

述评与讨论

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.12.001

污水处理系统碳排放影响因素及降碳策略研究

吴宝利, 李鹏峰, 张岳, 孙永利, 郑兴灿, 葛铜岗, 尚巍,
刘静, 夏琼琼

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

摘要: 针对城镇污水处理系统的碳排放核算尚未形成系统性和规范化的量化核算程序的现状,初步构建了包括污水输送、污水处理、污泥处理处置、尾水排放及再生水利用环节在内的整体污水处理系统碳排放测算方法。通过测算全国2 093座污水处理厂的碳排放量可知,我国污水处理厂碳排放总量强度逐年增高,冬春两季的吨水碳排放量高于夏秋两季;吨水碳排放量随着污水处理厂工程规模和运行负荷率的提高而降低,但随着出水水质标准的升高而呈现明显上升趋势。城镇污水处理主要工艺单元节能降碳管控措施主要包括进水峰值流量控制、强化工艺流程设计、精准控制运行模式等。

关键词: 污水处理; 碳排放; 温室气体; 节能降碳

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)12-0001-12

Research on Influencing Factors and Carbon Reduction Strategies of Sewage Treatment System

WU Bao-li, LI Peng-feng, ZHANG Yue, SUN Yong-li, ZHENG Xing-can,
GE Tong-gang, SHANG Wei, LIU Jing, XIA Qiong-qiong

(North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074,
China)

Abstract: The lack of a systematic and standardized quantitative accounting procedure for carbon emission accounting in urban sewage treatment systems is a significant challenge. This study has developed a preliminary carbon emission measurement method for the overall sewage treatment system, including sewage transportation, sewage treatment, sludge treatment and disposal, effluent discharge from sewage treatment plant and reclaimed water utilization. Through the analysis of carbon emissions from 2 093 sewage treatment plants in China, it was observed that the total carbon emission intensity of sewage treatment plants in China has been increasing annually. The carbon emission per ton of sewage in winter and spring was higher than that in summer and autumn. Additionally, the carbon emission per ton of sewage decreased with the increase of project scale and operation load rate, but displayed a noticeable upward trend with the increase of effluent quality standard. Furthermore, the control measures of energy

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFE0208800); 中国市政工程华北设计研究总院有限公司自立科研课题(ZH-2021-52-KJB)

通信作者: 张岳 E-mail: tjdxhjzy@tju.edu.cn

saving and carbon reduction in main process units of urban sewage treatment primarily involved controlling the peak inflow flow, strengthening the process design, and the operation mode accurately, etc.

Key words: sewage treatment; carbon emission; greenhouse gas; energy saving and carbon reduction

随着城市化及工业化的发展,大气中的温室气体含量急剧升高,对全球气候产生了重要影响。因此,如何降低温室气体排放量、大力推广节能降碳技术、实现可持续发展成为国际社会普遍面临的一项重大挑战^[1-3]。2020年12月12日,习近平总书记在国际气候峰会上承诺我国力争2030年前二氧化碳碳排放达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和,为我国碳减排设定了实现目标^[4-5]。污水处理属于能源密集型行业,美国、德国、日本等国家污水处理行业电耗占全社会总电耗的1%左右,高能耗导致大量间接碳排放^[6-7]。根据2018年发布的《中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告》,2014年我国温室气体总量为 $123.01 \times 10^8 \text{ t CO}_2$ 当量,其中污水处理的碳排放量为 $0.91 \times 10^8 \text{ t CO}_2$ 当量,占温室气体总量的0.7%^[8-10]。

我国城镇污水处理能力显著提高,为城市水污染防治作出了重要贡献,但同时也向空气中排入大量温室气体。目前,污水处理碳排放核算主要采用联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)指南提供的方法,碳排放核算的参数取值基本上根据各国人口数据及人均产污能力粗略估计,导致其在我国污水处理行业碳排放管理方面的适用性尚不完全确定。同时,针对污水处理系统的碳排放核算,我国尚未形成系统性和规范化的量化核算程序。

为此,以城镇污水处理行业碳排放管理为目标导向,根据全国污水处理厂的运行基础数据,在《IPCC 2006年国家温室气体清单指南2019修订版》(以下简称《2019清单指南》)框架下结合工艺过程的化学计量学,初步构建包括污水输送、污水处理、污泥处理处置、尾水排放及再生水利用环节在内的整体污水处理厂系统碳排放测算方法;同时结合构建的碳排放测算方法,从季节变化、排放标准、处理规模、运行负荷率等方面分析污水处理系统的碳排放变化规律,探讨城镇污水处理系统的碳排放特征及主要因素的影响方式,进而提出系统性的减污降碳优化路径,为污水处理厂的减污降碳、节能降耗

协同增效提供应用参考。

1 碳排放测算方法

1.1 测算原则

研究所述的污水处理厂系统碳排放测算方法综合考虑了城镇污水输送、污水处理、再生水利用、污泥处理处置、资源回收利用各环节产生的碳排放,可用于指导污水处理碳排放核算边界和指标体系的构建,为量化核算与评价污水处理过程温室气体排放提供应用参考。

1.2 测算边界和内容

IPCC指南认为,生物降解排放的 CO_2 其碳元素源于空气中的 CO_2 ,对空气碳平衡影响有限,故不纳入国家碳排放总量的核算范围。据此,主要考虑污水输送处理过程中直接向空气排放的 CH_4 和 N_2O 及外加碳源转化排放的 CO_2 (称“直接碳排放”)、能耗物耗生产的碳排放(称“间接碳排放”)。因此,城镇污水输送处理碳排放源分析如图1所示。

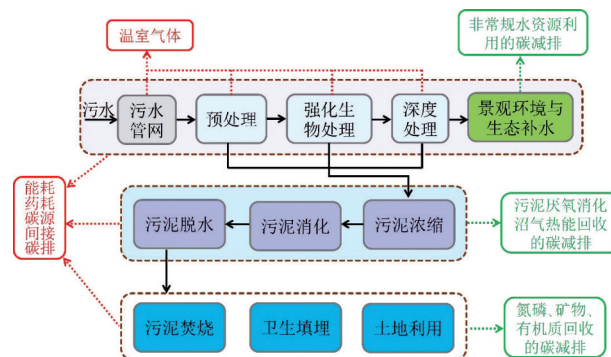


图1 城镇污水收集处理系统碳排放源分析

Fig.1 Analysis of carbon emission sources from urban sewage collection and treatment system

由图1可知,污水输送、污水处理、污泥处理与处置、尾水资源化利用等环节均存在碳排放或碳减排发生。为此,基于目前污水系统普遍采用的主要工艺单元碳排放分析,提出全流程碳排放综合测算方法。

污水收集处理系统各工艺单元的碳排放分析见表1。

表1 污水收集处理各单元碳排放分析

Tab.1 Carbon emission analysis for each unit of sewage collection and treatment

流程环节	工艺单元	碳减排	间接碳排放	直接碳排放
污水输送	管线与泵站		CO ₂ (电耗)	CH ₄
污水处理 再生利用	预处理		CO ₂ (电耗)	CH ₄
	生物处理		CO ₂ (电耗、碳源)	N ₂ O
	深度处理		CO ₂ (电耗、药耗)	N ₂ O(反硝化滤池)
	消毒		CO ₂ (电耗、药耗)	
	出水达标排放	碳减排(水质提升)		N ₂ O、CH ₄
	景观与生态环境用水	碳汇(景观生态)		N ₂ O、CH ₄
	热能、太阳能等	净减排(新能源)		
污泥处理	污泥脱水		CO ₂ (电耗、药耗)	
	污泥干化		CO ₂ (电耗、药耗)	
	污泥消化	CH ₄ 回收利用		
污泥处置	卫生填埋			CH ₄
	土地利用	碳汇(景观生态)		N ₂ O、CH ₄
	焚烧碳化		CO ₂ (电耗、能耗)	

