

陈芃宇, 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): 44-55.

CHEN P Y, HUANG X R, ZHAN J. Research progress on carbon emission reduction of urban water utilities system based on LCA [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(2): 44-55.

基于 LCA 的城镇水务系统碳减排研究进展

陈芃宇, 黄心蕊, 詹 健*

(南昌大学资源与环境学院, 江西南昌 330031)

摘要 【目的】 在当前“双碳”背景下,为实现社会可持续发展,文章旨在探讨生命周期评价(LCA)方法在城镇水务系统碳减排研究中的应用,明确碳排放特征和规律,以期为城镇水务系统碳减排策略的制定提供参考。【方法】 文章首先介绍了LCA的理论框架,包括目标定义、清单分析、影响评价和解释4个阶段。在此基础上,总结了将LCA方法应用于城镇水务系统各子系统(给水、污水、再生水、雨水)的碳核算和碳减排研究,明确了碳核算对象和边界,分析了不同系统碳排放的组成。【结果】 通过LCA方法的应用,文章总结了国内外城镇水务系统碳减排研究进展,揭示了城镇水务系统各子系统的碳排放情况,为碳减排提供了数据支持。研究发现,城镇水务系统碳排放主要来源于能源消耗、化学品使用和污水污泥处理等方面。【结论】 针对城镇水务系统的碳排放问题,文章提出了减碳、替碳和碳汇三大范畴的碳减排路径和策略。具体行动措施包括优化能源结构、提高能源利用效率、推广低碳技术、加强污水处理设施建设和管理等。同时要重视水务系统内各个主体之间的责任关系,从运营企业到管理部门,需要加强合作。通过实施这些具体的碳减排措施,有望降低城镇水务系统的碳排放,为实现我国“双碳”目标贡献力量。

关键词 城镇水务系统 生命周期评价(LCA) 碳减排 碳中和 碳核算

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)02-0044-12

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.02.005

Research Progress on Carbon Emission Reduction of Urban Water Utilities System Based on LCA

CHEN Pengyu, HUANG Xinrui, ZHAN Jian*

(School of Resources and Environment, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract [Objective] In order to achieve sustainable social development under the current background of "dual carbon", this paper aims to explore the application of life cycle assessment (LCA) method in the study of carbon emission reduction of urban water utilities system and clarify the characteristics and laws of carbon emissions, in order to provide reference for formulation of carbon emission reduction strategy of urban water utilities system. [Methods] Firstly, the theoretical framework of LCA is introduced, including four stages: target definition, inventory analysis, impact evaluation and interpretation. On this basis, this paper summarizes the application of LCA method to the carbon accounting and carbon emission reduction of various subsystems (water supply, wastewater, reclaimed water and rainwater) of urban water system, and the carbon accounting objects and boundaries are clarified, and the composition of carbon emissions of different systems is analyzed. [Results] Through application of LCA method, this paper summarizes the research progress of carbon emission reduction of urban water system at home and abroad, reveals the carbon emission of each subsystem of urban water utilities system, and provides data support for carbon emission reduction. The study finds that the carbon emissions of urban water utilities systems mainly come from energy consumption, chemical use and sewage sludge treatment.

[Conclusion] In view of the carbon emission problem of urban water utilities system, this paper proposes carbon emission reduction paths and strategies in three categories: carbon reduction, carbon substitution and carbon sink. Specific actions include optimizing energy utilization structure, improving energy efficiency, promoting low-carbon technologies, and strengthening the construction and

[收稿日期] 2024-06-28

[作者简介] 陈芃宇(2001—),男,硕士,研究方向为水务系统碳减排,E-mail:1324224315@qq.com。

[通信作者] 詹健,男,教授,研究方向为生物滞留设施和海绵城市,E-mail:zhanjian@ncu.edu.cn。

management of wastewater treatment facilities. At the same time, it is necessary to pay attention to the responsibility relationship between various entities in water system, and strengthen cooperation from the operating enterprises to management departments. Through implementation of these specific carbon reduction measures, it is expected to reduce the carbon emissions of urban water utilities systems and contribute to the realization of China's "dual carbon" goal.

Keywords urban water utilities system life cycle assessment (LCA) carbon emission reduction carbon neutrality carbon accounting

2022年,住房城乡建设部发布了《“十四五”全国城市基础设施建设规划》,其中提到,在“十三五”期间,我国城市基础设施的投资稳步增加,各类基础设施的建设和改造稳步推进,设施的服务能力和城市的承载能力正在不断提升。据统计,到2020年,用水普及率和城市污水处理率分别达到了99.0%和97.5%,污水的集中处理能力达到1.9亿m³/d^[1]。在供水排水方面的进展有效促进了我国社会的健康积极发展。

然而,城镇水务行业在其运作流程中,涉及到水源地取水、水质净化以及输送至污水收集及处理等环节,均需要耗费大量电力资源。从全球范围看,城镇水务系统在运行维护阶段电能消耗约占世界总电耗的6.1%,能源消耗约为总能耗的4.1%^[2]。根据《城市建设统计年鉴》中有关我国城镇水务系统供水量和污水排放量的增长变化趋势,2022年我国城镇水务系统碳排放总量约占全社会总碳排放量的0.82%。虽然仅仅从碳排放总量来看,对城镇水务行业进行碳中和似乎对全社会的贡献非常有限,但不可忽视的一点是,水作为全社会流动性最大的一种产品,与其他各个行业的关系十分密切。做好水务系统的碳减排,分析和厘清城镇水务系统内碳排放的总量和强度,对找到实施碳减排措施的切入点和挖掘减碳潜力至关重要。这不仅有助于其自身做到节能增效,促进低碳转型,还有助于全社会各行业做到可持续发展。

生命周期评价(life cycle assessment, LCA)作为一种环境管理工具,不仅能对当前的环境冲突进行有效的定量分析和评价,而且能对产品及其“从摇篮到坟墓”的全过程所涉及的环境问题进行评价,既可用于企业产品开发与设计,又可以有效地支持政府环境管理部门制定相关政策^[3]。许多利用LCA的相关研究评价了不同水系统造成的环境影响,进而有助于制定相应的碳减排措施。这种方法已被广泛用于分析不同城镇水务系统造成的直接和

间接环境影响,具体来说包括给水系统、污水系统、再生水系统和雨水系统。

1 LCA 方法

针对气候变化这一全球热点议题,各国都在积极采取行动,以实现碳达峰和碳中和为共同奋斗目标。为了实现这个目标,必须精确评估各产品和技术的碳足迹,并构建低碳体系。在此背景下,LCA方法作为一种有效的工具,被广泛应用于碳排放源的清查、数据收集以及碳排放核算过程的深入分析中。LCA由4个相互关联的部分组成,即目标定义和范围界定、清单分析、影响评价、结果解释。相关流程如图1所示^[4]。

