参考。

**关键词** 碳排放; 双碳; 水务; 减碳措施

据统计, 世界范围内污水处理厂能耗占社会总能耗的 1%~3%<sup>[1]</sup>。我国废水与固废处理碳排放量占全社会总量 1.6%<sup>[2]</sup>。尽管与能源、工业、建筑、交通等部门相比, 水务行业产生的温室气体排放比重较小。但社会生产生活均与水相关, 各行各业均需用水, 能源行业的耗水量已占全世界用水量约 15%<sup>[3]</sup>。因此, 探究水务系统碳排是节能减排的重要方向。

国外学者对“水-能-碳”关系进行了深入研究, 有对宏观尺度的城市水系统进行碳排放测算<sup>[4-5]</sup>, 也有对微观尺度的水泵选型、地下水提升、自来水处理、污水处理工艺设计、管网布置等环节碳排放的定量化研究<sup>[6-7]</sup>。国内关于城市水系统碳排放的研究起步晚, 但近年来发展迅速, 已初步形成系列研究成果。在理论层面, 已开展了针对能源强度、能源需求和碳排放量在内的城市水系统“水-能”关系研究<sup>[8-9]</sup>。2022 年, 由中国城镇供水排水协会出台《城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南》, 对厘清城镇水务系统碳排放核算边界规范活动数据获取与核算方法选用提供了指导。国内也有部分团队开展了针对水系统单个环节的能耗研究, 包括取供水、用水与污水版块<sup>[10-12]</sup>。

成都作为全面体现新发展理念城市首倡地、公园城市建设首提地和国家低碳试点城市, 始终坚持生态优先和绿色发展, 各领域各行业都在进行“双碳”相关课题的研究和试点工作。成都市水务部门率先在行业内开展碳排放核算, 迈出了水务系统从低碳的定性分析向定量分析的重要一

收稿日期: 2022-10-21; 录用日期: 2023-03-26

第一作者: 郑轶丽(1979—), 女, 硕士, 教授级高级工程师, 405367800@qq.com; ✉通信作者: 魏婷(1988—), 女, 硕士, 高级工程师, 417967670@qq.com

步。同时，基于碳排放核算，梳理了水务系统内碳排放特征，可进一步探索水务系统减碳转型路径。本研究梳理总结水务系统碳排放核算方法，将水务系统碳排放由定性分析上升至定量分析；同时通过对核算数据的统计和分析，提出成都市水务系统“双碳”的转型策略，以期为我国类似地区开展水务低碳工作提供参考。

## 1 研究方法

### 1.1 核算对象及核算边界

本研究的核算范围为成都市市域 14 335 km<sup>2</sup>，核算对象为成都市城市水务系统，对成都市水务局行政管理辖区内不同系统的水处理过程进行碳排放核算。参照《城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南》，包含城市公用事业属性的市政给水、污水、再生水和雨水 4 个系统。其中，给水系统包括取水设施、给水处理厂、输配水管网和长距离输水 4 个模块；污水系统包括化粪池及污水管渠设施、污水处理厂和污泥处理处置 3 个模块；再生水系统包括再生水厂和输配水管网 2 个模块；雨水系统包括雨水管渠设施和以源头减量、过程控制与末端控制为主的雨水控制设施 2 个模块。核算边界为水务系统运行维护阶段。

### 1.2 核算方法及数据来源

核算方法采用碳排放系数法。基于给水系统、污水系统、再生水系统、雨水系统运行规模。根据运行中电力及药剂消耗数据得出综合碳排放强度，求得各系统碳排放总量。

核算数据主要涉及三类：1) 运行规模数据，包括地下水供水量、自来水处理量、污水处理量、污水回用、雨水回用等，水量规模来自成都市水务局收集辖区运营企业的统计资料，部分缺失数据来自《城市供水统计年鉴 (2018)》、《城市排水统计年鉴 (2018)》、《成都市水资源公报 (2015~2020 年度)》；2) 能耗、药耗数据，包括自来水处理厂、污水处理厂能耗、药耗数据，来自成都市水务运营企业监测、统计数据；3) 能源类型的发热量值和碳排放系数，主要参考《综合能耗计算通则》(GB/T 2589-2008) 和参考国家发改委公布的《2012 年省级电网平均二氧化碳排放因子》中的四川省电力排放系数。其余部分缺失数据、单位能源消耗数据参考相关城市经验值<sup>[13-14]</sup>。

## 2 水务系统碳排放核算

### 2.1 给水系统的碳排放核算

#### 2.1.1 碳排放核算机理

给水系统主要包括取水、制水、市政供水系统，均为间接碳排（图 1（a））。取水系统包括从常规水资源（地下水、地表水等）处取水并输送至水厂，碳排放量来自取水泵站和送水泵站电能消耗；制水系统包括对水源地输水的原水进行处理（混凝、沉淀、过滤、消毒等），生产出符合相关用水标准的自来水，碳排放量来自能耗和药耗；供水系统包括将水厂生产的自来水输送至用户端，碳排放量来自供水泵站和二次加压泵站（图 1（b））。