1.3 测算公式基本形式分析

根据图1和表1,结合城镇污水处理系统运行全过程碳排放途径分析可知,城镇污水系统运行阶段的净碳排放量(W)是指直接碳排放量(E_z)与间接碳减排量(E_j)的加和扣除碳减排量(J)。直接碳排放根据实施途径可分解成污水收集与输送过程碳排放量(E_c)、污水处理过程碳排放量(E_c)、污泥卫生填埋碳排放量(E_w)、污泥土地利用环节碳排放量(E_r)、污泥焚烧环节碳排放量(E_f)。间接碳排放量主要考虑污水输送与处理全过程耗电碳排放量(E_{DH})、污泥处理处置过程耗电碳排放量(E_{WN})、碳源消耗碳排放量(E_{TH})、药剂消耗碳排放量(E_{YH})。

根据实施途径,碳减排可分解为水质提升与利用形成的碳减排量(J_w)、污泥厌氧消化产甲烷回收利用碳减排量(J_x)、污泥土地利用作为土壤改良剂与肥料的碳减排量(J_n)、污水热能回收利用碳减排量(J_r)、太阳能等其他能源开发碳减排量(J_s)。

综上,污水系统碳排放测算公式基本形式如下:

$$W = E_z + E_j - J \quad (1)$$

$$E_z = E_c + E_c + E_w + E_r + E_f \quad (2)$$

$$E_j = E_{DH} + E_{WN} + E_{TH} + E_{YH} \quad (3)$$

$$J = J_w + J_x + J_n + J_r + J_s \quad (4)$$

2 测算公式推导

2.1 直接碳排放量(E_z)

2.1.1 污水收集与输送过程碳排放量(E_c)

在污水管网输送到污水处理厂的过程中,一方面

面长距离输送会消耗能量,间接产生CO₂;另一方面,管道内壁的粗糙表面附着的大量微生物也会导致管网中污染物进行一系列的生化反应,其中厌氧消化过程可产生温室气体(主要为CH₄)。管道内厌氧消化过程产生的CH₄总量为由BOD₅降解产生的CH₄量与微生物内代谢产生的CH₄量之和。同时,根据现场实测条件和工程调查结果,结合人均污染物产生当量、污水管网起始端污水量等数据,实际污水管道中CH₄的计算公式可简化如下:

$$M_{CH_4,降解简化} = a \times m \times (P_{人口} \times k \times 365 - Q_i \times BOD_{5,进水}) \times 10^{-6} \quad (5)$$

式中: $M_{CH_4,降解简化}$ 为管道CH₄产量,t/a; $P_{人口}$ 为城市人口数,人; k 为城镇居民人均日生活污水污染物产生量,g/(人·d); m 为污水中污染物沉积至管道底泥的比例,取60%~80%^[11-13]; Q_i 为污水厂处理水量,m³/a; a 为管道中BOD₅衰减系数,取0.2~0.5^[14-16]; $BOD_{5,进水}$ 为进水BOD₅浓度,mg/L。

根据《中华人民共和国气候变化第三次信息通报》,CH₄的百年全球增温潜势(G_{CH_4})为21,因此污水收集与输送过程的CH₄类碳排放计算公式如下:

$$E_G = G_{CH_4} \times M_{CH_4,降解简化} = 21 \times a \times m \times (P_{人口} \times k \times 365 - Q_i \times BOD_{5,进水}) \times 10^{-6} \quad (6)$$

2.1.2 污水处理过程碳排放量(E_c)

城镇污水处理过程直接碳排放包括N₂O碳排放量(E_{MC})和CH₄碳排放量(E_{NC})。

① N₂O碳排放量(E_{MC})

城镇污水处理系统的 N_2O 碳排放主要指生物脱氮工艺中硝化与反硝化的中间产物 N_2O ,气体主要释放点位如图2所示。 N_2O 最主要的产生点位在生物池的好氧区和缺氧区,释过程受工艺类型、碳氮比、DO浓度、监测方法等因素影响,而二沉池、后续深度处理及水体中也会形成少量气体,但比例较小。

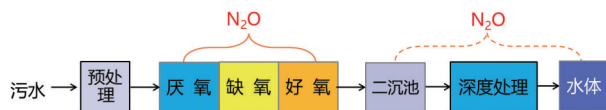


图2 城镇污水处理系统 N_2O 主要产生点位

Fig.2 N_2O generation points in sewage treatment system

N_2O 既可作为硝化过程的副产物也可作为反硝化过程的中间产物而释放,去除总氮产生的 N_2O 折算碳直接排放量计算式如下:

$$E_{MC} = Q_i \times (TN_0 - TN_1) \times 44/28 \times EF_1 \times G_{N_2O} \times 10^{-6} \quad (7)$$

式中: E_{MC} 为污水厂去除TN产生的 N_2O 折算 CO_2 当量的年排放量, tCO_2/a ; TN_0 、 TN_1 分别为污水厂进、出水TN浓度, mg/L ; $44/28$ 为 N_2O 与 N_2 的分子质量之比; EF_1 为污水厂去除总氮的 N_2O 排放因子,《2019清单指南》推荐值为 $0.005 tN_2O/tN$; G_{N_2O} 为 N_2O 的全球变暖潜势,《2019清单指南》推荐值为298。

② CH_4 碳排放量(E_{NC})

城镇污水处理厂污水及污泥处理的厌氧过程会产生甲烷,其产生点位主要在预处理单元、二级处理单元及污泥处理单元,具体如图3所示。

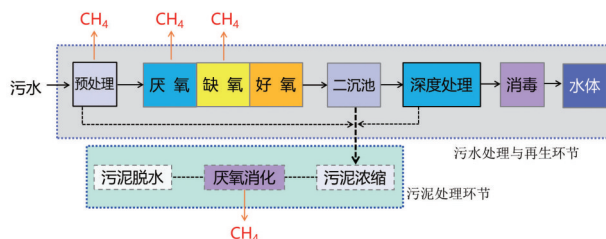


图3 污水处理系统 CH_4 产生点位

Fig.3 CH_4 generation points in sewage treatment system

甲烷产生的碳排放可参照《2019清单指南》所述,计算式如下:

$$E_{NC} = [Q_i \times (COD_0 - COD_1) \times 10^{-6} - 1.42 \times SG_i \times f_i] \times EF_2 \times G_{CH_4} \quad (8)$$