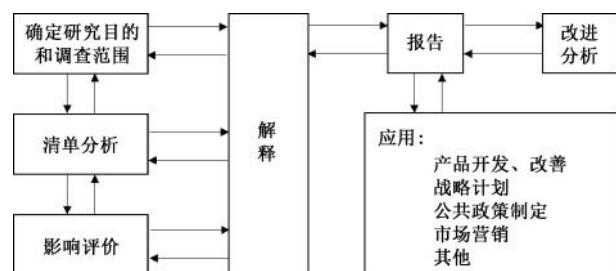


图1 LCA流程

Fig. 1 LCA Process

1.1 目标定义和范围界定

在LCA初期,设定研究目标与范围是至关重要的,这也为后续3个环节——清单分析、影响评估及结果解读提供了基础,并直接关系到整个评价过程及其成果。不仅要明确阐述LCA分析的目标、背景以及理由,而且更应强调其中的假设条件与约束条件。同时,确定功能单位同样不可或缺,它是衡量产品系统输出功能的标准,能确保LCA结果的可比性。

1.2 清单分析

生命周期清单(life cycle inventory, LCI)分析是一种精确描绘系统内外物质与能量流动状况的技术手段。它将产品生命周期各个阶段所涉及的各种负荷类型及负荷量详细记录下来,以便全面评估产品

或服务全周期内所需资源、能源的消耗以及废物的产生情况。这种方式能够清晰揭示系统中各环节的输入和输出关系。

需要收集目标产品从制造、使用到废弃的整个生命周期的数据,包括原料数据,如资源开采、电力、燃料等。由于生命周期复杂多样,这些数据难以收集,需要借助 LCA 软件,如 SimaPro(荷兰)、TEAM(法国)、Gabi(德国)等。这些软件提供了相关数据和研究方法,帮助进行冗杂的计算过程^[3]。

1.3 影响评价

生命周期清单表是生命周期影响评价(life cycle impact assessment, LCIA)的基础。根据国际标准化组织(ISO)质量相关标准,LCIA 是为了理解和评价产品系统的潜在环境影响的重要性。环境毒理学和化学学会(Society of Environmental Toxicology and Chemistry, SETAC)将 LCIA 分为 3 个步骤,分别是分类、特征化和量化评估^[5]。目前国内外常用的 LCIA 方法体系主要有面向以问题为主的 CML2001、EDIP2003、IMPACT2002,是对于气候变化、富营养化、土壤酸化等环境影响进行评价。以及 Ecoindicator99 等面向损害为主的方法体系,这种体系将每种环境影响分类成不同主题,并进行建模分析。

(1) 分类:将清单中的输入输出数据进行整合,得出统一的环境影响类型。这种类型包含资源枯竭、生态影响及对人类健康的影响三大类,每个类别之下又细分为诸多子类别。

(2) 特征化:开发一种模型,将 LCIA 提供的数据根据特征化因子进行量化分类,得到各类环境影响的负荷。

(3) 量化评估:目的是将不同类别环境影响负荷,统一化为无量纲归一化结果,使不同影响之间可以相互比较。之后再对各结果赋予权重,以获得环境综合影响值。但由于没有官方统一或广泛认可的权重因子,因而大部分研究均采用层次分析法进行权重量化。该方法首先对不同影响之间两两比较以确定相对重要性,并进行标度,形成 A-P 矩阵;随后,对矩阵进行逻辑一致性检验,并计算权重值(W)。最终,依照权重值将各项评价加权求和,计算评价总值,如式(1)所示。

$$L = \sum_{i=1}^n W_i N_i \quad (1)$$

其中: L ——全生命周期环境影响指标值;
 W_i ——第 i 种环境影响类型权重值;
 N_i ——归一化后第 i 种环境影响的环境负荷潜能值。

1.4 解释

生命周期解释的目的是根据 LCA 前几个阶段的研究或清单分析的发现,以透明的方式来分析结果、形成结论、解释局限性、提出建议并报告生命周期解释的结果,尽可能提供对 LCA 或 LCIA 研究结果的易于理解的、完整的和一致的说明。

1.5 碳排放计算

全球变暖潜势(global warming potential, GWP)是基于 LCA 的碳排放计算考虑的环境影响类别,其产生量主要由污染物去除和能源消耗效率决定,对全球的气候变化影响程度都是广泛一致的,适用性较强。不同的温室气体统一转化为二氧化碳(CO_2)当量表示。一般可采用政府间气候变化专门委员会(IPCC)排放因子法进行核算,核算模型如式(2)。

$$L_{CAC} = \sum_{j=1}^n A_j E_j \times G_j \quad (2)$$

其中: L_{CAC} ——生命周期碳排放量,以 CO_2 当量计, $kg CO_2 eq$;
 A_j ——温室气体 j 排放量, kg ;
 E_j ——温室气体 j 排放因子;
 G_j ——温室气体 j 的全球变暖潜值。

2 LCA 在城镇水务系统碳减排的应用

随着气候问题日益严重,碳中和和碳达峰迫在眉睫,LCA 作为一种有效的碳排放和碳核算清查工具,被广泛用于不同领域的碳中和相关研究,例如能源生产技术、废物管理技术等。Nakajima 等^[6]通过 LCA 评价饮料罐材料的回收效果,是最早对碳中和进行的研究。2002 年,研究人员开始利用 LCA 进行碳排放的评价,目的主要是更好地控制温室气体的排放。在 Corti 等^[7]的研究中发现,相较于传统燃油的使用方式,在生物质产能的运营过程中所产生的 CO_2 能够通过植物在光合作用中的 CO_2 积累进行中和。Weitz 等^[8]采用 LCA,剖析美国城市生活废弃物管理 25 年以来对温室气体排放的影响。

在城镇水务系统中,LCA 也得到了相关应用,主要是针对不同水系统的综合碳核算评估和环境影响,从而制定减少碳排放的措施或建立环境影响评

价模型,为城镇水务行业达到碳中和提供理论依据。吴百苗等^[9]基于全生命周期框架评价模型,并利用该模型对2种不同污泥处理工艺下污水处理厂各阶段中能耗、物耗、污染排放等方面进行综合影响评价与对比分析,选择出来了碳排放最少的处理工艺。Pintilie等^[10]使用LCA方法来确定和量化西班牙塔拉戈纳城市废水处理和再生水回用的主要环境影响贡献者。该研究也表明LCA方法在污水处理和回用决策中具有重要作用。García-Sánchez等^[11]使用LCA和社会生命周期方法,系统地评估了墨西哥城给水和污水系统对环境和社会的影响。

2.1 城镇水务系统碳核算对象与边界

利用LCA分析城镇水务系统,首先就是要确定研究的对象。一般来说,城镇水务系统包括4个部分,分别是市政给水系统、污水系统、再生水系统和雨水系统,其各部分的具体模块如表1^[2]所示。

表1 城镇水务系统碳核算对象

Tab. 1 Carbon Accounting Objects of Urban Water Utilities System

核算对象	模块
给水	取水设施、给水处理厂、海水淡化厂、输配水管网和长距离输水
污水	污水管渠设施、污水处理厂和污泥处理处置
再生水	再生水厂和输配水管网
雨水	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

