

中国污水处理温室气体排放量估算与分析

牛子帆, 赖春宇, 赵和平*

(浙江大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 尽管由污水处理造成的温室气体排放日益受到关注, 针对近年来我国污水处理产生的温室气体排放量、区域分布、重要影响因素及减排策略的研究仍较为缺乏。本研究基于《省级温室气体清单编制指南(试行)》和 2006 年《IPCC 国家温室气体清单指南》的方法估算了 2016—2020 年全国 31 个省份污水处理产生的温室气体排放量、不同污水处理过程的温室气体排放量、不同种类温室气体的排放贡献, 并深入讨论了年度排放量变化以及不同省份巨大差异的原因。研究发现: 2016—2020 年我国由污水处理产生的温室气体排放总量分别为 1.40 亿 t、1.37 亿 t、1.33 亿 t、1.37 亿 t 和 1.43 亿 t 二氧化碳当量, 呈先下降后增高趋势, 可能是由于工业污水温室气体排放量的变化造成的; 中国不同省份之间由污水处理产生的温室气体排放量分布不均衡, 其中东部省份广东排放量最高, 西部省份西藏排放量最低; 工业污水处理对温室气体排放量的贡献最大, 相关性和贡献度分析表明机制纸、化学品和副食品等产品生产因易排放大量高 COD 废水, 可能会对污水处理温室气体排放产生重要影响; 所有温室气体中, CH₄ 平均排放量最高 (65.6%)。因此, 在未来的减排工作中, 应重点关注工业污水处理过程 CH₄ 的减排和发展 CH₄ 的回收利用技术。本文对我国污水处理过程的温室气体排放进行了较为深入的分析, 为碳中和碳减排策略提供了新的思路。

关键词: IPCC; 污水处理; 温室气体; 影响因素

中图分类号: X51 **文献标识码:** A

Estimation and analysis of greenhouse gas emissions from wastewater treatment in China

NIU Zifan, LAI Chunyu, ZHAO Heping*

(College of Environmental and Resource Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Although the greenhouse gas emissions caused by wastewater treatment are increasingly concerned, there is still a lack of research on the greenhouse gas (GHG) emissions, regional distribution, important influencing factors and carbon emission reduction of wastewater treatment in China in recent years. Based on the methods of Guidelines for the Preparation of Provincial Greenhouse Gas Inventories (for Trial Implementation) and IPCC 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories in 2006, the study estimates the greenhouse gas emissions from wastewater treatment in 31 provinces across the China from 2016 to 2020, the greenhouse gas emissions from different wastewater treatment processes, and the contribution of different greenhouse gas emissions. The reasons for the changes in annual emissions and the huge differences in different provinces are discussed in depth. The study showed that the total GHG emissions from wastewater treatment in China from 2016 to 2020 were 140, 137, 133, 137 and 143 million tons of carbon dioxide equivalent, respectively, exhibiting a downward trend and then increasing trend, which may be caused by the change of GHG emissions from industrial

收稿日期: 2023-03-14 DOI: 10.20078/j.eep.20230506
基金项目: 国家自然科学基金中欧国际合作重大项目课题 (NSF32061133002); 浙江省重点研发计划项目 (2021C03171)
作者简介: 牛子帆 (1997—), 女, 河北邯郸人, 硕士研究生, 主要研究方向为污水处理。E-mail: zfniau@zju.edu.cn
通讯作者: 赵和平 (1978—), 男, 安徽当涂人, 博士, 教授, 主要研究方向为污水处理。E-mail: zhaohp@zju.edu.cn

wastewater. The GHG emissions from wastewater treatment are uneven among different provinces in China, with the highest in Guangdong and the lowest in Xizang. Industrial wastewater treatment had the largest contribution to GHG emissions. Correlation and Contribution analysis showed that the production of processed paper, chemicals and non-staple food, which were prone to discharge large amounts of high-COD wastewater, might have an important impact on GHG emissions from wastewater treatment. Among all GHG emissions, CH₄ has the highest carbon emission (65.6%). Therefore, future efforts should focus on the abatement of CH₄ in industrial wastewater treatment processes and the development of CH₄ recycling technologies. In this paper, the GHG emissions from wastewater treatment process in our country are analyzed deeply, which provides new ideas for carbon neutrality and carbon emission reduction strategy.

Keywords: IPCC; Wastewater treatment; Greenhouse gas emissions; Influencing factor

0 引言

近年来,温室效应导致了全球气候变暖、海平面升高,极端天气、森林火灾等自然灾害频发。大气中温室气体(Green house gas, GHG)的增加是引起温室效应的重要因素,引起温室效应的主要温室气体有二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)等^[1]。为了减缓全球气候变暖带来的影响,全球多个国家展开了积极的行动部署。在第七十五届联合国大会上,中国提出了要于2030年实现碳达峰,2060年实现碳中和的目标^[2]。污水的收集和处理是保障人们正常生活的必要环节,也是保护生态环境的重要途径。污水处理厂是温室气体排放的重要来源之一,在污水的收集、处理和排放过程中,污水中碳元素和氮元素会通过微生物的作用生成CH₄、N₂O和CO₂等温室气体,污水处理厂已被认为是重要的温室气体排放源之一^[3]。随着中国经济建设的发展以及城镇化进程的推进,污水处理厂的数量在不断的增加,截至2020年底,我国已投入运行的污水厂已达到2 618座,污水处理量达到557亿t,污水处理率达到97.53%^[4]。全面了解我国污水处理温室气体的排放情况,对于制定相关的减排政策具有重要意义。

IPCC指南是目前国际通用的碳核算方法,在全球碳核算体系中具有极高的权威、兼容与参照性^[5]。尽管已有部分学者基于IPCC的方法对我国污水处理产生的温室气体进行过核算,例如,付加峰等人^[6]基于IPCC指南方法计算了183个分布于我国各个省份的污水处理厂的CH₄排放量;闫旭等人^[7]根据IPCC法计算了2014年中国城镇污水处理厂温室气体的排放量;李乔洋^[8]基于IPCC法计算了2007—2019年中国不同省份污泥

处理过程中产生的温室气体排放量,并预测了2030年我国污泥处理的温室气体排放量。Du Wenjie等人^[9]基于2009—2019年我国市政污水处理设施运行与碳排放的大数据分析,评估了污水行业的温室气体排放特征并探讨了其未来减排潜力及技术路径,结果表示不同的污水水质特征和污水厂运行情况是造成排放强度地域差异的主要原因。Yang Mengjie等人^[10]采用人口等效方法,计算了2005—2020年中国市政污水处理厂GHG的排放量,并分析了历史排放变化的特征,结果表示中国市政污水处理厂2020年的温室气体排放量为3 095万二氧化碳当量,相比于2005年增长了232%,温室气体排放量的增加可归因于快速城市化、生活水平的提高和废水处理量的大幅增加。如上所述,虽然已经有些学者对全国的污水处理碳排放进行了研究,但多聚焦在市政污水处理,缺少基于污水收集、处理到排放全过程的碳排放计算。此外,针对近年来我国污水处理产生的温室气体排放区域分布、重要影响因素及减排策略的研究仍较为缺乏^[11]。