式中: E_{NC} 为污水厂去除COD产生的 CH_4 折算 CO_2 当量的年排放量, tCO_2/a ; COD_0 、 COD_1 分别为污

水厂进、出水COD浓度, mg/L ; SG_i 为污水厂界内产生的绝干污泥总量, tDS/a ; f_i 为污水厂污泥中的有机质含量,若无实测值可取 $0.4 \sim 0.6 tVSS/tDS^{[17-18]}$; 1.42 为干污泥中有机质(以 $C_5H_7NO_2$ 细胞体计,相对分子质量为113)折合COD当量($5O_2$,相对分子质量160); EF_2 为污水厂去除COD的 CH_4 排放因子,为最大 CH_4 产生潜势值(IPCC推荐取值 0.25)与 CH_4 修正因子MCF(IPCC推荐取值 0.165)的乘积,即 $0.041 tCH_4/tCOD$ 。

2.1.3 污泥卫生填埋碳排放量(E_w)

城镇污水处理厂产生的污泥中C、N等元素在卫生填埋过程中将产生 CH_4 ,即产生碳排放效应。针对污泥卫生填埋的碳排放估算,IPCC指南提供了两种方法,分别为质量平衡法和一阶衰减法。一阶衰减法需要污泥填埋场50年以上的监测数据,计算方法并不适用于我国,故采用质量平衡法。污泥卫生填埋 CH_4 排放因子($EF_{CH_4,卫生填埋}$)采用IPCC指南推荐公式,具体如下:

$$EF_{CH_4,卫生填埋} = MCF \times DOC \times DOC_F \times F \times 16/12 \quad (9)$$

式中:MCF为甲烷产生量修正因子,根据我国实际污泥泥质,取 $0.92^{[17-18]}$; DOC为污泥中可分解有机碳比例,取《2019清单指南》推荐值 0.5 ; DOC_F 为可分解转化为 CH_4 的DOC比例,取《2019清单指南》推荐值 0.5 ; F 为卫生填埋产生的气体中 CH_4 的比例,取《2019清单指南》推荐值 0.5 ; $16/12$ 为 CH_4 和C分子质量之比。

经计算,我国卫生填埋 CH_4 排放因子 $EF_{CH_4,卫生填埋}$ 为 $0.15 kgCH_4/kgVS$ 。

基于此,结合“全国城镇污水处理信息管理系统”(简称“信息系统”)运营项目月报表中登记的污泥处置途径及处置量信息,污泥填埋 CH_4 排放量($M_{CH_4,卫生填埋}$)测算公式如下:

$$M_{CH_4,卫生填埋} = [\omega_{卫生填埋} \times Q_w \times (1 - \gamma) \times EF_{CH_4,卫生填埋} - R_{CH_4,卫生填埋}] \times (1 - OX) \quad (10)$$

式中: $M_{CH_4,卫生填埋}$ 为污泥卫生填埋环节 CH_4 产生量, tCH_4/a ; $\omega_{卫生填埋}$ 为污泥填埋率,%,由“信息系统”查询的污泥卫生填埋处置总量计算所得; Q_w 为脱水污泥量, t/a ; $R_{CH_4,卫生填埋}$ 为污泥填埋场 CH_4 回收量,取 0 ; OX 为污泥中碳的氧化因子,采用《2019清单指

南》推荐值,取0.1; γ 为污泥含水率,%。

污泥填埋 CH_4 类碳排放量(E_w)测算公式如下:

$$E_w = M_{\text{CH}_4, \text{卫生填埋}} \times G_{\text{CH}_4} = 2.835 \times \omega_{\text{卫生填埋}} \times Q_w \times (1 - \gamma) \quad (11)$$

2.1.4 污泥土地利用环节碳排放量(E_T)

污泥土地利用环节 CH_4 和 N_2O 排放量采用排放系数法核算。据报道,土地利用 CH_4 的排放因子($\text{EF}_{\text{CH}_4, \text{土地利用}}$)取0.003 kg CH_4 /kgVS, N_2O 的排放因子($\text{EF}_{\text{N}_2\text{O}, \text{土地利用}}$)取0.017 kg N_2O /kgVS,且污泥细胞质中氮含量(δ_N)可取0.12^[17-18]。污泥土地利用 CH_4 、 N_2O 排放量($M_{\text{CH}_4, \text{土地利用}}$ 、 $M_{\text{N}_2\text{O}, \text{土地利用}}$)计算方法如下:

$$M_{\text{CH}_4, \text{土地利用}} = \omega_{\text{土地利用}} \times Q_w \times (1 - \gamma) \times \text{EF}_{\text{CH}_4, \text{土地利用}} = 3 \times 10^{-3} \times \omega_{\text{土地利用}} \times Q_w \times (1 - \gamma) \quad (12)$$

$$M_{\text{N}_2\text{O}, \text{土地利用}} = \omega_{\text{土地利用}} \times Q_w \times (1 - \gamma) \times f \times \delta_N \times \text{EF}_{\text{N}_2\text{O}, \text{土地利用}} \times 44/28 \quad (13)$$

式中: $\omega_{\text{土地利用}}$ 为污泥土地利用率,%; f 为污泥中挥发性固体占比,%。

污泥土地利用环节碳排放量(E_T)可按式计算:

$$E_T = G_{\text{CH}_4} \times M_{\text{CH}_4, \text{土地利用}} + G_{\text{N}_2\text{O}} \times M_{\text{N}_2\text{O}, \text{土地利用}} \quad (14)$$

2.1.5 污泥焚烧环节碳排放量(E_F)

污泥焚烧是利用污泥中的热量和外加辅助燃料,通过焚烧实现污泥彻底无害化处置的过程,可分为单独焚烧和协同焚烧等类型。

① 污泥焚烧前应经过污泥干化阶段,脱水污泥需要经过桨叶、圆盘、流化床、带式机等形式的干化设备进行热干化处理后才可进行焚烧,在此过程中能源消耗将产生温室气体贡献,计算公式如下:

$$E_{\text{污泥干化}} = \sum_{i=1}^n E_i \times \text{EF}_i \quad (15)$$

式中: $E_{\text{污泥干化}}$ 为污泥干化阶段 CO_2 排放量,t CO_2 /a; E_i 为干化阶段第*i*种燃料能耗,kW·h/a或kJ/a; EF_i 为第*i*种燃料有效的 CO_2 排放因子,t CO_2 /(kW·h)。

② 污泥焚烧过程排放的主要温室气体包括 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 。IPCC中规定,只有废弃物中的矿物碳(如塑料、某些纺织物、橡胶、液体溶剂和废油)在焚化期间经氧化产生的二氧化碳排放,被视为净排放。废弃物中所含的生物质材料(如纸张、食品和木材废弃物)燃烧产生的 CO_2 排放是生物成因的排

放,不应纳入碳排放总量。因此,污水处理厂污泥应属于生物质材料,其燃烧产生的 CO_2 不计入碳排放总量。污泥焚烧产生的 CH_4 、 N_2O 直接排放量计算公式分别如下:

$$E_{\text{CH}_4, \text{焚烧碳化}} = \text{EF}_{\text{CH}_4, \text{焚烧碳化}} \times W \quad (16)$$

$$E_{\text{N}_2\text{O}, \text{焚烧碳化}} = \text{EF}_{\text{N}_2\text{O}, \text{焚烧碳化}} \times W \quad (17)$$