为了保证碳核算结果的准确性,还需要确定系统的具体核算边界,这一步也是关键步骤之一。在LCA理论中,生命周期可分为5个阶段即原材料获取阶段、生产制造(装配)阶段、包装和运输阶段、使用阶段和回收(再利用)或者丢弃阶段。这个过程包括研究对象“从摇篮到坟墓”的全流程。而对于城镇水务来说,在时间维度层面,可分为:(1)规划建设,从设施在正式投入运行之前的全过程;(2)运行维护,从设施正式投产到其结束运行的全过程;(3)资产重置和拆除,设施结束运行后作他用或拆除的全过程。城镇水务系统属于传统建筑行业之一,但又有别于传统建筑行业。在规划建设阶段,包含建设施工,相关材料的制造、运输与消耗,以及一些间接能源消耗等,会产生大量碳排放。同时,此阶段的规划也会对后续的实际运行产生影响,根据规划设计和建造时的施工水平不同,可能会影响到运

行投产时系统内设施的实际运行年限,从而影响到后续阶段的碳排放。根据相关研究,运行维护阶段是城镇水务系统内碳排放最大的部分,是碳减排最重要的环节。

2.2 给水系统

城镇给水系统包括取水设施、给水处理厂、海水淡化厂、输配水管网和长距离输水,并且一般是由这些设施以一定的方式组合起来形成的整体,同时也包括输配水管道、处理设施、输送设备等附属设施^[12]。城镇给水系统的碳核算边界从取水水源算起,然后经过输配水管网的运输,进入水质处理设施最后到达用户的全过程。

目前,利用LCA对城镇给水系统碳排放的研究相对较少,但已经有研究探明了关于区域层面的建模数据,例如, Ma等^[13]采用效率测量模型,估计了2018年我国城市供水系统运行的温室气体排放总量约为1 248万t CO₂ eq,温室气体强度为0.377 kg CO₂ eq/m³。Yateh等^[14]对93篇相关文献进行分析,调查了饮用水处理厂的能源消耗和碳排放之间的关系,研究了水、能源和碳排放之间的内在关系。研究发现,在国家层面上,水处理厂的能源消耗和碳排放研究缺乏数据管理和高效技术。因此,建议采取适应性策略,进行有效的监测和报告,包括投资太阳能或风能等可再生能源,采用节能技术,实施可持续的水资源管理,以及严格的碳排放规定。

研究人员也针对某些典型的饮用水处理厂和处理工艺的碳排放和能耗进行研究。Li等^[15]对我国9个给水厂进行碳核算分析,测试了其温室气体排放强度平均值,并且分析不同排放源对总排放的贡献,其中电力供应是主要排放源,占68.9%~91.8%。Bonton等^[16]对加拿大魁北克省2座饮用水处理厂进行了LCA的比较研究,在魁北克省水力发电为主的情况下,纳滤系统的环境影响远低于传统工艺。主要原因是传统工艺中使用的煤质活性炭生产,其对人类健康、气候变化和资源消耗的影响较大。Hofs等^[17]使用混合LCA,结合过程分析和投入产出分析,评估了一座2025年建成并预期运行至2075年的新饮用水处理厂的碳足迹。Zhang等^[18]对天津一个大型饮用水处理厂在建设和运行阶段的温室气体排放进行了LCA,研究发现,建设期碳排放主要来源于混凝土工程和钢筋工程。运行期碳排放主要来源于电力消耗、化学品使用和热力消耗。

其中,水泵的运行是电力消耗的主要部分。

然而,在考虑碳排放的约束下,对城镇供水效率不可避免会产生影响。Ma 等^[13]研究了在碳排放约束下我国城市供水效率问题,构建了一个考虑碳排放作为非期望产出的数据包络分析模型,研究发现在考虑碳排放约束后,城市供水效率平均值显著下降。研究还明确了影响城市供水效率的关键因素,如环境规制、管网漏损率、供水网络密度、居民用水量等。所以,在碳中和的背景下,如何做到供水效率与碳排放之间的平衡,需要进一步的研究。

2.3 污水系统

城镇污水系统是城镇污水收集、输送、处理、排放、副产物处置相关的全部构筑物和设施的总称,按照发挥功能的不同,可分为污水管渠设施、污水处理厂和污泥处理处置 3 个部分。污水中通常含有较高浓度的有机物,这导致污水系统的碳排放活动较为复杂。因此,污水中的各类有机物在完全降解之前所经过的相关运输和处理设施都应该纳入核算边界之中。

对于污水处理厂而言,系统由上游、核心和下游过程组成^[19]。上游过程包括废水收集和运输到处理厂。核心流程包括工厂建设、运营和拆除阶段。下游过程主要是副产物的产生。一般来说,污水处理厂系统核心过程运行阶段的输入包括废水、能源、化学品,而输出包括对周围环境的各种排放,即水、空气和土壤。值得注意的是,许多与污水处理厂相关的 LCA 研究已将其系统边界扩展到包括下游过程^[20],即材料替代或能量回收。

城镇污水系统作为典型的能源密集型行业,完整厘清其温室气体排放情况十分关键。污水处理厂系统温室气体排放总量一般为直接和间接 CO₂、甲烷(CH₄)和一氧化二氮(N₂O)排放的总和^[21]。朱黔沫等^[22]梳理了城市排水系统温室气体来源情况,结果表明直接温室气体排放包括二级生物废水处理产生的 N₂O 和厌氧废水和/或污泥处理过程产生的 CH₄ 和好氧生物降解处理过程排放的 CO₂。间接温室气体排放主要源于污水处理厂中使用的电力和化学品的生产,燃料、化学品和废物的运输,污水和污泥接收环境中剩余成分的降解。许多与污水处理厂相关的 LCA 研究得出结论,GWP 与污水处理厂运行的电力(特别是化石燃料电力)消耗之间存在线性关系。这主要归因于电力生产过程中占主导地位

的 CO₂ 排放^[23]。除了电力之外,污水处理厂中 CO₂ 的产生还有其他来源,例如化学品的生产、使用和运输,废水中有机物的降解和污泥的利用^[24]。在污水处理厂的生命周期中,二次生物废水处理、废水和污泥的 N₂O 排放对全球变暖的潜在影响作出了不小的贡献。Rodriguez-Garcia 等^[25]发现主要来自输水管线的 N₂O 的排放不容小觑。除了 CO₂ 和 N₂O 排放对 GWP 的贡献外,CH₄ 排放在某些情况下也需要引起人们重视。根据 Bogner 等^[26]的研究,来自垃圾填埋场和废水的 CH₄ 约占废物总排放量的 90%,约占全球人类活动甲烷排放量的 18%。值得注意的是,由于 CH₄ 具有能量回收的潜力,回收 CH₄ 可以通过替代化石燃料/电力间接缓解全球变暖。当前的温室气体核算方法并不完善,例如我国环境保护产业协会发布的《污水处理厂低碳运行评价技术规范》,其忽略了部分排放单元,并且未将污水中的有机碳排放纳入清单。所以为了更准确地进行污水处理厂的 LCA,对温室气体排放的核算模型在不断发展中。章易博等^[27]基于 BioWin 建模软件,提出了一种更全面的城镇污水处理厂碳排放核算方法,考虑了进水溶解性 CH₄、污水化石碳、外加碳源以及受纳水体残余污染物引起的碳排放,为污水厂温室气体排放计算提供了新思路。Rodriguez-Garcia 等^[28]提出了一种用于估算污水处理厂直接排放温室气体(CO₂ 和 N₂O)的模型,即直接排放估算模型。Nguyen 等^[29]整合了 LCA 和全厂模型,LCA 可以评估污水处理厂的整体环境性能,而全厂模型可以量化温室气体排放,并评估不同控制策略的效果。将两者结合可以弥补各自的不足,提供更全面的评估。

