

城市污水处理厂甲烷排放研究

——以芜湖市为例

王欣畅, 汪天蕾, 陈申威, 汤有纯

安徽师范大学地理与旅游学院, 安徽 芜湖

Email: wxc616@foxmail.com

收稿日期: 2021年4月20日; 录用日期: 2021年5月19日; 发布日期: 2021年5月27日

摘要

人类活动造成的温室气体排放被认为是导致全球气候变暖的主要原因之一, 甲烷(CH₄)在其中的作用仅次于二氧化碳, 而污水处理厂则是重要的甲烷排放源之一。为了解中小城市污水处理厂的CH₄排放特征及其控制因素, 对芜湖市污水处理厂CH₄排放通量进行观测研究, 并利用IPCC推荐的方法对其甲烷年排放通量进行了初步估算。结果表明: 1) 芜湖市污水处理厂的CH₄排放速率在517.28~1,075.26 mg/(m²·h)之间, 具有一定的时空变异特征, 具体表现为: 时间上, CH₄排放峰值出现在11月份; 空间上, 污水处理厂进水口的CH₄排放速率显著高于其他构筑物。2) 污水处理厂甲烷排放速率的主要影响因素为水体pH、总磷和总氮含量。3) 根据实测法估算得出芜湖市污水处理厂甲烷年排放量为46,583.83 kg, 比IPCC推荐方法的估算值高46.71%。

关键词

污水处理厂, 甲烷排放, 碳排放, 中小城市

Study on Methane Emission from Wastewater Treatment Plants

—A Case Study of Wuhu City

Xinchang Wang, Tianlei Wang, Shenwei Chen, Youchun Tang

School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu Anhui

Email: wxc616@foxmail.com

Received: Apr. 20th, 2021; accepted: May 19th, 2021; published: May 27th, 2021

Abstract

Greenhouse gas caused by human activities is considered to be one of the main causes of global warming. The influence of methane (CH_4) is second only to that of carbon dioxide. Wastewater treatment plants are one of the important sources of methane emissions. In order to explore the features and influencing factors of CH_4 emission from wastewater treatment plants in small-medium cities, the study observed and estimated the CH_4 emission flux of Wuhu wastewater treatment plants. The annual methane emission flux of the wastewater treatment plant was estimated by the method recommended by IPCC. The results show that: 1) The CH_4 emission rate of the wastewater treatment plants ranged from 517.28 to 1,075.26 $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ with a certain temporal and spatial variation. In time, CH_4 emission peak appeared in November; in space, the CH_4 emission rate at the inlet of wastewater treatment plant was significantly higher than that of other structures. 2) The main influencing factors of methane emission rate in wastewater treatment plant were water quality factors, including pH, total phosphorus and total nitrogen in water. 3) The annual methane emission from wastewater treatment plants in Wuhu City estimated by the measured value was 46,583.83 kg, which was 46.71% higher than that estimated by IPCC algorithm.

Keywords

Wastewater Treatment Plants, Methane Emission, Carbon Emission, Small-Medium Cities

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着工业化程度不断加深,全球气候变暖以及大气中的温室气体排放问题逐渐显露。大气中温室气体浓度快速增长是导致气候变暖的主要因素之一,自1800年以来,大气层甲烷浓度自工业化前的时间以来增加了一倍以上[1]。甲烷作为主要温室气体,近十年来,大气中 CH_4 的浓度以每年0.0068 ppmv的速度增长[2],并且,据《WMO 温室气体公报 2019》,2019年全球大气中的 CH_4 的平均浓度创下新高,为 1.869 ± 0.02 ppmv,是工业化前水平的259% [3],大气中甲烷的含量在温室气体中位居第二,仅次于 CO_2 ,甲烷的增温作用大于 CO_2 和 N_2O ,对温室效应的贡献率约占20% [4]。

大气中甲烷排放源主要分为自然源和人为源,其中自然源主要包括湿地甲烷、白蚁甲烷、海洋甲烷和地质甲烷排放,人为源主要包括石油和天然气工业、采煤业、固体废弃物的处置以及包括污水处理、水稻栽培、家畜和生物量燃烧等的其他来源[5]。当前,关于 CH_4 排放的自然源和部分人为源已开展大量卓有成效的研究,如宋长春、陈槐等对湿地生态系统 CH_4 排放特征[6] [7]、陈碧辉对热带雨林白蚁甲烷排放的研究[8]、唐俊红等和Buffett Bruce等对地质和海洋甲烷排放的研究[9] [10]。在自然源中,自然湿地的甲烷排放量约占自然源甲烷排放量的75%,占全球甲烷总排放量的26%~42% [11],对此,段晓男、姚守平等[12] [13]分别对乌梁素海湖泊、若尔盖高原花湖湖滨湿地等自然湖泊湿地的甲烷排放特征进行探究。祝栋林、艾永平等、温志丹等、赵伟[14] [15] [16] [17]分别对太湖及玄武湖、北京市及长春市城市湖泊和三峡水库等人工水体的甲烷排放特征进行研究,本文将对人工水体中的废水甲烷排放特征进行进一步研究。

废水和污水污泥的处理一直是被确定为人为温室气体的重要排放来源,在全球范围内约有5%的甲烷

排放产生于污水处理过程[18] [19]。当前关于污水处理厂甲烷排放量的估算主要是采用 IPCC 推荐的方法, 见《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》[20] (简称《IPCC 指南》)。然而污水处理厂的甲烷排放量尚未有研究进行计算, 仅见郑思伟等及孙祥超等[21] [22]分别利用 IPCC 中 BOD/COD 推荐值和年鉴实测值对杭州市和天津市的生活污水甲烷排放量进行了测算和对比, 发现即使同样使用 IPCC 推荐的方法, 代入推荐值和实测值所得的结果也显示出很大误差率。

据 Rodriguez-Caballero 等[23]和 Sakae Toyoda 等[24]对污水处理厂产甲烷菌相关的甲烷产生机制的进一步研究, 发现污水处理中, 多模式 A/A/O 工艺中的厌氧和缺氧处理池为产甲烷菌提供了良好的生存环境, 通过生物过程, 兼性细菌与厌氧细菌将复杂的有机化合物降解为如甲烷一类的简单化合物并释放能量[25]。此外, 污水将进入好氧池, 此处有持续鼓泡供氧, 进行好氧活性污泥吸附和有机物降解工序。可见, 在污水处理的不同阶段, 环境存在较大差异, 则 CH_4 的排放特征在理论上势必会受到环境条件的影响而产生差异, 因此本研究认为有必要对此开展相关观测研究。

