

涂倩倩, 沈鹏飞, 刘鸣燕, 等. 城镇污水处理厂碳排放核算方法及特征[J]. 净水技术, 2024, 43(6): 52-62.

TU Q Q, SHEN P F, LIU M Y, et al. Estimation methodology and characteristics of carbon emissions in urban WWTPs[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(6): 52-62.

城镇污水处理厂碳排放核算方法及特征

涂倩倩^{1,2}, 沈鹏飞^{1,2,*}, 刘鸣燕^{1,2}, 张梓璇^{1,2}, 余波^{2,3}, 杨凯^{2,3}

(1. 中国铁工投资建设集团有限公司, 北京 101300; 2. 中国中铁生态环境专业研发中心, 上海 200331; 3. 中铁水务集团有限公司, 陕西西安 710000)

摘要 污水处理行业因其运行过程中消耗大量能源、排放温室气体的特征,在我国全力推进碳中和、碳减排的进程中引起了行业广泛关注。而如何系统全面量化城镇污水处理厂碳排放水平,是推进城镇污水处理厂优化运行管理、制定减排策略的重要前提。结合文献调研,以城镇污水处理厂运行阶段为研究对象,总结污水处理碳排放来源及特征的研究现状,分析直接碳排放、间接碳排放和负碳排放等不同来源碳排放核算方法的原理及特点,探究其适用场景及局限性,并提出污水处理碳排放核算方法研究和应用的发展趋势分析与建议,为发展污水处理领域碳排放评估新技术提供借鉴和参考。

关键词 污水处理厂 直接碳排放 间接碳排放 负碳排放 温室气体 碳排放核算

中图分类号: TU992 **文献标识码**: A **文章编号**: 1009-0177(2024)06-0052-11

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.06.006

Estimation Methodology and Characteristics of Carbon Emissions in Urban WWTPs

TU Qianqian^{1,2}, SHEN Pengfei^{1,2,*}, LIU Mingyan^{1,2}, ZHANG Zixuan^{1,2}, YU Bo^{2,3}, YANG Kai^{2,3}

(1. China Tiegong Investment & Construction Group Co., Ltd., Beijing 101300, China;

2. Eco-Environmental Research and Development Center of China Railway Group-Limited, Shanghai 200331, China;

3. China Railway Water Group Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract Urban wastewater treatment has attracted extensive attention in China's efforts to promote carbon neutrality for the characteristics of consuming a large amount of energy and emitting greenhouse gases. How to systematically and comprehensively quantify the carbon emissions level of urban wastewater treatment plants (WWTPs) is an important prerequisite for optimizing operation and management and reducing carbon emission of urban WWTPs. Combined with literature research, taking the operation stage of urban WWTP as the research object, it summarizes the research status of the sources and characteristics of carbon emissions from wastewater treatment, analyzes the principles and characteristics of carbon accounting methods from different sources such as direct carbon emissions and indirect carbon emissions, and explores their application scenarios and limitations. In order to provide reference for the development of new technologies for carbon emission assessment in wastewater treatment, the trend analysis and suggestions for the research and application of carbon emissions estimating methods in wastewater treatment are also proposed.

Keywords wastewater treatment plant(WWTP) direct carbon emission indirect carbon emission carbon-negative greenhouse gas carbon emission estimation

温室气体增加导致的气候变化是当今世界面临的最严峻的非传统安全问题之一,严重威胁人类社

会的生存和发展。为应对气候变化,我国于2020年在第75届联合国大会上提出“力争2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和”,标志着我国绿色低碳发展迈上新台阶。而污水处理行业因大幅减少污水直排,缓解了水体黑臭厌氧导致大量碳排放的现象,可视为碳减排行业。但传统污水处理方式通过消耗大量能源、药剂去除污染物,同时具备高能耗密度特征^[1]。研究^[2]表明,随着我国污水处理水平和

[收稿日期] 2023-06-01

[基金项目] 中国中铁股份有限公司科技研究开发计划项目(2022-重点-37)

[作者简介] 涂倩倩(1994—),女,硕士,研究方向为污水处理与水环境综合治理,E-mail:527504511@qq.com。

[通信作者] 沈鹏飞(1988—),男,博士,研究方向为水污染治理及海绵城市技术,E-mail:perfey_shen@163.com。

排放标准的提高,2009年—2019年全国平均污水处理碳排放强度增长了17.2%,2019年全国污水处理行业碳排放总量达到530万t CO₂。因此,全力推进污水处理行业的碳减排、碳中和成为环境领域亟待解决的重要课题。

精准评估城镇污水处理厂运行阶段的碳排放水平是实现污水处理行业由高碳排放向低碳排放甚至“零碳”排放转变的前提。当前,针对城镇污水处理厂碳排放核算研究已形成了排放因子法、物料平衡法、动态机理模型法和实测法等多种方法,如何确定核算边界和选择核算方法是摸清碳排放规律特征、助力减碳策略制定的关键技术要点。本文以城镇污水处理厂运行阶段为研究对象,梳理污水处理过程碳排放来源及特征,分析直接碳排放、间接碳排放和负碳排放等不同来源的碳核算方法原理及特点,探究其适用场景及局限性,并提出污水处理碳排放核算方法未来的发展方向,为发展污水处理领域碳排放评估新技术提供参考。

1 污水处理碳排放源

从碳排放路径出发,将城镇污水处理厂运行阶段的碳排放源分为3类(图1):一是直接排放,指污水处理过程中因污染物转化导致向大气直接排放的温室气体,也称为物质类排放;其排放量与有机污染物和含氮污染物削减量呈正相关,占总碳排放量的35%~65%^[3];二是间接排放,指污水处理消耗的能量和物料在其生产过程和运输过程中引起的温室气

体排放,分为能耗类排放和物耗类排放^[4],分别占总碳排放量的31%~64%和12%~29%^[5];三是负碳排放,指通过各类负碳行为引起的碳减排,包括对城镇污水处理厂中污水热能、化学能、再生水等回收利用。

2 污水处理直接碳排放

城镇污水处理厂直接碳排放来源于微生物分解有机物和内源呼吸作用产生的CO₂,厌氧环境产甲烷菌降解有机物过程产生的CH₄,以及脱氮反应中通过羟胺氧化、异养反硝化和硝化反硝化等路径排放的N₂O^[6];其排放量占比分别为1.3%~9.0%、0.5%~14.0%和26%~74%(按温室效应换算为相同质量的CO₂)^[7]。