式中: $E_{\text{CH}_4, \text{焚烧碳化}}$ 为污泥焚烧碳化中 CH_4 排放量,t CH_4 /a; $E_{\text{N}_2\text{O}, \text{焚烧碳化}}$ 为污泥焚烧碳化中 N_2O 排放量,t N_2O /a; $\text{EF}_{\text{CH}_4, \text{焚烧碳化}}$ 、 $\text{EF}_{\text{N}_2\text{O}, \text{焚烧碳化}}$ 分别为污泥焚烧碳化中 CH_4 、 N_2O 排放因子,分别取0.024 25 t CH_4 /t污泥、0.000 99 t N_2O /t污泥^[19-20];W为污泥焚烧环节的干化污泥量,t/a。

污泥焚烧环节直接碳排放量为污泥焚烧的 CH_4 、 N_2O 直接排放量总和,计算公式如下:

$$E_{\text{温室气体,焚烧碳化}} = G_{\text{CH}_4} \times E_{\text{CH}_4, \text{焚烧碳化}} + G_{\text{N}_2\text{O}} \times E_{\text{N}_2\text{O}, \text{焚烧碳化}} \quad (18)$$

③ 由于市政污泥本身热值有限,污泥焚烧过程需要燃料助燃,这部分能源的二氧化碳排放量通过下式计算:

$$E_{\text{燃料,焚烧碳化}} = W \times S_e \times \text{EF}_{\text{TR}} \quad (19)$$

式中: $E_{\text{燃料,焚烧碳化}}$ 为污泥焚烧过程中助燃燃料天然气的碳排放量,t CO_2 /a; S_e 为焚烧过程中天然气的比能耗,取12.25 m³/tDS^[19-20]; EF_{TR} 为天然气消耗 CO_2 排放因子,取值为0.001 98 t CO_2 /m³^[19-20]。

综上,污泥焚烧碳化过程中碳排放量可用下式计算:

$$E_F = E_{\text{污泥干化}} + E_{\text{温室气体,焚烧碳化}} + E_{\text{燃料,焚烧碳化}} \quad (20)$$

2.2 间接碳排放量(E_j)

2.2.1 污水输送与处理全过程耗电碳排放量(E_{DH})

城镇污水输送与处理运行所需耗能主要为电能,主要用于污水污泥的输送、混合、供氧、污泥脱水及特种物质(O_3 、 ClO_2)现场制备等设备运行。污水输送与处理过程电能消耗的间接碳排放量(E_{DH})可按式计算:

$$E_{\text{DH}} = \text{EF}_{\text{DH}} \times W_{\text{DH}} \quad (21)$$

式中: EF_{DH} 为电能生产的碳排放因子,建议取0.90 t CO_2 /(MW·h)^[17-18]; W_{DH} 为城镇污水输送与处理过程的电能消耗量,MW·h/a。

2.2.2 污泥处理处置过程耗电碳排放量(E_{WN})

污泥处理处置过程所需耗能主要为电能,主要用于污泥处理和处置过程中的设备运行。污泥处

理处置过程电能消耗的间接碳排放量(E_{WN})可按下列式计算:

$$E_{WN} = EF_{DH} \times W_{WN} \quad (22)$$

式中: W_{WN} 为城镇污泥处理处置过程的电能消耗量, $MW \cdot h/a$ 。

2.2.3 碳源消耗碳排放量(E_{TH})

城镇污水处理厂外加碳源作为电子供体在反硝化脱氮过程中产生 CO_2 , CO_2 类碳排放量可按下列式计算:

$$E_{TH} = M_{\text{碳源}} \times EF_{\text{碳源}} \times EF_{CO_2, \text{外碳源}} \quad (23)$$

式中: $M_{\text{碳源}}$ 为外加碳源投加量, kg 碳源/ a ; $EF_{\text{碳源}}$ 为碳源消耗的碳排放因子, tCO_2/kg 碳源; $EF_{CO_2, \text{外碳源}}$ 为脱氮过程中外加碳源(以氧当量计)的 CO_2 理论转化率,取 $0.675 kgCO_2/kgBOD$ 碳源。

2.2.4 药剂消耗碳排放量(E_{YH})

城镇污水处理厂运行过程中所需药剂主要包括外加碳源、除磷药剂、污泥脱水药剂等。药剂生产过程中温室气体的排放因子可从文献^[4, 21-24]中获取,如乙酸钠的碳排放因子参考值为 $1.85 kgCO_2/kg$ 乙酸钠,除磷药剂和脱水药剂的碳排放因子平均为 $2.5 kgCO_2/kg$ 混凝剂,石灰的碳排放因子为 $1.74 kgCO_2/kg$ 石灰。药剂消耗碳排放量(E_{YH})可按下列式计算:

$$E_{YH} = \sum_{j=1}^m (M_{YH,j} \times EF_{YH,j}) \quad (24)$$

式中: $M_{YH,j}$ 为第 j 种药剂消耗量, kg/a ; $EF_{YH,j}$ 为第 j 种药剂生产碳排放因子, tCO_2/kg 药剂。

2.3 碳减排量(J)

2.3.1 出水水质提升与利用形成的碳减排量(J_W)

城镇污水处理厂出水水质提升与利用可形成水环境碳减排效益,其思路如下:假如直接向水环境中排放污水,则向大气排放的温室气体量为 E_1 ,而经过城镇污水处理厂处理后的再生水补充至水环境,向大气排放的温室气体量为 E_2 ,因此,由水质提升与利用形成碳减排量可表示为 $J=E_1-E_2$ 。本章节主要计算污水处理导致的碳减排效应,水质提升带来水环境碳减排意味着污水处理厂对环境的影响总体是积极的。因此推导的公式主要是计算污水处理前后导致的碳排放量,其计算过程主要是向受纳水体补入再生水导致的碳减排。

根据《2019清单指南》,地表水体 CH_4 、 N_2O 的排

放因子($EF_{CH_4, \text{地表水体}}$ 、 $EF_{N_2O, \text{地表水体}}$)是基于排入受纳水体的BOD、TN质量提出的,分别取 $6 \times 10^{-5} tCH_4/kgBOD$ 、 $8 \times 10^{-8} tN_2O/kgTN$,即向受纳水体排入 $1 kgBOD$ 或 $1 kg TN$,将分别向大气排放 $6 \times 10^{-5} t CH_4$ 、 $8 \times 10^{-8} t N_2O$ 。根据上述逻辑可知,水质提升与利用形成的碳减排量(J_W)可按下列式计算:

$$J_W = Q_i \times (BOD_0 - BOD_1) \times G_{CH_4} \times EF_{CH_4, \text{地表水体}} \times 10^{-6} + Q_i \times (TN_0 - TN_1) \times G_{N_2O} \times EF_{N_2O, \text{地表水体}} \times 10^{-6} \quad (25)$$

式中: BOD_0 、 BOD_1 分别为城镇污水厂进、出水BOD浓度, mg/L 。

2.3.2 污泥厌氧消化甲烷回收利用碳减排量(J_X)

污泥厌氧消化甲烷回收利用碳减排是指污泥厌氧消化过程产生的 CH_4 ,之后被污水处理厂回收利用。污泥厌氧消化甲烷回收利用碳减排量(J_X)可按照污泥厌氧消化产生的甲烷量换算得到,具体算式如下:

$$J_X = Q_w \times (1 - \gamma) \times f \times \beta_{VS} \times EF_{CH_4, \text{厌氧消化}} \times G_{CH_4} \quad (26)$$