然而, 当前关于城市污水处理过程中的温室气体排放研究还很少见, 仅见一些学者对大型城市如天津、深圳、杭州和南京等地的污水处理厂的 CH_4 排放进行过估算, 但估算方法简略, 误差率较大, 不同估算方法获得的 CH_4 排放量的对比研究略显不足。本研究利用顶空平衡 - 气相色谱法对芜湖市污水处理厂 CH_4 排放通量进行观测, 探讨影响污水甲烷排放量的主要因素, 基于实测数据估算芜湖市污水的甲烷排放量, 并与 IPCC 推荐的污水处理温室气体排放量的估算进行对比, 以期为芜湖市准确编制温室气体排放清单、制定相关减排政策提供基础数据支持。

2. 材料和方法

2.1. 研究地点

朱家桥污水处理厂的处理工艺流程如下(图 1): 污水经粗格栅拦截较大悬浮物进入污水泵房; 在污水泵房中利用潜水泵将污水提升至后续处理单元, 污水经细格栅去除细小悬浮物进入旋转沉砂池; 在旋转沉砂池中通过机械力控制水流流态与流速, 促进有机物与沙粒分离, 去除沙粒沉淀并使有机物随水旋流带出池外, 污水进入初沉池; 在初沉池中悬浮物质及部分悬浮性 BOD 被去除, 污泥泵房将初沉池污泥抽升至贮泥池, 污水通过配水井进入 A^2O 生化池; 在 A^2O 生化池中利用厌氧、缺氧以及好氧池的不同功能进行生物脱碳除磷, 同时去除 BOD, 污水进入二沉池; 在二沉池中混合液进行固液分离, 污泥大部分回流进入贮泥池, 污水通过配水井进入紫外线消毒池; 在紫外线消毒池中紫外光破坏水中细菌病毒内部的 DNA 结构, 杀灭细菌病毒, 污水得到消毒净化, 通过排水泵房排出。

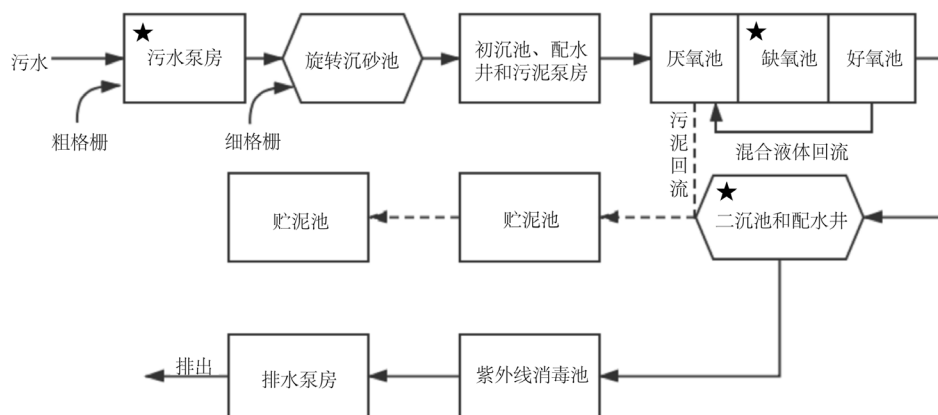


Figure 1. Process of Zhujiqiao wastewater treatment plant (★ means sampling spots)

图 1. 朱家桥污水处理厂污水处理工艺(★为采样点)

城南污水处理厂的工艺流程如下(图 2): 污水在集水井中经格栅拦截悬浮物进入旋转沉砂池; 在旋转沉砂池中通过机械力控制水流流态与流速, 促进有机物与沙粒分离, 去除沙粒沉淀并使有机物随水旋流带出池外, 污水进入 A²O 生化池; 在 A²O 生化池中利用厌氧、缺氧以及好氧池的不同功能进行生物脱碳除磷, 同时去除 BOD, 污水进入二沉池; 在二沉池中混合液进行固液分离, 污泥大部分回流进入贮泥池, 污水通过配水井进入紫外线消毒池; 在紫外线消毒池中紫外光破坏水中细菌病毒内部的 DNA 结构, 杀灭细菌病毒, 污水得到消毒净化, 通过排水泵房排出。

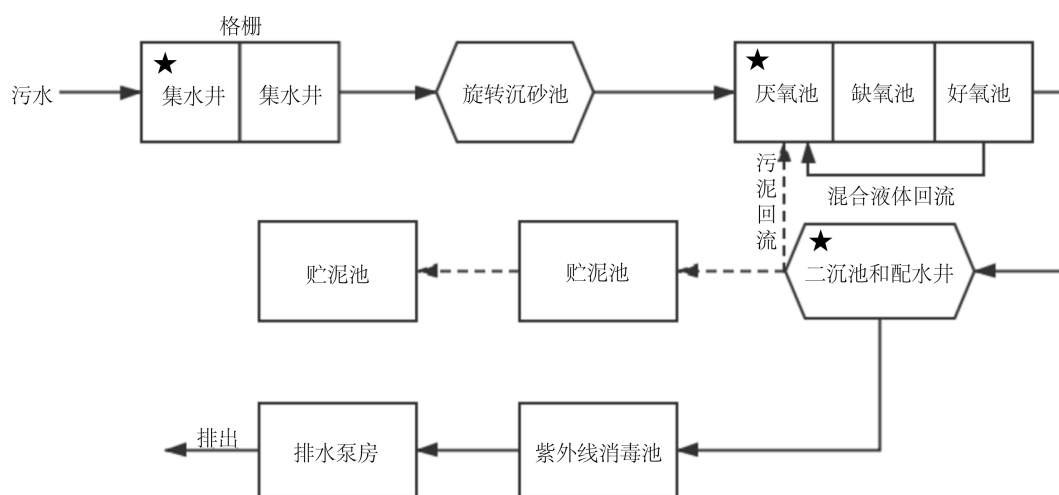


Figure 2. Process of Chengnan wastewater treatment plant (★ means sampling spots)

图 2. 城南污水处理厂中的污水处理工艺(★为采样点)

芜湖市位于安徽省东南部(117°40'E~118°44'E, 30°19'N~31°34'N), 地处长江中下游平原, 皖南山区以北, 江淮平原以南。属亚热带湿润季风气候区, 梅雨季节特点显著, 夏季炎热多雨, 年降水量约为 1400 mm。总面积为 6026 平方公里, 规划市区面积为 1491 km², 市辖镜湖区、鸠江区、弋江区、湾沚区和繁昌区, 南陵县, 代管县级市无为市。截至 2019 年, 芜湖市常住人口为 377.8 万人, 人均国内生产总值 96,154 元。芜湖市污水系统主要以长江、青弋江、漳河、裕溪河、扁担河、荆山河、横山河以及龙山、尖山、四褐山为界划分为 10 个片区。芜湖市于 2013~2014 年完成江南、江北各片区的污水专项计划, 一共规划污水处理厂 10 座, 预计总处理量 221 万吨/天。现已建成污水处理厂 7 座, 日处理污水能力为 53 万吨/天[26]。

