

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.14.004

# 城市生活污水处理行业温室气体排放结构及发展趋势

许可<sup>1</sup>, 周红明<sup>2</sup>, 张德跃<sup>1</sup>, 陈汪洋<sup>3</sup>

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381; 2. 北京中创碳投科技有限公司, 北京 100007; 3. 中国水务投资有限公司, 北京 100053)

**摘要:** “碳达峰、碳中和”是目前污水处理行业的热点,但目前我国相关研究主要集中在城市生活污水处理厂内部节能降耗和能源自给方面,对城市生活污水收集处理整体系统的温室气体排放的构成、来源及减排方法的研究相对缺乏。对我国城市生活污水收集处理行业温室气体直接和间接排放的总量和结构进行了定量分析,并结合国家最新政策,指出了城市生活污水处理行业温室气体减排重点和发展方向。

**关键词:** 碳达峰; 碳中和; 城市生活污水处理; 温室气体; 甲烷; 氧化亚氮

**中图分类号:** TU99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)14-0027-05

## Structure and Development Trend of Greenhouse Gas Emissions in Urban Domestic Sewage Treatment Industry

XU Ke<sup>1</sup>, ZHOU Hong-ming<sup>2</sup>, ZHANG De-yue<sup>1</sup>, CHEN Wang-yang<sup>3</sup>

(1. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China; 2. SinoCarbon Innovation & Investment Co. Ltd., Beijing 100007, China; 3. China Water Investment Co. Ltd., Beijing 100053, China)

**Abstract:** “Carbon dioxide emission peak, carbon neutrality” is the hot topic in the sewage treatment field. However, the current related research mainly focuses on energy saving and energy self-sufficiency in urban sewage treatment plants. Research on the composition, sources and emission reduction methods of greenhouse gas emissions from the overall system of urban sewage collection and treatment is relative lack. This paper quantitatively analyzes the total amount and structure of direct and indirect greenhouse gas emissions from the urban sewage collection and treatment industry in China. The key points and development directions of greenhouse gas emission reduction in the urban sewage treatment industry based on the latest national policies were pointed out.

**Key words:** carbon dioxide emission peak; carbon neutrality; urban domestic sewage treatment; greenhouse gas; methane; nitrous oxide

### 1 背景及相关研究

我国承诺“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”,因此“碳达峰”“碳中和”立即成为国内各行各业的研究热点。国家和部委发布的相关文件也围绕落实二氧化碳排放达峰目标与碳中和愿景,提出了统筹推进应对

气候变化与生态环境保护相关工作的指标要求和实施路径。

针对城市生活污水处理行业的温室气体排放,国内外专家和学者开展了大量的研究工作。约旦、法国、美国、德国、奥地利等国家的部分污水处理厂已通过水力发电、污泥厌氧消化、光伏发电、风力发

电、外源有机废物与污泥共消化、高效曝气、厌氧氨氧化等措施实现完全或接近碳中和(能源中和)。王洪臣<sup>[1]</sup>在2010年提出了城镇污水厂的温室气体排放源、计算方法和减排对策;郭盛杰等<sup>[2]</sup>对中国城镇污水处理厂的温室气体排放进行了核算,并对其时空特征进行了分析;赵晶晶<sup>[3]</sup>提出应开展生命周期评价以应对城镇污水处理厂的环境影响,并提出了低碳运行的对策;郝晓地等<sup>[4]</sup>提出了污水处理厂实现“碳中和”的实施技术路径,特别强调了污水热源利用的潜力;刘智晓<sup>[5]</sup>提出了“碳中和”背景下城镇可持续水系统构建的思路和策略。

目前,城市生活污水处理行业温室气体排放研究主要集中在控制污水处理能耗领域,通常采用“节流”和“开源”两大类措施,其中“节流”措施主要包括高效曝气、运行设施的精确控制、短程硝化和厌氧氨氧化等新兴工艺,而“开源”措施主要包括污泥的厌氧消化和外源有机废物与污泥共消化、污水源热泵、光伏等发电措施。