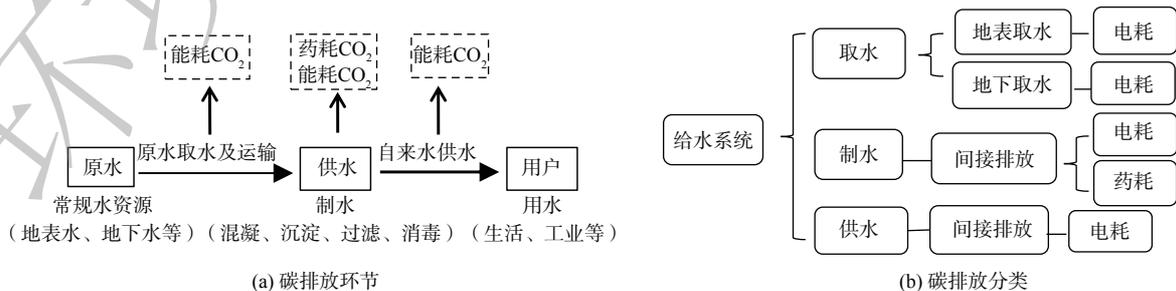


图 1 给水系统碳排放示意图

Fig. 1 Carbon emission process and classification of water supply system

### 2.1.2 各环节碳排放核算方法

1) 取水环节。给水系统取水环节的间接排放计算公式如式(1)。

$$Q_{\text{给水取水}} = Q_1 \times W_0 \times \text{EF}_{\text{电}} \quad (1)$$

式中： $Q_{\text{给水取水}}$ 表示给水取水环节间接排放的 $\text{CO}_2$ ， $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ ； $W_0$ 为取水能量强度，参考文献[8]地表水取水耗能为 $0.12 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ ，水库取水耗能为 $0.05 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ ，地下水取水耗能为 $0.09 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ ； $\text{EF}_{\text{电}}$ 为电力排放系数，参考国家发改委公布的《2012年省级电网平均二氧化碳排放因子》中的四川省电力排放系数，取 $0.2475 \text{ kg}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$ 。

2) 制水环节。给水系统制水环节电耗产生的间接排放量计算公式如式(2)。

$$Q_{\text{给水制水-电}} = Q_1 \times W_1 \times \text{EF}_{\text{电}} \quad (2)$$

式中： $Q_{\text{给水制水-电}}$ 为制水电耗产生的 $\text{CO}_2$ 碳排放量， $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ ； $W_1$ 为制水的能源强度， $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ ，根据制水企业的工艺耗能情况折算。

给水系统中药耗主要包括混(絮)凝剂和消毒剂。自来水厂采用的混(絮)凝剂一般为聚合氯化铝、聚合硫酸铜等无机物，制备工艺简单，且部分凝剂可重复利用，综合碳排量相对较低，故仅对消毒剂为主对制水过程中的药耗碳排放进行分析。

给水系统制水环节药耗产生的间接排放量计算公式如式(3)。

$$Q_{\text{给水制水-药}} = Q_1 \times W_2 \quad (3)$$

式中： $Q_{\text{给水制水-药}}$ 表示制水药耗产生的 $\text{CO}_2$ 碳排放量， $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ ； $W_2$ 为单位制水药耗碳排强度，参考文献[15]，取 $1.4 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，即生产每千克水消耗的药剂对应排放 $1.4 \text{ kg CO}_2$ ；根据成都市自来水厂运营资料，单位制水消毒剂耗用量约为 $1.6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。综上所述，在给水系统中，单位制水药耗碳排量约为 $0.002 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

3) 供水环节。给水系统供水环节电耗产生的间接排放量计算公式如式(4)。

$$Q_{\text{给水供水}} = Q_1 \times W_3 \times \text{EF}_{\text{电}} \quad (4)$$

式中： $Q_{\text{给水供水}}$ 表示供水电耗产生的 $\text{CO}_2$ 碳排放量， $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ ； $W_3$ 为配水的能源强度， $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ ，根据制水企业的泵站提升情况折算。

### 2.1.3 碳排放量测算及结果分析

成都市建设有规模较大的主力供水厂23座，市域内总供水设计生产能力共 $5.47 \times 10^6 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ ，2019年成都市全年总供水量为 $1.14 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。供水管网漏损较为严重，中心城区漏损率约9%，市域严重区域漏损率超过12%。供水厂处理工艺多为传统的“混凝-沉淀-过滤-消毒”。给水系统各部分的能耗与年取(供)水总量呈正相关。近年(2015—2019年)总取水量总体成上升趋势，各组分能耗与碳排也呈上升趋势，但随着技术的更新、系统的优化和管理的完善，制水、供水环节单位能耗逐年略有下降。2019年，成都市给水系统总 $\text{CO}_2$ 排放量约为 $7.15 \times 10^4 \text{ t}$ 。2015至2019年，成都给水系统的 $\text{CO}_2$ 排放量如图2所示。

根据2015—2019年测算数据，给水系统中取水环节碳排放占给水系统总碳排放量的47%~50%，原水、供水加压提升能耗是给水系统碳排放的主要组分。由于取水能耗采用估算值，取水环节能耗波动主要与不同取水

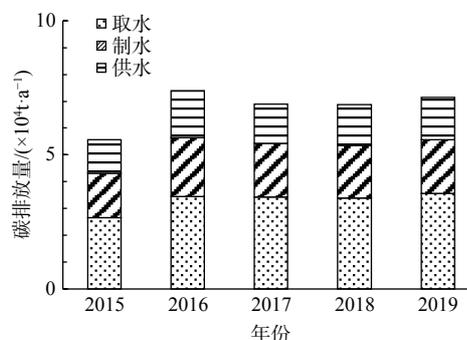


图2 2015—2019年成都市给水系统碳排放量分类统计  
Fig. 2 Carbon emission from different processes of Chengdu water supply system from 2015 to 2019

水源规模相关；制水环节碳排放占比为 28%~30%。近年来，成都市制水环节无革新技术应用，主要通过精准调控等方式控制能耗，单位制水能耗由 2015 年  $0.073 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$  逐步降为  $0.067 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ ；供水环节碳排放占比为 21%~24%，单位供水能耗总体呈降低趋势，由 2015 年  $0.058 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$  逐步降为  $0.056 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ （见图 3）。

