# 及业环境计学学报 JOURNAL OF AGRO-ENVIRONMENT SCIENCE

## 中文核心期刊/CSCD

请通过网上投稿系统投稿 网址:http://www.aes.org.cn

## 典型农业流域池塘甲烷浓度及扩散排放特征

张欣悦, 肖启涛, 刘臻婧, 廖远珊, 谢晖, 邱银国, 齐天赐, 徐向华, 段洪涛

### 引用本文:

张欣悦, 肖启涛, 刘臻婧, 廖远珊, 谢晖, 邱银国, 齐天赐, 徐向华, 段洪涛. 典型农业流域池塘甲烷浓度及扩散排放特征[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(4): 931–942.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0887

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

## 九龙江河口养虾塘氧化亚氮排放通量及影响因素

金宝石,谢建国,闫鸿远,杨平,曾从盛

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 2031-2038 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0248

#### 淡水养殖塘甲烷通量观测时段的选取对年排放量的影响研究

赵佳玉, 张弥, 石立新, 肖薇, 谢燕红, 蒲旖旎, 贾磊, 甄晓菊, 冯兆忠 农业环境科学学报. 2022, 41(5): 1131-026-1 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1255

### 洞庭湖区典型沟塘反硝化脱氮能力及其影响因素

龙广丽, 严星, 夏永秋, 刘鑫, 文炯, 彭芝, 荣湘民

农业环境科学学报. 2023, 42(4): 842-851 https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0761

## 太湖流域不同再生稻品种的温室气体排放强度

樊迪, 李若林, 马静, 张广斌, 徐华

农业环境科学学报. 2022, 41(9): 2082-2090 https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0219

## 有机无机肥配施对苹果园温室气体排放的影响

马艳婷, 赵志远, 冯天宇, SOMPOUVISETThongsouk, 孔旭, 翟丙年, 赵政阳 农业环境科学学报. 2021, 40(9): 2039–2048 https://doi.org/10.11654/jaes.2020–1477



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张欣悦, 肖启涛, 刘臻婧, 等. 典型农业流域池塘甲烷浓度及扩散排放特征[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(4): 931-942.

ZHANG X Y, XIAO Q T, LIU Z J, et al. Dissolved methane concentration and diffusion emission characteristics of ponds in a typical agricultural catchment [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(4): 931–942.

## 典型农业流域池塘甲烷浓度及扩散排放特征

张欣悦1,2, 肖启涛2\*, 刘臻婧3, 廖远珊4, 谢晖2, 邱银国2, 齐天赐2, 徐向华1\*, 段洪涛2,4

(1.南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京 210044; 2.中国科学院南京地理与湖泊研究所 中国科学院 流域地理学重点实验室,南京 210008; 3.湖南省气候中心,长沙 410118; 4.西北大学城市与环境学院,西安 710127)

摘 要:为探究农业流域池塘水体 CH4动态变化特征,以巢湖北岸典型农业流域——烔炀河流域为研究对象,选取 4 种不同景观池塘(排污塘、灌溉塘、养殖塘和自然塘),基于为期近 1 a 的逐月野外调查,探明农业流域不同景观池塘甲烷溶存浓度及其排放特征。结果表明:受人为活动干扰较低的自然塘 CH4浓度[(0.41±0.29) μmol·L⁻¹]及其扩散排放通量[(0.54±0.49) mmol·m⁻²·d⁻¹]相对较低,但农业活动以及生活污水排放等致使流域内养殖塘、排污塘和灌溉塘成为大气 CH4的热点排放区域,其扩散排放通量分别是自然塘的 6.0、3.0 倍和 2.2 倍。不同景观池塘 CH4排放均表现出明显的时间变化,但因受外源碳氮等生源要素累积以及人为活动干扰等影响,其 CH4变化特征有所不同。统计分析表明该流域池塘 CH4变化总体上受水温、溶解氧和污染负荷(有机质和营养盐等)等因素驱动。综上,烔炀河农村流域池塘水体是大气 CH4的显著排放源,年均 CH4溶存浓度和扩散排放通量分别为(1.30±0.78) μmol·L⁻¹和(1.64±1.50) mmol·m⁻²·d⁻¹,其中养殖塘具有较高 CH4扩散排放通量,在未来研究中需要重点关注。

关键词:农业流域;池塘;CH4浓度;CH4通量;影响因素

中图分类号:X71 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)04-0931-12 doi:10.11654/jaes.2022-0887