但对于城市生活污水收集领域的温室气体排放总量、行业温室气体减排与国家政策要求的关系、未来行业温室气体减排的主要着力点等方面,国内仍缺少定量总体评估和分析。

## 2 温室气体排放的分类

### 2.1 温室气体的种类

目前《京都议定书》规定控制的温室气体包括6种,分别为:二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、甲烷(CH<sub>4</sub>)、氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)、氢氟碳化合物(HFCs)、全氟碳化合物(PFCs)、六氟化硫(SF<sub>6</sub>)。其中与废水处理行业密切相关的温室气体除CO<sub>2</sub>外,主要有CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O。根据最新的温室气体排放当量计算方法,CH<sub>4</sub>基于100年计算的全球变暖潜能值(GWP100)为25,即每排放1 t CH<sub>4</sub>造成相当于25 t CO<sub>2</sub>产生的温室效应,N<sub>2</sub>O的全球变暖潜能值(GWP100)为298,而这个数据在2014年分别为21和310。

### 2.2 温室气体排放的分类

根据WBCSD和WRI联合发布的*The GHG Protocol: A Corporate Reporting and Accounting Standard*,企业实体的温室气体排放分为范围一、范围二和范围三,其中:范围一为直接排放,即在实体控制范围内的排放,来源于静置燃烧、移动燃烧、化学或生产过程,或逸出源(非故意释放)。范围二

为间接排放,即实体控制之下的耗电量所产生的排放,包括电力、蒸汽、加热及制冷方面的购买行为。我国废水处理行业中污水处理厂(站)处理和泵站提升的电耗属于范围二(间接排放)。范围三为其他间接排放,也称为延伸责任,即涉及使用生产的产品、员工通勤和差旅等所产生的排放。如我国废水处理行业中使用的药剂在生产过程中所产生的温室气体排放即属于范围三(延伸责任)。需要特别说明的是,这个分类方法仅适用于对企业和行业的温室气体排放总量核算,对国家和地区温室气体排放进行核算时,仅计算直接排放量。

## 3 我国各类温室气体排放总量及占比

根据《中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告》,2014年我国温室气体排放总量(包括温室气体吸收汇)为111.86×10<sup>8</sup> t CO<sub>2</sub>-eq,其中CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、HFCs、PFCs和SF<sub>6</sub>所占比重分别为81.6%、10.4%、5.4%、1.9%、0.1%和0.6%。土地利用、土地利用变化和林业的温室气体吸收汇为11.15×10<sup>8</sup> t CO<sub>2</sub>-eq,如不考虑温室气体吸收汇,温室气体排放总量为123.01×10<sup>8</sup> t CO<sub>2</sub>-eq。以上温室气体排放量均为直接排放。

2014年我国废弃物处理所产生的温室气体排放量为1.95×10<sup>8</sup> t CO<sub>2</sub>-eq,其中固体废弃物处理排放量为1.04×10<sup>8</sup> t CO<sub>2</sub>-eq,占53.2%;废水处理排放量为0.91×10<sup>8</sup> t CO<sub>2</sub>-eq,占46.8%。废水处理所排放的温室气体由CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O组成,以2014年温室气体排放当量方法计,排放量分别为0.57×10<sup>8</sup> t CO<sub>2</sub>-eq和0.34×10<sup>8</sup> t CO<sub>2</sub>-eq;如以最新温室气体排放当量方法计,则排放量分别为0.68×10<sup>8</sup> t CO<sub>2</sub>-eq和0.33×10<sup>8</sup> t CO<sub>2</sub>-eq。