因此,本研究基于《省级温室气体清单编制指南(试行)》和2006年《IPCC国家温室气体清单指南》的方法计算了中国大陆地区31个省份(未计算港澳台相关数据)2016—2020年不同污水处理阶段温室气体排放量、不同污水处理过程的温室气体排放情况、不同温室气体的排放贡献,并讨论了年度污水处理碳排放量变化及不同省份巨大差异的原因,为污水处理实现碳中和提供基础数据和减排思路。

1 研究方法

1.1 核算范围

在污水的收集、处理和排放阶段中会产生直

研究未考虑污泥处理部分。为了便于计算,本研究将污水处理分为 4 个阶段,分别为污水的收集与排放阶段、生活污水处理阶段、工业污水处理阶段和电力与化学品消耗阶段,前 3 个阶段会产生直接排放的 CO_2 、 CH_4 和 N_2O ,电力与化学品消耗阶段会产生间接排放的 CO_2 。由于大多数污水处理厂具有 30~50 a 的使用寿命,建设过程温室气体排放量与污水处理厂运行阶段相比较少,可以忽略不计,因此本研究未考虑污水处理厂建设造成的温室气体排放^[13]。此外,IPCC 将生物分解产生的 CO_2 定义为生源性 CO_2 ,不纳入温室气体计算清单。同时 IPCC 指南中表示污水在收集和排放阶段发生的硝化和反硝化过程是 N_2O 的主要来源,而污水处理阶段中 N_2O 的直接排放量由于较少可以忽略不计,因此没有被列入 IPCC 温室气体排放的清单^[14-15]。

**Fig. 1 Schematic diagram of GHG generation in the whole process of wastewater treatment:
Take activated sludge method for example^[10]**

换为 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 进行比较, 1 t CH_4 和 1 t N_2O 的升温能力分别相当于 25 t 和 298 t CO_2 的升温能力^[14]。

Table 1 Greenhouse gas emissions during wastewater collection, treatment and discharge process

污水处理阶段		排放类别	温室气体种类		
			CH ₄	N ₂ O	CO ₂
污水 处理	污水收集与排放	直接排放	√	√	√ *
	生活污水处理	直接排放	√	√ *	√ *
	工业污水处理	直接排放	√	√ *	√ *
电力与化学品消耗		间接排放			√

3

1.2 数据来源

本研究对污水收集、处理和排放阶段中温室气体排放量采用国家发展和改革委员会基于 2006 年《IPCC 国家温室气体清单指南》发布的《省级温

室气体清单编制指南(试行)》中的计算方法。本研究相关数据及标准计算方法均来源于官方发布的最新资料和已发表文献,具体来源如表 2 所示。

表 2 数据及计算方法来源

Table 2 Sources of data and calculation method

数据类型	数据来源和相关数据计算方法
人口、家庭食品消费量、GDP、城镇化率、工业产品量、工业污水 COD 产生量、生活污水 COD 产生量、不同产品年产量	《中国统计年鉴》、《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》、《主要污染物总量减排统计办法》
污水处理量和处理率	《中国城乡建设统计年鉴》
工业污水 COD 排放量、生活污水 COD 排放量	《中国环境统计年鉴》
中国不同区域电网基准线排放因子	中华人民共和国生态环境部 ^[11]
CH ₄ 回收缺省值、CH ₄ 修正因子、CH ₄ 最大产生能力、N ₂ O 排放因子和转化系数	《省级温室气体清单编制指南 试行》
不同种类食物蛋白质含量	居民膳食蛋白质供需平衡分析 ^[16]

污水处理产生的温室气体排放总量计算方法如下:

$$E = E_{\text{直接}(\text{CO}_2\text{-et})} + E_{\text{间接}(\text{CO}_2\text{-et})} \tag{1}$$

式(1)中: E 指清单年份的污水收集、处理和排放全阶段温室气体排放总量(kg CO₂-eq/a);

$E_{\text{直接}(\text{CO}_2\text{-et})}$ 指清单年份的污水处理阶段温室气体直接排放总量(kg CO₂-eq/a);

$E_{\text{间接}(\text{CO}_2\text{-et})}$ 指清单年份的污水处理阶段温室气体间接排放总量(kg CO₂-eq/a)。

$$E_{\text{间接}(\text{CO}_2\text{-et})} = E_{\text{电力}} + E_{\text{化学品}} \tag{2}$$

$$E_{\text{电力-污水处理}} = F_E \times T_{\text{COD}} \times U_{\text{电力-COD}} \tag{3}$$

$$E_{\text{化学品}} = 0.02 \times E \tag{4}$$

式(2~4)中: $E_{\text{电力}}$ 指由电力消耗间接产生的温室气体排放总量,kg CO₂-eq/a;

$E_{\text{电力-污水处理}}$ 指生活污水处理阶段、工业污水处理阶段电力消耗间接产生的温室气体排放量,kg CO₂-eq/a;

$E_{\text{化学品}}$ 指由化学品消耗间接产生的温室气体排放总量,kg CO₂-eq/a;

F_E 指中国区域电网基准线排放因子^[17];

T_{COD} 指清单年份的污水 COD 削减总量,t^[4];

$U_{\text{电力-COD}}$ 指削减污水中 1 t COD 耗电量,kW · h/t;

0.02 指由化学品消耗产生的温室气体排放量占污水处理温室气体排放总量的比例^[18]。

$$E_{\text{直接}(\text{CO}_2\text{-et})} = 25 \times E_{\text{CH}_4} + 298 \times E_{\text{N}_2\text{O}} \tag{5}$$

$$E_{\text{直接}(\text{CH}_4)} = E_{\text{污水收集}} + E_{\text{污水排放}} + E_{\text{污水处理}} \tag{6}$$

式(5~6)中: E_{CH_4} 指清单年份污水处理全阶段 CH₄排放总量,kg CH₄/a;

$E_{\text{污水收集}}$ 指清单年份污水收集阶段 CH₄排放总量,kg CH₄/a;

$E_{\text{污水排放}}$ 指清单年份污水排放阶段 CH₄排放总量,kg CH₄/a;

$E_{\text{污水处理}}$ 指清单年份生活和工业污水处理阶段 CH₄排放量,kg CH₄/a;