## 2.2 污水系统的碳排放核算

### 2.2.1 碳排放机理

污水系统的碳排放覆盖自小区化粪池或其他污水接入市政管网开始，至处理达标出水排入受纳水体为止的全部处理单元，主要包括污水收集输送、污水处理及污泥处理处置 3 个环节。在污水收集输送环节，化粪池与污水管网系统中有机物持续降解，直接排放  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$ ；同时部分污水输送到污水厂站过程中需泵站提升，产生电力消耗间接排放  $\text{CO}_2$ 。在污水处理环节中，产生的碳排放一方面来自处理过程中生化反应产生的直接碳排放；另一方面来自设施运行的电力消耗及投加药剂产生的间接排放。污泥处理处置中的碳排放主要来自处理过程中直接排放的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$ ，以及过程中能源消耗所对应的间接碳排放。污水系统碳排放核算边界和排放类型见图 4。

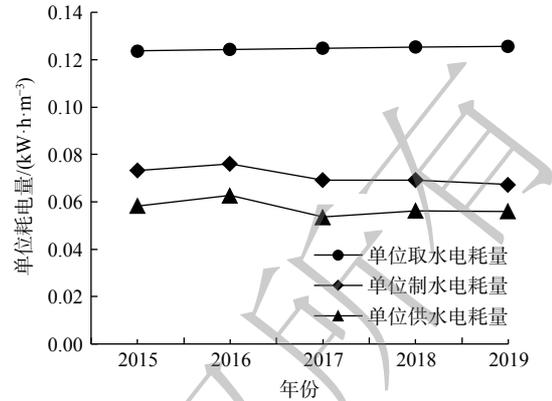


图 3 2015—2019 年给水系统各环节单位耗电量  
Fig. 3 Unit power consumption of each process of water supply system from 2015 to 2019

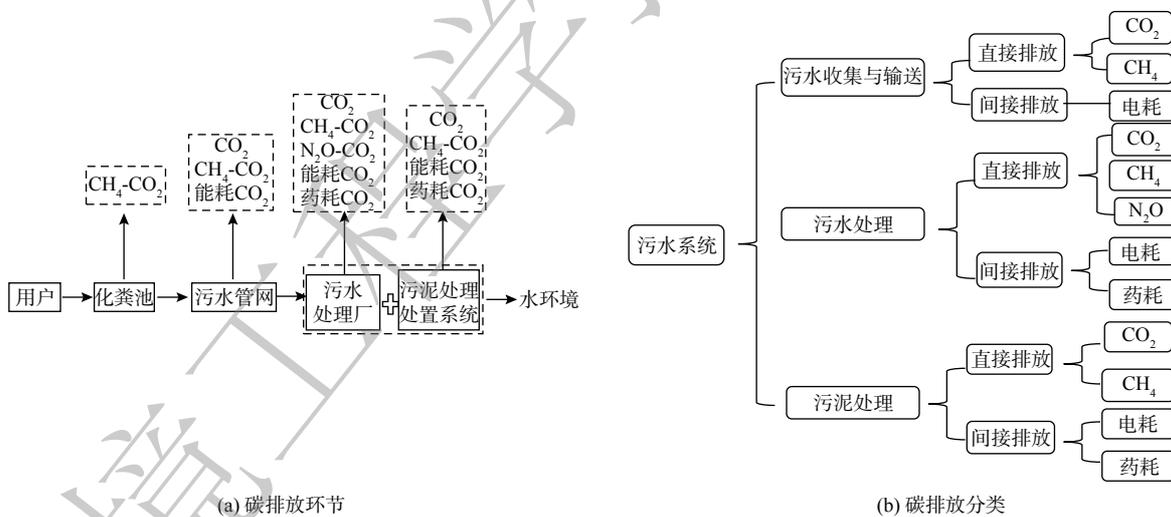


图 4 污水系统碳排放示意图

Fig. 4 Carbon emission diagram of sewage system

### 2.2.2 各环节碳排放核算方法

1) 污水收集输送环节。污水收集输送环节的直接排放采用产排系数法计算，计算公式如式 (5)。

$$Q_{\text{污水收集-直}} = G \times N \times P \times 365 \times \beta \times 10^{-6} \quad (5)$$

式中： $Q_{\text{污水收集-直}}$ 表示污水收集输送环节直接排放的  $\text{CO}_2$ ， $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ ； $G$ 为温室气体排放系数（以每克 COD 计的耗氧有机物排放温室气体的质量当量计）， $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，参考文献 [16] 中国内典型城市生活污水的实测数据取值，其中化粪池  $\text{CO}_2$  排放系数（以每克 COD 计的耗氧有机物排放  $\text{CO}_2$  质量当量计）为  $0.0384 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ ， $\text{CH}_4$  排放系数（以每克 COD 计的耗氧有机物排放  $\text{CH}_4$  质量当量计， $\text{CH}_4$  以  $\text{CO}_2$  当量表

示)为  $1.328 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ , 管网  $\text{CO}_2$  排放系数 (以每克 COD 计的耗氧有机物排放  $\text{CO}_2$  质量当量计) 为  $0.0124 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,  $\text{CH}_4$  排放系数 (以每克 COD 计的耗氧有机物排放  $\text{CH}_4$  质量当量计,  $\text{CH}_4$  以  $\text{CO}_2$  当量表示) 为  $0.500 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ ;  $N$  为人口数, 人, 根据成都市 2015—2019 年统计年鉴取值;  $P$  为每人每天排放的耗氧有机物 (以 COD 计) 质量,  $\text{g}\cdot(\text{人}\cdot\text{d})^{-1}$ , 根据《第一次全国污染源普查城镇生活源产排污系数手册》, 成都市属于四区 I 类城市, 其 COD 的产生系数为  $82 \text{ g}\cdot(\text{人}\cdot\text{d})^{-1}$ ;  $\beta$  为 COD 降解系数, 化粪池取 0.2, 管网取 0.06。考虑到成都市污水多为重力流, 提升泵站较少, 此处不计泵站电力消耗间接排放的  $\text{CO}_2$ 。