本研究选取朱家桥污水处理厂和城南污水处理厂为研究案例地, 其中朱家桥污水处理厂(118.362°E, 31.395°N)位于芜湖市鸠江区, 服务区域主要为镜湖区和鸠江区。该处理厂于 2006 年完成 1 期建设, 2010 年完成 2 期建设。第三阶段正在进行建设, 总日处理污水规模 22 万吨, 服务面积 99 平方公里。城南污水处理厂(118.345°E, 31.272°N)位于芜湖市弋江区, 服务范围主要为弋江区。一期工程已于 2010 年竣工, 二期工程已建设完毕, 尚未投入使用。日处理污水总规模 10 万吨, 服务面积 45 平方公里。本研究利用朱家桥污水处理厂和城南污水处理厂的甲烷排放实测值估算芜湖市甲烷年排放量, 并与 IPCC 估算的结果进行比较。两个污水处理厂中采集的污水样品分别来自污水泵房(集水井)、缺氧池和二沉池, 分别代表进水口、缺氧池和出水口的水样(图 1 和图 2)。

2.2. 采样方法

受新冠疫情的影响, 原计划采样时间为 2019 年 9 月至 2020 年 8 月, 实际采样时间为 2019 年 9 月至

2020年1月每月上旬晴天的14:00至17:00进行。 CH_4 排放通量测定采用顶空气相色谱法(HS-GC),具体在步骤如下:使用透明取水器对每个污水处理厂的污水泵房(集水井)、缺氧池和二沉池中进行采样,每个采样点取3个平行样,用60 mL注射器取无气泡和多余杂质的水样40 mL,再抽取高纯氮气20 mL后,剧烈震荡1~3分钟使溶解在水样中的甲烷在针筒的气相和液相部分达到平衡[27],并将气体收集到50 mL铝箔气袋中,对甲烷浓度进行测定。同时,利用哈希便携式水质仪(HQ40d, Hach)测量水体温度、含氧量(DO)和pH值,利用便携式测温仪和风速仪测量实时气温和风速。同时采集水样带回实验室,分别采用钼锑抗分光光度法(GB11893-1989)和过硫酸钾氧化-紫外分光光度法(GB11894-1989)测定水体总磷和总氮含量[28]。

2.3. CH_4 扩散通量计算方法

扩散排放通量采用任艺洁等[29]研究中介绍的计算方法。具体如下:

$$C_{obs} = C_0 \cdot V_0 / V_1 \quad (1)$$

式中: C_0 为注射器顶空 CH_4 浓度(mol/L), V_0 为注射器顶空体积(0.02 L), V_1 为采集水样体积(0.04 L)。

计算 CH_4 扩散通量(F_{diff})的公式[29]如下:

$$F_{diff} = c \cdot K_w (C_{obs} - C_{eq}) \quad (2)$$

式中: c 为单位换算系数, K_w 为气体在水-气界面处相对于浓度梯度的扩散速度(cm/s)。

在0°C~30°C范围内 CH_4 在水中的 S_c 与水温(T)的关系式[29]如下:

$$S_c(\text{CH}_4) = 2309.2 - 120.31T + 3.4209T^2 - 0.040437T^3 \quad (3)$$

本文所用的 S_c 与 K_w 之间的模型为RC01 [30],其计算公式如下:

$$K_w = 1.91 \exp(0.35U_{10}) (S_c / 600)^{-1/2} \quad (4)$$

式中: U_{10} 为水面以上风速,单位为m/s。

当水面与大气平衡时,式(2)中的 C_{eq} 代表水中气体的浓度(mol/L),实际水温下 CH_4 的 C_{eq} 值计算公式[29]如下:

$$C_{eq} = K_H \cdot P_A \quad (5)$$

式中: P_A 为 CH_4 的大气分压。 K_H 是采样时气体的Henry常数($\mu\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{atm})$),根据采样时水温数据计算而确定[29]。

$$K_H = K_H^\theta \cdot e^{K_T \left(\frac{1}{T_K} - \frac{1}{T^\theta} \right)} \quad (6)$$

式中: $T^\theta = 298 \text{ K}$,表示常温。

依据本方法计算的结果应与IPCC算法的结果单位相同才可进行数值比较,故需进行单位换算。单位换算方法如下:

$$\text{CH}_4 \text{ Emissions (Sampling)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{diff} \cdot S_{water} \cdot c_i \quad (7)$$

式中: CH_4 排放量为清单年度的甲烷年排放量($\text{kg CH}_4/\text{年}$)。 c_i 是量纲换算系数(8760 (24 * 365))。

2.4. IPCC 估算法

《IPCC指南》中推荐的甲烷年排放通量估算方法[20]如下:

$$\text{CH}_4 \text{ Emissions (IPCC)} = \text{EF} \cdot \text{TOW} - R \quad (8)$$

式中: TOW 为清单年度废水中有机物总量(kg BOD/年) [20]。

EF 为甲烷排放因子(kg CH₄/kg BOD); R 为清单年度 CH₄回收量(kg CH₄/年)。

排放因子(EF)的估算公式为[20]:

$$\text{EF} = B_0 \cdot \text{MCF} \quad (9)$$

式中: B₀ 为 CH₄ 最大生产能力(kg CH₄/kg BOD)。

其中, 库存年度废水有机物总量(TOW)的估算公式[20]如下:

$$\text{TOW} = P \cdot \text{BOD} \cdot 0.001 \cdot 365 \quad (10)$$

式中: P (population)为清单年度芜湖市人口;

BOD 为清单年度国家人均 BOD (g/人/天);

0.001 是从 g BOD 到 kg BOD 的量纲换算系数。

3. 结果与讨论

3.1. 污水处理厂甲烷排放时空特征

城南和朱家桥污水处理厂的甲烷排放速率具有明显的月变化规律, 均表现为先增加后减少(图 3)。甲烷排放速率在 2019 年 11 月达到峰值, 此时城南和朱家桥污水处理厂的甲烷排放速率分别为 594.96 mg/(m²·h)和 480.30 mg/(m²·h); 而城南污水处理厂 CH₄排放速率的最低值出现在 1 月份, 为 325.28 mg/(m²·h), 朱家桥污水处理厂则出现在 9 月份, 为 108.38 mg/(m²·h)。此外, 朱家桥污水处理厂的甲烷月排放速率明显低于城南污水处理厂, 2019 年 9 月差值达到最大, 两厂相差 398.07 mg/(m²·h)。