$E_{\text{N}_2\text{O}}$ 指清单年份污水处理全阶段 N₂O 排放总量,kg N₂O/a。

$$E_{\text{污水处理}} = E_{\text{生活污水}} + E_{\text{工业污水}} \tag{7}$$

$$E_{\text{生活污水}} = (TOW \times EF) - R \tag{8}$$

式(7~8)中: $E_{\text{污水处理}}$ 指清单年份生活和工业污水处理阶段 CH₄排放总量,kg CH₄/a;

$E_{\text{生活污水}}$ 指清单年份生活污水处理阶段 CH₄排放总量,kg CH₄/a;

TOW 指生活污水中 BOD 的总量,kg BOD/a;

EF 指排放因子,kg CH₄/kg BOD^[15];

R 指清单年份 CH₄回收量,kg CH₄/a,CH₄回收缺省值是零。

其中排放因子(EF)的估算公式为:

$$EF = B_0 \times MCF \tag{9}$$

式(9)中: B_0 指 CH₄最大产生能力,CH₄/kg BOD;

MCF 指 CH₄修正因子,全国平均的 MCF 为 0.165^[15]。

$$E_{\text{工业污水}} = \sum_i [(TOW_i - S_i) \times EF_i - R_i] \tag{10}$$

式(10)中: $E_{\text{工业污水}}$ 指清单年份污水处理厂污水处理阶段 CH₄排放总量,kg CH₄;

i 表示不同的工业行业;

TOW_i 指工业污水中 BOD 的总量,kg BOD/a;

S_i 指以污泥方式清除掉的 COD 总量, kg COD/a;

EF_i 指排放因子, kg CH_4 /kg COD, 污泥清除缺省值是零^[15];

R_i 指 CH_4 回收量, kg 甲烷/a。

$$E_{\text{N}_2\text{O}} = N_{\text{E}} \times E_{\text{FE}} \times 44/28 \quad (11)$$
式(11)中: $E_{\text{N}_2\text{O}}$ 指清单年份 N_2O 的年排放量, kg N_2O /a;

N_{E} 指污水中 N 元素含量, kg N/a;
 E_{FE} 指污水的 N_2O 排放因子, kg N_2O /kg N, 中国为 0.005 kg N_2O -N/kg N^[15];
44/28 为转化系数^[15]。
排放到污水中的 N 元素含量为:

$$N_{\text{E}} = (P - P_{\text{r}} \times F_{\text{NPR}} \times F_{\text{NON-CON}} \times F_{\text{IND-COM}}) - N_{\text{S}} \quad (12)$$

式(12)中: P 指人口数, 人;
 P_{r} 指每年人均蛋白质消耗量, kg/(人·a);
 F_{NPR} 指蛋白质中的 N 元素含量, kg N/kg;
 $F_{\text{NON-CON}}$ 指污水中的非消耗蛋白质因子;
 $F_{\text{IND-COM}}$ 指工业和商业的蛋白质排放因子;
 N_{S} 指随污泥清除的 N, kg N/a, 缺省值为 0^[15]。

$$P_{\text{r}} = \sum_i^n Q_i \times C_i \quad (13)$$

式(13)中: i 指不同种类食物;
 Q_i 指人均食品消费量, kg/(人·a);
 C_i 指食品中蛋白质含量^[16]。

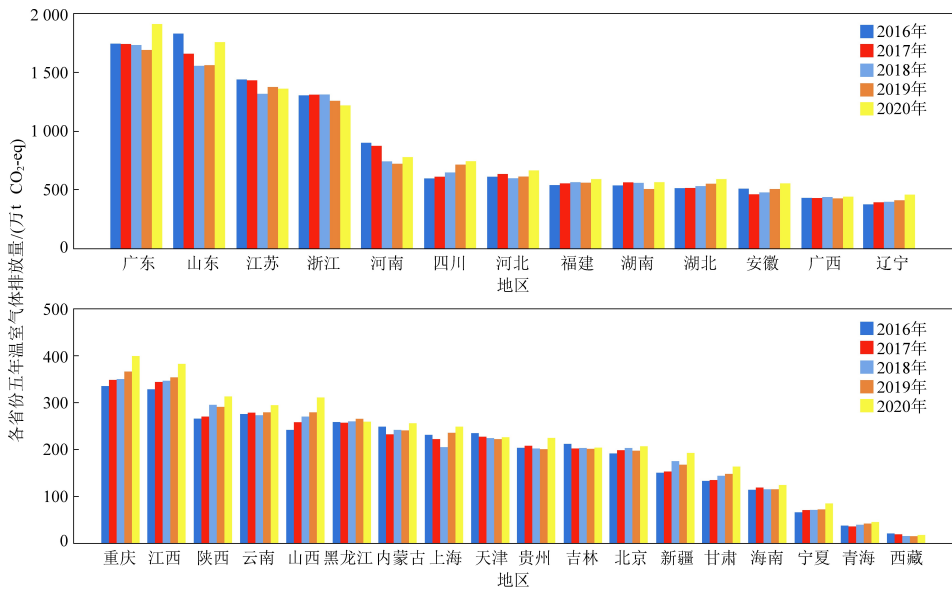


图 3 不同省份 2016—2020 年污水处理温室气体排放总量平均值

Fig. 3 Average of greenhouse gas emissions from wastewater treatment in different provinces from 2016 to 2020

2 2016—2020 年全国污水处理温室气体排放情况与分析

2.1 全国和不同省份污水处理温室气体排放情况

我们对 2016—2020 年全国污水处理温室气体的总排放量进行了统计, 计算结果如图 2 所示。2016—2020 年五年间, 我国由污水处理产生的总温室气体排放量分别为 1.40 亿 t、1.37 亿 t、1.33 亿 t、1.37 亿 t 和 1.43 亿 t CO_2 -eq, 呈先下降后增高趋势。其中 2018 年排放量最低, 2020 年排放量最高。人均温室气体排放量呈现相同趋势, 其中 2018 年最低 (94.81 kg CO_2 -eq/a), 2020 年最高 (101.19 kg CO_2 -eq/a)。

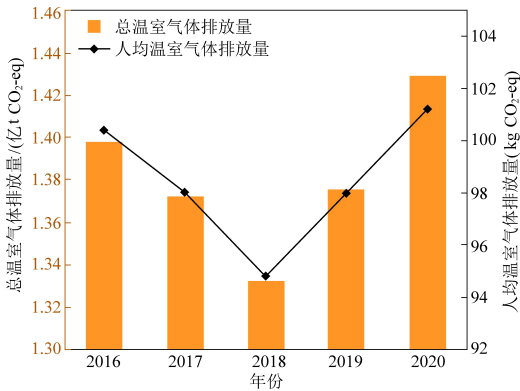


图 2 2016—2020 年中国污水处理全阶段温室气体排放总量
Fig. 2 Total greenhouse gas emissions in the whole process of wastewater treatment from 2016 to 2020