式中: β_{VS} 为污泥厌氧消化过程VS去除率,%; $EF_{CH_4, \text{厌氧消化}}$ 为污泥厌氧消化产甲烷系数, tCH_4/t 污泥。

2.3.3 污泥作土壤改良剂与肥料的碳减排量(J_N)

污泥中氮磷等营养物质可被植物吸收利用,因此可替代硝酸铵、过磷酸钙等化肥原料。结合污泥细胞N含量(δ_N)为 0.12 (可被植物利用 61%),污泥细胞P含量(δ_P)为 0.02 (可被植物利用 70%)^[4, 21-23],污泥土地利用作为土壤改良剂与肥料的碳减排量(J_N)可按下列式计算:

$$J_N = \omega_{\text{土地利用}} \times Q_w \times (1 - \gamma) \times f \times EF_{\text{天然气}} \times (0.61 \times P_{NH_4NO_3} \times \delta_N \times EF_{\text{硝酸铵}} + 0.7 \times P_{Ca(H_2PO_4)_2} \times \delta_P \times EF_{\text{过磷酸钙}}) \times 10^{-3} \quad (27)$$

式中: $EF_{\text{天然气}}$ 为化肥原料生产过程中消耗的天然气转化的 CO_2 排放因子,取 $56.1 gCO_2/MJ^{[17-18]}$; $P_{NH_4NO_3}$ 为 NH_4NO_3 与P的分子比率,取 2.8 ; $EF_{\text{硝酸铵}}$ 为化肥硝酸铵生产能耗,取 $1 GJ/t$ 硝酸铵^[4]; $P_{Ca(H_2PO_4)_2}$ 为 $Ca(H_2PO_4)_2$ 与P的分子比率,取 3.8 ; $EF_{\text{过磷酸钙}}$ 为过磷酸钙生产能耗,取 $1.3 GJ/t$ 过磷酸钙^[4]。

2.3.4 污水热能回收利用碳减排量(J_R)

采用城市污水热能利用系统,可以代替部分高

位能源(石油、天然气、电能等)的使用,进而提高城市能量的有效利用率,具有明显的节能效果。城镇污水处理厂采用污水热能利用技术,可实现污水余温热能回收,降低化石类能源的使用量,从而实现碳减排。污水热能回收利用碳减排量(J_R)可按式计算:

$$J_R = M_R \times \partial \times EF_{DH} \quad (28)$$

式中: M_R 为污水热能回收利用产能, kW·h/a; ∂ 为污水热能回收利用产能转换电能折算系数,可根据现场机械设备运行情况确定。

2.3.5 太阳能等其他能源开发碳减排量(J_S)

城镇污水处理系统部分能源可采用太阳能等其他能源代替,从而降低污水处理厂能耗,达到节能降碳的效果。太阳能等其他能源开发碳减排量(J_S)可按式计算:

$$J_S = M_S \times \alpha \times EF_{DH} \quad (29)$$

式中: M_S 为太阳能等其他能源产能开发量, kW·h/a; α 为太阳能等其他能源开发产能转换电能折算系数,可根据现场设施运行情况确定。

3 污水处理系统碳排放影响因素

影响城镇污水处理系统碳排放的因素众多,其中城市污水管网系统、受纳水体和污泥处理处置过程受外界环境影响因素较多。而城镇污水处理厂的碳排放影响因素单一,且参数取值较为明确,因此,选择全国地级市以上2 093座污水处理厂的基础数据为主要分析对象,连续追踪城镇污水处理厂进、出水的水质和水量数据,结合碳排放测算公式,从季节变化、处理规模、排放标准、运行负荷率等方面分析污水处理厂的碳排放变化规律,研究城镇污水处理系统碳排放特征及主要影响因素,从而为节能降耗低碳运行策略的制定提供参考。

3.1 碳排放特征

选取全国地级市以上2 093座污水处理厂的水质和水量监测数据,结合碳排放测算公式,核算梳理2018年—2020年各月份直接碳排放量、间接碳排放量、碳减排量、碳排放总量的变化情况,结果分别见图4、5。

由图4可知,全国2 093座污水处理厂碳排放总量、间接碳排放量和直接碳排放量随着时间增长逐年上升,2018年、2019年、2020年的碳排放总量依次为 $2\,042.20 \times 10^4$ t、 $2\,292.89 \times 10^4$ t、 $2\,431.09 \times 10^4$ t,说明我国污水处理厂碳排放总量强度逐年增高。结

合图5可知,直接碳排放量约为碳排放总量的1/3,间接碳排放量约为碳排放总量的2/3,说明间接碳排放为污水处理系统碳排放的最主要组成部分,碳排放总量与间接碳排放量密切相关。因此,可采用以控制间接碳排放、降低运行能耗和物耗为主的措施,减少污水处理碳排放总量,同时通过优化调控系统工艺的方式,降低生物脱氮除磷及污泥处理处置等过程的直接碳排放量。

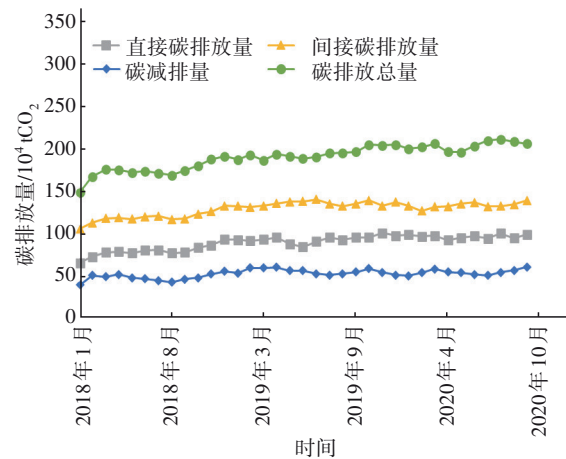


图4 2018年—2020年全国2 093座城镇污水处理厂碳排放量变化趋势

Fig.4 Change trend of carbon emission from 2 093 urban sewage treatment plants from 2018 to 2020

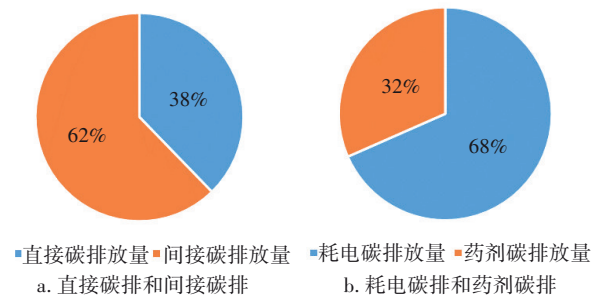


图5 2018年—2020年全国2 093座城镇污水处理厂碳排放占比分析

Fig.5 Analysis of carbon emission proportion of 2 093 urban sewage treatment plants from 2018 to 2020

由图5可知,在间接碳排放分布中,电耗产生的碳排放占比约为68%,而药耗产生的碳排放占比约为32%,其碳排放总量约为电耗碳排放量的50%。由此可知,减少间接碳排放量首先应从耗电量较大的机械设备着手,如进水泵、回流泵、风机、潜流推进器等;同时应考虑降低药耗所产生的碳排放量,一方面可通过优化管网运行条件和提升管网完善