目前 LCA 在污水处理厂碳排放领域的研究主要以可持续发展评估为主题,围绕不同污水处理、污泥处理技术或能源/资源回收技术的全球变暖潜力等环境影响和经济成本开展研究^[30]。Lu 等^[31]通过 LCA 方法,对东莞某市政污水处理厂的升级改造项目的环境效益进行了评估,研究发现,污水处理厂的升级改造显著增加了负面环境影响,主要原因包括旧设备拆除、新设施建设、膜生物反应器(MBR)池增加等导致的能源消耗增加。Hao 等^[32]利用 LCA 方法评估了我国某污水处理厂的环境影响,并提出了一个具有高效能源和资源回收方案的新方案。研

究结果显示,新方案通过能源和资源回收能够抵消传统污水处理厂的负面影响,甚至实现净零影响。

对于污水管渠而言,由于管渠设施中厌氧环境的存在,污水中大量的有机物在微生物作用下会最终转化成 CH_4 、 CO_2 等温室气体。 CH_4 一般由有机物的厌氧降解产生,这个过程分为 5 个阶段:水解、发酵、产氢、产乙酸和产 CH_4 , CH_4 主要在最后一个阶段产生。而 N_2O 往往是由管渠中发生的硝化与反硝化反应产生。管材也是影响碳排放的重要因素之一。Alsadi 等^[33]研究了如何优化常用压力管道材料固化内衬管道(CIPP)、预应力钢筒混凝土管(PCCP)、高密度聚乙烯管(HDPE)和聚氯乙烯管(PVC)在其生命周期内的碳排放,结果表明,PVC 管在所有管道材料中碳排放最低,PCCP 管次之,HDPE 管和 CIPP 管碳排放较高。另外值得注意的是,在强降雨气候下,城市排水量超过合流制管道或污水处理厂容量时,未经处理的雨水和污水会溢流,从而直接排放到自然水体中,其中由污水中微生物产生的温室气体不可忽略。Tavakol-Davani 等^[34]讨论了将水文分析和 LCA 方法结合起来评估雨水收集系统、灰色基础设施和混合系统控制联合下水道溢流的环境可持续性。结果表明,相较于仅灰色基础设施场景,将更多的合流污水送至污水处理厂,导致更高的 GWP 影响。

2.4 再生水系统

再生水系统主要指的是为使污水处理厂出水满足不同的回用水质标准经过的处理系统以及将处理水输送至用户的输配水管网设施的总称。

再生水厂主要利用经过二级处理的水作为水源,经过进一步净化处理,这些水可以用于多种用途,包括补充地下水、供应工业用水、农业和林业灌溉、城市循环用水以及景观用水等。标准的处理流程通常包括二级处理后的水加上传统的净化步骤,如混凝、沉淀、过滤和膜分离技术。如果处理后的水仍然达不到用户的要求,可以引入先进的处理工艺,例如臭氧氧化、高级氧化过程和活性炭吸附等技术。在水处理过程中,碳排放的主要来源包括水泵和其他设备运行所需的电力消耗、化学药剂的添加以及相关材料的运输。此外,处理过程中产生的污泥通常通过填埋方式处理,这也会产生一定程度的直接碳排放。

对于再生水处理厂的 LCA 研究与其他系统类

似,主要围绕不同处理方式和回用方案产生的环境影响。Negi 等^[35]对城市水系统中不同再生水回用方案的环境影响进行了 LCA,分析了不同方案在温室气体排放方面的表现,指出直接饮用水再生利用方案由于需要大量能源,导致温室气体排放量显著增加,在非饮用水再生利用方案下,温室气体排放量比基准情景减少了 12%。Pasqualino 等^[36]使用 LCA 方法评估了西班牙地中海沿岸一个污水处理厂的环境影响,并比较了 4 种城市废水再利用的替代方案。研究发现,回收废水产生的 CO_2 排放最少。在淡水资源匮乏的地区使用再生水代替饮用水可以节省大量能源消耗。Gilboa 等^[37]开发了一个动态模拟模型,综合考虑了各种水源的使用与再生,并将其与 LCA 和生命周期成本方法相结合。研究表明,不同水源方案对全球变暖潜力的贡献主要来自电力消耗。特别是海水淡化、饮用水供应和废水处理等流程产生的电力消耗,其中用处理后的灰水或处理后的污水再生用作非饮用水是环境影响最低的方案。

2.5 雨水系统

城镇雨水系统由渗滞、转输、集蓄、调蓄、截污净化和利用设施以一定的方式组合而成,可分为雨水管渠设施和雨水控制设施两部分。其中,雨水管渠设施除常规排水管渠及附属构筑物外,还包括具有转输功能的其他设施,如植草沟、渗管等;雨水控制设施则可划分为渗滞类设施、集蓄利用类设施、调蓄类设施、截污净化类设施以及其他技术设施 5 类。

目前国内外学者已经针对海绵城市和雨水系统的碳排放问题展开了相关研究,较多集中在设施层面的研究如生物滞留池、绿色屋顶、雨水花园、透水铺装、人工湿地等方面。Flynn 等^[38]使用 LCA 方法来评估维拉诺瓦大学校园内一处绿色基础设施生物渗透雨水花园的环境、经济和社会效益。研究发现,当雨水花园的填料进行再利用时,在全 LCA 下,可减少 58 228 kg CO_2 eq 的排放。Kavehei 等^[39]利用 LCA 方法系统性地回顾和分析了绿色屋顶、雨水花园、生物滞留池、植被水沟和雨水池塘等不同技术,估计了其碳足迹,发现雨水花园的碳封存潜力最大,可以抵消其全部碳足迹。朱雨等^[40]运用 LCA 方法对河北省某小区的典型海绵措施进行了全生命周期内的碳核算,结果表明,该设施的直接碳排放主要在降解污染物的过程中产生。李晨璐等^[41]基于 LCA 方法,构建了一种适用于城区范围的海绵城市雨水

系统碳排放量化方法。然而, 目前大多数相关研究仅聚焦于对单个设施的碳排放进行评估, 却忽视了诸如雨水管网以及水泵站等传统雨洪管控设施。这使得在从更宏观的视角审视雨水排泄体系时, 对于其整体碳排放情况的研究尚存在一定的空白。同时, 多数研究的研究区域局限于建筑物或小区范围, 缺乏适用于城区等较大范围的雨水排水系统碳核算方法。

在涉及到雨水系统构建环节的碳排放系数数据库及计算辅助工具领域, 国外已有许多数据库资源, 如 ICE、Athena、NREL 以及 CLCD 等。然而, 它们却未能对雨水系统的碳排放系数做出综合性、系统性记录。此外, 这些数据库所提供的数据时效性相对较低, 且不同地区之间的碳排放系数差异显著。即便在国内, 虽然已经出现了一些本土化的生命周期数据库, 但其中大部分数据仍然源自国外的相关统计资料, 这在某种程度上可能无法准确反映出我国当前的排放实际情况。张希^[42]基于 LCA, 建立了一种可实现自动计算的计算软件, 软件包括针对中国的雨水系统建设本土化和数据完整的雨水系统温室气体排放系数因子库, 更全面、更准确地预估实际案例中雨水系统的碳排放和碳汇。