在 2016—2020 年五年期间, 中国不同省份之间由污水处理产生的温室气体排放量分布不均衡 (图 3),

东部地区如广东、山东、江苏和浙江,温室气体排放量较大,而西部省份,尤其是西藏,排放量较小。其中广东省的年平均排放量约为0.17亿 t CO₂-eq,占全国污水处理温室气体总排放量(贡献率)的11.8%,排名第一,山东省排名第二,贡献率为11.2%,其次是江苏(9.3%)、浙江(8.6%)、河南(5.4%)和四川(4.5%)。而甘肃、海南、宁夏、青海和西藏是排放量最低的五省份,分别占全国污水处理温室气体排放总量的0.9%、0.8%、0.5%、0.3%和0.1%。

为了探究产生此趋势的原因,进一步对2016—2020年全国污水处理不同阶段温室气体排放情况的差异性进行了研究和分析。

2.2 污水处理不同阶段温室气体排放情况与分析

2.2.1 总体情况

首先对2016—2020年污水处理不同阶段的温室气体贡献率进行了计算,不同阶段的温室气体贡献率差异较大。2016—2020年期间,贡献率最大的是工业污水处理阶段,达到了35.77%,其次为电力和化学品消耗阶段,占温室气体排放总量的30.27%,生活污水处理阶段和收集和排放阶段贡献率分别为17.16%和16.80%,如图4所示。不同阶段的温室气体贡献率结果显示,工业污水

处理阶段和电力和化学品消耗阶段是贡献最大的两个阶段,共贡献了超过60%的温室气体排放量,在后续的分析 and 未来的减排工作中需要重点关注。

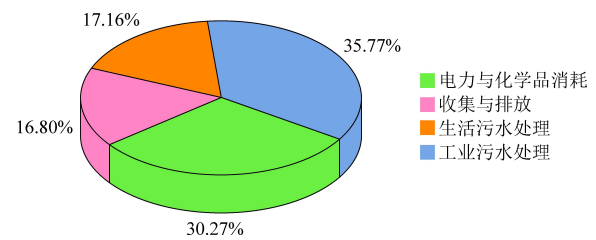


图4 污水处理不同阶段的温室气体贡献率 (2016—2020年五年平均值)

Fig. 4 Contribution of greenhouse gases in different processes of wastewater treatment (2016—2020 average)

对各省份污水处理不同阶段温室气体排放量进行分析,结果如图5所示,不同省份污水处理不同阶段的温室气体贡献率存在较大差异。可以发现,西藏、广西和江西省在直接排放过程中温室气体排放比例较高,可能是由于其污水收集率低、污水处理率低造成的^[4]。浙江、江苏、福建等地的工业污水处理产生的温室气体贡献率较大,可能由于其工业化程度高造成的^[4]。贵州、云南、西藏等地生活污水处理碳排放量贡献率相对较高,可能是由于其工业化水平低。

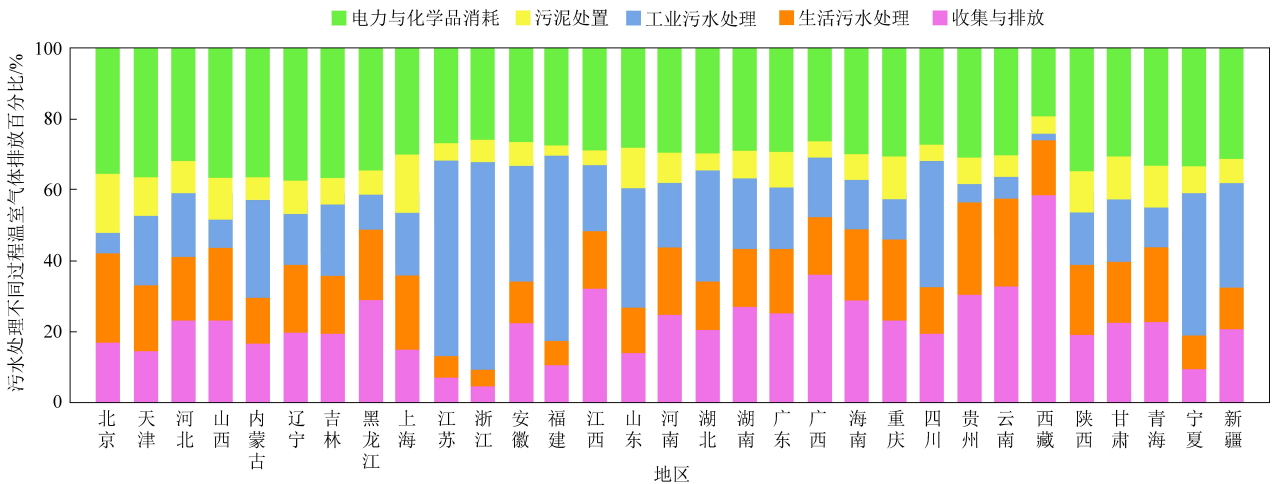


图5 不同省份污水处理不同阶段的温室气体贡献率 (2016—2020年五年平均值)

Fig. 5 Contribution of greenhouse gases at different stages of wastewater treatment in different provinces (2016—2020 average)

2.2.2 工业污水处理阶段温室气体排放情况

进一步对不同阶段的温室气体排放量的变化趋势进行了分析。由图6可以看出,2016—2020年全国工业污水处理阶段温室气体排放量呈先下降后上升的趋势(2018年是转折点)。

对山东、江苏、浙江、河南、四川、甘肃、青海和

西藏8个代表性省份进行分析,如图7所示。工业污水处理阶段,可以看出东部地区,如山东、江苏和浙江温室气体排放量较大,并且总体呈下降趋势,而西部省份,例如甘肃和西藏,由于工业化水平较低,温室气体排放量相对较小。生活污水处理方面,所有省份生活污水处理温室气体排放

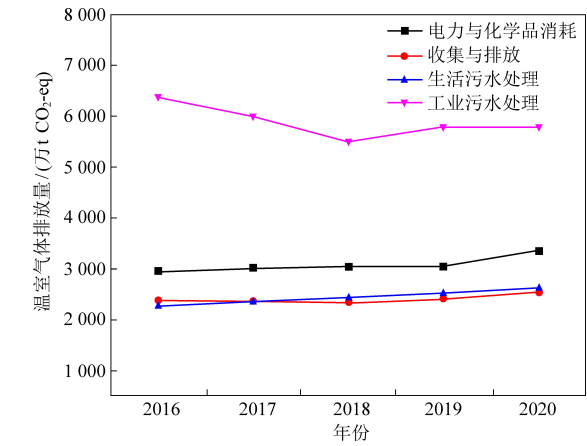


图 6 2016—2020 年中国污水处理不同阶段温室气体排放量
Fig. 6 Total greenhouse gas emissions in different process of wastewater treatment from 2016 to 2020