程度来降低污水中碳源的损耗,进而降低污水处理厂的碳源投加量,另一方面可通过精细化运行措施如精准加药、跌水复氧控制、水质水量均衡等,节约药耗,降低峰值加药量。

3.2 季节变化的影响

结合碳排放测算公式,系统梳理全国2 093座城镇污水处理厂2018年—2020年连续3年的吨水碳排放量,核算结果如图6所示。

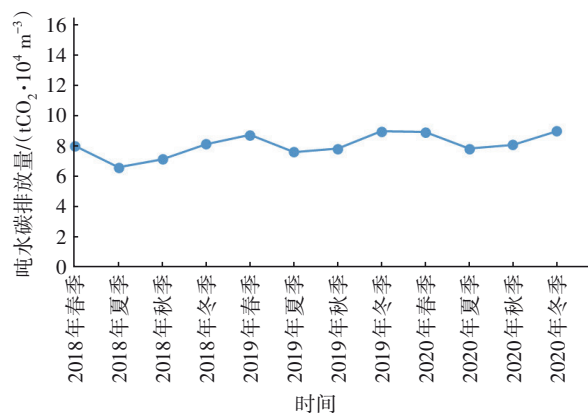


图6 2018年—2020年全国2 093座城镇污水处理厂吨水碳排放量季度变化趋势

Fig.6 Quarterly change trend of carbon emissions per ton of sewage from 2 093 urban sewage treatment plants from 2018 to 2020

由图6可知,夏秋两季的吨水碳排放量小于冬春两季的吨水碳排放量,这是由于冬春两季气温较低导致污水处理厂进水温度偏低,相应的生化系统中污泥活性降低。为保障冬季处理效能,需要提高活性污泥浓度,采取的主要措施为提高生物池的曝气强度和推进器的运行功率;同时,在高浓度活性污泥和低水温条件下,增加反硝化碳源、化学除磷药剂的投加量以提升污水厂的整体脱氮除磷能力。这些措施都将增加污水处理厂间接碳排放量,因此,冬春两季的吨水碳排放量高于夏秋两季。

3.3 工程规模的影响

根据碳排放测算公式,梳理2018年—2020年不同处理规模(1×10^4 、 5×10^4 、 10×10^4 、 15×10^4 、 20×10^4 、 30×10^4 、 40×10^4 、 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)污水处理厂的吨水碳排放量,核算结果如图7所示。

由图7可知,吨水碳排放量随着污水处理厂的工程规模的提高而降低。这是由于城镇污水处理厂的运行电耗和药耗与设计规模关系密切,设计规模越小,吨水电耗和吨水药耗越大,随着处理规模的

增大,吨水电耗和吨水药耗相应降低,而能耗和物耗导致的间接碳排放也随之降低。核算结果表明,污水处理厂工程规模升高会产生一定程度的碳减排效益,说明集中式的污水处理厂可降低污水处理厂吨水碳排放量。

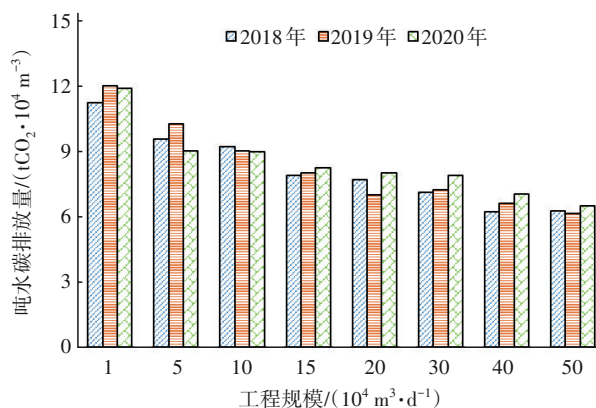


图7 2018年—2020年不同工程规模污水处理厂吨水碳排放量变化趋势

Fig.7 Change trend of carbon emission per ton of sewage from sewage treatment plants with different project scales from 2018 to 2020

3.4 排放标准的影响

以2018年—2020年全国地级市以上2 093座污水处理厂的数据为基础,梳理所有标准的污水厂、地方标准(高于一级A)的污水厂、一级A及以下标准的污水厂碳排放变化情况,核算结果见图8。其中,排放标准为地方标准(高于一级A)的污水厂共计544座,排放标准为一级A及以下标准的污水厂共计1 549座。

由图8可知,所有标准污水厂的碳排放量、地方标准(高于一级A)污水厂的碳排放量均随着时间增长而上升,所有标准污水厂2018年、2019年、2020年的碳排放总量依次为 $2\,222.81 \times 10^4$ 、 $2\,511.66 \times 10^4$ 、 $2\,533.28 \times 10^4 \text{ t}$,地方标准(高于一级A)污水厂2018年、2019年、2020年的碳排放总量依次为 520.08×10^4 、 715.47×10^4 、 $836.80 \times 10^4 \text{ t}$;但是,2018年—2020年,全国一级A及以下标准的污水厂每月碳排放量较为稳定,没有出现随时间增长而上升的现象。同时,全国污水厂碳排放总量与地方标准(高于一级A)污水厂碳排放总量、全国污水厂碳排放总量与一级A及以下标准污水厂碳排放总量的相关系数计算结果分别为0.83、0.44,说明全国污水厂碳排放总量与地方标准(高于一级A)的污水厂碳

排放总量密切相关,间接表明地方标准(高于一级A)污水厂的碳排放量直接影响全国污水厂碳排放总量的变化趋势。

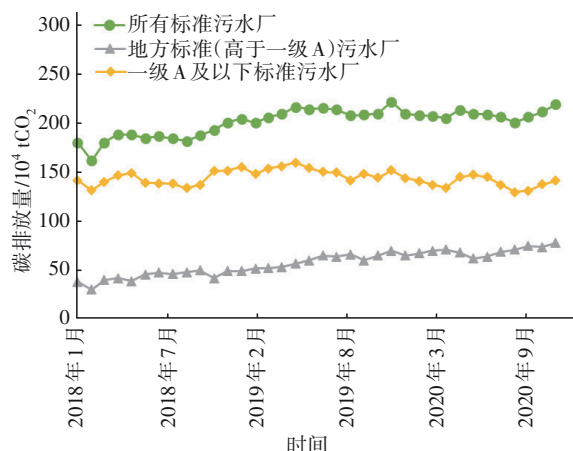


图8 2018年—2020年不同排放标准污水厂碳排放量变化趋势

Fig.8 Change trend of carbon emission from urban sewage treatment plants under different emission standards from 2018 to 2020

图9为不同排放标准下污水处理厂年均吨水碳排放量变化趋势。

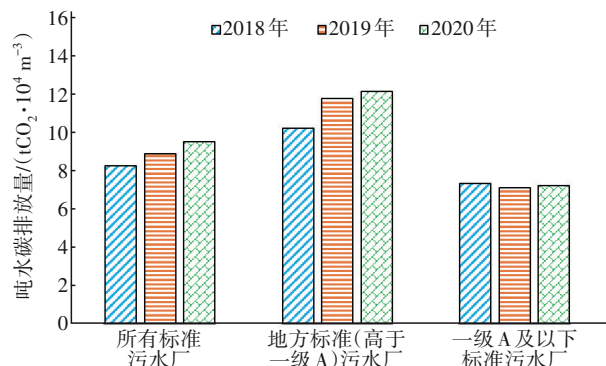


图9 2018年—2020年不同排放标准污水处理厂吨水碳排放量变化趋势

Fig.9 Change trend of carbon emission per ton of sewage from sewage treatment plants under different emission standards from 2018 to 2020