2) 污水处理环节。污水处理环节直接排放的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  计算公式如式 (6)。

$$Q_{\text{污水处理-直}} = \sum \text{TOW}_i \times \text{EF}_i \times \text{GWP}_i \quad (6)$$

式中:  $Q_{\text{污水处理-直}}$  表示污水处理环节直接排放的温室气体,  $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ ;  $i$  表示  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  或  $\text{N}_2\text{O}$ ;  $\text{TOW}_i$  表示污水处理去除的耗氧有机物 (以 COD 计) 质量或总氮量,  $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ , 根据成都市各污水厂运营数据计算;  $\text{EF}_i$  表示排放因子 (以每克 COD 计的耗氧有机物排放温室气体质量当量计), 分别取  $0.273 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $0.05 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$  或  $0.005 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ ;  $\text{GWP}_i$  表示全球变暖潜能,  $\text{CH}_4$  取  $25 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$  (指每克  $\text{CH}_4$  对应  $\text{CO}_2$  当量)、 $\text{N}_2\text{O}$  取  $298 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$  (指每克  $\text{N}_2\text{O}$  对应  $\text{CO}_2$  当量)。

电耗间接排放计算公式如式 (7)。

$$Q_{\text{污水处理-电}} = W \times \text{Se} \times \text{EF}_{\text{电}} \quad (7)$$

式中:  $Q_{\text{污水处理-电}}$  表示污水处理环节电耗间接排放的  $\text{CO}_2$ ,  $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ ;  $W$  表示污水处理量,  $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ ;  $\text{Se}$  表示污水处理过程的比能耗,  $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1}$ , 根据各厂运营数据计算。

药耗间接排放计算公式如式 (8)。

$$Q_{\text{污水处理-药}} = K \times \text{EF}_{\text{药}} \quad (8)$$

式中:  $Q_{\text{污水处理-药}}$  表示污水处理环节药耗间接排放的  $\text{CO}_2$ ,  $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ ;  $K$  表示药耗量,  $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ , 采用运营数据;  $\text{EF}_{\text{药}}$  表示单位质量药剂的排放系数, 成都市污水厂主要使用的药剂是消毒剂, 取  $1.4 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

3) 污泥处理处置环节。不同污泥处理处置方式的碳排放计算差异较大。成都主流的污泥处理处置方式为填埋、堆肥及焚烧 (含建材利用), 各类处置方式对应碳排放计算公式见式 (9)~(14) 所示, 其中相关排放方式见注释。

$$Q_{\text{填埋}} = M \times \text{MCF} \times \text{DOC} \times \text{DOC}_F \times F \times \frac{16}{12} \times \text{GWP}_{\text{CH}_4} \quad (9)$$

$$Q_{\text{堆肥-直}} = \sum M \times \text{EF}_i \times \text{GWP}_i \quad (10)$$

$$Q_{\text{堆肥-电}} = M \times \text{Se}_{\text{泥}} \times \text{EF}_{\text{电}} \quad (11)$$

$$Q_{\text{焚烧-直CO}_2} = M \times \text{MFCF} \times \text{CF} \times \text{OF} \times \frac{44}{12} \quad (12)$$

$$Q_{\text{焚烧-直N}_2\text{O}} = M \times \text{EF}_{\text{焚烧-N}_2\text{O}} \times \text{GWP}_{\text{N}_2\text{O}} \quad (13)$$

$$Q_{\text{焚烧-间CO}_2} = M \times \left( \frac{R}{C} \times \text{EF}_{\text{煤}} + E_{\text{焚}} \times \text{EF}_{\text{电}} \right) \quad (14)$$

式中:  $Q_{\text{填埋}}$  表示污泥填埋排放的  $\text{CO}_2$ ,  $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ ;  $M$  表示处理的污泥量,  $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ , 采用运营数据;  $\text{MCF}$  表示  $\text{CH}_4$  修正因子, 取 1;  $\text{DOC}$  表示可降解有机碳比例, 取 10%;  $\text{DOC}_F$  为能转化为  $\text{CH}_4$  的  $\text{DOC}$  比例, 取 50%;  $F$  为  $\text{CH}_4$  在填埋气中的比例, 取缺省值 50%;  $16/12$  为  $\text{CH}_4$  与  $\text{C}$  分子量之比。参数取值参考 IPCC。  $Q_{\text{堆肥-直}}$  表示污泥堆肥直接排放的  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  (以  $\text{CO}_2$  当量计),  $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ ;  $\text{EF}_i$  表示处理每千克污泥的各类温室气体排放因子, 参考 IPCC 的相关指数,  $\text{CH}_4$  取  $2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  取  $0.15 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (污