## Dissolved methane concentration and diffusion emission characteristics of ponds in a typical agricultural catchment

ZHANG Xinyue<sup>1,2</sup>, XIAO Qitao<sup>2\*</sup>, LIU Zhenjing<sup>3</sup>, LIAO Yuanshan<sup>4</sup>, XIE Hui<sup>2</sup>, QIU Yinguo<sup>2</sup>, QI Tianci<sup>2</sup>, XU Xianghua<sup>1\*</sup>, DUAN Hongtao<sup>2,4</sup> (1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC–FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Hunan Climate Center, Changsha 410118, China; 4. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi' an 710127, China)

**Abstract:** This study investigated the dynamic variability of  $CH_4$  in four ponds draining distinct landscapes (sewage pond, irrigation pond, aquaculture pond, and natural pond) in the Tongyang River catchment, a typical agricultural catchment, based on field measurements over the period of 1 a. Results showed that these ponds were hot spots of atmospheric  $CH_4$  due to agricultural activities and domestic sewage discharge. For comparison, the estimated diffusive  $CH_4$  emissions in the aquaculture, sewage, and irrigation ponds were 6.0, 3.0 times, and 2.2 times higher, respectively, than natural ponds[ $(0.54\pm0.49)$  mmol·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>] with less human activity. The  $CH_4$  varied temporally in the

收稿日期:2022-09-04 录用日期:2022-12-08

作者简介: 张欣悦(1998—), 女, 硕士研究生, 从事内陆水体温室气体排放研究。 E-mail: Z1078496525@163.com

<sup>\*</sup>通信作者:肖启涛 E-mail;qtxiao@niglas.ac.cn;徐向华 E-mail;xuxianghua@nuist.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(42271114,41801093);江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金项目(BK20220018);农业生态大数据分析与应用技术国家地方联合工程研究中心开放课题(AE202205);巴彦淖尔市科技计划项目(K202124)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (42271114,41801093); Provincial Science and Technology Innovative Program for Carbon Peak and Carbon Neutrality of Jiangsu Province, China (BK20220018); The Open Research Fund of National Engineering Research Center for Agro-Ecological Big Data Analysis & Application, Anhui University (AE202205); Science and Technology Planning Project of Bayan Nur, China (K202124)

four ponds; however, factors influencing the CH<sub>4</sub> variability varied between ponds. Generally, the temporal variability of CH<sub>4</sub> was associated with water temperature, dissolved oxygen concentration, and pollutant loadings (e.g., organic matter and nutrients). Overall, the mean dissolved CH<sub>4</sub> concentration in ponds of the agricultural catchment was  $(1.30\pm0.78)~\mu \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , and the estimated diffusive CH<sub>4</sub> emission was  $(1.64\pm1.50)~\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , suggesting that the ponds were a significant source of atmospheric CH<sub>4</sub>. Notably, peak CH<sub>4</sub> emissions occurred in aquaculture ponds, which should be further investigated in future research.

Keywords: agriculture watershed; pond; CH<sub>4</sub> concentration; CH<sub>4</sub> flux; influencing factor

池塘水体面积小、水深浅、人为干扰程度强烈,为 CH4的产生和排放提供有利条件,是大气 CH4的重要排放源[1-3]。据估计小型池塘 CH4的排放强度约为大型湖泊的几十倍[1,4-5]。Holgerson等[1]研究发现小型池塘约占全球湖泊和池塘表面积的8.6%,但却贡献了约40.6%的水体(湖泊和池塘)CH4排放。同时,全球湖泊水体 CH4排放估算的不确定性来源之一是小型池塘的作用[6-7]。因此,加强小型池塘 CH4排放研究对准确评估湖泊等淡水系统碳收支及其在全球碳循环中的贡献具有重要意义。

水域生态系统 CH4生物地球化学循环过程异常活跃,受人为活动影响显著<sup>14,8-91</sup>。但是,不同人为活动干扰强度下池塘 CH4产生及其排放是否存在差异还不得而知<sup>[10-12]</sup>,全球农业用地扩张伴随着大量小型池塘的产生<sup>[2]</sup>。其中,农业流域池塘具备蓄水、纳污、灌溉和养殖等多种功能,但不同类型池塘 CH4排放的综合研究鲜有报道。考虑到水体 CH4排放的高度异质性,忽略池塘类型和用途可能导致农业流域池塘 CH4排放估算存在较大的不确定性<sup>[3,9]</sup>。