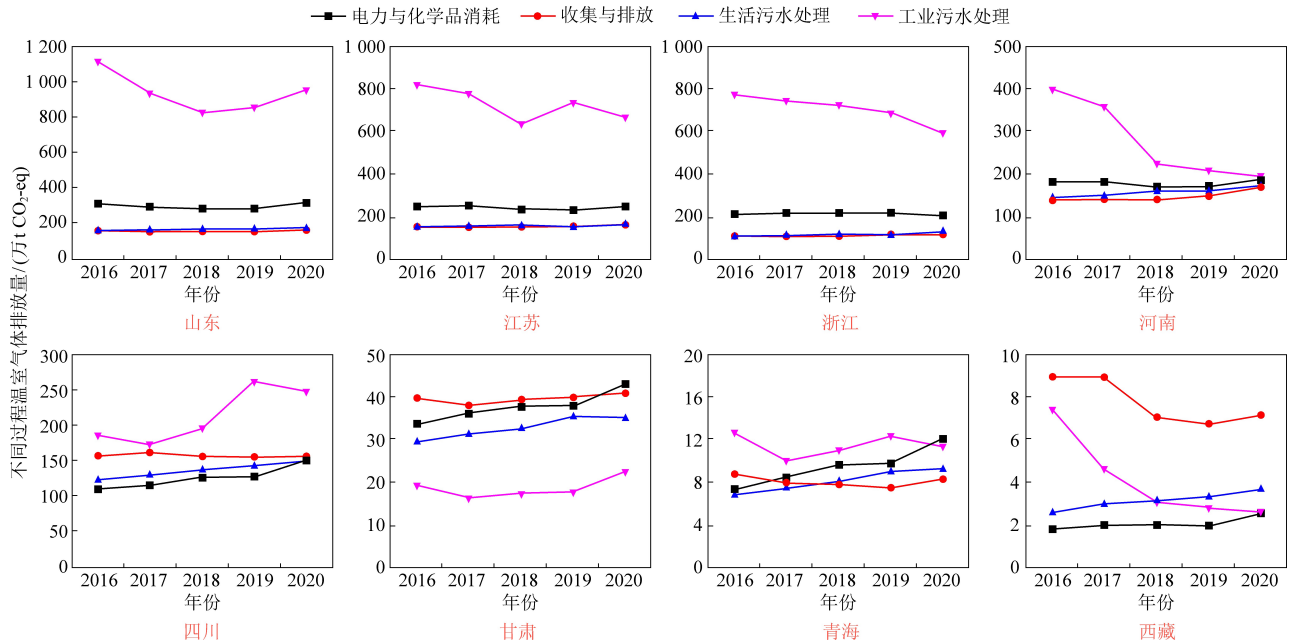


图 7 不同省份 2016—2020 年污水处理不同阶段的温室气体排放量
Fig. 7 Greenhouse gas emissions at different stages of wastewater treatment in different provinces from 2016 to 2020

表 3 重点产品产量较上一年增长率

Table 3 The yield of key products increased at a higher rate than that of last year					%
产品种类	2016	2017	2018	2019	2020
机制纸	/	1.7	-4.1	1.17	0.44
化学品(化学农药、化学纤维、合成洗涤剂、化学原药)	/	-6.1	-3.0	6.1	0.5
副食品(成品糖、食用植物油、罐头)	/	-10.0	-23.2	8	0.01

$p<0.01$ 时,两个变量成显著正相关。结果显示,机制纸、化学品(化学农药、化学纤维、合成洗涤剂、化学原药)和副食品(成品糖、食用植物油、罐头)产品的生产对工业污水 COD 排放的贡献率较高,分别为 21.3%、13.3% 和 6.6%。且以上产品生产 COD 产量与工业污水处理温室气体排放量呈显著

量基本处于稳定增长的趋势,可能是由于人口和城镇化的稳定增长。电力与化学品排放方面,由于其与工业污水和生活污水处理相关,因此工业污水处理量较高的地区,如山东、江苏和浙江,电力与化学品消耗过程的温室气体排放量较高。收集与排放过程阶段,甘肃和西藏的温室气体排放量较高,可能与管道建设不够完善、蛋白消费总量较高(与人口、饮食消费习惯有关)等因素有关。

由于工业污水处理阶段中的温室气体主要来源于水体中的有机物(其含量用 COD 表示)好氧或厌氧降解,我们进一步在时间维度(不同年份)对易产生高 COD 废水及产量较大的工业产品进行了 COD 排放贡献分析与 Pearson 相关性分析(表 3),当 $p<0.05$ 时,两个变量成正相关,当

正相关。同时对产业产品产量随年份的变化做了统计(表 4)^[4],发现工业污水处理过程温室气体排放量在 2018 年显著下降的同时我国机制纸、化学品(化学农药、化学纤维、合成洗涤剂、化学原药)和副食品(成品糖、食用植物油、罐头)的生产量也在该年度有大幅度的下降。

表 4 不同年份重点产品 COD 产生量与工业污水处理过程温室气体排放量 Pearson 相关分析和其 COD 排放贡献率

Table 4 Pearson correlation analysis between COD production from key products in different years and GHG emissions in industrial wastewater treatment process and its COD emission contribution rate

不同年份重点产品 COD 产生量/t	工业污水处理温室气体排放量/t CO ₂ -eq	贡献率/%
机制纸	0.687 * *	21.3
化学品	0.643 * *	13.3
副食品	0.944 * *	6.6
啤酒	0.781	3.2
原煤	-0.929	2.2

注：* $p<0.05$ ；* * $p<0.01$

我们对典型省份的工业污水处理温室气体排放总量进行了分析(图 7),发现东部地区,如山东、江苏和浙江,排放量较大,而西部省份,尤其是西藏,排放量较小。

通过相关性分析发现,对于不同省份,以上行业的 COD 产量仍然和工业污水处理过程温室气体

排放量呈显著正相关(表 5)。因此,上述行业对工业污水处理温室气体排放的贡献可能较大,在未来的污水减排工作中可以考虑优化以上产品的生产工艺,通过降低 COD 排放量从而实现温室气体减排。