泥含水率为 80%)。 $Q_{\text{堆肥-电}}$  表示污泥堆肥电耗间接排放的  $\text{CO}_2$ ,  $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ ;  $Se_{\text{泥}}$  表示堆肥过程的比能耗,  $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1}$ , 参考《城市生活垃圾堆肥处理工程项目建设标准》, 取 10。 $Q_{\text{焚烧-直}\text{CO}_2}$  表示污泥焚烧直接排放的  $\text{CO}_2$ ,  $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ ;  $MFCF$  表示污泥化石源  $\text{CO}_2$  排放比例, 根据《城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南》及各厂运营数据, 取 10%;  $CF$  表示污泥碳含量, 取 10%;  $OF$  为氧化因子, 取缺省值 0.85; 44/12 为  $\text{CO}_2$  与 C 分子量之比。 $Q_{\text{焚烧-直}\text{N}_2\text{O}}$  表示污泥焚烧直接排放的  $\text{N}_2\text{O}$  (以  $\text{CO}_2$  当量计,  $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ );  $EF_{\text{焚烧-}\text{N}_2\text{O}}$  表示排放因子, 参考 IPCC, 取  $0.9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (污泥含水率为 80%)。 $Q_{\text{焚烧-间}\text{CO}_2}$  表示污泥焚烧间接排放的  $\text{CO}_2$ ,  $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ ;  $R$  表示湿污泥 (污泥含水率为 80%) 在 1 个标准大气压 (0.101 3MPa) 常温下 (20  $^\circ\text{C}$ ) 干化至干污泥 (污泥含水率为 20%) 需要的热量, 取  $1\ 947\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $C$  为燃煤热效率, 参考《锅炉节能技术监督管理规程》(TSG 60002-2010), 取 75%;  $EF_{\text{煤}}$  表示标煤的碳排放因子, 取  $84\text{ kg}\cdot\text{kJ}^{-1}$ ;  $E_{\text{焚}}$  为污泥干化设备的单位电耗, 取  $40\text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1}$ 。

### 2.2.3 碳排放量测算及结果分析

截至 2019 年, 成都市范围内已建污水管网超过  $19\times 10^4\text{ km}$ , 污水处理厂共 247 座, 总处理能力  $4.48\times 10^6\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ , 实际处理水量  $3.35\times 10^6\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ , 负荷率约 74.8%。污水处理工艺以  $\text{A}_2\text{O}$  为主, 污泥处理以堆肥和焚烧为主。2019 年, 成都市污水系统总排放量为  $6.29\times 10^5\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 。2015 至 2019 年间, 污水量及污泥产量逐年上升, 总碳排也呈逐年上升趋势, 与污水规模基本呈正相关 (图 5)。污水系统年均碳排放量 (图 6) 为  $5.76\times 10^5\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ , 主要来自污水处理环节, 其平均碳排放为  $2.81\times 10^5\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ , 占比 48.8%, 其中有 53% 为直接排放、47% 为间接排放。污泥处理处置环节碳排放量占比第二 (29.0%), 其平均碳排放为  $1.67\times 10^5\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ , 主要来自焚烧处理 (65.0%)。

在各个环节中, 单位碳排放量最高的也是污水处理环节。根据 2015—2019 年成都市污水厂运营数据, 成都市污水处理的平均能耗为  $0.365\text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ 。该值高于 2018 年全国平均数据 ( $0.3\text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 主要是由于成都市污水处理厂出水按照《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》要求执行水污染物特别排放限值, 部分指标略严于常规污水处理厂执行的《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 指标, 故工艺耗能较高。针对污泥处理处置环节, 由于成都市污泥处理处置采用堆肥和焚烧等高碳排的工艺为主, 而污泥消

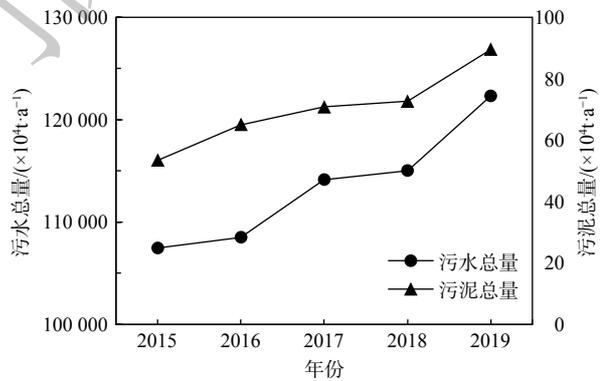
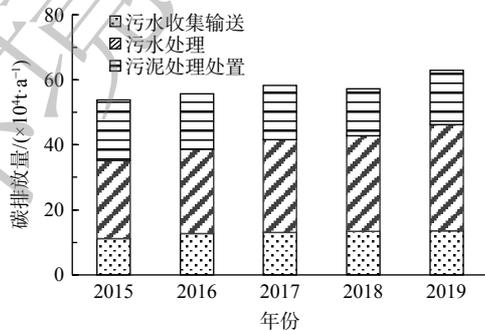
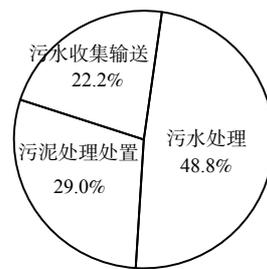


图 5 2015 至 2019 年成都市污水量及污泥量变化  
Fig. 5 Variation of sewage and sludge volume in Chengdu from 2015 to 2019



(a) 各环节逐年碳排放量统计图



(b) 各环节平均碳排放量比例图

图 6 2015 至 2019 年成都市污水系统碳排放量统计

Fig. 6 Carbon emission from different processes of Chengdu sewage system from 2015 to 2019

化+沼气发电这种资源化处置方式板块空白,导致单位污泥的碳排放量较高。

### 2.3 再生水系统的碳排放核算

#### 2.3.1 碳排放机理

再生水系统与污水系统密不可分。一般而言,再生水系统自污水处理厂出水起,至用户为止的全部相关设施单元。碳排放来自再生水厂处理设施的直接及间接排放,以及输配管网和泵站相关的间接排放。