直接碳排放过程涉及多种微生物复杂生化反应,且受到处理工艺、运行工况等因素影响,因此,波动和差异性较大,核算难度最高^[8]。目前针对污水处理过程直接碳排放强度核算已形成排放因子法、物料平衡法、动态机理模型法和实测法等方法,其主要差异在于核算原理、核算精度和复杂程度。

2.1 排放因子法

排放因子法是基于排放因子与水系统相关因素之间的简单线性关系,将温室气体排放清单里的各类排放源活动数据与排放因子相乘得出碳排放量估值的方法,源自联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)。为了给世界各国温室气体排放核算工作提供依据和参考,IPCC自1992年起编制了一系列温室气体清单指南^[4],为能源、农业林业、废弃物等过程建立了碳排放源清单和核算方法;其中明确了污水处理过程CH₄和N₂O排放的核算方式和排放因子^[9],基本计算如式(1)。

$$E_i = R_i \times E_{Efi} \times k_i \quad (1)$$

其中: E_i ——第*i*种温室气体排放源的排放量, kg CO₂;

R_i ——活动数据,即与温室气体排放源直接相关的数据源,包括污水厂进出水指标如COD、TN等;

k_i ——修正系数,即利用污水处理厂运行特征如处理规模、污染物去除率等修正碳排放因子^[10];

E_{Efi} ——排放因子,即单位活动数据对应

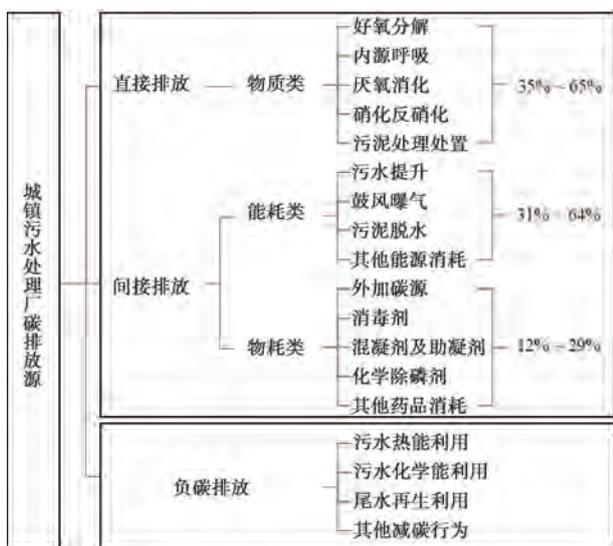


图1 城镇污水处理厂碳排放源

Fig. 1 Carbon Emission Sources of Urban WWTPs

的温室气体排放量,包括间接碳排放因子和直接碳排放因子,其中直接碳排放因子由污水处理工艺、运行管理水平、排放标准等多种因素决定^[11]。

由于排放因子法仅纳入排放源活动数据这一单独变量,计算过程简单明确,常作为初步评估某区域或某污水处理厂碳排放水平的快速工具。闫旭等^[12]利用排放因子法分析我国31省市城镇污水处理厂2005年—2014年的直接碳排放总量特征,发现10年间碳排放总量从2 230.97 Gg CO₂增加到7 348.60 Gg CO₂,且存在显著时空分布差异;宋宝木等^[13]利用排放因子法分析深圳市某污水处理厂碳排放水平动态变化,得出该厂直接碳排放强度为(0.19±0.05) kg CO₂/m³(占该厂碳排放总量的52.03%),并因水质水量变化受季节性影响(旱季高、雨季低)。因此,排放因子法既可用于国家和行业层面的宏观分析,也可用作特定污水处理厂的微观核算^[14]。

排放因子法的局限则在于估算结果精确性不足。一是对于排放因子的选取,多为直接采用参考国际通用值,在反映我国污水处理行业特征时适用性和精确度可能不足;例如,IPCC指南中推荐的排放因子取值范围宽泛,其中N₂O排放因子推荐值达到0.000 16~0.045 00 kg N₂O-N/(kg N)^[15],应用于某特定研究对象时需要补充大量监测数据不断修正,提升精度。二是直接排放的CO₂在早期研究中多被忽略,IPCC指南认为直接排放的CO₂源于自然界碳循环系统,对空气碳平衡影响有限,因此未纳入核算范围^[15]。但分析污水处理厂进水特性发现,其中2.1%~27.9%的总有机碳来源于清洁剂等化工产品^[16-17],可造成2.4%~15.1%的CO₂直接排放量^[8]。近年来,化石源CO₂直接排放逐渐被纳入污水厂碳排放清单^[7-8],但该部分排放因子取值研究仍较为缺乏。

2.2 静态模型法

静态模型法是基于污水处理动力学反应原理和物料平衡关系的方法,即将污水处理单元视作整体作为核算系统,认为进入核算系统的碳(如进水有机碳)与排出核算系统的碳(如出水有机碳、剩余污泥中的碳及排入大气CH₄和CO₂)遵循质量平衡原则;根据污水处理产生直接碳排放的过程(如缺氧

阶段反硝化过程、厌氧消化过程、有机物好氧分解过程等)的反应方程式,结合核算系统内的质量平衡和物料消耗,对碳排放量进行估算^[18]。

针对排放因子法在核算精度上的不足,随着污水处理生化反应原理研究的逐渐深入和计算能力的全面提高^[19],2005年,Monteith等^[20]通过模拟活性污泥处理系统好氧状态下的微生物增殖代谢有机物、内源呼吸以及厌氧消化等过程,首次建立CH₄和CO₂直接排放静态模型,更精准可靠地核算污水处理过程碳排放量。但N₂O生成机理复杂且生成点位较多,模拟难度较大,因此,静态模型法早期研究重点以CH₄和CO₂排放模拟为主^[7]。2012年,Rodriguez等^[21]针对排放因子法无法准确评估N₂O的问题,建立可用于核算CO₂和N₂O排放量的直接排放预测模型(DEEM),对硝化过程和反硝化过程的N₂O形成途径简单模拟,为后续N₂O排放动态模拟打下基础。

相较于排放因子法,静态模型法数据要求更高、计算过程更复杂,通常用于特定污水厂碳核算分析。张程^[18]以污水处理有机碳的迁移转化为核心,模拟缺氧段反硝化菌还原反应、厌氧段厌氧消化过程和微生物内源代谢、好氧段有机物好氧分解和微生物内源呼吸等过程,确定CO₂和CH₄转化规律和量化方法,研究表明西安某污水处理厂直接碳排放强度为0.232 kg CO₂/m³,其中缺氧池、厌氧池和好氧池分别占32.5%、29.7%和37.8%。Shahabadi等^[22]设定2 000 mg/L BOD同等进水条件,利用静态模型法对好氧、厌氧和混合厌氧/厌氧工艺的直接碳排放量进行模拟与对比,核算结果分别为1.95、1.99和2.44 kg CO₂/m³。上述研究表明静态模型法可用于指示温室气体在污水处理系统中的转化特征,比较不同工艺环节和各类设施之间的碳排放差异。