由图9可知,所有标准、地方标准(高于一级A)的污水处理厂年均吨水碳排放量逐年升高,而一级A标准及以下的污水处理厂年均吨水碳排放量逐年变化不大,与碳排放总量变化趋势相一致。吨水碳排放量随着出水水质标准的升高而呈现明显上升的趋势,主要原因包括:①标准提升后污水厂生物脱氮需求增大,导致硝化反硝化产生的直接碳排放量增加;②标准提升后污水厂碳源、化学除磷药

剂的投加量增加,能耗和物耗导致的间接碳排放量随之升高。

3.5 运行负荷的影响

以全国2093座污水处理厂为例,结合碳排放测算公式,梳理2018年—2020年各月份吨水碳排放量、运行负荷率变化情况,结果见图10。

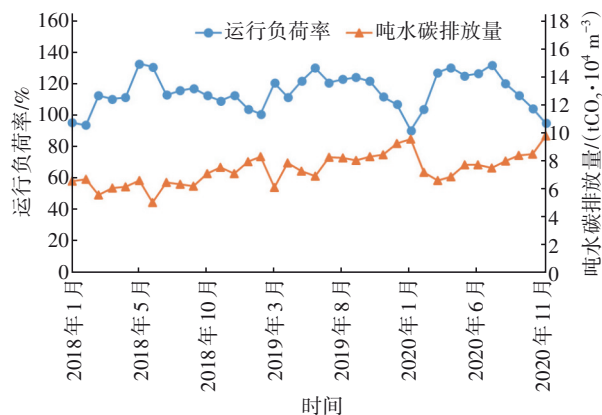


图10 2018年—2020年全国2093座城镇污水处理吨水碳排放量与运行负荷率变化趋势

Fig.10 Change trend of carbon emission per ton of sewage and operating load rate of urban sewage treatment plants from 2018 to 2020

由图10可知,吨水碳排放量随着污水处理厂运行负荷率的波动而发生变化,吨水碳排放量与运行负荷率呈负相关。出现此种现象的主要原因为污水处理厂物耗、能耗与运行负荷率具有较好的相关性,吨水电耗、单位COD电耗、吨水药耗均随着运行负荷率的提高而逐渐降低,尤其是运行负荷率<40%的污水处理厂,吨水电耗和单位COD电耗较高,而运行负荷率>80%的污水处理厂,电耗水平基本持平,这意味着运行负荷率越高,设备利用效率越高,同时,吨水能耗和吨水药耗与碳排放呈正相关关系,因此,吨水碳排放量与运行负荷率呈负相关关系。

4 污水处理单元低碳降耗控制策略分析

城镇污水处理是一个复杂的系统工程,其低碳降耗控制策略需综合分析整个系统的基本特征和变化属性,分析系统各个工艺单元的低碳降耗措施,并结合工艺单元的主要影响因素,形成全工艺单元流程低碳降耗策略和技术措施。结合城市污水处理全流程能耗、物耗及碳排放影响因素分析,提出如表2所示的城镇污水处理主要工艺单元节能降耗控制策略。

表 2 城镇污水处理主要工艺单元节能降碳控制策略

Tab.2 Energy-saving and carbon reduction control strategy for main process units of urban sewage treatment

项目	低碳降耗途径及控制策略
污水管网	低水位高流速运行,考虑水力提升能耗,选择合理的泵站以降低泵送扬程,实现节能和增效
污水提升	①通过设置变频器或不同流量泵组合的形式,控制泵池水位相对平稳,使实际水泵扬程尽量接近水泵最佳工况;②采用变频方式控制泵组的运行,或通过固定-变频组合搭配,提高泵组整体效率;③合理利用污水管网系统和泵房集水池的调蓄能力,减缓污水量的剧烈波动,同时保持较高的进水水位,降低进水提升泵的静扬程
进水格栅	①优化格栅组合(栅隙 1.5 ~ 10 mm),降低惰性漂浮物和悬浮物对生化处理单元的影响,减少活性污泥中惰性组分的含量;②根据实际情况设置超细格栅(栅隙 0.2~1.5 mm),降低进水中纤维及毛发类悬浮物;③加强日常运维,对设备及时维护或更新
沉砂池与初沉池	①进水 SS 浓度较高时,可适当延长沉砂池的水力停留时间;增强无机颗粒和细微砂颗粒的去除能力,降低泥砂沉积和后续单元设备的磨损;②控制曝气沉砂池的曝气量,降低碳源损耗;③设置高效初沉池,去除进水中无机组分并减少碳源的损耗;④针对 SS/BOD ₅ 比值较高的进水,可新建或改造原有初沉池为初沉发酵池;合理控制底泥排出量和悬浮污泥层高度,降低 SS/BOD ₅ 比值,增加优质碳源
生物处理单元	①优化单元布局和工艺,合理调节生物功能区,优化控制措施包括厌氧、缺氧和好氧功能区的指标控制,也包括污泥龄、回流比、污泥浓度、曝气量、投药量等工艺指标的调整;②优化生物池功能区的设置,在推流式生物池好氧区的末端设置缺氧过渡区,降低混合液回流中的溶解氧含量,增强缺氧池的功能
碳源控制	①开发系统内部碳源,设置初沉发酵池实现对碳源的截留与改善;②对于预处理系统的跌水复氧控制,可采用淹没出流的方式,降低出流复氧量,或采用隔板封闭的方式降低跌水复氧效果;③根据进水 TN 波动变化,动态调整碳源投加量和投加点位,降低碳源投加量;④改善反硝化滤池进水方式,采用下进上出的方式防止跌水复氧
除磷药剂	①开展除磷药剂优化投加试验,优选除磷药剂;②结合进水水质及环境因素变化,优化药剂投加点和投加量;③加强药剂投加设备的日常维护保养,降低药剂投加误差

5 结论

① 基于全国污水处理厂的运行基础数据,在 IPCC 指南方法框架下结合工艺过程的化学计量学,初步构建了包括污水输送、污水处理、污泥处理处置、尾水排放及再生水利用环节在内的整体污水处理厂系统碳排放测算方法。

② 结合构建的碳排放测算方法,从季节变化、工程规模、排放标准、运行负荷等方面分析污水处理系统的碳排放变化规律,探讨城镇污水处理系统的碳排放特征及主要因素的影响方式,进而提出系统性的减污降碳优化路径,为污水处理厂的减污降碳、节能降耗协同增效提供应用参考。

③ 基于 2018 年—2020 年全国地级市以上 2 093 座污水处理厂的水质水量监测数据计算碳排放量,测算结果表明,我国污水处理厂碳排放总量强度逐年增高;直接碳排放量约为碳排放总量的 1/3,间接碳排放量约为碳排放总量的 2/3,说明间接碳排放为污水处理系统碳排放的主要组成部分,碳排放总量与间接碳排放量密切相关;冬春两季的吨水碳排放量高于夏秋两季;吨水碳排放量随着污水处理厂工程规模和运行负荷率的提高而降低;吨水碳排放量随着出水水质标准的升高而呈现明显上升的趋势。