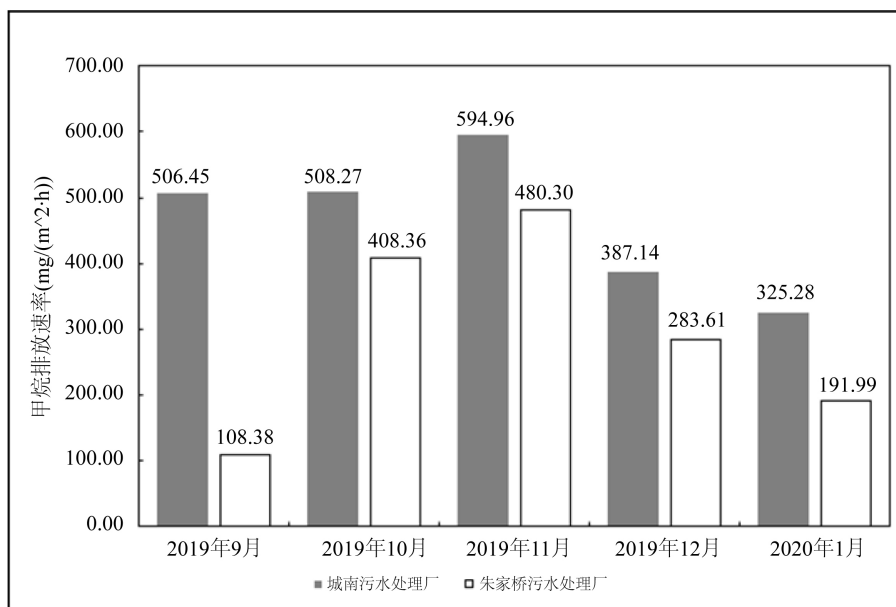


Figure 3. Monthly methane emission rates in Chengnan and Zhujiqiao wastewater treatment plant

图 3. 城南污水处理厂和朱家桥污水处理厂甲烷月排放速率

城南和朱家桥污水处理厂甲烷排放所表现出来的时空差异可能由以下几个方面的原因所致: 首先,

芜湖市城南污水处理厂的服务范围主要是弋江区，区域内共建有 35 个产业园及工厂，污水的受污染程度更高，污水中磷和氮浓度更高。而芜湖市城北污水处理厂的服务范围主要是鸠江区和镜湖区，主要分布商业中心和居民住宅区，截至 2019 年常住人口分别为 63.3 万人和 57.7 万人，故进水口的水源污染程度较低，多为生活污水。其次，本研究 11 月份在城南污水厂采样过程中发现污水有浓烈刺鼻异味，进水口及缺氧池的水体较其他月份透明度较低，水体受污染程度较高。最后，据测量，2019 年 11 月的水体平均氮含量为 56.76 mg/L，城南污水厂的进水口平均氮含量达到 44.16 mg/L，缺氧池中平均氮含量达到 192.38 mg/L，且最高值达到 201.02 mg/L。此时水体中的氮处于极高的浓度，高浓度的氮为产甲烷菌提供了良好的生存条件，导致甲烷排放量的增加。

城南污水处理厂和朱家桥污水处理厂的甲烷月平均排放速率在进水口、缺氧池和出水口三个工序中逐渐减少，降幅较大(图 4)。但在污水处理的三道工序中，朱家桥污水处理厂的甲烷月排放速率均低于城南污水处理厂。两厂甲烷月排放量差距最大的是进水口处，为 141.78 mg/(m²·h)，最小的是出水口处，为 0.14 mg/(m²·h)。由此可见，两者每月甲烷排放量的差距在处理工序的推进中逐渐缩小。

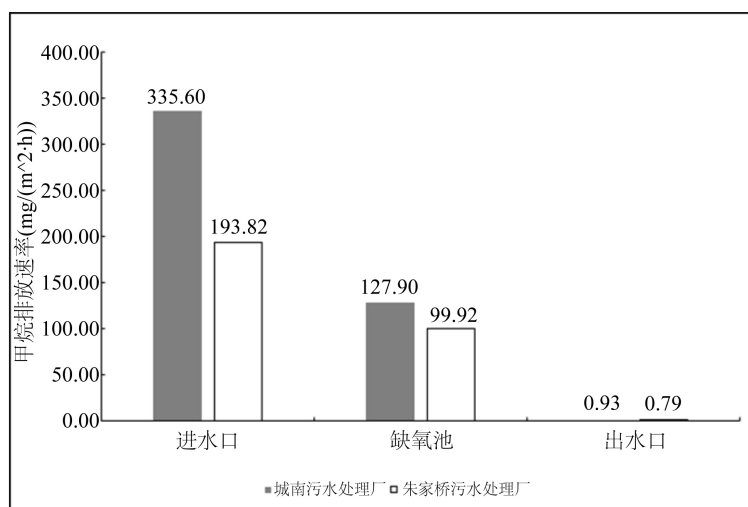


Figure 4. Monthly methane emission rates of 3 structures Chengnan and Zhujiqiao wastewater treatment plant

图 4. 城南污水处理厂和朱家桥污水处理厂各构筑物甲烷月排放平均速率

观测发现，11 月份城南污水处理厂缺氧池的氮浓度出现极高值。进水口处的水中氮的含量高，集中在 35~50 mg/L 之间，受污染程度高。随着污水处理工序的推进，水质提升，缺氧池和出水口的水中氮含量明显降低，集中分布于 20 mg/L 及以下，出水口水体甲烷产量相应减少。因此所调查的三个采样点中，水体的甲烷月平均排放量随着工序的推进呈现明显递减。

2019 年 9 月至 2020 年 1 月，甲烷排放速率范围为 517.28~1075.26 mg/(m²·h)，月平均甲烷排放速率为 758.95 mg/(m²·h)。甲烷排放速率峰值出现在 2019 年 11 月，低值出现在 2020 年 1 月(图 5)。并且 2019 年 9 月至 2019 年 11 月两厂的甲烷排放速率远高于 2019 年 12 月至 2020 年 1 月。综上可见，在本实验中发现秋季(9 至 11 月)两个污水处理厂的甲烷排放速率均高于冬季(12 至次年 1 月)。