2.6 水务系统协同性分析

尽管给水系统、污水系统、再生水系统和雨水系统的运营主体不同, 但它们构成了城镇水务系统的有机整体, 不同系统之间相互联系、相互影响, 单独评估某一环节的环境影响难以全面了解整个系统。因此, 在利用 LCA 分析碳减排等问题时需要对不同系统之间的协同性进行充分考虑。例如在污水系统中, 可以根据再生水回用的具体场景合理设定出水标准, 避免过度处理或水质不达标, 从而优化污水处理厂的能耗水平, 减少造成的环境影响。Negi 等^[35]利用 LCA 方法评估了印度孟买不同废水回用情景的环境影响, 研究包括了多种再生水处理方案和回用用途, 结果表明, 不同的废水回用情景具有不同的环境影响, 需要根据具体情况选择。

3 城镇水务系统碳减排路径分析

3.1 系统碳排放组成分析

基于 LCA 分析, 城镇水务系统内给水系统、再生水系统和雨水系统的主要碳排放活动是电力消耗产生的间接排放。而污水系统由于包括生物处理设

施, 除了电力消耗带来的间接碳排放外, 还有各类设施的直接碳排放, 据估算, 其排放量与污水系统电耗所导致的碳排放比例约为 3:1。从城镇水务系统的整体来看, 运行阶段的碳排放占总排放量的 90% 以上, 其中给水系统耗电、污水系统耗电和污水系统生化导致的排放量约占 80%, 这 3 个部分是碳排放活动的聚焦点。我国城镇水务系统碳排放组成如图 2 所示。

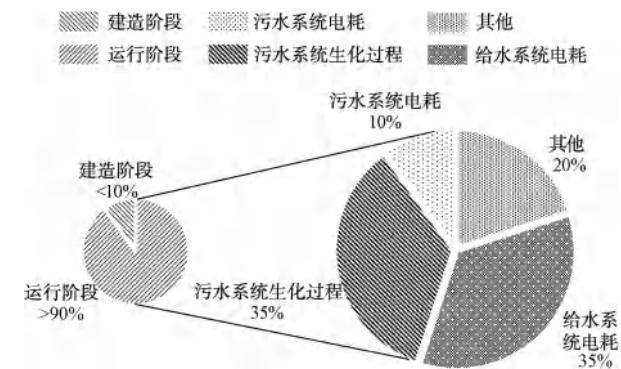


图 2 我国城镇水务系统碳排放组成
Fig. 2 Composition of Carbon Emissions in Urban Water Utilities System at Home

3.2 碳减排路径分析

为了做到城镇水务系统碳减排, 尽快达到国家碳达峰与碳中和的目标, 进行碳核算基础, 它能够确定水务行业未来的碳排放趋势, 并且能将系统管理基准化和推动水务企业主动参与碳减排行动^[1]。做好碳核算后, 继而可以根据结果分析确定实现碳中和的具体规划方案, 其中找到支撑减碳降碳的技术工艺是关键。

根据碳减排原理和机制, 国际上将其分为 3 个范畴: 减碳、替碳和碳汇。《城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南》中将上述范畴进一步细分为 5 类行动策略。源头控制、过程优化及工艺升级行动策略属于减碳范畴, 低碳能源策略属于替碳范畴, 植物增汇属于碳汇范畴。碳减排行动路线总结如图 3 所示。

3.2.1 减碳

减碳立足于现有的工艺, 通过优化或者革新从而降低化石燃料的消耗, 降低碳排放量。一般来说, 减碳行动实施迅速, 工程上投资规模较小, 作为城镇水务系统制定碳减排方案的首选, 目前大部分的研究也都基于此。减碳策略总结如表 2 所示。

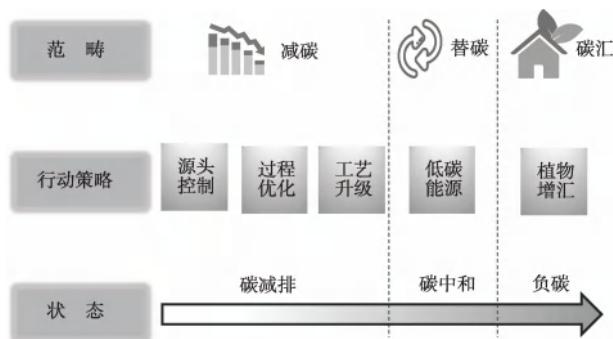


图 3 城镇水务系统碳减排行动路线

Fig. 3 Action Route for Carbon Emission Reduction in Urban Water Utilities System

3.2.2 替碳

然而光靠减碳策略是远远不够的,替碳和碳汇是必由之路。替碳是通过使用清洁能源代替传统化石能源来减少碳排放,例如风能、太阳能以及其他可再生能源。近些年来,环保低碳的“光伏+污水处理厂”的新模式成为主流发展方向。我国对此提供了大力支持,2020年4月,国家五部委出台文件,鼓励污水处理企业综合利用场地空间,采用“自发自用、余量上网”模式建设光伏发电项目。在地方上,2021年11月,浙江省能源局印发全国首个针对整县推进分布式光伏开发试点工作的省级实施工

表 2 城镇水务系统减碳策略
Tab. 2 Carbon Reduction Strategies for Urban Water Utilities System

水务系统	源头控制	过程优化	工艺升级
给水与再生水	水源地保护 强制用水计量 加强节水宣传	智慧泵站构建 管网漏损监测 水处理工艺优化 终端水质保障	新型供水方式 高效处理工艺
污水	出水水质标准优化 强化工业废水分管理 采用粪尿分离技术	抑制污水管渠温室气体产生 曝气和提升设备优化 剩余污泥处理优化	低碳型污水处理新技术 推动资源回收
雨水	源头减量 绿色基础设施建设	泵站运行模式优化 雨污分流	

作导则^[43]。姚阔为等^[44]结合实际案例分析了光伏发电在污水厂碳减排中的应用,研究表明“供电-处理污水自来水”的绿色清洁生产模式预计全年减少1 690.61 t 温室气体排放,具有良好的社会、环境和经济效益。通过建设光伏发电,优化了电网结构,增加能源供给方式,减少化石能源的使用。但这种模式也存在一定的不足。一是光伏发电受气候变化的影响较大,日照时间、雨雪周期的不同会影响发电量。二是目前的光伏项目主要是在已有的处理厂安装建设,必须适应原有的布局进行改造。并且光伏项目的基础建设、安装成本较高,也基本难以满足处理厂所需发电量,反而还增加了供配电系统的管理难度。李杰^[45]探讨了云南省分布式光伏发电开发现状,初步评估其可开发装机容量可达2 400万kW,但实际建设情况却不尽人意。对试点地区的投资开发企业等的调研分析表明,当地的电价水平较低,影响了投资的积极性。而且部分当地政府提出的资源入股、项目分成等导致了非技术成本的增加,项目收益进一步降低。所以,想要在城镇水务系统中大规模推广光伏发电,不仅要考虑安装改造等技