但静态模型法在精确模拟和预测碳排放过程方面仍存在缺陷。研究^[7]表明,污水处理运行工况等因素对碳排放量有较大影响,如N₂O直接排放与温度有关,呈现冬季产量高、夏季产量低的特征,进水C/N增加可有效减少N₂O释放量,但若是通过增加碳源提高C/N,则会导致CH₄和CO₂产量增加等。静态模型法未考虑到污水厂运行条件、进水条件等诸多动态因素波动对碳排放的影响,故其碳排放量

核算结果仍存在一定偏差^[19]。

2.3 动态模型法

为了进一步提高碳排放量核算准确性,基于温室气体形成机理的动态模型法近年来已有较多研究,该方法更贴近地模拟污水处理过程及微生物复杂生化反应过程,充分考虑污染物迁移转化规律和影响温室气体排放的动态因素^[23-24]。动态模型法多以国际水污染控制与研究协会(IWA)的活性污泥模型(ASM)为研究基础^[19],在底物降解、微生物生长等理论方程的基础上对有机物氧化、硝化反硝化和内源呼吸等过程进行定量描述,从而模拟和量化温室气体排放^[25]。Corominas等^[26]分别采用静态模拟法和动态模拟法对污水处理碳排放过程进行模拟,对比发现随着温度、C/N等条件变化,动态模拟结果会随之改变,而静态模型不能捕捉到模拟值波动。

动态模型法极大优化了 N_2O 排放过程的模拟与量化。 N_2O 排放模拟的不确定性是造成排放因子法或静态模型法核算偏差的主要原因之一^[7,25],其难点在于 N_2O 生成途径多且复杂,除羟胺氧化、硝化反硝化和异养反硝化等途径, N_2O 还可能通过羟胺和亚硝酸盐反应产生,或在有氧条件下由微生物直接由氨氮转化而成^[27-28]。随着动态模型法研究不断深入,污水处理 N_2O 排放量核算准确性显著提高;Pocquet等^[29]基于氨氮氧化为羟胺、羟胺氧化为NO和亚硝酸盐、NO氧化为亚硝酸盐、亚硝酸盐和NO还原为 N_2O 等酶促反应,建立 N_2O 排放模型,并在污水厂 N_2O 和NO实测数据中得到校准和验证。

动态模型法使精确模拟和量化污水处理工艺及运行工况等对直接碳排放量的影响成为可能,从而为污水处理厂的降碳措施的制定提供依据。例如,不同研究者通过应用动态模型发现,降低好氧池的溶解氧浓度会减少 CO_2 排放量、增加 N_2O 排放量;增加一级处理总悬浮固体(TSS)去除率可有效降低直接碳排放水平,但由于降低生化池C/N可能引起 N_2O 排放量增加^[30];污泥龄控制在12d左右可控制碳排放量达到最低水平^[31]等。

动态模型组成复杂,计算量大,需要大量实测数据用于模型参数的确定和校准。但由于目前我国关于污水处理厂碳排放的基础数据还较为缺乏,且污

水处理过程中温室气体形成机理(尤其是 N_2O 排放机理)研究尚未成熟,因此,现阶段动态模型的预测能力有待进一步提升^[19]。此外,目前关于动态模型法的研究大多集中于活性污泥法工艺,在其他处理工艺的应用研究较少,应用范围有待拓展^[32]。

2.4 实测法

实测法是基于碳排放源现场的实测数据计算分析得到碳排放水平的方法,即在污水处理厂可能产生温室气体的点位(包括进水泵站、沉淀池、生物处理单元、贮泥池等)布设采样装置监测排放气体,随后汇总实测数据得到直接碳排放量^[11]。现阶段针对污水处理厂温室气体气样排放监测方法主要有两类,一是通过气袋法、静态箱法、漂浮型气体通量罩等方法采集气体样品,利用以气相色谱法为代表的气体检测方法的实验室分析技术;二是以红外线气体分析仪、微电极传感器等为代表的在线实时监测技术^[23]。实测法准确性相对较高,检测结果仅受到样品代表性、仪器精度和测定误差等因素的干扰。

实测法的应用有助于为行业碳排放研究增加数据样本、明确关键排放点位。鲍志远^[33]通过监测水-气界面的温室气体排放通量和溶解态温室气体浓度,发现AO工艺和SBR工艺的直接碳排放量存在显著区别,且 N_2O 是直接排放的主要贡献源(占总碳排放量的43.5%~55.6%)。Masuda等^[34]通过实测发现, CH_4 可在污水管网和初沉池中产生,且氧化沟工艺相较于双AO工艺和AO工艺有更低的碳排放水平。实测法的应用除了对摸清碳排放本底情况、探索碳排放机理和特征等有重要意义,也有助于污水处理碳排放核算研究,可为排放因子法和模型法等验证提供依据,并为温室气体排放系数本土化和模型参数更新优化提供数据支撑^[23]。

开展长期的碳排放水平动态监测对碳排放评估技术优化和推进污水厂低碳运行具有积极意义,但另一方面,由于污水处理厂温室气体生成点位多、排放量不确定性大,且目前主要依赖人工开展实测,其应用存在成本高、工作量大等限制。此外,现阶段仍缺乏系统的污水处理系统碳排放监测方案,因此现阶段此项工作未能广泛、科学开展。

关于以上污水处理直接碳排放核算方法的特征总结如下(表1)。

表 1 污水处理直接碳排放核算方法特征总结

Tab. 1 Characteristics of Direct Carbon Emission Estimation Methods in Wastewater Treatment

类别	排放因子法	静态模型法	动态模型法	实测法
原理特点	基于温室气体排放因子与水系统相关因素之间的线性关系	基于物料平衡和动力学反应关系	基于温室气体形成途径的动态机理模型	基于排放源的现场实测基础数据
核算依据	污染物削减量 排放因子数据	化学平衡反应式 生物处理设计参数 动力学参数等	污水处理机理模型 生物处理运行数据 动力学参数等	现场实测数据
适用条件	广泛适用从国家、行业层面宏观估算到特定污水厂微观核算	适用于中观、微观尺度,针对某个或几个污水厂	适用于特定污水处理厂微观核算	适用于特定污水处理厂微观核算
复杂程度	简单	较复杂	复杂	复杂
优势	计算简单、快速 应用广泛,国际通用 可参考实例较多	模拟更贴近实际情况 数据收集较容易 计算过程较简单	模拟最贴近实际情况 影响因素考虑全面	现场监测实际值 中间环节少
局限	排放因子取值范围大 计算结果粗略	需要收集运行参数 计算结果较粗略	模型适用性较弱 计算过程复杂 相关数据样本较少	数据监测工作量大 测算结果受到样品和测量误差的影响