秋季城南污水厂的缺氧池的氮含量出现了极高值，分析表明氮含量与甲烷排放速率呈显著正相关关系(表 1)。且在不破坏产甲烷菌蛋白酶的前提下，水体温度越高，产甲烷菌的酶活性越高，甲烷的排放量应随着环境温度升高而增加。据计算，调查地点秋季采样时间的平均气温为 25.61℃，而冬季采样时间的平均气温为 12.68℃，秋季温度明显远高于冬季。综合以上原因，秋季污水厂的甲烷排放量大于冬季。

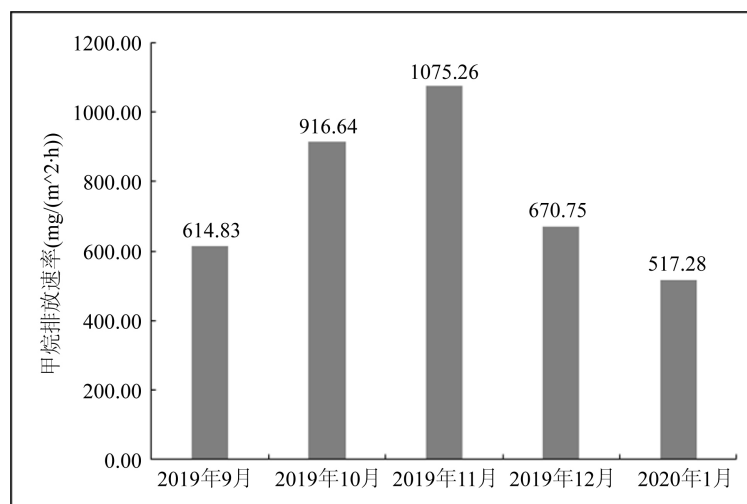


Figure 5. Total monthly methane emission rates in Chengnan and Zhujiacao wastewater treatment plant

图 5. 朱家桥污水厂和城南污水厂甲烷月排放总速率

Table 1. Correlation between methane emission rate and environmental variables and water quality factors (r)

表 1. 甲烷排放速率与环境变量及水质因子的相关性(r)

因素	相关系数(r)	P
气温	0.027	>0.05
风速	0.045	>0.05
水温	0.151	>0.05
pH	0.733**	<0.01
DO	-0.061	>0.05
总磷	0.565**	<0.01
总氮	0.614**	<0.01

**表示当 $P < 0.01$ 时, 呈显著相关性。

3.2. 甲烷排放影响因素分析

3.2.1. 与环境因子的关系

相关分析结果表明, 污水处理厂甲烷排放与气温、水温、风速等环境因子的相关性不显著(表 1)。已有研究表明, 水体中的产甲烷菌的温度适应范围一般为 $25^{\circ}\text{C} \sim 55^{\circ}\text{C}$, 少数嗜冷菌最适温度低于 25°C , 极端嗜热菌的最适温度在 80°C 以上[31], 在一定温度范围内, 较高的温度可以提高产甲烷菌体内的生物酶活性, 促进甲烷的生产。在本实验中, 最高水温为 29.5°C , 最高气温为 32.6°C (图 6(a)、图 6(b)), 在大多数产甲烷菌的最适温度范围内, 不会对生物酶产生破坏, 且三个采样点的气温和水温差异性不大, 采样期间的温度差异较小, 所以甲烷排放速率与气温和水温呈非显著相关性。

风速影响甲烷排放的过程主要发生在甲烷在水气界面的氧化输运过程中。风速的增加减少了污水-大气界面厚度, 从而增加了甲烷向大气的扩散速率[15], 由于通量需要根据风速进行计算, 理论上风速与甲烷排放速率之间应存在一定的正相关关系。多数显示有相关性的研究地点的水面比较开阔, 本研究涉及的采样点水面面积较小且不开阔, 有大量建筑物遮挡, 地形复杂, 风速对 CH_4 排放的影响较小。故结果