我国是农业大国,池塘是我国典型的农业水利工 程,广泛分布于我国东部和南部地区,为农业发展做 出了巨大的贡献[13-14]。研究估计我国池塘等小型水 体总面积达3.2万 km²,且主要分布在长江流域等耕 地密集的区域[15]。但是,有关我国农业流域池塘CH4 等温室气体排放的研究鲜有报道。另外,水体CH4排 放与其外源负荷输入水平紧密相关[16-17]。同一农业 流域内不同用途的池塘因其外源负荷水平不同,其生 物化学循环过程及CH4排放也可能存在差异。巢湖 流域位于我国东部地区,流域内种植大量农作物,农 业面源污染严重,大量、广泛分布的池塘也是其最具 特色的人为景观[18]。烔炀河流域的自然地理和社会 经济特征在巢湖农村流域中极具代表性,因此,本研 究选取烔炀河流域内4种不同景观池塘(排污塘、灌 溉塘、养殖塘和自然塘),基于为期近1a的逐月调查 数据,探讨典型农业流域内不同用途和类型的池塘

CH4排放的差异及其关键影响因素,以期为准确评估小型池塘CH4排放量及估算其碳收支提供科学数据和参考依据。

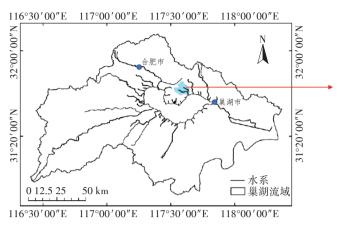
## 1 材料与方法

## 1.1 研究区域及采样池塘分布

烔炀河流域是位于巢湖北岸的农村小流域,流域 总面积约为89.3 km2(图1),属于典型亚热带气候,光照 充足,雨量丰沛,年平均气温16℃,年均降水量1120 mm。流域内土地利用类型包括耕地、林地和建设用 地等。由于农业活动的不断进行以及农村生活污水 的不断排出,流域内面源污染严重。结合烔炀河土地 利用类型,选择研究区内4种不同景观池塘(灌溉塘、 排污塘、养殖塘、自然塘、图1)进行调查,所选水体水 域面积在0.003~0.010 km<sup>2</sup>之间,平均水深范围为0.3~ 3.0 m,属于典型的小型景观水体。其中,灌溉塘面积 最大,为0.010 km<sup>2</sup>,养殖塘面积最小,为0.003 km<sup>2</sup>。 灌溉塘周边种植大量农作物,受农业活动影响最为显 著;排污塘周边为高密度人口聚集地,接收大量的生 活污水;养殖塘分布着大量芦苇等水生植被,为虾蟹 等生长提供栖息地;自然塘则远离村庄,周边以天然 林地为主,受人为干扰相对较小。

### 1.2 水样采集和 CH<sub>4</sub>分析

池塘等小型水体水-气界面 CH4交换通量的估算主要采用扩散模型法和静态箱法等[1-3]。为获取水体 CH4溶存浓度,本研究采用国际上常用的扩散模型法估算池塘水-气界面 CH4通量[1.6],即野外采集水样分析 CH4溶存浓度,结合水-气界面扩散模型法估算 CH4通量。在2020年9月至2021年9月对流域内4种不同景观池塘进行为期1 a 的采样,采样频率为每月一次,每月下旬进行采样。在每个池塘采集水样用于 CH4溶存浓度分析,采集水样时,保证水面没有扰动,用 20 mL针筒抽取表层 20 cm处的水样,并注意避免气泡产生,然后将16 mL水样注入预置 2 g氯化钾、预先抽真空并注入高纯氮气(摩尔分数>99.999%)的 32 mL棕色玻璃瓶内[19-20]。针筒在采集水样前用待采水











拍摄人:刘臻婧 拍摄时间:2021年5月28日

#### 图 1 烔炀河流域地理位置以及采样池塘

Figure 1 Geographical location of the Tongyang River catchment and the sampled ponds

样清洗 2~3 次,为保证气密性,在实验室内将每个棕色瓶用丁基胶塞密封瓶口,并用铝盖压接,在野外水样采集完成后用密封胶密封针孔。采样结束后,将装有水样、密闭良好的棕色瓶立即倒置放入冷藏箱中,运回实验室进行处理分析。