④ 城镇污水处理主要工艺单元节能降碳管控措施主要包括进水峰值流量控制、强化工艺流程设计、精准控制运行模式等,如合理利用污水管网系统和泵房集水池的调蓄能力;优化格栅组合(栅隙 1.5 ~ 10 mm),减少活性污泥中惰性组分含量;新建或改造原初沉池为初沉发酵池,增加优质碳源;优化单元布局和工艺,合理调节生物功能区;开发系统内部碳源,设置初沉发酵池实现对碳源的截留与改善;实施预处理系统的跌水复氧控制;动态调整药剂投加量和投加点位,降低药剂投加量。

参考文献:

- [1] 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, 45(4): 56-62.
GUO Shengjie, HUANG Haiwei, DONG Xin, *et al.* Calculation of greenhouse gas of municipal wastewater treatment and its temporal and spatial trend in China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45 (4): 56-62(in Chinese).
- [2] 郝晓地, 王向阳, 江瀚, 等. 污水处理环境综合效益评价方法及案例应用 [J]. 中国给水排水, 2019, 35 (6): 6-15.
HAO Xiaodi, WANG Xiangyang, JIANG Han, *et al.* Evaluation method of the environmental comprehensive

- benefit for wastewater treatment and a case study [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35 (6): 6-15 (in Chinese).
- [3] DELRE A, MONSTER J, SCHEUTZ C. Greenhouse gas emission quantification from wastewater treatment plants, using a tracer gas dispersion method [J]. Science of the Total Environment, 2017, 605/606: 258-268.
- [4] 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 Yue, GE Tonggang, SUN Yongli, *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(in Chinese).
- [5] 宋新新, 林甲, 刘杰, 等. 面向未来的污水处理厂关键技术研发与工程实践专栏序言 [J]. 环境科学学报, 2022, 42(4): 1-6.
SONG Xinxin, LIN Jia, LIU Jie, *et al.* The R & D and practice of key technologies for sewage treatment plants facing the future [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(4): 1-6(in Chinese).
- [6] 郭恰, 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.
GUO Qia, CHEN Guang, MA Yan. Analysis on influencing factors of carbon emission in key processes of urban water system and suggestions for emission reduction [J]. Water Purification Technology, 2021, 40 (10): 113-117(in Chinese).
- [7] 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.
HAO Xiaodi, ZHAO Zicheng, LI Ji, *et al.* Analysis of energy recovery and carbon neutrality for the Kakolanmaki WWTP in Finland [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(9): 2849-2857 (in Chinese).
- [8] 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, 2014, 38(10): 204-209.
SONG Baomu, QIN Huapeng, MA Gongqiang. 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, 2014, 38 (10): 204-209(in Chinese).
- [9] 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 Xu, QIU Dezhi, GUO Dongli, *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(in Chinese).
- [10] 蔡博峰, 高庆先, 李中华, 等. 中国污水处理厂甲烷排放研究 [J]. 中国环境科学, 2015, 35(12): 3810-3816.
CAI Bofeng, GAO Qingxian, LI Zhonghua, *et al.* Estimation of methane emissions of wastewater treatment plants in China [J]. China Environmental Science, 2015, 35(12): 3810-3816(in Chinese).
- [11] 王宝宝, 金鹏康, 郝晓宇, 等. 城市污水管网中污染物转化规律的模拟研究 [J]. 中国给水排水, 2015, 31 (15): 24-27.
WANG Baobao, JIN Pengkang, HAO Xiaoyu, *et al.* Simulation study on transformation of pollutants in urban sewer network [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(15): 24-27 (in Chinese).
- [12] 薛甜. 污水管网汇流区域污染物的沉积特性和迁移转化规律研究 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2020.
XUE Tian. Study on the Sedimentation Characteristics and Transfer and Transformation of Contaminants in Confluence Area of Sewage Pipeline Network [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020 (in Chinese).
- [13] 金鹏康, 卞晓峥, 焦丁, 等. 城市污水管网污染物沉积与冲刷释放规律研究 [J]. 安全与环境学报, 2016, 16(5): 253-257.
JIN Pengkang, BIAN Xiaozheng, JIAO Ding, *et al.* On the pollutant deposition and erosion release in the urban sewer networks [J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(5): 253-257 (in Chinese).
- [14] 赵楠. 城市污水管网污染物迁移转化模拟研究 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2021.
ZHAO Nan. Simulation Research on Pollutant Transformation in Urban Sewer Networks [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021 (in Chinese).
- [15] 冯良记. 城市排水管网水动力及水质转化模型研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2009.

- FENG Liangji. Study on the Hydrodynamic and Wastewater Quality Transformation Model in Urban Sewer Networks [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009(in Chinese).
- [16] 吴娟. 旧城排水管网优化改造及水质变化特性研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2014.
- WU Juan. Study on the Optimization of Drainage Pipe Network and the Variation Characteristics of Wastewater Quality [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2014(in Chinese).
- [17] 张成, 易建婷, 陈宏, 等. 重庆市城镇生活污水处理碳排放核算 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2014, 36(9): 135-139.
- ZHANG Cheng, YI Jianting, CHEN Hong, *et al.* Estimation of carbon emission from urban wastewater treatment in Chongqing [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2014, 36(9): 135-139(in Chinese).
- [18] NGUYEN T, NGO H H, GUO W, *et al.* Insight into greenhouse gases emissions from the two popular treatment technologies in municipal wastewater treatment processes [J]. Science of the Total Environment, 2019, 671:1302-1313.
- [19] 向文川. 城市污水污泥干化焚烧工艺的碳排放研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- XIANG Wenchuan. Study on Carbon Emission of Desiccation and Incineration of Municipal Sewage Sludge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011(in Chinese).
- [20] 陈莉佳, 许太明, 卢宇飞. 市政污泥脱水-干化-焚烧不同工艺路线碳排放分析 [J]. 净水技术, 2019, 38(s1): 155-159.
- CHEN Lijia, XU Taiming, LU Yufei. Analysis on carbon emission from different dewatering-drying-incineration processes of municipal sludge [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(s1): 155-159(in Chinese).
- [21] 任佳雪, 高庆先, 陈海涛, 等. 碳中和愿景下的污水处理厂温室气体排放情景模拟研究 [J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(4): 410-419.
- REN Jiaxue, GAO Qingxian, CHEN Haitao, *et al.* Simulation research on greenhouse gas emissions from wastewater treatment plants under the vision of carbon neutrality [J]. Climate Change Research, 2021, 17(4): 410-419(in Chinese).
- [22] 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.
- [23] FANG K, TANG Y, ZHANG Q, *et al.* Will China peak its energy-related carbon emissions by 2030? Lessons from 30 Chinese provinces [J]. Applied Energy, 2019, 255:113852.
- [24] YU S, HU X, LI L, *et al.* Does the development of renewable energy promote carbon reduction? Evidence from Chinese provinces [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 268:110634.
-
- 作者简介:** 吴宝利(1980-),男,黑龙江桦南人,硕士,高级工程师,从事城镇给排水、水环境治理设计、科研及管理工作。
- E-mail:** wubaoli06@cemi.com.cn
- 收稿日期:** 2022-11-09
- 修回日期:** 2023-01-26

(编辑: 丁彩娟)

用生命之水 筑美丽中国