显示研究地点甲烷排放速率与风速呈非显著相关性(图 6(c)、图 6(d))。

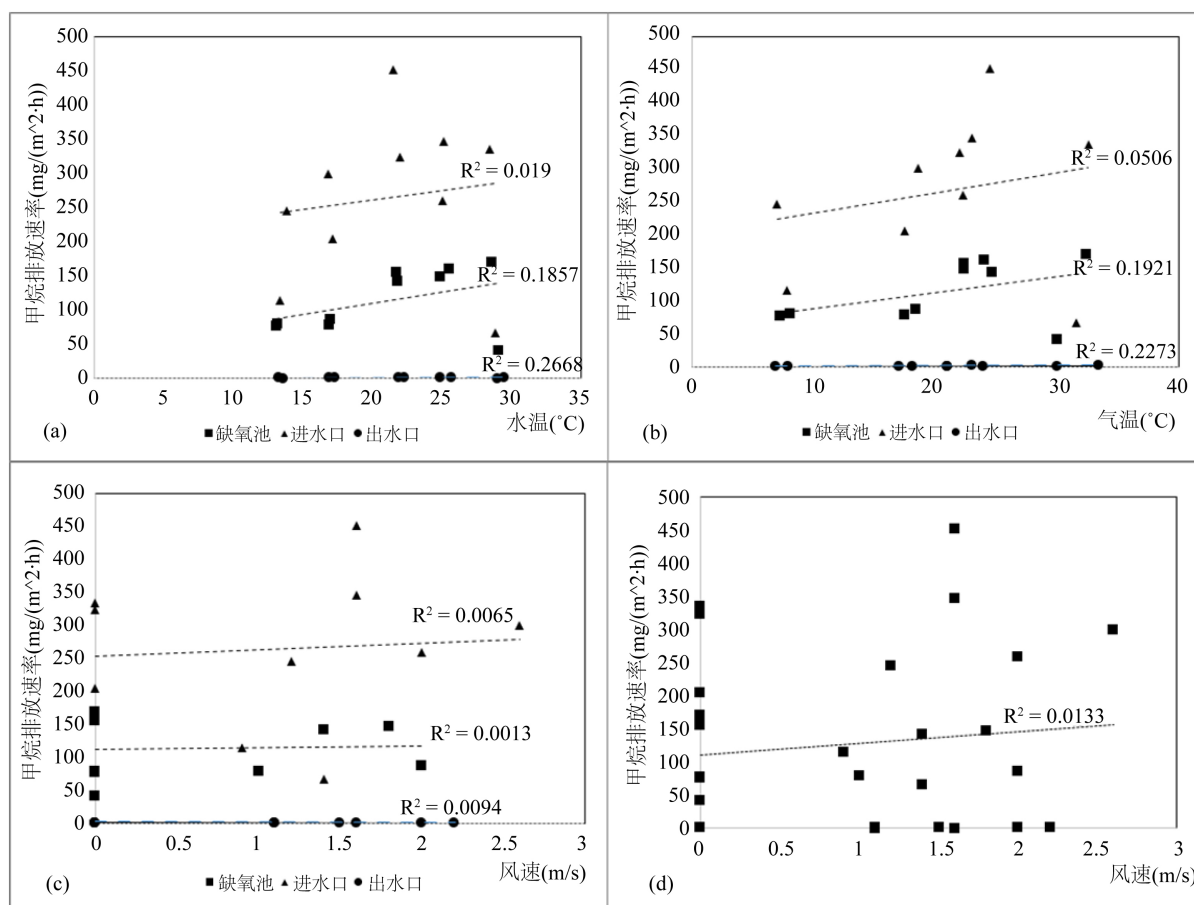


图 6 分别表示在进水口、缺氧池和出水口处甲烷排放速率与水温(a)、气温(b)、风速(c)、的关系, 以及总体甲烷排放速率与风速的关系(d)

Figure 6. Relationship between methane emission rate and environmental factors

图 6. 甲烷排放速率与环境因子的关系

3.2.2. 与水质因子的关系

结果表明, 影响污水中甲烷排放的主要因素是样品的水质因素(表 1)。其中, 污水 pH、总磷和总氮含量与甲烷排放有明显的正相关关系。

产甲烷菌的最适 pH 一般为 6~8, 适宜采样地环境的嗜温菌的最适 pH 为 6.8~7.2 [32] [33], 本研究中污水样品的平均 pH 值为 6.87, 所有样品 pH 均在 6~8, 36.7%的水样 pH 值小于 6.8, 仅 6.7%的水样 pH 高于 7.2 (图 7(a)), 进水口水样 pH 有少部分大于 7.2, 缺氧池的 pH 多为 6.8~7 之间, 出水口处水样 pH 多为 6.8 以下, 因此水样的 pH 值与甲烷排放速率存在明显的正相关关系。

由于产甲烷菌是厌氧菌, 喜好淹水的厌氧环境, 污水处理工艺中较低的氧含量有利于产甲烷菌的生产, 因此理论上甲烷排放速率与 DO 应呈一定的负相关。水体含氧量的数值波动较大(图 7(c)、图 7(d))。可能是由于样品较少, 且三个采样点的含氧量差异较小, 规律性不明显, 故结果显示甲烷排放速率与水体含氧量呈非显著相关性。

高浓度的氮磷能充分满足微生物的需要, 从而促进污水中甲烷的排放。本研究污水氮磷平均含量为

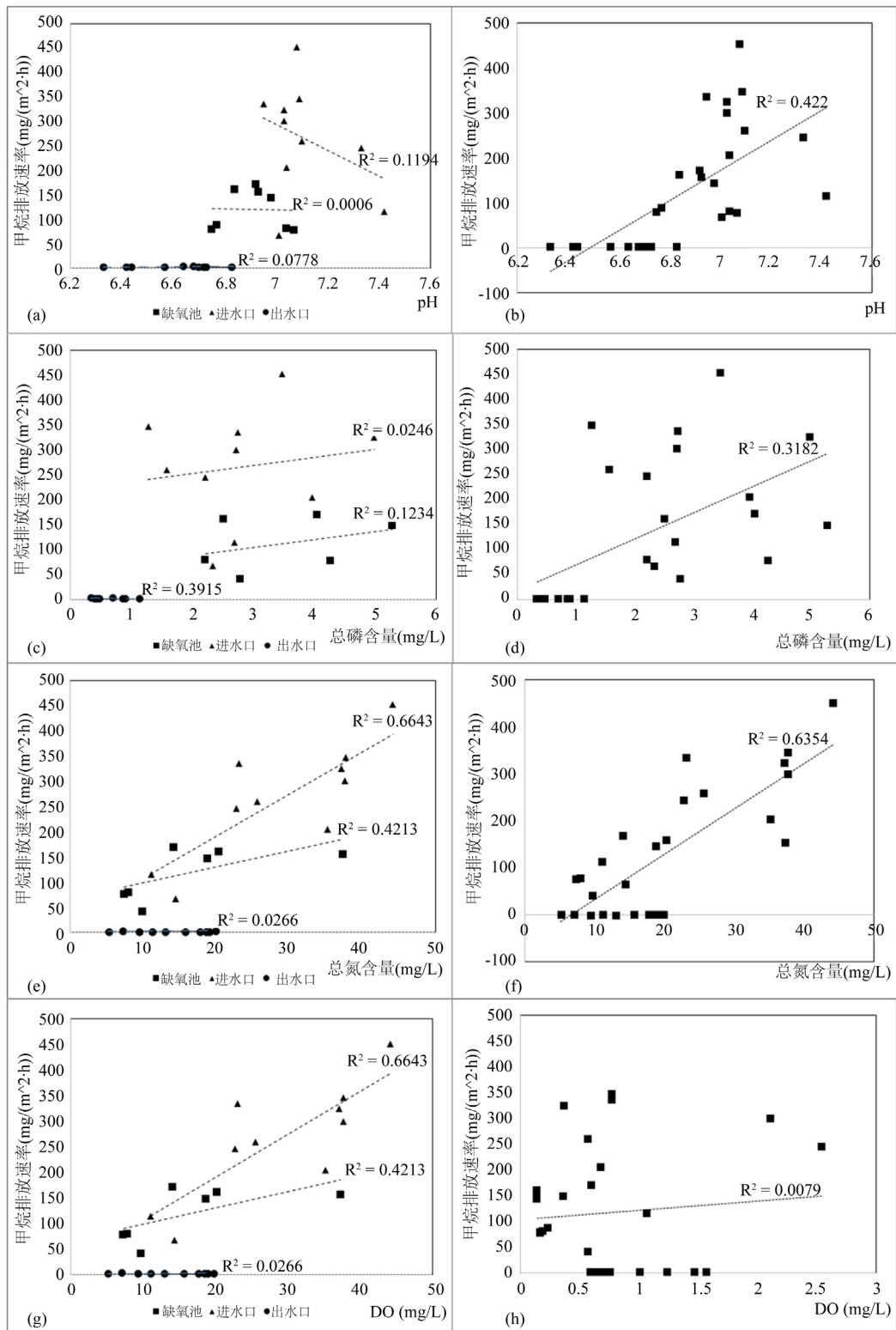


图 7 分别表示在进水口、缺氧池和出水口处甲烷排放速率与 pH (a)、DO (c)、总磷(e)和总氮(g)含量的关系, 以及总体甲烷排放速率与 pH (b)、DO (d)、总磷(f)和总氮(h)含量的关系