水样运回实验室后将水样剧烈振荡 5 min, 待  $CH_4$ 气体在玻璃瓶中的气相(顶空部分)和液相(剩余液体)达到动态平衡,使用带有三通阀的注射器从瓶中抽取 5 mL气体,再通过气相色谱仪测量其浓度。水体  $CH_4$ 溶存浓度( $c_{CH_4}$ ,  $\mu$ mol·L<sup>-1</sup>)通过顶空平衡法计算,公式如下[21]:

$$c_{\text{CH}_4} = \left(p_1 \times K_e\right) + \left(\frac{HS}{S} \times \frac{p_1 - p_0}{V_m}\right) \tag{1}$$

式中: $p_0$ 、 $p_1$ 分别为高纯氮气中CH<sub>4</sub>分压以及振荡平衡后混合气体中的分压,Pa;HS为采样瓶气相体积,mL;S为采样瓶中液相体积,mL; $V_m$ 为 $CH_4$ 气体的摩尔体积; $K_c$ 为平衡时 $CH_4$ 气体的溶解度, $mol \cdot L^{-1} \cdot Pa^{-1}$ ,计算公式参考 $Wanninkhoff^{22}$ 的研究。

基于野外采样获取的水体溶存 $CH_4$ 浓度,利用经典的水-气界面气体扩散模型法计算池塘水体水-气界面的 $CH_4$ 扩散通量 $(F_m, mmol \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$ ,计算公式为[23]:

$$F_{\rm m} = k \times (c_{\rm CH_4} - d_{\rm ep}) \tag{2}$$

式中:k为水-气界面  $CH_4$ 气体的传输系数, $m \cdot d^{-1}$ ; $c_{CH_4}$ 为基于公式(1)计算得到的  $CH_4$ 浓度, $\mu$ mol· $L^{-1}$ ; $d_{eq}$ 为特定温度下池塘表层水  $CH_4$ 气体与大气  $CH_4$ 达到平衡的浓度, $\mu$ mol· $L^{-1}$ ,在野外采样时,用针筒抽取水面上方空气,装入铝箔采样袋中密封保存,用气相色谱仪分析其气袋中大气样品  $CH_4$ 浓度( $C_a$ ),用于  $d_{eq}$ 

的计算:

$$d_{\rm eq} = C_a \times K_e \tag{3}$$

观测数据表明烔炀河流域在大部分情况下处于低风速( $<3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )环境,根据模型方程的适用性,k值计算公式为 $|^{123}$ :

$$k = 0.24 \times \left(2.07 + 0.215 U_{10}^{1.7}\right) \left(\frac{S_{c}}{S_{c600}}\right)^{-n}$$
 (4)

式中: $U_{10}$ 为10 m高度处的风速, $m \cdot s^{-1}$ ,本研究根据烔炀河流域当地气象站观测的风速计算得到 $U_{10}^{[24]}$ ;n为与风速相关的系数,当 $U_{10}>3.7 m \cdot s^{-1}$ ,n=0.5,当 $U_{10}<3.7 m \cdot s^{-1}$ ,n=2/3。 $S_c$ 为无量纲 $CH_4$ 气体的施密特数,通过水温计算得到; $S_{c600}$ 为20 C时 $CH_4$ 的施密特数。 $F_m>0$ 表示水体溶存 $CH_4$ 浓度处于饱和状态(即大于平衡浓度),此时水体向大气释放 $CH_4$ 。

## 1.3 环境变量获取

在野外采样中,采用YSI 6600多参数水质监测仪原位测量池塘水体的水温、溶解氧(DO)、pH值等。气温、降雨量来源于烔炀河流域当地自动气象观测站。另外,每次采样时,使用有机玻璃采水器采集表层500 mL水样用于营养盐浓度分析,原水样用于测定总氮(TN)、总磷(TP)浓度,TN和TP测定采用国家标准方法(GB/T 11894—1989、GB/T 11893—1989)。水样经GF/F玻璃纤维膜过滤后用于测定铵态氮(NH‡-N)和硝态氮(NOȝ-N),NH‡-N浓度测定采用纳氏试剂光度法,NOȝ-N浓度测定通过流动分析仪分析得到,同时滤后水样通过总有机碳分析仪测定溶解性有机碳(DOC)浓度。化学需氧量(COD)使用重铬酸钾法测定。