需要特别说明的有两点:一是废水收集和处理能耗、废水处理所需药剂生产过程的温室气体排放作为范围二(间接排放)和范围三(延伸责任),未计入废水处理温室气体排放量,而计入能源活动和工业生产活动。二是废水处理中有机物的生物分解也会产生CO<sub>2</sub>,虽然目前国内有研究表明废水处理直接产生的CO<sub>2</sub>中约9%~21%来自化石燃料,但依照目前国际上的温室气体减排实践,废水处理产生的CO<sub>2</sub>全部归为生源碳,均不纳入温室气体排放计算与平衡。

2014年废水处理行业温室气体直接排放全部

为 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放(非 $\text{CO}_2$ 排放,以下简称“非二排放”),其总量占全国温室气体排放总量(不考虑温室气体吸收汇)的比例不高,约为0.7%。这其中包括了城市生活污水处理、村镇生活污水处理和工业废水处理等各类污(废)水收集和处理过程中产生的温室气体直接排放量。

#### 4 我国污水处理行业温室气体排放量估算

根据温室气体排放分类方法,我国城市生活污水处理行业的温室气体排放量由直接排放(范围一)、间接排放(范围二)和其他间接排放(范围三)组成。其中城市生活污水处理温室气体直接排放(范围一)是废水处理行业温室气体直接排放的一部分,由 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 组成;间接排放(范围二)主要由污水处理厂(站)处理和收集系统泵站提升能耗产生的 $\text{CO}_2$ 排放组成;其他间接排放(范围三)主要由药剂使用、员工通勤和差旅所产生的温室气体排放组成,由于该部分排放量较小且难以统计,本次估算不计入本部分排放量。

##### 4.1 直接排放量估算

###### 4.1.1 $\text{CH}_4$ 排放量估算

###### ① $\text{CH}_4$ 排放量

根据《中国城乡建设统计年鉴》(2014),2014年我国城市与县城人口合计约6.02亿人,参考《室外排水设计标准》(GB 50014—2021),以人均污染物排放量为 $45 \text{ gBOD}_5/(\text{人}\cdot\text{d})$ 计,产生的污染量约为 $988.5\times 10^4 \text{ t BOD}_5$ ,但城镇生活污水处理厂处理量仅为 $532.4\times 10^4 \text{ t BOD}_5$ 。经测算,未纳入城镇生活污水处理厂处理的污染物除部分排入环境外,约50%在下水道和厌氧化粪池内进行了降解<sup>[6]</sup>。

根据《省级温室气体清单编制指南(试行)》,不流动的下水道和深厌氧化粪池的甲烷产生修正因子分别高达0.5和0.8,考虑化粪池中污染物降解比例较高,以平均修正因子为0.7计,我国城市生活污水处理收集系统甲烷排放量约为 $95.69\times 10^4 \text{ t/a}$ ,折合温室气体直接排放量约 $2400\times 10^4 \text{ t CO}_2\text{-eq}$ ,占城市生活污水收集及处理系统甲烷排放量的89.5%。

###### ② 生活污水处理系统甲烷排放量

郭盛杰等<sup>[2]</sup>以我国城镇污水处理厂为对象,根据不同地区不同温室气体排放因子,研究了2007年—2016年生活污水处理系统的温室气体排放情况。结果显示,2014年我国城镇污水处理厂温室气

体排放总量约 $2800\times 10^4 \text{ t CO}_2\text{-eq}$ ,其中甲烷排放造成的温室气体排放量约占10%,约 $280\times 10^4 \text{ t CO}_2\text{-eq}$ ,即处理系统甲烷直接排放量约 $11.2\times 10^4 \text{ t}$ 。

##### 4.1.2 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量估算

相关研究表明,传统污水处理中 $\text{N}_2\text{O}$ 主要来自硝化阶段,硝化阶段产生的 $\text{N}_2\text{O}$ 量比反硝化阶段高2个数量级<sup>[7]</sup>,即 $\text{N}_2\text{O}$ 需要好氧状态,而城市污水收集系统一般保持在厌氧状态,因此收集系统一般不产生 $\text{N}_2\text{O}$ 的排放。根据金鹏康等<sup>[8]</sup>和笔者的研究,无外水进入的系统其污水通过化粪池和污水管道后,氨氮浓度下降程度很低,也证明了这一观点。因此,城市生活污水收集及处理过程的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放主要集中在污水处理系统。