3 污水处理间接碳排放

污水处理过程中消耗的能源或物料在其生产场地发生的碳排放称为间接碳排放。其中消耗的能源主要是电力、化石燃料等,消耗的物料主要是化学药剂等,分别称为能耗类排放和物耗类排放。现阶段污水处理间接碳排放核算研究大多采用基于简单线性关系的排放因子法。由于间接排放因子仅取决于社会能源结构和工业生产水平,不受污水处理厂运行工况、处理工艺等因素影响,其核算难度较小且应用成熟度较高。

3.1 能耗类排放

能耗类排放主要来源于污水处理过程中曝气鼓风机、搅拌器、提升泵、砂水分离器、水下推流器、回流泵、刮泥机、污泥脱水设备等设施运行消耗能源产生的碳排放,通常以电力消耗为主。其导致的间接碳排放量可用耗电量和电能生产排放因子计算,基本计算如式(2)。

$$E_N = D \times E_{EFD} \quad (2)$$

表 2 我国区域电网基准线排放因子取值^[37]

Tab. 2 Emission Factors in Regional Power Grid at Home^[37]

电网名称	省份/自治区/直辖市	排放因子/[kg CO ₂ ·(kW·h) ⁻¹]
华北区域	北京、天津、河北、山西、山东、内蒙古自治区 ^a	0.941 9
东北区域	辽宁、吉林、黑龙江、内蒙古自治区 ^b	1.082 6
华东区域	上海、江苏、浙江、安徽、福建	0.792 1
华中区域	河南、湖北、湖南、江西、四川、重庆	0.858 7
西北区域	陕西、甘肃、青海、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区	0.892 2
南方区域	广东、广西壮族自治区、云南、贵州、海南	0.804 2

注:^a表示除赤峰、通辽、呼伦贝尔和兴安盟外的内蒙古地区采用“华北区域电网”碳排放因子;^b表示赤峰、通辽、呼伦贝尔和兴安盟采用“东北区域电网”碳排放因子。

其中: E_N ——污水处理过程消耗电力产生的碳排放量,kg CO₂;

D ——一定时间内污水厂运行维护总耗电量,kW·h;

E_{EFD} ——电能生产排放因子,kg CO₂/(kW·h),取值可参考生态环境部发布的《2019年度减排项目中国区域电网基准线排放因子》(表2)。

能耗类排放是污水处理运营阶段碳排放的重要组成部分。研究表明,我国污水处理单位污水耗电量为0.189~0.343 kW·h/m³^[35],造成的碳排放量占比为污水处理碳排放总量的31%~64%^[5]。按照处理阶段分析,包含鼓风机、推流器和回流泵等设备的二级处理单元为能耗类排放占比最高的处理单元,约占总能耗类排放的62.25%;其次是以提升为主的一级处理单元,约占总能耗类排放的23.18%;深度处理及消毒环节占比约为5.74%^[36]。

3.2 物耗类排放

物耗类排放主要是污水处理过程消耗的化学药剂在生产和运输过程造成的碳排放,包括 C/N 不足时投加的碳源、污水出厂前投加的消毒剂、污泥浓缩脱水时投加的絮凝剂等。其核算依据为各类化学药剂投加量和各类化学药剂产生的温室气体排放因子,基本计算如式(3)。

$$E_w = \sum_{i=1}^n (M_{Y_i} \times E_{EFY_i}) \quad (3)$$

其中: E_w ——污水处理过程消耗药剂产生的碳排放量,kg CO₂;
 n ——总计使用 n 种药剂;
 M_{Y_i} ——第 i 种药剂的消耗量,kg;
 E_{EFY_i} ——第 i 种药剂的排放因子,kg CO₂/(kg 药剂),污水处理厂常见化学药剂排放因子取值可参考表 3。

表 3 污水处理厂常见化学药剂排放因子取值

Tab. 3 Emission Factors of Common Chemicals in WWTPs

药剂名称	排放因子/[kg CO ₂ ·(kg 药剂) ⁻¹]
甲醇	0.61 ^[3]
乙酸	0.852 ^[3]
乙酸钠	0.623 ^[3]
聚合氯化铝	1.62 ^[3]
聚丙烯酰胺	1.5 ^[4]
氯化铁	0.26 ^[3]
其他絮凝剂	2.5 ^[4]
臭氧	11.36 ^[3]
液氯	0.93 ^[3]
次氯酸钠	0.99 ^[3]
其他消毒剂	1.4 ^[4]
生石灰	1.10 ^[3]
氢氧化钠	0.84 ^[4]
其他药剂	1.6 ^[4]

药剂类碳排放强度占总碳排放强度的 12% ~ 29%,受污水厂进水水质、排放标准和处理工艺等因素影响较大^[5]。例如,在传统二级处理工艺流程增设深度处理单元如混凝沉淀或活性炭吸附技术后,碳排放强度增加 0.015 ~ 0.032 kg CO₂/m³^[38-39],其主要贡献来源是絮凝剂的使用、活性炭的制备和再生等药耗增加造成的间接碳排放^[38];对低 C/N 进水污水处理厂碳排放水平进行分析,碳源投加导致

的间接碳排放量可达总排放量的 1.33%,且该部分外加碳源属于化石源碳,从而导致 CO₂ 直接排放量的增加^[40]。

4 污水处理负碳排放

城镇污水处理厂通过污水热能利用、化学能利用和尾水再生利用等方式进行资源回用,属于负碳行为;在污水处理碳排放核算中,应将该部分资源回用造成的碳补偿量纳入碳排放清单,综合评估污水处理厂碳排放水平。

4.1 污水热能利用

城市生活污水因具有冬暖夏凉的特点,适合作为稳定的冷、热交换源,可通过水源热泵技术从污水处理厂出水中回收余热^[41]。污水热能是一种蕴含着可观热量的清洁能源,研究^[3]表明,仅需要污水热能总量的 9.8% 就可以实现污水处理厂碳中和运行。但考虑到热量散失,污水热能只适合厂区原位利用或周边就近利用。例如,芬兰 Kakolanmäki 污水厂通过回收尾水余热,在实现厂内能源自给基础上,可为周边约 15 000 户家庭进行集中供暖,每年可实现碳减排约 5 万 t CO₂^[42]。