#### 2.3.2 碳排放量测算及结果分析

成都市再生水系统建设总体处于初步发展阶段,目前主要回用于河道、湿地的生态补水。由于前文污水系统处理环节的碳排放采用厂站总电耗计算,已包含再生水深度处理环节的碳排放,此处仅计再生水输配中由泵站提升而导致的电耗碳排放。计算式为式(15)。

$$Q_{\text{再生水}} = E_{\text{再}} \times EF_{\text{电}} \quad (15)$$

式中:  $Q_{\text{再生水}}$  表示再生水系统间接排放的  $\text{CO}_2$ ,  $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ ;  $E_{\text{再}}$  表示系统消耗的电能,  $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$ , 根据成都市各再生水厂运营数据统计。

2015至2019年,成都市再生水系统的碳排放量如图7所示。系统碳排放量与再生水回用量呈正相关,总体呈上升趋势。2019年,再生水系统总碳排放量约为  $2.6 \times 10^3 \text{ t}$ 。

### 2.4 雨水系统的碳排放核算

#### 2.4.1 碳排放机理

雨水系统碳排放核算边界覆盖自雨水源头排放开始、至排入自然水体为止的全部设施单元,包括雨水排水管渠、泵站和其它传输设施,以及雨水控制设施中的绿色和灰色设施。就成都市实际情况而言,雨水系统基本为重力流,灰绿雨水控制设施较少,系统碳排放主要来自排涝活动,即在城市下穿隧道等地势低、没有良好可靠自流条件区域设置的雨水泵站,在暴雨时将汇流至隧道内的雨水收集后通过水泵压力排放至自然水体,泵站运行消耗电能,从而带来间接的碳排放。

#### 2.4.2 碳排放量测算及结果分析

雨水系统的间接排放计算公式如式(16)。成都市域共有138座雨水泵站,年电耗总量约为  $1.04 \times 10^6 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$ , 计算得每年雨水系统碳排放总量( $\text{CO}_2$ 当量)约为  $256 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 。雨水系统碳排放量主要取决于雨水径流量。系统能耗强度约为  $0.014 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ , 吨水的碳排放强度( $\text{CO}_2$ 当量)约为  $4 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 远低于其他水系统。

$$Q_{\text{雨}} = E_{\text{雨}} \times EF_{\text{电}} \quad (16)$$

式中:  $Q_{\text{雨}}$  表示雨水系统间接排放的  $\text{CO}_2$ ,  $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ ;  $E_{\text{雨}}$  表示系统消耗的电能,  $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$ , 根据成都市各雨水泵站运营数据统计。

## 3 水务系统碳排放特征及减排建议

### 3.1 碳排碳汇特征分析

水务系统的碳排放领域包括给水系统、污水系统、再生水系统及雨水系统。基于对各环节用电、用能、用材情况的调研与计算,2019年水务系统碳排放总量约  $7.03 \times 10^5 \text{ t}$  (以  $\text{CO}_2$  当量计)。成都市全市碳排放总量约为  $5.796 \times 10^7 \text{ t}$ , 则水务系统约占成都市总碳排放量的1.2%, 与其他国家、地区

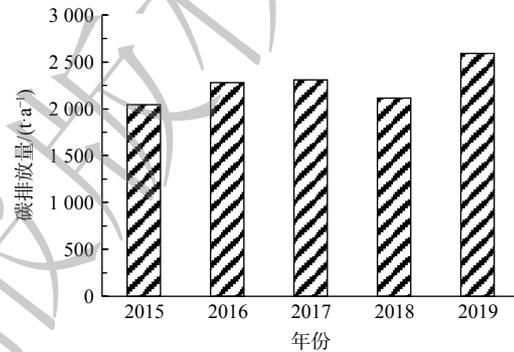


图7 2015至2019年再生水系统碳排放量

Fig. 7 Carbon emission from recycled water system from 2015 to 2019

水务碳排放量特征基本相符。

给水系统中，取水系统和供水系统碳排放量占比较高，主要表现为泵站加压提升产生的电能耗能较高。与碳排放量主要相关的因素是取供水规模，供水产销差及管网漏损规模较高，整体影响了取供水系统的总碳排放。污水系统中污水处理环节的间接碳排放是系统碳排放量的主要贡献者。污水处理间接碳排放中能耗碳排放占比达71%，是现状污水处理系统的减排关键部分。同时，污水处理过程中 $\text{CH}_4$ 排放量和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量相比 $\text{CO}_2$ 较小，但其增温潜势高，不可忽视其相关影响。雨水系统碳排放量主要取决于排水量，相较水务其他系统，其产生的碳排放总量和强度都较小。

就水务系统整体而言，碳排放量最高的是污水系统，占系统整体的90%（表1）。各系统的碳排放强度差别也很大，最高的是污水系统，吨水的碳排强度（以 $\text{CO}_2$ 当量计）为达 $0.52 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。因此，污水处理的低碳化是整个水务行业转型的关键。

表1 成都市水务系统现状碳排放统计表  
Table 1 Statistics of carbon emission of current water system in Chengdu

系统分类	水量规模/t	碳排放量/( $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ )	碳排放量占比	碳排放强度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	高碳排放环节
供水系统	$12\times 10^8$	$7.15\times 10^4$	10%	0.06	漏损及泵站
污水及再生水系统	$12\times 10^8$	$63.12\times 10^4$	90%	0.52	污水处理
雨水系统	$0.7\times 10^8$	$0.026\times 10^4$	0.03%	0.004	排涝

### 3.2 减碳对策

随着城市发展、人口增长和生活水平的提高，用水量、污水量、雨水转输量都将持续增长。面对“碳达峰碳中和”这一新的时代要求，水务系统需加快探索适宜的减碳路径，提前布局减碳措施，降低碳排放强度，才能在水量增长情况下实现“碳达峰碳中和”目标。