郭盛杰等<sup>[2]</sup>相关研究表明,2014年我国城镇污水处理厂温室气体排放总量约 $2800\times 10^4 \text{ t CO}_2\text{-eq}$ ,其中 $\text{N}_2\text{O}$ 排放造成的温室气体排放量约占54%,约 $1512\times 10^4 \text{ t CO}_2\text{-eq}$ ,即处理系统 $\text{N}_2\text{O}$ 直接排放量约 $5.1\times 10^4 \text{ t}$ 。

##### 4.2 间接排放量估算

###### 4.2.1 用电量估算

根据《中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告》,2014年我国 $\text{CO}_2$ 排放量为 $91.24\times 10^8 \text{ t}$ ,根据中国电力企业联合会发布的《电力行业碳达峰碳中和发展路径研究》,电力行业 $\text{CO}_2$ 排放量占比为41%,因此可粗略估算我国2014年电力行业产生的 $\text{CO}_2$ 排放量约为 $37.4\times 10^8 \text{ t}$ 。根据前海深港国际先进技术研究院的研究结果,2014年我国污水处理厂电耗(不包括农村污水处理)占全国总电耗的0.26%,即污水处理厂电耗产生的 $\text{CO}_2$ 排放量约为 $972\times 10^4 \text{ t CO}_2\text{-eq}$ 。考虑污水提升泵站能耗约占处理电耗的10%,则我国城市生活污水处理产生的温室气体间接排放量(范围二)约为 $1069\times 10^4 \text{ t CO}_2\text{-eq}$ 。

###### 4.2.2 城市污水处理厂详细核算法

郭盛杰等<sup>[2]</sup>以我国城镇污水厂为对象,根据不同地区不同温室气体排放因子,研究了2007年—2016年我国城市污水处理厂温室气体排放情况。结果显示,2014年我国城镇污水处理厂温室气体排放总量约 $2800\times 10^4 \text{ t CO}_2\text{-eq}$ ,其中间接排放量约占36%,即 $1000\times 10^4 \text{ t CO}_2\text{-eq}$ 左右,同样考虑污水提升泵站能耗约占处理电耗的10%,则我国城市生活污水处理产生的温室气体间接排放量(范围二)约



为  $1\ 100\times 10^4\ \text{t CO}_2\text{-eq}$ , 与用电量值算法结果基本一致。

2014年我国城市生活污水处理温室气体排放量估算见图1。

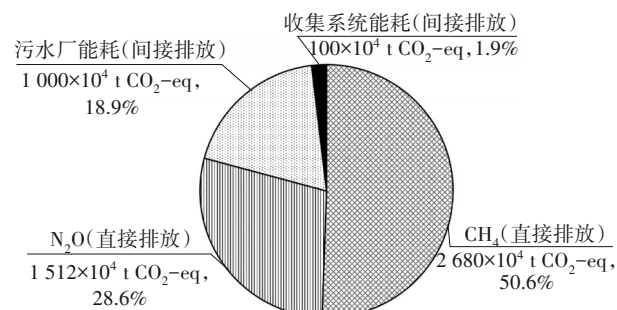


图1 2014年我国城市生活污水处理系统各类温室气体排放量比例

Fig.1 Proportion of various types of greenhouse gas emissions from urban domestic sewage treatment systems in China in 2014