Figure 7. Relationship between methane emission rate and water quality factors

图 7. 甲烷排放速率与水质因子的关系

18.54 mg/L, 处于严重富营养化阶段。且磷含量主要对污染程度较低的出水口处甲烷排放速率影响较大(图 7(e)、图 7(f)), 在干净的水体中产甲烷菌对磷浓度的变化较为敏感, 而氮含量则主要对污染程度较高的进水口和处理池的甲烷排放速率影响较大, 在受污染严重的水体段, 高浓度的氮含量对水体甲烷排放速率具有较大贡献。甲烷排放速率与总氮和总磷在总体上呈明显的正相关关系(图 7(g)、图 7(i))。

3.3. 芜湖市污水处理厂甲烷排放通量比较

本研究采用《IPCC 指南》[20]中废水处理部分记录的方法对芜湖市污水排放量进行估算。《IPCC 指南》中我国的人均 BOD 推荐值为 40 g/人/天。最大甲烷生产能力表明污水中的有机物能产生最大的甲烷排放量。《IPCC 指南》中住宅区污水每千克 BOD 产甲烷推荐值为 0.6 kg。甲烷修正因子表示不同处理排放途径或系统达到最大甲烷生产能力的程度, 也反映系统的厌氧程度。《省级温室气体清单编制指南》建议全国平均 MCF 值为 0.165 [34]。本文中甲烷回收取默认值 0。另外, 本文利用通量计算公式代入实测值进行计算, 得出了实测方法估算出的芜湖市污水处理厂甲烷排放通量(表 2):

Table 2. Annual total methane emission from Wuhu wastewater treatment plants
表 2. 芜湖市污水处理厂甲烷年排放总量

方法	CH ₄ 年排放总量(kg/年)
IPCC 算法	31,751.32
实测方法	46,583.83

结果表明, 实测法计算的甲烷排放量比 IPCC 算法计算的甲烷排放量高出约 46.71%。但由于新冠疫情的影响, 本文的采样受到影响, 所以采用实测法求得的结果是利用实际采样的月份所得平均值估算的年度甲烷排放通量, 由于缺少春夏两季的数据, 所以本实验估算所得实测值会略有误差。

将本研究观测结果与其他相关研究的结果进行比较, 并结合其他调查, 得到结果如下: 到 2020 年, 我国生活污水处理 CH₄ 减排 7%。2020 年, 减排后生活污水处理 CH₄ 排放量为 101.36 万吨, 比 2010 年增加 66% [35]。大城市及特大城市的污水年排放量较大, 其中天津市 2015 年甲烷排放量为 24,850,080 kg, 杭州市 2014 年甲烷排放量为 15,362,000 kg。在其他相关研究中[21] [22], 南京市仅一座污水处理厂的甲烷年排放量就达 12,625.61 kg [36], 在本研究中, 芜湖市 CH₄ 排放总量为 46,583.83 kg/年, 因此仅用大城市的数据来估算全国的排放量会造成较大的误差, 后续研究应更加关注中小城市污水处理厂的甲烷排放量计算, 以期为全国碳排放估算提供依据。

据郑思伟等和孙祥超等[21] [22]的研究表明, 2012~2015 年 IPCC 算法的误差率约为 30%, 2011~2014 年约为 25%。Delre 等[37]发现 IPCC 算法估算的 CH₄ 排放量比实际排放量高 5 倍以上。在本研究中, IPCC 算法的误差率约为 46.71%, 说明 IPCC 算法应该及时进行修改和细化, 以更加精准地估算甲烷排放通量。

4. 结论

芜湖市城市污水厂甲烷排放速率在 517.28~1075.26 mg/(m²·h)范围内波动, 具有显著的时空变异特征。时间上, 秋季的甲烷排放量明显高于冬季; 空间上, 不同位点的甲烷排放存在差异, 随着污水处理工艺的推进, 甲烷排放速率呈现递减趋势; 此外, 城南污水厂甲烷月排放速率明显高于朱家桥污水厂。

分析了污水处理厂水体的甲烷排放速率与环境变量以及水质因子的关系。结果表明, 水体 pH、总磷及总氮含量与甲烷排放速率呈显著正相关, 水体含氧量(DO)、水温、气温和风速与甲烷排放速率呈非显著相关性。

在 IPCC 估算法和实测法的比较中,用 IPCC 算法估算,芜湖市年平均甲烷生产量为 31,751.32 kg/年;用实测法进行估算,芜湖市甲烷年排放量为 46,583.83 kg/年,月平均排放量为 3,881.99 kg/月。IPCC 算法的误差率为 46.71%,对 CH₄ 排放量的估计不够准确,需要进一步改进来更精准地计算不同地方的甲烷年排放量,为城市温室气体减排标准制定及全球气候变化的研究提供一定理论支持。

5. 展望

本文研究过程中发现有待完善的地方如下:首先,在污水处理厂中甲烷的排放方式主要为扩散排放,冒泡排放可能也是污水中甲烷排放方式之一,但实地考察时环境条件不允许用静态浮箱进行测量,因此本研究的甲烷排放量仅为扩散排放的总量,估算结果略偏小。其次,因为新冠疫情影响,本研究采样季节仅为秋冬季节,由于春夏季节温度升高,甲烷排放量一般高于秋冬季节,故估算结果也有所误差。最后,本研究选取了芜湖市两座污水处理厂作为研究对象,调查范围较小,收集样品数量较少,故分析结果与理论预测有所出入。

本研究希望今后的研究扩大时间和空间维度进行观察和测量,并且对污水中的甲烷排放方式进行进一步调查,验证污水是否以冒泡排放的方式排放甲烷。若验证出有冒泡排放,则可对污水中冒泡排放速率进行进一步测量,根据测量结果估算一定区域内甲烷排放总量,以期对 IPCC 计算方法优化和当地温室气体减排目标制定提供更有力的数据支持。

致 谢

该论文得到了国家大学生创新创业训练计划项目(201910370015)的支持,在此表示衷心的感谢。感谢安徽师范大学地理与旅游学院对我的栽培。同时感谢指导这项研究的指导老师苗雨青老师。也感谢芜湖市朱家桥污水处理厂的陈平先生和城南污水处理厂的王晶晶先生、余亚运先生对本研究几个月来采样工作的支持。同时感谢师兄崔乾、师姐孙奕琳以及大学生创新创业训练项目组成员汪天蕾、陈申威和汤有纯对本研究提供宝贵建议。