术层面的问题,还要结合当地经济水平和社会因素进行综合考量。总的来说,我国目前水务系统采用这种策略还有一定的局限性,有时不可避免要产生较大规模的投资。

3.2.3 碳汇

碳汇指的是通过植物吸收固定大气中的温室气体,期望能抵消温室气体的排放。碳汇策略重点是植物增汇和水生态系统固碳。碳汇策略的研究重点集中在污水系统和雨水系统。污水系统中,一些结合植物增汇的新型处理工艺逐渐投入使用。例如以独特的食物链反应池为基础的食物链反应池(FCR)工艺,它以特殊材料和植物根系为生物载体,利用各次级生态系统中的各种微生物、水生植物、水生动物等的新陈代谢作用,增强对水体中污染物的降解功能。王文刚等^[46]将FCR工艺应用于西安某污水处理工程中,实际运行结果表明该工艺运行稳定,出水水质稳定达到一级A标准,同时,FCR在运行过程中通过植物作用,不仅有效改善了周边的生态环境,并且在一定程度上实现了碳减排的目的。但目前这些研究并没有量化新技术的碳汇,仅仅关注了污水

处理的效果,不能全面分析对碳减排的影响。表 3 总结了一些常见碳汇策略的应用。

表 3 碳汇在水务系统中的部分应用
Tab. 3 Partial Applications of Carbon Sinks in Urban Water Utilities System

碳汇策略	技术特点	地区	工程概况	生命周期范围	应用效果	参考文献
FCR 工艺	以特殊材料和植物根系为载体,利用水生植物等增强对水体中污染物的降解	辽宁某城镇	FCR+深度处理,污水处理规模为 1 万 m^3/d	运行阶段	对化学需氧量 (COD_{Cr})、五日生化需氧量 (BOD_5)、悬浮固体 (SS)、氨氮、总氮 (TN)、总磷 (TP) 的实际去除率均高于设计去除率,达到一级 A 标准	[47]
植物生态生膜(BBR) 工艺	基于 FCR,以植物根系和仿根系膜组件作为微生物的载体,构建水生态系统	南昌	改造后污水处理规模为 2 万 m^3/d	运行阶段	BBR 主体工艺整体上达到预期设计效果,解决了改造前出水水质不能稳定达标的问题	[48]
尾水人工湿地	通过湿地植物、微生物和土壤的协同作用,净化污水	厦门	一体化 AO 工艺+梯级人工湿地,人工湿地面积共 452.88 m^2	建设、使用和更新	使用阶段碳汇达到 $-346\ 220.86\ kg\ CO_2\ eq$	[49]
海绵城市	利用绿色设施缓解城市内涝、削弱城市径流污染负荷、节约水资源、保护和改善城市生态环境	北京某片区	建设有雨水花园、下沉式绿地、绿色屋顶、透水铺装等主要海绵城市设施	建设和运行	运行阶段绿色雨水基础设施产生的碳汇量为 $-0.58\ 万\ t$,全生命周期的碳排放量为 $-16.71\ 万\ t$	[50]

3.2.4 水务系统各主体责任

当然,想要达到碳中和甚至负碳,不能只依赖于技术层面的进步,更加需要管理部门高屋建瓴地统一规划。城镇水务管理部门主要职责在于制定相关标准法规,并为水务系统的规划提供关键的数据支持。在进行未建或未运行水务系统的碳核算工作时,管理部门需对规划区域进行不同系统的物质流分析和水量平衡计算,整合运营企业和行业协会提供的平均碳排放强度数据,并结合当地规划特色选择最适宜的强度因子。

运营企业作为城镇水务系统的具体实施者,应当负责搜集碳核算所需资料并执行核算任务,同时主动接受行业协会和管理部门的指导与监督。行业协会则应负责指导运营企业进行碳排放核算,汇总核算成果,并提供城镇水务系统的平均碳排放强度信息。城镇水务系统里的每一个主体,包括水务管理部门、行业协会以及运营企业都需要在从碳核算到碳减排策略落地实施的全过程中发挥作用,通力合作,才能早日实现“双碳”目标。

4 结语和展望

本文介绍了 LCA 方法在城镇水务系统中的理论和应用,并分析了碳减排路径和策略,为达到“双

碳”目标提供理论依据。LCA 作为一种环境评价工具,其评价指标 GWP 能够反应温室气体的排放情况,已经被广泛应用于城镇水务系统的碳足迹分析和碳核算过程中。在给水系统、污水系统、再生水系统和雨水系统中均有不同程度的应用,能够为水务系统碳中和提供较大的帮助。然而目前这方面的研究还不够全面,例如给水系统中,在减少碳排放和保证供水效率的平衡的研究中还存在一定的空白;污水系统中,各种温室气体的直接排放还缺少准确计算的方法或模型。最后,从减碳、替碳和碳汇 3 个范畴来分析了碳减排的策略和路径,为城镇水务行业的碳减排提供一定的理论基础。