表 5 不同省份重点产品 COD 产生量与该省份工业污水处理过程温室气体排放量 Pearson 相关分析

Table 5 Pearson correlation analysis between COD production of key industries in different provinces and GHG emissions from industrial wastewater treatment process

不同省份重点产品 COD 产生量/t	工业污水处理温室气体排放量/t CO ₂ -eq
机制纸	0.964 * *
化学品	0.629 * *
副食品	0.730 * *

注：* $p<0.05$ * * $p<0.01$

2.2.3 生活污水处理阶段温室气体排放情况

2016—2020 年全国生活污水处理过程温室气体的排放量呈稳定上升的趋势,分别由 2016 年的 2 272 万 t CO₂-eq 和 774 万 t CO₂-eq 增加到了 2 600 万 t CO₂-eq 和 1 154 万 t CO₂-eq。Pearson 相关分析结果表明,生活污水处理过程与人口、城镇化率和污水处理量表现出正相关(表 6)。因此,在时间维度上,随着全国人口持续增长和城镇化率的不断提高,污水的产生量不断增加,生活污

水处理过程的温室气体排放也因此增加。不同省份生活污水处理过程温室气体排放量有较大的差异,其中广东、山东、江苏、河南和四川是这两个过程温室气体排放量最高的 5 个省份,西藏、青海和宁夏的温室气体排放量最低。主要可能是由于东部地区人口较多和城镇化率较高,污水处理量较高,温室气体排放量高,而西藏、青海等省人口少,污水处理量较低,温室气体排放量低。

表 6 不同阶段温室气体排放量影响因素 Pearson 相关分析

Table 6 Pearson correlation analysis of influencing factors of GHG emissions from wastewater treatment in different processes

	生活污水处理	收集与排放
污水处理率	0.991 * *	0.757
污水处理量	0.985 * *	0.787
人口	0.954 *	0.685
城镇化率	0.997 * *	0.759

注：* $p<0.05$ ；* * $p<0.01$

2.2.4 收集和排放阶段温室气体排放情况

2016—2020 年收集和排放过程温室气体排放量呈逐年上升的趋势,由 2016 年的 2 374 万 t CO₂-eq

增加到了 2 547 万 t CO₂-eq。收集和排放过程释放的温室气体主要是 CH₄ 和 N₂O,这两类温室气体排放量的时空变化量和影响因素不同。收集和

排放过程的 CH₄排放量逐年降低,并且和管道建设的长度呈负相关(表 7),因此完善管网的建设可能是控制该过程甲烷排放的有效策略。与 CH₄相反,N₂O 的排放量总体呈上升趋势,根据公式(12),N₂O 的排放量与居民蛋白质摄入总量呈显著正相关。蛋白质摄入总量越高,废水中氮元素越多,产生的 N₂O 也会相应变多,其中禽类、蛋类和水产品食品的蛋白质含量较高,因此居民对此类饮食习惯的变化会影响 N₂O 排放量。不同省份收集和排放过程的温室气体排放量未发现明显分布特征,部分省份(如湖南、甘肃、新疆和西藏)收集与排放过程温室气体排放量最高,这可能与管道建设不够完善、蛋白消费总量较高(与人口、饮食消费习惯有关)等因素有关。

表 7 收集与排放阶段 CH₄排放影响因素 Pearson 相关分析

Table 7 Pearson correlation analysis of influencing factors of CH₄ emissions from wastewater treatment in collection and discharge processes

收集与排放阶段 CH ₄ 排放量	
排水管道长度	-0.994 * *
污水处理率	-0.991 * *

注: * $p<0.05$; * * $p<0.01$

2.2.5 电力与化学品消耗阶段温室气体排放情况

电力与化学品消耗阶段主要来源于工业和生活污水处理。2016—2020 年全国电力与化学品消耗阶段温室气体排放量呈先上升后下降的趋势。在时间维度上,根据 Pearson 相关分析,发现电力与化学品消耗阶段温室气体排放量与生活 and 工业污水处理两个阶段的 COD 排放量呈显著正相关(表 8)。

表 8 电力与化学品消耗阶段温室气体排放量与生活 and 工业污水处理阶段 COD 排放量 Pearson 相关分析

Table 8 Pearson correlation analysis between GHG emissions from power and chemical consumption processes and COD emissions from domestic and industrial wastewater treatment processes

电力与化学品消耗温室气体排放量	
生活污水处理 COD 排放量	0.723 * *
工业污水处理 COD 排放量	0.940 * *

注: * $p<0.05$; * * $p<0.01$

2.2.6 不同阶段温室气体排放情况总结

根据上文分析,工业污水处理是污水处理温室气体排放贡献最大的过程,同时工业污水去除单位 COD 的电力与化学品的消耗是生活污水的

1.7 倍^[11],可能导致工业污水处理过程对电力与化学品消耗过程产生重要影响。工业污水处理量较高的地区,如广东与山东,电力与化学品消耗过程的温室气体排放量较高,因此优化此类地区的产业结构,降低工业污水处理过程产生的污染物,是未来减排的重点。

以上结果表明,工业污水处理过程温室气体排放量的变化可能是造成温室气体总排放量在不同年份和不同省份温室气体排放差异的重要因素。此外,电力与化学品的温室气体排放又和工业污水处理过程密切相关。因此,降低工业污水处理过程温室气体排放是未来减排的重点。尤其是经济较发达的东部省份,因为人口较多,城镇化率较高,同时工业水平也较高,工业污水的有机负荷较大,从而导致污水处理所有过程温室气体排放量较多。根据上文分析,机制纸、化学品(化学农药、化学纤维、合成洗涤剂、化学原药)和副食品(成品糖、食用植物油、罐头)等产品生产因易产生高大量含浓度 COD 废水而可能对工业污水处理温室气体排放量产生重大影响,进而影响污水处理总温室气体排放。在未来的污水减排工作中可以重点考虑优化以上产品的生产工艺(尤其是经济较发达的东部省份),降低废水 COD 排放量,从而达到温室气体减排的目的。

2.3 污水处理过程中 CH₄、N₂O 和 CO₂排放情况

根据表 6 可知,从污水收集到处理全过程会直接或间接产生 CH₄、N₂O 和 CO₂ 三种温室气体,了解不同种类的温室气体贡献率与排放情况对于掌握未来温室气体的减排重点极为重要。