污水热能利用形成的理论碳补偿量可通过热能回收转换的电当量和电能产生排放因子估算得出,计算方法如式(4)~式(5)^[1]。

$$A = (Q \times \Delta T \times c) \times \left(1 \pm \frac{1}{C_{COP} \pm 1}\right) \quad (4)$$

$$E_A = a \times A \times E_{EFD} \quad (5)$$

其中: A ——从污水中提取热能用于供热/制冷时,可获取的理论热能/冷能,kJ/d;
 Q ——水源热泵处理的污水量,m³/d;
 ΔT ——提取热能温差,℃;
 c ——水比热容,取 4.2×10³ kJ/m³;
 C_{COP} ——水源热泵能效比;
 E_A ——污水热能回收形成的碳减排量,kg CO₂/d;
 a ——热能转化为电能的折算系数,可取 3.6 kW·h/MJ。

4.2 污水化学能利用

污水处理化学能利用即通过厌氧生物处理等方式将污水中含有的大量有机物转化为沼气(主要包括污泥厌氧消化),再以直接燃烧、热电联产等方式将化学能回用为电能和热能。经研究,污水化学能

理论值最多可达 17.8~28.7 kJ/(g COD_{Cr}) (即不考虑能量损失,将污水有机物全部转化为 CH₄ 所产生的能量)^[43];但受限于我国城市污水有机组分低、CH₄ 产率有限等因素,实际仅有 10%~14% 的化学能可得到利用^[44]。研究^[45]表明,当污泥有机质质量分数达到 60% 时,利用热水解-厌氧消化-土地利用的污泥处理处置组合路径可以实现负碳排放,碳补偿量为 37.91 kg CO₂/m³。

污水化学能回收利用形成的理论碳补偿量可通过化学能回收转换的电当量和电能产生排放因子估算得出,计算方法如式(6)^[1]。

$$E_H = \frac{\varepsilon \times H_{\text{COD}} \times c_{\text{in}} \times Q}{a} \times E_{\text{EFD}} \quad (6)$$

其中: E_H ——污水化学能回收形成的碳减排量,kg CO₂/d;
 ε ——污水化学能利用率,取 10%~14%;
 H_{COD} ——单位 COD_{Cr} 理论化学能,取 13.9 kJ/(g COD_{Cr});
 c_{in} ——污水处理厂进厂水 COD_{Cr} 质量浓度,mg/L;
 Q ——污水处理厂日处理水量,m³/d。

4.3 尾水再生利用

城市污水经过再生处理后用于生态补水、城市杂用或工业冷却,可视为减少了因自来水使用及水环境污染造成的碳排放。研究^[39]表明,当利用再生水替代自来水用于城镇绿化灌溉、消防和居民冲厕时,可折减约 20% 的污水处理碳排放总量。

通过生态补水形成的碳补偿量可通过进厂污水的污染物削减量和 IPCC 指南提出的地表水体排放因子估算得出,计算方法如式(7)^[46]。

$$E_{\text{S1}} = Q \times (\Delta C_{\text{BOD}_5} \times G_{\text{CH}_4} \times E_{\text{CH}_4} + \Delta C_{\text{TN}} \times G_{\text{N}_2\text{O}} \times E_{\text{N}_2\text{O}}) \quad (7)$$

其中: E_{S1} ——尾水生态补水形成的碳减排量,kg CO₂/d;
 ΔC_{BOD_5} 和 ΔC_{TN} ——污水处理厂 BOD₅ 和 TN 进出水削减质量浓度,mg/L;
 G_{CH_4} 和 $G_{\text{N}_2\text{O}}$ ——增温潜势值,分别取 28 和 265;
 E_{CH_4} 和 $E_{\text{N}_2\text{O}}$ ——地表水体排放因子,分别取 0.002 4~0.160 0 kg CH₄/(kg BOD₅)

和 0.001~0.068 kg N₂O/(kg TN),具体取值可根据受纳水体水质状况确定。

通过城市杂用和工业冷却形成的碳补偿量可通过等量自来水生产造成的碳排放量估算,计算方法如式(8)。

$$E_{\text{S2}} = Q \times E_{\text{EFG}} \quad (8)$$

其中: E_{S2} ——尾水用于城市杂用和工业冷却形成的碳减排量,kg CO₂/d;
 E_{EFG} ——制水排放因子,即单位供水量生产导致的碳排放量,kg CO₂/m³。

由于水厂处理方式以物化反应过程为主,其碳排放核算暂不考虑生物反应导致的直接碳排放,仅纳入电力消耗和药剂消耗导致的间接碳排放量。结合我国水厂设计运行情况调查,按照制水电耗为 0.20~0.35 kW·h/m³、药耗聚合氯化铝混凝剂为 3~100 g/m³、次氯酸钠为 1~3 g/m³ 等常规工况计算^[47-48],估算自来水生产的碳排放量为 0.18~0.48 kg CO₂/m³,具体取值可根据水源条件和水厂处理工艺确定。

5 污水处理碳排放核算体系研究展望

目前,涵盖污水处理直接碳排放和间接碳排放的核算方法体系已基本形成。尤其针对直接碳排放核算,已有从简单到复杂、适用于微观到宏观核算的排放因子法、模型法和实测法等多种方法,各有其适用条件。但对于污水处理行业碳排放水平的系统评估,仍存在较大优化空间:一是碳核算方法研究需进一步提升准确度,例如直接排放的化石源 CO₂ 应如何核算、直接排放 N₂O 反应过程在模型中如何精准表达等;二是污水处理碳排放实测基础数据不足,造成排放因子取值宽泛、本土适应性不佳,动态模型相关参数进行进一步优化校验的基础资料缺乏;三是负碳排放核算尚不全面,相关研究对于负碳行为的核算多集中于污泥处理处置回收的化学能,对于尾水利用等负碳行为的核算方法关注较少。因此,笔者预测污水处理碳排放核算方法体系研究和应用的发展方向将包括以下内容。

(1) 统一污水处理碳排放核算边界,通过对直接碳排放、间接碳排放以及负碳排放进行综合考量,建立系统全面的碳排放核算体系。过往研究中,大多认为直接排放 CO₂ 源于自然碳循环系统而忽略该部分计算,或未区分化石源碳和生源性碳的占比对直

接排放的所有 CO₂ 纳入计算,因此,有必要展开我国污水处理厂进水特性分析,确定生活污水化石源碳比例范围,同时对相应排放因子取值补充完善。此外,在我国碳中和背景下,水源热泵、分布式光伏发电等能源回收措施在污水厂中的应用日益增加,且污水厂尾水水质提升也为水环境改善和再生水利用潜能作出了积极贡献,因此,有必要进一步完善负碳排放核算方法,在评估污水处理厂碳排放水平时应综合考虑上述负碳行为的环境效益和能源利用。通过应用标准化的碳排放核算体系,实现城镇污水处理厂碳排放水平科学评价。