展望总结如下。

(1) 进一步研究碳减排和供水效率的平衡,可综合环境 LCA 和社会 LCA 来分析,量化给水系统中的社会影响和效益。

(2) 结合全生命周期分析,优化碳排放核算的模型,全面考虑环境影响。

(3) 协同分析城镇水务系统中的各个系统,以及各个系统生命周期中的每个环节。政府管理部门和行业协会应加强不同运营主体间的联系,优化推进水务系统碳中和进展。

参考文献

- [1] 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 R B, YU W B, ZHANG M B, et al. Carbon accounting and reduction planning in urban water sector [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(8): 1-10.
- [2] 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.
China Urban Water Association. Guidelines for carbon accounting and emission reduction in the urban water sector [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022.
- [3] 郑秀君, 胡彬. 我国生命周期评价(LCA)文献综述及国外最新研究进展 [J]. 科技进步与对策, 2013, 30(6): 155-160.
ZHENG X J, HU B. Domestic literature review and the latest overseas research progress of life cycle assessment [J]. Science & Technology Progress and Policy, 2013, 30(6): 155-160.
- [4] 王吉凯. 基于产品生命周期的碳排放计算方法研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
WANG J K. Research on the method of calculation for carbon emissions based on life cycle assessment [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- [5] 魏小清. 基于生命周期理论的大型公共建筑能耗分析与评价 [D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
WEI X Q. Analysis and valuation of energy consumption based on LCA for large-scale public buildings [D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [6] NAKAJIMA K, INO H, HALADA K. Life cycle assessment of beverage cans [J]. Journal of the Japan Institute of Metals, 2000, 64(8): 591-596.
- [7] CORTI A, LOMBARDI L. Biomass integrated gasification combined cycle with reduced CO₂ emissions: Performance analysis and life cycle assessment (LCA) [J]. Energy, 2004, 29 (12/13/14/15): 2109-2124. DOI: 10.1016/j.energy.2004.03.015.
- [8] WEITZ K A, THORNELOE SUSAN A, NISHTALA S R, et al. The impact of municipal solid waste management on greenhouse gas emissions in the United States [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2002, 52(9): 1000-1011.
- [9] 吴百苗, 张一梅, 栗帅, 等. 基于LCA的污水处理方案碳中和综合影响评价 [J]. 环境工程, 2022, 40(6): 130-137.
WU B M, ZHANG Y M, LI S, et al. Comprehensive impact assessment on carbon neutralization of wastewater treatment plants based on hybrid LCA [J]. Environmental Engineering, 2022, 40 (6): 130-137.
- [10] PINTILIE L, TORRES C M, TEODOSIU C, et al. Urban wastewater reclamation for industrial reuse: An LCA case study [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 139: 1-14. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.07.209.
- [11] GARCÍA-SÁNCHEZ M, GÜERECA L P. Environmental and social life cycle assessment of urban water systems: The case of Mexico City [J]. Science of the Total Environment, 2019, 693: 133464. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.07.270.
- [12] 许君清, 汪正然, 李光明. “双碳”背景下的水务行业可持续发展前景探析 [J]. 净水技术, 2023, 42(10): 1-6, 195.
XU J Q, WANG Z R, LI G M. Exploration of sustainable development prospect of water industries under the background of "carbon peaking and carbon neutrality" goals [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(10): 1-6, 195.
- [13] MA J, YIN Z Y, CAI J. Efficiency of urban water supply under carbon emission constraints in China [J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 85: 104040. DOI: 10.1016/j.scs.2022.104040.
- [14] YATEH M, LI F T, TANG Y L, 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.
- [15] LI F K, ZHANG X Y, HUANG J L, 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.
- [16] BONTON A, BOUCHARD C, BARBEAU B, et al. Comparative life cycle assessment of water treatment plants [J]. Desalination, 2012, 284: 42-54. DOI: 10.1016/j.desal.2011.08.035.
- [17] HOFS B, BROEK W, ECKEVELD A, et al. Carbon footprint of drinking water over treatment plant life span (2025-2075) is probably dominated by construction phase [J]. Cleaner Environmental Systems, 2022, 5: 100079. DOI: 10.1016/j.cesys.2022.100079.
- [18] ZHANG P, MA B, ZHENG G L, et al. Unveiling the greenhouse gas emissions of drinking water treatment plant throughout the construction and operation stages based on life cycle assessment [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2024, 272: 116043. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2024.116043.
- [19] ZANG Y W, LI Y, WANG C, et al. Towards more accurate life cycle assessment of biological wastewater treatment plants: A review [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 107: 676-692. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.05.060.
- [20] 范秀磊, 袁博, 李学强, 等. 青岛麦岛污水处理厂污泥消化及热电联产运行管理经验 [J]. 中国给水排水, 2020, 36 (2): 22-25.
FAN X L, YUAN B, LI X Q, et al. Experience of sludge digestion and cogeneration operation management in Qingdao maidao sewage treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(2): 22-25.
- [21] 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 B Y, SUN L K, YANG C W. The feasible wastewater treatment technology in China under the background of carbon neutrality [J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(10):

- 2997–3000.
- [22] 朱黔沫, 陈浩, 叶建锋. 城市排水系统的碳排放特征与减排策略综述[J]. 净水技术, 2024, 43(3): 47–60.
- ZHU Q M, CHEN H, YE J F. Overview of characteristics of carbon emission and strategies of emission reduction for urban drainage system[J]. Water Purification Technology, 2024, 43 (3):47–60.
- [23] SLAGSTAD H, BRATTEBØ H. Life cycle assessment of the water and wastewater system in Trondheim, Norway—A case study[J]. Urban Water Journal, 2014, 11(4): 323–334.
- [24] SHAHABADI M B, YERUSHALMI L, HAGHIGHAT F. Impact of process design on greenhouse gas (GHG) generation by wastewater treatment plants [J]. Water Research, 2009, 43 (10): 2679–2687.
- [25] RODRIGUEZ-GARCIA G, FRISON N, VÁZQUEZ-PADIN J R, et al. Life cycle assessment of nutrient removal technologies for the treatment of anaerobic digestion supernatant and its integration in a wastewater treatment plant [J]. Science of the Total Environment, 2014, 490: 871 – 879. DOI: 10.1016/j. scitotenv. 2014. 05. 077.
- [26] BOGNER J, PIPATTI R, HASHIMOTO S, et al. Mitigation of global greenhouse gas emissions from waste: Conclusions and strategies from the intergovernmental panel on climate change (IPCC) fourth assessment report. working group III (mitigation) [J]. Waste Management & Research, 2008, 26(1): 11–32.
- [27] 章易博, 柴文波, 王长智, 等. 城镇污水处理厂碳排放核算与基于 BioWin 的减污降碳模拟[J]. 环境科学学报, 2024, 44(9): 427–438.
- ZHANG Y B, CHAI W B, WANG C Z, et al. Carbon emission accounting of urban wastewater treatment plants and simulation of pollution and carbon reduction based on BioWin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2024, 44(9): 427–438.
- [28] RODRIGUEZ-GARCIA G, HOSPIDO A, BAGLEY D M, et al. A methodology to estimate greenhouse gases emissions in Life Cycle Inventories of wastewater treatment plants [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2012, 37: 37–46. DOI: 10.1016/j. eiari. 2012. 06. 010.
- [29] NGUYEN T K L, NGO H H, GUO W S, et al. A critical review on life cycle assessment and plant-wide models towards emission control strategies for greenhouse gas from wastewater treatment plants[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 264: 110440. DOI: 10.1016/j. jenvman. 2020. 110440.
- [30] 唐婧, 李威潭, 杨佳豪. 基于 CiteSpace 的污水处理厂生命周期碳排放评价领域研究热点[J]. 应用与环境生物学报, 2024, 30(3): 633–641.
- TANG J, LI W T, YANG J H. Research hotspots in application of life cycle assessment to the study of carbon emissions in wastewater treatment plants elucidated via CiteSpace [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2024, 30 (3): 633–641.
- [31] LU Y X, AN H, LI C, et al. Environmental impact analysis and carbon emission reduction pathways by upgrading wastewater treatment plant: A case study of upgrading project at a wastewater treatment plant in Dongguan, China[J]. Water, 2024, 16(4): 596. DOI: 10.3390/w16040596.
- [32] HAO X D, WANG X Y, LIU R B, et al. Environmental impacts of resource recovery from wastewater treatment plants[J]. Water Research, 2019, 160: 268 – 277. DOI: 10.1016/j. watres. 2019. 05. 068.
- [33] ALSADI A A, MATTHEWS J C. Reduction of carbon emission is optimized during the life cycle of commonly used force main pipe materials[J]. Frontiers in Water, 2022, 4: 735519. DOI: 10.3389/frwa. 2022. 735519.
- [34] TAVAKOL-DAVANI H, BURIAN S J, BUTLER D, et al. Combining hydrologic analysis and life cycle assessment approaches to evaluate sustainability of water infrastructure[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2018, 144(11): 1340. DOI: 10.1061/(ASCE)IR. 1943–4774. 0001340.
- [35] NEGI R, CHANDEL M K. Life cycle assessment of wastewater reuse alternatives in urban water system [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2024, 204: 107469. DOI: 10.1016/j. rescohrec. 2024. 107469.
- [36] PASQUALINO J C, MENESES M, CASTELLS F. Life cycle assessment of urban wastewater reclamation and reuse alternatives [J]. Journal of Industrial Ecology, 2011, 15(1): 49–63.
- [37] GILBOA Y, FRIEDLER E, SCHÜTZE M. Assessing water use and reuse options—a holistic analysis of a model city, coupling dynamic system modelling with life cycle assessment[J]. Urban Water Journal, 2023, 20: 844 – 858. DOI: 10.1080/ 1573062X. 2023. 2211959.
- [38] FLYNN K M, TRAVER R G. Green infrastructure life cycle assessment: A bio-infiltration case study [J]. Ecological Engineering, 2013, 55: 9–22. DOI: 10.1016/j. ecoleng. 2013. 01. 004.
- [39] KAVEHEI E, JENKINS G A, ADAME M F, et al. Carbon sequestration potential for mitigating the carbon footprint of green stormwater infrastructure[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 94: 1179 – 1191. DOI: 10.1016/j. rser. 2018. 07. 002.
- [40] 朱雨, 邵薇薇, 杨志勇. 海绵设施全生命周期碳排放核算方法研究[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 32–38.
- ZHU Y, SHAO W W, YANG Z Y. Carbon emission accounting for whole life cycle of sponge facilities [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 32-38.
- [41] 李晨璐, 郑涛, 彭开铭, 等. 基于全生命周期法的海绵城市雨水系统碳排放研究[J]. 环境与可持续发展, 2019, 44 (1): 132–137.
- LI C L, ZHENG T, PENG K M, et al. Study on carbon emission of sponge city stormwater system based on life cycle assessment [J]. Environment and Sustainable Development, 2019, 44(1):