针对成都市水务系统碳排放的特征及现存问题，减碳对策总结为五大基本策略，包括节水优先、高效管网、源头提质、低碳工艺及能源回用。1) 节水优先。通过用户节约用水、强化用水量计量、梯度计价等措施降低用水量需求<sup>[17-18]</sup>减少给水系统及污水系统的水量负荷，从而减少水全生命周期的碳排放量。2) 高效管网。主要针对给水系统，通过减小管道漏损率<sup>[19]</sup>，优化给水管网平均压力值，降低输送过程的碳排放量。3) 源头提质。主要针对污水系统，通过在系统源头提质，提高进厂BOD浓度，从而提高污泥有机质含量<sup>[20]</sup>，为污泥资源化利用奠定基础。4) 低碳工艺。针对给水及污水处理，研发应用低能耗、低碳、高效的处理工艺技术，减小吨水电耗<sup>[21-22]</sup>，提高药耗消减率，从而降低处理过程的碳排放量。5) 能源回用。主要针对污水系统，充分利用污水自身的化学能<sup>[23]</sup>，提高污泥厌氧消化+沼气回收等资源化处理方式的比例<sup>[24]</sup>，增加污水源热泵<sup>[23,25-26]</sup>光伏发电等非传统能源应用，提高污水厂能源自给率，推动污水系统碳中和。

近期，成都市水务系统的减碳工作以新工艺技术试点、污水处理节能降耗、给排水管网提质增效及节水管理为重点。结合水务“十四五”发展规划，设定近期（2025年）减碳控制性指标及目标如表2所示。

在不考虑减碳措施的前提下，水务系统碳排放总量与人口基本成正相关关系。成都市2025年人口预计达2234万，常规情景水务系统碳排放总量估算为 $1.08\times 10^6 \text{ t}$ 。应用上述减碳措施，水务系统碳排放总量预测为 $9.44\times 10^5 \text{ t}$ ，相比常规情景减少12%（图8）。

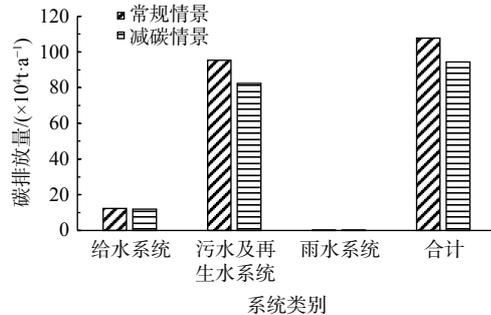


图8 成都市水务系统2025年常规情景及减碳情景碳排放量

Fig. 8 Carbon emission of regular and carbon reduction scenarios of Chengdu water system in 2025

表2 成都市水务系统近期减碳策略

Table 2 Near-term carbon emission reduction strategy of Chengdu water system

水务系统	控制指标	目标值	主要措施
给水系统	管网水平均压力值	0.32 MPa	优化供水分区及泵组建设
	漏损率	10%	实行分区计量管理、管网查漏、主动更换漏损及易漏管道
	万元工业增加值用水量	12 m <sup>3</sup>	提高工业用水重复利用率、降低工业用水定额
	人均用水量	310 m <sup>3</sup>	宣贯节水理念, 推广节水器具, 增强居民节水意识
污水及再生水系统	进水BOD <sub>5</sub>	100 mg·L <sup>-1</sup>	逐步取消城市区域现状化粪池; 治理管网渗漏、错接、腐蚀等病害问题
	污泥有机质含量	65%	逐步取消城市区域现状化粪池; 治理管网渗漏、错接、腐蚀等病害问题
	药耗削减率	5%	优化加药设备、应用在线监测系统, 实现精准加药
	吨水电耗	0.32 kW·h·m <sup>-3</sup>	更换老旧设备、应用在线检测和模拟技术优化曝气等高能耗单元
	污泥资源化利用比例	试点	在新建污水厂试点建设厌氧消化+沼气回收处置设施
	污水回用率	30%	建设城市再生水厂及配套管网系统
雨水系统	70%年径流总量控制率达标面积	40%	依托海绵城市建设开展, 通过透水铺装、下凹绿地、雨水花园等低影响开发措施减少雨水径流量
	雨水回用率	3%	在市内大型公园、较大的城市广场、高校、政府机关等用地, 建设雨水回收利用示范工程

#### 4 结语

1) 成都市2019年水务系统碳排放量总计 $7.03 \times 10^5$  t。其中, 碳排放量及单位碳排放强度最高的均为污水系统, 其碳排放主要来自污水处理的电耗间接排放及污泥处理处置环节。因此, 污水及污泥的处理是水务系统减碳的重点环节。

2) 针对成都市水务系统的碳排放特征, 确定了减碳五大基本策略, 即节水优先、高效管网、源头提质、低碳工艺及能源回用。近期实施的减碳措施主要包括给水系统节水优先管理策略持续推进、污水处理现有工艺节能降耗技术应用、给排水管网提质增效及污水污泥低碳处理工艺的试点示范。

3) 由于缺少实测数据, 部分环节采用相似城市的经验值进行估算, 建议后续针对成都水务系统开展参数的本土化研究。同时本次提出的减碳措施以该领域较为成熟的低碳技术为主, 未来需考虑新技术的减排能力, 并量化其带来的影响。为保障相关措施的实施, 建议进一步加强低碳相关配套政策制度的研究。