## 5 我国污水处理温室气体排放及减排趋势

① 城市生活污水处理行业温室气体排放量可能持续增长。虽然我国城市生活污水处理能力和污水处理量提升很快,2018年比2011年分别增加了55.9%和47.7%<sup>[6]</sup>,但是污水处理厂平均进水污染物浓度却不断下降,2018年比2011年下降了13.9%<sup>[6]</sup>,抵消了部分生活污水处理量提升的贡献。另外,根据《中国统计年鉴》(2019),我国城市人口增长较快,2018年比2011年增长了21.0%,虽然纳入城市污水厂的污染物总量(以BOD<sub>5</sub>计)不断提升,但未纳入城市污水厂的污染物(以BOD<sub>5</sub>计)也在增加。相比于2011年,2018年我国城市人口产生的未纳入城市生活污水处理厂的污染物的量(以BOD<sub>5</sub>计)增加了7.2%。

如果没有纳入城市生活污水处理厂处理的污染物的增长未能得到有效控制,而城市生活污水处理量持续增长,那么我国城市生活污水处理产生的温室气体排放量也将持续增长。按照2011年—2018年的增长趋势,预计到2060年,仅未纳入城市生活污水处理厂的污染物增长带来的温室气体排放量就可能增加约  $1\ 022\times 10^4\ \text{t}$ ,相当于2014年我国废水处理行业温室气体直接排放总量的10%。城市生活污水收集系统产生的温室气体排放量的增长,与我国力争2030年前整体实现“碳达峰”、2060年前实现“碳中和”的总趋势相比,具有显著的特

殊性。

② 城市生活污水处理温室气体排放是影响“碳中和”目标能否实现的重要因素。根据承诺,我国2060年前将努力实现“碳中和”,即温室气体排放总量与温室气体吸收汇持平,或低于温室气体吸收汇量。《中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告》表明,2014年我国温室气体吸收汇量约为  $11.15\times 10^8\ \text{t CO}_2\text{-eq}$ 。2014年我国城市生活污水处理的温室气体排放量合计  $0.53\times 10^8\ \text{t CO}_2\text{-eq}$ (直接排放量和间接排放量分别为  $0.42\times 10^8$ 、 $0.11\times 10^8\ \text{t CO}_2\text{-eq}$ ),虽然占全国温室气体排放总量的比例不高(约为0.4%),但是占温室气体吸收汇的比例较高,约为4.8%。如果收集系统产生的温室气体排放量未得到有效控制,那么未来城市生活污水处理温室气体排放量将持续增长,2060年其占温室气体吸收汇的比例有可能进一步提升至5.6%以上,城市生活污水处理温室气体排放将成为影响2060年“碳中和”目标实现的重要因素,因此需要提前谋划减排方案。

③ 城市生活污水处理将是实现“减污降碳、协同减排”的重要领域。2020年中央经济工作会议明确提出“要继续打好污染防治攻坚战,实现减污降碳协同效应”。2021年生态环境部办公厅印发《关于统筹和加强应对气候变化与生态环境保护相关工作的指导意见》(环综合〔2021〕4号),进一步指出要“强化污水、垃圾等集中处置设施环境管理,协同控制甲烷、氧化亚氮等温室气体。鼓励各地积极探索协同控制温室气体和污染物排放的创新举措和有效机制”。虽然我国城市生活污水处理温室气体排放总量占比不高,但其直接排放全部为CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O,2014年其排放量分别占我国CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O排放总量的1.93%和2.59%,分别是城市生活污水处理温室气体排放总量占比(0.43%)的4.5倍和6倍。

2021年11月《中美关于在21世纪20年代强化气候行动的格拉斯哥联合宣言》还特别提出“两国特别认识到,甲烷排放对于升温的显著影响,认为加大行动控制和减少甲烷排放是21世纪20年代的必要事项”,并提出了包括中方制定一份全面、有力度的甲烷国家行动计划在内的4项具体措施。城市生活污水处理行业除了承担水环境污染物削减的功能外,还需要在以甲烷为代表的温室气体减排领域发挥作用。