参考文献

- [1] Nisbet, E. (1990) Climate Change and Methane. *Nature*, **347**, 23-23. <https://doi.org/10.1038/347023a0>
- [2] 王郭臣. 长江河口湿地植被固碳对 CH₄ 和 CO₂ 产生的贡献[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2018.
- [3] 世界气象组织. WMO 温室气体公报 2018 [R]. 日内瓦: 世界气象组织, 2018: 1-9.
- [4] 孙波. 土壤中甲烷的释放[M]/赵其国. 土壤物质循环与农业和环境. 南京: 江苏科学技术出版社, 1995: 128-143.
- [5] 任仁. 温室气体甲烷的人为源及其减排的技术措施[J]. 环境导报, 2000(4): 42-43.
- [6] 宋长春. 湿地生态系统碳循环研究进展[J]. 地理科学, 2003, 23(5): 622-628.
- [7] 陈槐. 中国特有湿地甲烷排放研究[Z]. 成都: 中国科学院成都生物研究所, 2012.
- [8] 陈碧辉. 温室气体源汇及其对气候影响的研究现状[J]. 气象科学, 2005, 26(1): 586-590.
- [9] 唐俊红, 向武, 鲍征宇, 等. 地质成因的甲烷释放对大气的的影响[J]. 地质科技情报, 2006, 25(2): 75-82.
- [10] Buffett, B. and Archer, D. (2004) Global Inventory of Methane Clathrate: Sensitivity to Changes in the Deep Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, **227**, 185-199.
- [11] IPC. (2013) The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Inter-Governmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.09.005>
- [12] 段晓男, 王效科, 陈琳, 等. 乌梁素海湖泊湿地植物区甲烷排放规律[J]. 环境科学, 2007, 28(3): 455-459.
- [13] 姚守平. 若尔盖高原花湖湖滨湿地甲烷排放研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 中国科学院研究生院(成都生物研究所), 2007.

- [14] 祝栋林. 太湖及玄武湖甲烷气体产生、释放及影响机制研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京大学, 2012.
- [15] 艾永平. 城市湖泊的甲烷排放时空变化及其与水文水质关系[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2009.
- [16] 温志丹, 宋开山, 赵莹, 邵田田, 李思佳. 长春市水体夏秋季温室气体排放特征[J]. 环境科学, 2016, 37(1): 102-111.
- [17] 赵玮, 朱孔贤, 黄文敏, 等. 三峡水库湖北段甲烷排放通量时空特征及其影响因素分析[J]. 水生生物学报, 2013, 37(4): 776-781.
- [18] Yoshida, H., Mønster, J. and Scheutz, C. (2014) Plant-Integrated Measurement of Greenhouse Gas Emissions from a Municipal Wastewater Treatment Plant. *Water Research*, **61**, 108-118. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.05.014>
- [19] El-Fadel, M. and Massound, M. (2001) Methane Emissions from Wastewater Management. *Environmental Pollution*, **114**, 177-185. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00222-0](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00222-0)
- [20] IPCC (2006) IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IGES, Kanagawa.
- [21] 郑思伟, 唐伟, 徐海岚, 等. BOD/COD 选取对污水处理厂甲烷排放量估算的影响——以杭州市为例[J]. 环境卫生工程, 2017, 25(3): 66-68.
- [22] 孙祥超, 陈伟, 贺姝峒, 等. 天津市生活污水甲烷排放量估算研究[J]. 资源节约与环保, 2018(4): 119-120, 123.
- [23] Rodriguez-Caballero, A., Aymerich, I., Poch, M. and Pijuan, M. (2014) Evaluation of Process Conditions Triggering Emissions of Green-House Gases from a Biological Wastewater Treatment System. *Science of the Total Environment*, **493**, 384-391. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.015>
- [24] Toyoda, S., Suzuki, Y., Hattori, S., et al. (2011) Isotopomer Analysis of Production and Consumption Mechanisms of N₂O and CH₄ in an Advanced Wastewater Treatment System. *Environmental Science & Technology*, **45**, 917-922. <https://doi.org/10.1021/es102985u>
- [25] 闫旭, 韩云平, 李琦路, 等. 污水处理过程中温室气体产生研究进展[J]. 环境化学, 2015(5): 853-862.
- [26] 章宏学. 芜湖市城市污水系统存在的问题分析与研究[J]. 智能城市, 2018, 4(21): 62-63.
- [27] Goldenfum, J.A. (2009) GHG Measurement Guidelines for Freshwater Reservoirs: Report of the UNESCO/IHA Greenhouse Gas Emission from Freshwater Reservoirs Research Project. UNESCO, Paris.
- [28] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 243-258.
- [29] 任艺洁, 邓正苗, 谢永宏, 等. 洞庭湖湿地洪水期甲烷扩散和气泡排放通量估算及水环境影响分析[J]. 湖泊科学, 2019, 31(4): 187-199.
- [30] Amouroux, D., Roberts, G., Rapsomanikis, S. and Andreae, M.O. (2002) Biogenic Gas (CH₄, N₂O, DMS) Emission to the Atmosphere from Near-Shore and Shelf Waters of the North-Western Black Sea. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, **54**, 575-587. <https://doi.org/10.1006/ecss.2000.0666>
- [31] 吴美容, 张瑞, 周俊, 等. 温度对产甲烷菌代谢途径和优势菌群结构的影响[J]. 化工学报, 2014, 65(5): 1602-1606.
- [32] 王洁, 袁俊吉, 刘德燕, 等. 滨海湿地甲烷产生途径和产甲烷菌研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 993-1001.
- [33] 王保玉, 刘建民, 韩作颖, 等. 产甲烷菌的分类及研究进展[J]. 基因组学与应用生物学, 2014, 33(2): 418-425.
- [34] 省级温室气体清单编写组. 省级温室气体清单编制指南[M]. 北京: 国家发展改革委能源研究所, 2010.
- [35] Ma, Z., Feng, P., Gao, Q., et al. (2015) CH₄ Emission and Reduction Potential in Wastewater Treatment of China. *Advances in Climate Change Research*, **6**, 216-224.
- [36] 张星, 陈敏东, 高庆先, 等. 生活污水处理厂甲烷的释放通量及其影响因素[J]. 江西农业大学学报, 2018, 40(3): 657-662.
- [37] Daelman, M.R.J., van Voorthuizen, E.M., van Dongen U.G.J.M., et al. (2012) Methane Emission during Municipal Wastewater Treatment. *Water Research*, **46**, 3657-3670. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.04.024>