#### 参考文献

- [1] GU Y F, LI Y, LI X Y, et al. 2017. The feasibility and challenges of energy self-sufficient wastewater treatment plants[J]. *Applied Energy*, 2017, 204: 1463-1475.
- [2] 生态环境部. 中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告 [EB/OL]. [2022-10-21]. <http://big5.mee.gov.cn/gate/big5/www.mee.gov.cn/ywgg/ydqhbh/wsqtzk/201907/P020190701765971866571.pdf>, 2018.
- [3] 联合国教科文组织. 联合国世界水资源发展报告2016——水与就业 [M]. 1版. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
- [4] LEE M, KELLER A A, CHIANG P C, et al. Water-energy nexus for urban water systems: A comparative review on energy intensity and environmental impacts in relation to global water risks[J]. *Applied Energy*, 2017, 205: 589-601.
- [5] SUS O, HEUER M W, MEYERS T P W, et al. A data assimilation framework for constraining upscaled cropland carbon flux seasonality and biometry with MODIS[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(4): 2451-2466.
- [6] VIEIRA A S, GHISI E. Water-energy nexus in low-income houses in Brazil: the influence of integrated on-site water and sewage management strategies on the energy and sewerage services[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 133: 145-162.
- [7] VALEK A M, SUSNIK J, GRAFAKOS S. Quantification of the urban water-energy nexus in Mexico City, Mexico, with an assessment of water-system related carbon emissions[J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 590-591: 258-268.
- [8] 余娇, 赵荣钦, 肖连刚, 等. 基于“水—能—碳”关联的城市污水处理系

- 统碳排放研究[J]. 资源科学, 2020, 42(6): 1052-1062.
- [9] 赵荣钦, 李志萍, 韩宇平, 等. 区域“水—土—能—碳”耦合作用机制分析[J]. 地理学报, 2016, 71(9): 1613-1628.
- [10] 崔昱, 邹琳, 张明, 等. 水厂二泵房能效监控平台在优化供水调度中的应用[J]. 净水技术, 2021, 40(12): 162-169.
- [11] 郭怡, 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): 113-117.
- [12] 翟萌, 邵越, 徐福军. 西安污水处理厂温室气体排放及减排对策研究[J]. 环境工程, 2016, 34(2): 23-26.
- [13] 郝士博. 城市给排水系统能耗调查及评估[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [14] 朱永霞. 社会水循环全过程能耗评价方法研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017.
- [15] 张程. 污水处理系统碳排放规律研究与量化评价[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- [16] 黄建洪. 城市生活排水系统废气产排污系数核算研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- [17] 翁晓姚. 碳达峰与碳中和目标下供水企业绿色低碳发展的思考[J]. 净水技术, 2022, 41(5): 1-4.
- [18] 笪跃武, 于少亭, 胡淑圆. 城市自来水厂绿色发展路径探索与思考[J]. 净水技术, 2022, 41(11): 1-6.
- [19] 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.
- [20] 刘冠琦, 张春洋, 范锦, 等. 绿色发展视角下城市污泥处理处置规划探索——以石家庄市为例[J]. 给水排水, 2020, 46(10): 31-36.
- [21] 杨庆, 王亚鑫, 曹效鑫, 等. 污水处理碳中和运行技术研究进展[J]. 北京工业大学学报, 2022, 48(3): 292-305.
- [22] 付浩, 罗琦. 提质增效行动下某设区市污水处理减碳强度分析[J]. 中国给水排水, 2022, 38(23): 63-68.
- [23] 郝晓地, 张益宁, 李季, 等. 污水处理能源中和与碳中和案例分析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(20): 1-8.
- [24] 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.
- [25] 黄雄虎, 顾敦罡, 陆嘉麒等. 污水源热泵技术在城市污水热能回收中的应用现状与研究进展[J/OL]. 应用化工, 2023, 52(3): 922-928.
- [26] 郝晓地, 赵梓丞, 李季, 等. 污水处理厂的能源与资源回收方式及其碳排放核算: 以芬兰Kakolanmaki污水处理厂为例[J]. 环境工程学报, 2021, 15(9): 2849-2857.
- (责任编辑: 靳炜)

## Carbon emission measurement and carbon reduction strategy analysis of urban water system: A case study of Chengdu water system

ZHENG Yili<sup>1</sup>, MA Jun<sup>2</sup>, WEI Ting<sup>1,\*</sup>, WANG Panpan<sup>2,3</sup>, XIONG Wenlan<sup>4</sup>, YOU Luodan<sup>1</sup>

1. Chengdu Municipal Engineering Design and Research Institute, Chengdu 610015, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology Harbin 150090, China; 3. Harbin Institute of Technology Chongqing Research Institute, Chongqing 401151, China; 4. Water Affairs Bureau of Chengdu Municipality, Chengdu 610000, China

\*Corresponding author, E-mail: 417967670@qq.com

**Abstract** Urban water system is an industry that has high energy consumption per unit output and is closely tied with other industries. Under the background of "carbon peaking and neutrality (double carbon)" policy, conducting carbon emission calculation and carbon reduction strategy research is an important part of high-quality development of water system. This paper set up the structure of carbon emission calculation of urban water system and calculated direct and indirect carbon emission of Chengdu water system, including water extraction, production, supply, and discharge, based on large amounts of real data. The result showed that the total carbon emission of Chengdu water system was approximately 745,000 tons (as CO<sub>2</sub> equivalent) in 2019. The main producer was sewage system, in which the carbon emission generated from sewage treatment and sludge disposal was the most prominent. Based on these results, the goals and implementation path of Reduce pollution and carbon of water system were systematically and quantitatively analyzed. This paper put forward five key measures to promote carbon reduction, including "water conservation as priority, efficient pipe network, source improvement, low-carbon technology, and energy reuse", which can provide theoretical and technical support for the construction of "double-carbon" water system in Chengdu and similar cities.

**Keywords** carbon emissions; carbon peaking and carbon neutrality; water affairs; carbon reduction measures