(2)以污水处理厂实际运行情况和监测数据为依据,优化并修正排放因子取值范围,增加利用排放因子法开展直接碳排放核算的本土适应性和准确性。排放因子法是快速评估污水处理厂碳排放水平的简单工具,适用范围广泛,计算过程快捷,但由于温室气体直接排放过程受到工艺类型、进水条件、排放标准等条件影响,现有研究^[26]提出的推荐排放因子取值范围宽泛,其核算结果往往与真实值有所差距。因此,有必要加强污水处理厂温室气体排放监测工作,通过制定科学、系统和标准化的监测方案,并加大温室气体在线监测仪器的研发和应用,为研究适合我国实际情况、适用不同处理工艺、运行条件等的排放因子提供更大样本和更高质量的基础数据,提升排放因子法计算结果准确度,实现污水处理厂碳排放量快速估算。

(3)深化污水处理动态机理模型研究,同时研发适用于预测碳排放趋势、评估碳减排策略的实用工具。目前关于动态模型机理研究的局限主要包括:①温室气体(尤其是 N₂O)形成机理高度复杂且尚未研究透彻,对模拟结果的真实性和准确性形成制约,因此,未来温室气体生成机理理论认知的突破是指导碳排放过程模拟的关键因素;②目前将碳排放过程纳入污水处理模型的研究集中在活性污泥模型,其他生物处理工艺机理模型研究如生物膜法、颗粒污泥法等考虑到温室气体排放的极少,制约了动态模型法在采用其他工艺的污水处理厂广泛应用。另外,动态模型的应用目前仅停留在研究阶段,未来可致力于开发污水处理厂碳排放过程模拟软件,结合智慧水务平台预测不同运行工况对碳排放过程的影响,全局考虑碳减排控制与污水厂处理效果、运营成本等多方面

的协同,助力污水处理厂减碳增效。

6 结论

污水处理行业碳中和、碳减排目标的实现任重道远,建立系统全面的城镇污水处理厂碳排放量化方法,是科学评估污水处理厂碳排放水平、推进污水处理各环节碳排放强度特征分析和助力碳排放量削减指标制定的重要前提。目前,关于污水处理直接碳排放、间接碳排放及负碳排放的核算方法体系已基本形成,其中,直接排放过程具有高度复杂性,虽然已形成原理特点、使用场景、复杂程度各异的多种核算方法,但受制于实测数据缺乏、碳排放机理研究尚未成熟等因素,还需进一步提升其准确性和实用性;间接排放核算方法相对应用成熟;负碳排放核算在相关研究中多聚焦于污泥处理处置环节,对污水处理过程的环境效益和能源回收等负碳行为的评估有待优化。未来可通过建立标准化的碳排放核算体系,优化碳排放量快速评估的简单工具,完善碳排放过程精确模拟的实用工具,实现城镇污水处理厂碳排放水平的科学评估和准确预测,为污水处理行业实现减污降碳提供理论支撑。

参考文献

- [1] 郝晓地,刘然彬,胡沅胜. 污水处理厂“碳中和”评价方法创建与案例分析[J]. 中国给水排水, 2014, 30(2): 1-7.
HAO X D, LIU R B, HU Y S. Creation of evaluation method of “carbon neutral” for WWTPs and analysis of a practical case [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(2): 1-7.
- [2] DU W J, LU J Y, HU Y R, et al. Spatiotemporal pattern of greenhouse gas emissions in China's wastewater sector and pathways towards carbon neutrality[J]. Nature Water, 2023, 1: 166-175. DOI: s44221-022-00021-0.
- [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: 89-89.
China Urban Water Association. Guidelines for accounting and emission reduction in the urban water sector [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2022: 89-89.
- [4] 杨世琪. 城镇污水处理系统碳核算方法与模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
YANG S Q. The method and model research of GHG accounting of urban sewage treatment system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [5] 蒋富海,王琴,张显忠,等. 城镇污水治理与温室气体的协同减排双控研究[J]. 中国市政工程, 2022(5): 42-47, 121-122.
JIANG F H, WANG Q, ZHANG X Z, et al. Study on the dual