- 132–137.
- [42] 张希. 城市雨水系统全生命周期碳排放核算方法及应用研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2024.
- ZHANG X. Research on the accounting method and application of carbon emissions in life cycle of urban stormwater system [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2024.
- [43] 李翔, 朱灿耀. 新能源在污水处理厂中的应用 [J]. 给水排水, 2023, 59(s2): 472–476.
- LI X, ZHU C Y. The application of new energy in sewage treatment plants [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(s2): 472–476.
- [44] 姚阔为, 张鑫, 王冠. 光伏发电在污水厂节能减排中的应用及案例分析 [J]. 节能与环保, 2023(11): 75–80.
- YAO K W, ZHANG X, WANG G. Application and case analysis of photovoltaic power generation in energy saving and emission reduction of sewage plant [J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2023(11): 75–80.
- [45] 李杰. 云南省分布式光伏发电项目的开发现状及制约因素探讨 [J]. 太阳能, 2024(3): 14–22.
- LI J. Discussion on development status and constraining factors of distributed PV power generation projects in Yunnan province [J]. Solar Energy, 2024(3): 14–22.
- [46] 王文刚, 余波, 李箫宁, 等. FCR 工艺在西安某城镇污水处理厂中的应用 [J]. 水处理技术, 2024, 50(10): 147–151.
- WANG W G, YU B, LI X N, et al. Application of FCR Process in an urban wastewater treatment project in Xi'an [J]. Technology of Water Treatment, 2024, 50(10): 147–151.
- [47] 曹猛. FCR 工艺在辽宁某城镇污水处理工程中的应用 [J]. 中国给水排水, 2022, 38(4): 71–75.
- CAO M. Application of food chain reactor in an urban wastewater treatment project in Liaoning [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(4): 71–75.
- [48] 赵旭雍, 邓利智, 徐欣, 等. BBR 工艺用于污水处理厂准Ⅳ类水提标改造 [J]. 中国给水排水, 2023, 39(10): 115–120.
- ZHAO X Y, DENG L Z, XU X, et al. Research and demonstration of BBR Process for upgrading and renovation of quasi-Ⅳ standard in sewage treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(10): 115–120.
- [49] 刘先鹏. 厦门市乡村尾水人工湿地碳足迹全生命周期评估——以同安区三秀山村为例 [D]. 泉州: 华侨大学, 2022.
- LIU X P. Life cycle assessment of carbon footprint of rural tailwater artificial wetlands in Xiamen: A case study of Sanxiushan Village, Tong'an District [D]. Quanzhou: Huqiao University, 2022.
- [50] 李俊奇, 张希, 李惠民. 北京某片区海绵城市建设与运行中的碳排放核算研究 [J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 86–93.
- LI J Q, ZHANG X, LI H M. Study on carbon emission accounting in construction and operation of a sponge city in Beijing [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 86–93.

(上接第 43 页)

- [49] 李祥志, 曹文庚, 李英, 等. 含氟地下水的危害、治理技术现状与进展 [J]. 中国地质, 2024, 51(2): 457–482.
- LI X Z, CAO W G, LI Y, et al. Harmfulness of fluorine-bearing groundwater and its current situation and progress of treatment technology [J]. Geology in China, 2024, 51(2): 457–482.
- [50] 谭冈训, 李满, 武道吉, 等. 武城县除氟水厂的设计与运行 [J]. 给水排水, 2008, 34(3): 25–27.
- TAN G X, LI M, WU D J, et al. Design and operation of the fluoride removal water plant in Wucheng Country [J]. Water & Wastewater Engineering, 2008, 34(3): 25–27.
- [51] 赵艳红, 银晓瑞. 加强水生态文明建设 优化二连浩特市净水厂氟化物处理工艺 [J]. 内蒙古气象, 2015(6): 40–42.
- ZHAO Y H, YIN X R. Reinforcing the ecological civilization construction of water and optimizing the treating technology of fluoride of water treatment plant in Erenhot [J]. Meteorology Journal of Inner Mongolia, 2015(6): 40–42.
- [52] 王文俊, 李树庭. 钢铁厂三种难处理废水除氟技术试验研究 [J]. 冶金动力, 2023(5): 66–69.
- WANG W J, LI S T. Experimental study on fluoride removal technology for three kinds of difficult-to-treat wastewater in iron and steel mills [J]. Metallurgical Power, 2023(5): 66–69.
- [53] 陈宁, 董明甫, 孔海霞, 等. 光伏废水二级处理除氟剂选型试验及工程应用 [J]. 中国给水排水, 2023, 39(18): 100–106.
- CHEN N, DONG M F, KONG H X, et al. Selection test of defluorination agents for secondary treatment of photovoltaic wastewater and engineering application [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(18): 100–106.
- [54] 卢永, 汪林, 张炜铭, 等. 集成电路企业含氟废水深度处理示范工程分析 [J]. 中国给水排水, 2023, 39(12): 141–144.
- LU Y, WANG L, ZHANG W M, et al. Analysis on a demonstration project of advanced treatment of fluoride wastewater from integrated circuit enterprises [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(12): 141–144.
- [55] 谭周权. 工业园含氟废水/综合废水分步治理工程设计 [J]. 中国给水排水, 2022, 38(14): 71–76.
- TAN Z Q. Design of a stepwise project for the treatment of fluorine containing wastewater/comprehensive wastewater in an industrial park [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(14): 71–76.