## 6 结论

① 2014年我国城市生活污水处理温室气体排放总量约 $0.53 \times 10^8 \text{ t CO}_2\text{-eq}$ ,约为我国温室气体排放总量的0.4%,占比不高,但如未得到有效控制,排放量将持续增长,可能成为制约2060年“碳中和”目标实现的重要因素。

② 我国城市生活污水处理温室气体排放总量以直接排放为主,约占城市生活污水处理总排放量的80%,这其中收集系统的温室气体直接排放相当于 $2.400 \times 10^4 \text{ t CO}_2\text{-eq}$ 。相比目前已得到重视的污水处理厂能耗领域(间接排放),收集系统的温室气体减排工作需要开展进一步的研究。

③ 我国城市生活污水处理温室气体直接排放全部由 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放组成,在全国同类温室气体排放中占比较高,需要重点关注。

## 参考文献:

- [1] 王洪臣. 城镇污水处理领域的碳减排[J]. 给水排水, 2010, 36(12):1-3, 52.  
WANG Hongchen. Carbon abatement in municipal wastewater treatment area [J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(12):1-3, 52(in Chinese).
- [2] 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 emissions of municipal wastewater treatment and its temporal and spatial trend in China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(4):56-62(in Chinese).
- [3] 赵晶晶. 基于生命周期评价的城镇污水处理厂环境影响及低碳运行对策[J]. 环境保护与循环经济, 2014, 34(8):30-32.  
ZHAO Jingjing. Environmental impact and low-carbon operation countermeasures of urban sewage treatment plants based on life cycle assessment [J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2014, 34(8):30-32 (in Chinese).
- [4] 郝晓地, 涂明, 蔡正清, 等. 污水处理低碳运行策略与技术导向[J]. 中国给水排水, 2010, 26(24):1-6.  
HAO Xiaodi, TU Ming, CAI Zhengqing, et al. Strategies and technical orientation for low carbon

operation in wastewater treatment plants [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(24):1-6(in Chinese).

- [5] 刘智晓. 未来污水处理能源自给新途径——碳源捕获及碳源改向[J]. 中国给水排水, 2017, 33(8):43-52.  
LIU Zhixiao. Carbon capture and carbon redirection: new way to optimize the energy self-sufficient of wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(8):43-52(in Chinese).
- [6] 中国城镇供水排水协会. 中国城镇水务行业发展报告(2019)[M]. 北京:中国建筑业出版社, 2020.  
China Urban Water Association. Annual Report of Chinese Urban Water Utilities (2019) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020 (in Chinese).
- [7] 文林, 陈滢, 刘敏. 氮氧化物气体的产生及其对厌氧氨氧化的影响研究[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(4):99-103.  
WEN Lin, CHEN Ying, LIU Min. Generation of nitric oxides and the influence on anaerobic ammonium oxidation [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(4):99-103(in Chinese).
- [8] 金鹏康, 王晓昌. 城市污水管网污染物迁移转化特性[M]. 北京:科学出版社, 2018.  
JIN Pengkang, WANG Xiaochang. Migration and Transformation Characteristics of Pollutants in Urban Sewage Pipe Network [M]. Beijing: Science Press, 2018 (in Chinese).

**作者简介:**许可(1983-),男,安徽六安人,硕士,高级工程师,注册城乡规划师,中国市政工程华北设计研究总院水务规划咨询研究院总工,主要从事城乡给排水规划、市政基础设施综合规划、海绵城市建设、黑臭水体治理、污水处理提质增效等方面的规划、研究和标准编制工作。作为项目负责人和主要参加人完成规划项目100多项,其中省级以上项目近20项,共获得全国优秀城乡规划设计一等奖等国家级、省级规划设计、勘察设计奖7项,中国工程建设标准化协会标准科技创新奖1项。

**E-mail:**67262923@qq.com

**收稿日期:**2022-09-12

**修回日期:**2022-09-29

(编辑:丁彩娟)