- control of urban sewage treatment & greenhouse gas collaborative emission reduction [J]. *China Municipal Engineering*, 2022 (5): 42-47, 121-122.
- [6] 付加锋,冯相昭,高庆先,等. 城镇污水处理厂污染物去除协同控制温室气体核算方法与案例研究[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(9): 2086-2093.
FU J F, FENG X Z, GAO Q X, et al. Collaborative control method and case study of greenhouse gases in urban sewage treatment plants [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(9): 2086-2093.
- [7] 李东梅,吴丹萍,吴敏,等. 污水处理厂运行工况对温室气体排放的影响[J]. *化工进展*, 2021, 40(12): 6897-6906.
LI D M, WU D P, WU M, et al. Influence of operating parameters on greenhouse gas emission of sewage treatment plants [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 40(12): 6897-6906.
- [8] 王向阳. 污水处理碳足迹核算及环境综合影响评价研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2019.
WANG X Y. Study on calculating carbon footprint and assessing the total environmental impact of wastewater treatment [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019.
- [9] 蔡博峰,朱松丽,于胜民,等. 《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》解读[J]. *环境工程*, 2019, 37(8): 1-11.
CAI B F, ZHU S L, YU S M, et al. The interpretation of 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory [J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(8): 1-11.
- [10] 中国环境保护产业协会. 污水处理厂低碳运行评价技术规范: T/CAEP149—2022[S]. 北京:中国标准出版社, 2022.
China Environmental Protection Industry Association. Technical specification for low-carbon operation evaluation of wastewater treatment plants: T/CAEP149—2022 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [11] 石春力,田永英,黄海伟,等. 我国城镇污水处理厂碳排放核算方法研究综述[J]. *建设科技*, 2021(11): 39-43.
SHI C L, TIAN Y Y, HUANG H W, et al. Summary of researches on accounting methods of carbon emissions from urban sewage treatment [J]. *Construction Science and Technology*, 2021(11): 39-43.
- [12] 闫旭,邱德志,郭东丽,等. 中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征[J]. *环境科学*, 2018, 39(3): 1256-1263.
YAN X, QIU D Z, GUO D L, et al. Emission inventory of greenhouse gas from urban wastewater treatment plants and its temporal and spatial distribution in China [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(3): 1256-1263.
- [13] 宋宝木,秦华鹏,马共强. 污水处理厂运行阶段碳排放动态变化分析:以深圳某污水处理厂为例[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(10): 204-209.
SONG B M, QIN H P, MA G Q. Analysis for dynamic changes of wastewater treatment plant carbon emissions in operation phase: With a wastewater treatment plant in Shenzhen as an example [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(10): 204-209.
- [14] 郭盛杰,黄海伟,董欣,等. 中国城镇污水处理行业温室气体排放核算及其时空特征分析[J]. *给水排水*, 2019, 55(4): 56-62.
GUO S J, HUANG H W, DONG X, et al. Calculation of greenhouse gas emissions of municipal wastewater treatment and its temporal and spatial trend in China [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2019, 55(4): 56-62.
- [15] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. Bangkok: IPCC, 2019.
- [16] LAW Y, JACOBSEN G, SMITH A M, et al. Fossil organic carbon in wastewater and its fate in treatment plants [J]. *Water Research*, 2013, 47(14): 5270-5281.
- [17] TSENG L Y, ROBINSON A K, ZHANG X Y, et al. Identification of preferential paths of fossil carbon within water resource recovery facilities via radiocarbon analysis [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(22): 12166-12178.
- [18] 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.
ZHANG C. The study on quantitative evaluation of carbon emission in sewage treatment system [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [19] MANNINA G, EKAMA G, CANIANI D, et al. Greenhouse gases from wastewater treatment - A review of modelling tools [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 551/552: 254-270. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.163.
- [20] MONTEITH H D, SAHELY H R, MACLEAN H L, et al. A rational procedure for estimation of greenhouse-gas emissions from municipal wastewater treatment plants [J]. *Water Environment Research*, 2005, 77(4): 390-403.
- [21] RODRIGUEZ-GARCIA G, HOSPIDO A, BAGLEY D, et al. A methodology to estimate greenhouse gases emissions in life cycle inventories of wastewater treatment plants [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2012, 37(4): 37-46.
- [22] SHAHABADI M B, YERUSHALMI L, HAGHIGHAT F. Estimation of greenhouse gas generation in wastewater treatment plants—Model development and application [J]. *Chemosphere*, 2010, 78(9): 1085-1092.
- [23] 王钊越,赵夏滢,唐琳慧,等. 城市污水收集与处理系统碳排放监测评估技术研究进展[J]. *环境工程*, 2022, 40(6): 77-82, 161.

- WANG Z Y, ZHAO X Y, TANG L H, et al. Research advances in carbon emission monitoring and assessment of urban drainage and wastewater treatment systems [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(6): 77-82, 161.
- [24] 彭永臻, 高景峰, 隋铭皓. 活性污泥法动力学模型的研究与发展[J]. 给水排水, 2000(8): 15-19.
- PENG Y Z, GAO J F, SUI M H. Advances on the kinetic model of activated sludge process [J]. Water & Wastewater Engineering, 2000(8): 15-19.
- [25] MASSARA T M, MALAMIS S, GUIASOLA A, et al. A review on nitrous oxide (N_2O) emissions during biological nutrient removal from municipal wastewater and sludge reject water[J]. Science of the Total Environment, 2017, 596/597: 106-123. DOI:10.1016/j.scitotenv.2017.03.191.
- [26] COROMINAS L, FLORES-ALSINA X, SNIP L, et al. Comparison of different modeling approaches to better evaluate greenhouse gas emissions from whole wastewater treatment plants [J]. Biotechnol Bioeng, 2012, 109(11): 2854-2863.
- [27] LI K L, DUAN H R, LIU L F, et al. An integrated first principal and deep learning approach for modeling nitrous oxide emissions from wastewater treatment plants [J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(4): 2816-2826.
- [28] HUANG X J, XU Y, HE T X, et al. Ammonium transformed into nitrous oxide via nitric oxide by *Pseudomonas putida* Y-9 under aerobic conditions without hydroxylamine as intermediate [J]. Bioresource Technology, 2019, 277: 87-93. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.01.040.
- [29] POCQUET M, WU Z, QUEINNEC I, et al. A two pathway model for N_2O emissions by ammonium oxidizing bacteria supported by the NO/N_2O variation [J]. Water Research, 2016, 88: 948-959. DOI: 10.1016/j.watres.2015.11.029.
- [30] GORI R, JIANG L M, SOBHANI R, et al. Effects of soluble and particulate substrate on the carbon and energy footprint of wastewater treatment processes [J]. Water Research, 2011, 45(18): 5858-5872.
- [31] FLORES-ALSINA X, COROMINAS L, SNIP L, et al. Including greenhouse gas emissions during benchmarking of wastewater treatment plant control strategies [J]. Water Research, 2011, 45(16): 4700-4710.
- [32] ASHRAFI O, YERUSHALMI L, HAGHIGHAT F. Application of dynamic models to estimate greenhouse gas emission by wastewater treatment plants of the pulp and paper industry [J]. Environmental Science and Pollution, 2013, 20(3): 1858-1869.
- [33] 鲍志远. 典型城市污水处理工艺温室气体排放特征及减排策略研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- BAO Z Y. Study on characteristics mitigation strategies of greenhouse gases emissions from typical domestic wastewater treatment processes [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [34] MASUDA S, SANO I, HOJO T, et al. The comparison of greenhouse gas emissions in sewage treatment plants with different treatment processes [J]. Chemosphere, 2018, 193: 581-590. DOI:10.1016/j.chemosphere.2017.11.018.
- [35] 胡香, 陈孔明, 李涛. 巢湖流域城镇污水处理厂温室气体排放特征分析 [J]. 环境污染与防治, 2022, 44(10): 1409-1414.
- HU X, CHEN K M, LI T. Characteristics analysis of greenhouse gas emission in municipal wastewater treatment plants in Chaohu Basin [J]. Environmental Pollution and Control, 2022, 44(10): 1409-1414.
- [36] 刘芳, 王光辉, 郑鹏凯. 市政污水处理厂节能粗评估方法研究 [J]. 给水排水, 2021, 57(11): 37-40.
- LIU F, WANG G H, ZHENG P K. Study on coarse evaluation method for energy-saving in municipal wastewater treatment plants [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(11): 37-40.
- [37] 中华人民共和国生态环境部. 2019年度减排项目中国区域电网基准线排放因子 [R/OL]. [2023-06-01]. <https://www.mee.gov.cn/ywgz/ycqhbh/wsqtzk/202012/W02020129610353340851.pdf>.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Baseline emission factors of China's regional power grid in 2019 annual emission reduction project [R/OL]. [2023-06-01]. <https://www.mee.gov.cn/ywgz/ycqhbh/wsqtzk/202012/W020201229610353340851.pdf>.
- [38] 罗雨莉, 潘艺蓉, 马嘉欣, 等. 污水再生与增值利用的碳排放研究进展 [J]. 环境工程, 2022, 40(6): 83-91.
- LUO Y L, PAN Y R, MA J X, et al. Research advances on carbon emissions of wastewater resource recovery and valorization [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(6): 83-91.
- [39] WANG D, GUO F, WU Y H, et al. Technical, economic and environmental assessment of coagulation/filtration tertiary treatment processes in full-scale wastewater treatment plants [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 170: 1185-1194. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2017.09.231.
- [40] 周政, 李怀波, 王燕, 等. 低碳氮比进水 AAO 污水处理厂碳排放特征及低碳运行研究 [J]. 中国环境科学, 2022(11): 5088-5099.
- ZHOU Z, LI H B, WANG Y, et al. Research on low-carbon operation mode in AAO-based wastewater treatment plants with low C/N influent [J]. China Environmental Science, 2022(11): 5088-5099.
- [41] 丁晓妹, 李向阳. 城市污水热能的回收利用 [J]. 甘肃科技, 2010, 26(3): 74-75.
- DING X M, LI X Y. Recovery and utilization of heat energy from municipal sewage [J]. Gansu Science and Technology, 2010, 26(3): 74-75.
- [42] 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 Kakolanmäki 污水处理厂为例[J]. 环境工程学报, 2021, 15(9): 2849-2857.
- HAO X D, ZHAO Z C, LI J, et al. Analysis of energy recovery and carbon neutrality for the Kakolanmäki WWTP in Finland [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(9): 2849-2857.
- [43] 郝晓地, 方晓敏, 李季, 等. 污水碳中和运行潜能分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(10): 11-16.
- HAO X D, FANG X M, LI J, et al. Analysis of potential in carbon-neutral operation of WWTPs [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(10): 11-16.
- [44] HAO X D, LI J, LOOSDRECHT M C M, et al. Energy recovery from wastewater: Heat over organics[J]. Water Research, 2019, 161: 74-77. DOI: 10.1016/j.watres.2019.05.106.
- [45] 王琳, 李德彬, 刘子为, 等. 污泥处理处置路径碳排放分析[J]. 中国环境科学, 2022, 42(5): 2404-2412.
- WANG L, LI D B, LIU Z W, et al. Analysis on carbon emission from sludge treatment and disposal [J]. China Environmental Science, 2022, 42(5): 2404-2412.
- [46] 张岳, 葛铜岗, 孙永利, 等. 基于城镇污水处理全流程环节的碳排放模型研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(9): 65-74.
- ZHANG Y, GE T G, SUN Y L, et al. Research on carbon emission model based on the whole process of urban sewage treatment [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(9): 65-74.
- [47] 谢菲. 水厂电耗节约方法研究与创新[J]. 城镇供水, 2020(6): 27-30, 55.
- XIE F. Research and innovation of power consumption saving methods in waterworks[J]. City and Town Water Supply, 2020(6): 27-30, 55.
- [48] 崔玉川. 给水厂处理设施设计计算[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- CUI Y C. Design and calculation of water treatment facilities [M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.