对从污水收集到处理全过程中产生的 CH₄、N₂O 和 CO₂ 三种温室气体的贡献率进行分析,结果如图 8(a) 所示,2016—2020 年期间,CH₄ 平均排放量最高,约为 8 711 万 t CO₂-eq/a,在三种主要温室气体中其排放贡献率最大(63.08%)。CO₂ 平均排放量约为 3 071 万 t CO₂-eq/a,占温室气体总排放量的 22.24%,主要来源于电力与化学品消耗过程。N₂O 平均排放量约为 2 027 万 t CO₂-eq/a,占温室气体总排放量的 14.68%,主要来源于污水收集与排放过程。根据图 8(b) 分析结果发现,CH₄ 会产生于多种污水处理过程,包括工业和生活污水处理,以及污水收集与排放,在三种主要温室气体中其排放贡献率最大,因此 CH₄ 是未来减排的重点。

我们进一步对 CH₄ 产生的过程进行了分析,

■ CO₂排放量(CO₂当量) ■ 工业污水处理
■ N₂O排放量(CO₂当量) ■ 生活污水处理
■ CH₄排放量(CO₂当量) ■ 收集与排放

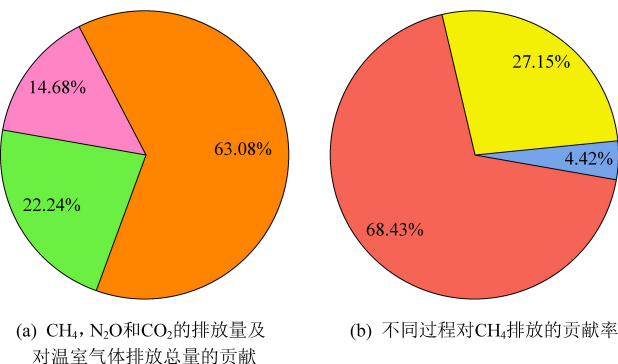


图 8 污水处理过程中 CH₄、N₂O 和 CO₂ 排放情况
(2016–2020 年平均数据)

Fig. 8 CH₄, N₂O and CO₂ emissions during wastewater treatment (average data from 2016 to 2020)

在厌氧条件下复杂的有机物可以通过微生物协同作用被转化为 CH₄。工业污水成分复杂,尤其是机制纸、化学品(化学农药、化学纤维、合成洗涤剂、化学原药)和副食品(成品糖、食用植物油、罐头)生产等行业废水含有大量的有机物^[11],其厌氧处理过程会产生大量的 CH₄^[19]。2015 年,全国工业废水含 COD 高达 1 949 万 t^[11],而根据任佳雪等人^[20]的研究结果,造纸废水处理过程的年 CH₄排放量可达 1 155 万 t CO₂-eq。因此,由图 8 (b)工业污水处理过程对污水处理的 CH₄产生做了很大的贡献(贡献率为 68%)。生活污水中的一些人类排泄、厨房废水中有机废弃物和油脂类物质等成分也富含大量的有机碳,其厌氧处理过程亦会生成大量 CH₄(贡献率为 27%),据统计,2015 年生活污水 COD 的产生量约 1 637 万 t^[11],其减排也需要重视。此外,污水收集排放过程也可以在厌氧条件下生成 CH₄,但其温室气体贡献率远小于工业和生活污水处理过程^[11]。污水收集与排放过程中污水管道内沉积物及管壁表面的生物膜通过厌氧生物作用也可以产生 CH₄^[8]。

尽管 CO₂温室效应能力远小于 CH₄(是 CH₄的 1/25),但由于污水处理厂是高能耗行业,电力与化学品消耗过程因设备使用的电耗和碳源的投加会产生大量的 CO₂,如 2018 年我国污水处理厂用电约 192 亿 kW·h^[21]。因此,CO₂在整个污水处理过程的温室气体排放贡献也很大。

N₂O 的温室气体排放贡献相对于 CH₄和 CO₂较小,但其温室效应能力是 CO₂的 298 倍,因此 N₂O 的排放控制亦不可忽视。N₂O 主要产生于在收集

与排放过程中氮元素的硝化作用和反硝化作用^[5]。硝化作用是在好氧条件下,通过自养型微生物亚硝酸盐菌和硝酸盐菌的作用,将氨氮氧化成亚硝酸盐氮和硝酸盐氮的过程,而反硝化作用是在缺氧条件下,由于反硝化菌的作用,将 NO₂⁻或 NO₃⁻还原成 N₂的过程,N₂O 可能成为这两个过程的中间产物^[22]。

3 污水处理温室气体减排策略

根据上文分析,工业污水处理过程对污水处理温室气体总排放量贡献最大。其中机制纸、化学品(化学农药、化学纤维、合成洗涤剂、化学原药)和副食品(成品糖、食用植物油、罐头)等产品的生产工业由于废水排放量大、COD 含量高^[23],应给予重点关注,因此优化其产业结构,降低此类工业废水的污染物含量,是未来减排的重点。

对于工业和生活污水处理阶段产生的温室气体的控制,我们建议优化污水处理阶段工艺。传统污水处理技术(如 A²/O 工艺)往往需要投加大量的碳源,尤其省市地的污水排放标准中 TN 指标的提升使得碳源的投加成本增加^[24]。因此,对污水处理厂进行工艺优化,或者使用碳排放量更低的药剂,是控制碳排放的有效策略。例如,合理利用污水处理阶段产生的 CH₄是有效控制碳排放的重要手段。近年来的研究表明,厌氧和好氧条件下 CH₄可以作为碳源和电子供体来驱动反硝化过程从而去除污水中的硝酸盐等污染物,这为污水处理中碳源的循环利用提供了新的思路^[24]。此外,Anammox 工艺是近年来新兴的自养型脱氮工艺,特定的功能微生物可以在无外加碳源的条件下进行氨氮、亚硝态氮等氮素的去除,并具有低污泥产量、低能耗等优势^[25]。

对于收集与排放阶段中甲烷排放的控制,我们发现 CH₄排放量与管网长度呈显著负相关性(表 5),因此在未来的发展中可以不断的完善污水管网的建设,从而减少该阶段中 CH₄的排放。

4 总 结

本文计算了近五年我国不同省份污水处理产生的温室气体排放总量、不同污水处理过程的温室气体排放情况、不同温室气体的排放贡献,并深入讨论了年度排放量变化以及不同省份巨大差异的原因,主要结论如下:

(1) 2016—2020 年五年间,我国由污水处理

产生的温室气体排放总量别为 1.48 亿 t、1.47 亿 t、1.45 亿 t、1.48 亿 t 和 1.55 亿 t CO₂-eq,呈先下降后上升的趋势。东部地区广东、山东的温室气体排放量较大,而西部省份,尤其是西藏,排放量较小。工业污水处理过程对温室气体排放的贡献最大。对于工业污水处理温室气体排放量,机制纸、化学品和副食品的生产因易产生高大量含浓度 COD 废水而可能对其产生重大影响;电力与化学品消耗的温室气体排放量与工业和生活污水处理密切相关;生活污水处理过程的温室气体排放量和人口和城镇化率表现出显著正相关;收集与排放过程中 CH₄排放量和排水管道长度之间呈显著负相关性。