(上接第 28 页)

- LI X H. Toxicity of MXC, BPA combined exposure on zebrafish embryo and sperm motility [D]. Wenzhou: Wenzhou Medical University, 2011.
- [55] 朱暖飞. 环境中典型双酚类化合物的免疫分析方法构建、污染调查与风险评估研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.
- ZHU N F. Construction of immunoassay method, pollution investigation and risk assessment of typical bisphenol compounds in the environment[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022.
- [56] VANDENBERG L N. Human exposure to bisphenol A (BPA) [J]. Reproductive Toxicology, 2007, 24(2): 139-177.
- [57] YANG C F, KARMAUS W J J, YANG C C, et al. Bisphenol A exposure, DNA methylation, and asthma in children [J]. International Journal Environment Research Public Health, 2020, 17(1): 298. DOI: 10.3390/ijerph17010298.
- [58] 谢娜妹, 王慧, 王舜钦. 双酚 A 暴露对儿童健康影响的研究进展[J]. 中国妇幼保健, 2022, 37(8): 1539-1542.
- XIE N M, WANG H, WANG S Q. Research progress on the effects of bisphenol A exposure on children's health [J]. Maternal and Child Health Care of China, 2022, 37(8): 1539-1542.
- [59] 徐耿. 童年期双酚 A 暴露对女童青春期发育提前的影响[J]. 中国儿童保健杂志, 2016, 24(7): 719-722.
- XU G. Effects of childhood BPA exposure on early pubertal development in girls[J]. Chinese Journal of Child Health Care, 2016, 24(7): 719-722.
- [60] 戴晖, 朱小琴, 罗淑红. 女童性早熟与环境内分泌干扰素的相关性研究[J]. 中国性科学, 2017, 26(6): 58-60.
- DAI H, ZHU X Q, LUO S H. Correlation of precocious puberty and environmental endocrine disruptors [J]. Chinese Journal of Human Sexuality, 2017, 26(6): 58-60.
- [61] 周琴. 双酚 A 对男性生殖功能的影响及机制探讨[D]. 太原: 山西医科大学, 2013.
- ZHOU Q. Effect and mechanism of bisphenol A on male reproductive function[D]. Taiyuan: Shanxi Medical University, 2013.
- [62] MUSTIELES V, FERNÁNDEZ M F. Bisphenol A shapes children's brain and behavior: Towards an integrated neurotoxicity assessment including human data [J]. Environmental Health, 2020, 19(1): 66. DOI: 10.1186/s12940-020-00620-y.
- [63] 李蕊瑞, 李晓蒙, 陈锦瑶. 双酚 A 的遗传毒性及其作用模式[J]. 卫生研究, 2021, 50(2): 353-357.
- LI R R, LI X M, CHEN J Y. Genotoxicity and mode of action of bisphenol A[J]. Journal of Hygiene Research, 2021, 50(2): 353-357.
- [64] 王冲, 徐立. 双酚 A 的表观遗传作用机制研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2018, 35(8): 744-747.
- WANG C, XU L. Effects of bisphenol A on epigenetics: A review of recent studies [J]. Journal of Environment and Health, 2018, 35(8): 744-747.
- [65] 苏贝, 张琳钰, 陈玲, 等. 市政尾水中环境雌激素对水生态健康的影响[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(5): 91-102.
- SU B, ZHANG L Y, CHEN L, et al. Effect of environmental estrogens in the effluent of municipal wastewater treatment plants on water ecological health [J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(5): 91-102.