(2)在所有温室气体排放中,CH₄平均排放量最高(65.6%),最大的来源是工业污水处理过程。CO₂平均排放量占温室气体总排放量的 20.8%,主要来源于电力与化学品消耗过程。N₂O 平均排放量占温室气体总排放量的 13.6%,主要来源于污水收集与排放过程。在未来的减排工作中,应重点关注工业污水处理过程 CH₄的减排和发展 CH₄的回收利用技术。

然而本研究仍然存在一些局限性,主要有以下两点:

(1)本研究未考虑生源性 CO₂,然而,根据一些学者的研究,污水有机物中化石碳成分所占比例较高,应当计入温室气体排放清单当中^[26]。因此,后续需要对生源性 CO₂的排放进行更加深入的研究。

(2)由于无法收集完整数据,本研究未计算农村污水处理过程产生的温室气体排放量以及污水收集和排放过程中由电力消耗产生的温室气体排放量,在未来的研究中有待完善,从而得到更精确的计算温室气体排放量。

参考文献(References):

[1] GBHMS Office. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change: adopted Kyoto, 11 December 1997[M]. Kyoto: TSO, 2005.

[2] 中国政协网. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[EB/OL]. (2022-03-03)[2023-03-03]. <http://www.rmzxb.com.cn/c/2022-03-03/3062746.shtml>.

[3] DEMIR Ö, YAPICI OGLU P. Investigation of GHG emission sources and reducing GHG emissions in a municipal wastewater treatment plant[J]. Greenhouse Gases: Science and Technology, 2019(3): 948-964.

[4] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版

社, 2021.

[5] PAUSTIAN K, RAVINDRANATH N H, AMSTEL A V. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[J]. International Panel on Climate Change, 2006: 1-29.

[6] 付加锋, 侯贵光, 马欣, 等. 污水处理行业温室气体排放特征的实证分析[C]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012: 728-735.

[7] 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.

[8] 李乔洋. 基于碳减排分析的我国城镇污泥处置现状及发展趋势研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020: 84-85.

LI Qiaoyang. Current situation of and development trend of urban sludge disposal in China based on carbon emission reduction analysis [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020: 84-85.

[9] DU Wenjie, LU Jiayuan, HU Yirong, 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.

[10] YANG Mengjie, PENG Man, WU Dong, et al. Greenhouse gas emissions from wastewater treatment plants in China: Historical emissions and future mitigation potentials [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2023, 190: 106794.

[11] 陆家缘. 中国污水处理行业碳足迹与减排潜力分析[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019: 5-51.

LU Jiayuan. Carbon footprint and reduction potential of Chinese wastewater treatment sector[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019: 5-51.

[12] XIE T, WANG C. Greenhouse gas emissions from wastewater treatment plants[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2012, 52(4): 473-477.

[13] 翟明洋, 周长波, 李晟昊, 等. 污水处理行业温室气体核算模型开发及减排潜力分析[J]. 中国环境管理, 2022, 14(6): 55-64.

ZHAI Mingyang, ZHOU Changbo, LI Shenghao, et al. Emission inventory of greenhouse gas from urban wastewater treatment plants and its temporal and spatial distribution in China[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2022, 14(6): 55-64.

[14] IPCC. Climate change 2014: Synthesis report[R]. Switzerland, 2014: 151.

[15] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 省级温室气体清单编制指南(试行)[R]. 北京: 国家发改委办公厅, 2011: 93-101.

[16] 罗洁霞. 居民膳食蛋白质供需平衡分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018: 4-7.

LUO Jiexia. A supply and demand analysis of Chinese residents' dietary protein [D]. Beijing: Chinese Academy of

- Agricultural Sciences, 2018; 4-7.
- [17] 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[EB/OL].(2020-12-29)[2023-03-03]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/ymqhbh/wsqtgz/202012/t20201229_815386.shtml.
- [18] ZHANG Q, NAKATANI J, WANG T, et al. Hidden greenhouse gas emissions for water utilities in China's cities[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017; 665-667.
- [19] 林代炎, 林新坚, 杨菁, 等. 产甲烷菌在厌氧消化中的应用研究进展[J]. *福建农业学报*, 2008(1): 106-110.
LIN Daiyan, LIN Xinjian, YANG Jing, et al. Advance in utilization of methanobacteria for anaerobic digestion studies[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2008, 23(1): 106-110.
- [20] 任佳雪, 马占云, 高庆先, 等. 中国工业废水处理甲烷排放历史演变趋势研究[C]. 2020 中国环境科学学会科学技术年会论文集(第四卷), 2020: 720-724.
- [21] 合肥鸿昇自动化. 污水处理节能降耗的途径[EB/OL]. (2022-04-02)[2023-03-02]. http://www.hfhszdh.com/news/index.php?lang=cn&metid=4621&pseudo_jump=1&met_mobileok=1.
- [22] PARRAVICINI V, SVARDAL K, KRAMPE J. Greenhouse gas emissions from wastewater treatment plants[J]. *Energy Procedia*, 2016, 97: 246-253.
- [23] 马占云, 冯鹏, 高庆先, 等. 中国废水处理甲烷排放特征和减排潜力分析[J]. *气候变化研究进展*, 2015, 11(5): 343-352.
MA Zhanyun, FENG Peng, GAO Qingxian, et al. CH₄ emissions and reduction potential in wastewater treatment of China[J]. *Climate Change Research*, 2015, 11(5): 343-352.
- [24] 吕盘龙, 李子言, 赵和平. 膜生物膜法在水污染控制及资源回收中的研究进展[J]. *微生物学通报*, 2020, 47(10): 3287-3304.
LÜ Panlong, LI Ziyang, ZHAO Heping. Advances in water pollution control and resource recovery by membrane-supported biofilm reactor[J]. *Microbiology China*, 2020, 47(10): 3287-3304.
- [25] 许冬冬, 康达, 郭磊艳, 等. 厌氧氨氧化颗粒污泥研究进展[J]. *微生物学通报*, 2019, 46(8): 1988-1997.
XU Dongdong, KANG Da, GUO Leiyang, et al. Research progress on Anammox granular sludge[J]. *Microbiology China*, 2019, 46(8): 1988-1997.
- [26] 郝晓地, 王向阳, 曹达敏, 等. 污水有机物中化石碳排放 CO₂ 辨析[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(2): 13-17.
HAO Xiaodi, WANG Xiangyang, GAO Daqi, et al. Analysis of CO₂ emission from fossil carbon in organics from wastewater[J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(2): 13-17.