## 1.4 数据分析

将实测的数据分景观池塘类型(自然塘、灌溉塘、

排污塘、养殖塘)、分季节(3—5月为春季、6—8月为夏季、9—11月为秋季、12月至次年2月为冬季)进行分析。使用 SPSS 22.0中的相关分析(Pearson correlations)方法分析  $CH_4$ 浓度及其排放通量与水体物理化学参数之间的相关系数,采用单因素方差分析(Oneway ANOVA)方法分析不同池塘之间  $CH_4$ 浓度、通量和水体理化指标的统计显著性差异,P<0.05为显著,P<0.01为极显著。

## 2 结果与分析

## 2.1 环境变量特征

烔炀河流域气温与降雨量呈现极为明显的季节变化特征(图 2a)。春、夏、秋、冬四季平均气温分别为 19.0、29.9、22.4、8.7℃,夏季气温显著(P<0.05)高于冬季气温。流域降雨同样具有季节变化特征,夏季降雨量显著(P<0.05)偏高。4种景观池塘DO浓度呈

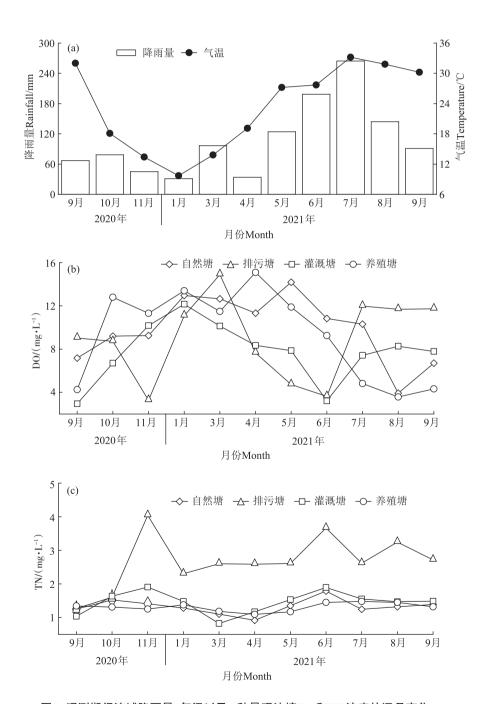


图 2 观测期间流域降雨量、气温以及 4 种景观池塘  $\mathrm{DO}$  和  $\mathrm{TN}$  浓度的逐月变化

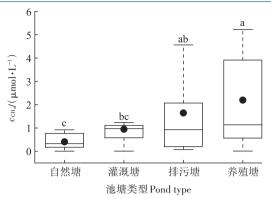
Figure 2 Monthly variations of rainfall, temperature, DO, and TN concentration in the four ponds during the sampling period

现不同季节变化特征(图 2b),自然塘、灌溉塘和养殖 塘DO浓度具有季节性差异(P<0.05),夏季和秋季较 低,冬季最高。排污塘和养殖塘DO浓度季节变化不 显著(P>0.05)。另外,逐月观测数据表明4种景观池 塘TN也呈现不同季节变化特征(图2c),自然塘、排污 塘和灌溉塘TN浓度季节变化趋势均不显著(P>0.05), 但养殖塘TN具有显著的季节变化特征,夏季TN显著 (P<0.05)高于其他3个季节。

不同池塘之间关键环境参数呈现出明显差异(表 1)。水温与气温变化高度相似 $(R^2=0.94, P<0.01)$ ,均 呈现出显著的时间变化特征,但4个采样塘水温之间 无显著性差异(P>0.05),年均水温为22.5 ℃。自然塘 的 DO 浓度最高(9.86 mg·L<sup>-1</sup>),但 COD 浓度显著(P< 0.05) 低于其他类型池塘。统计分析表明排污塘 COD、NHI-N、TN和TP浓度均显著(P<0.05)高于其他 类型景观池塘。总体上,排污塘营养盐负荷最高,灌 溉塘和养殖塘次之,自然塘最低。

## 2.2 CH<sub>4</sub>浓度的空间变化

4种不同景观池塘的CH4浓度差异见图3。自然 塘、灌溉塘、排污塘以及养殖塘CH4浓度均值分别为



不同字母表示不同池塘间差异性显著(P<0.05) Different letters indicate significant differences among different ponds at P<0.05

#### 图3 不同池塘CH<sub>4</sub>浓度

Figure 3 CH<sub>4</sub> concentrations in different ponds

 $(0.41\pm0.29)$ ,  $(0.95\pm0.56)$ ,  $(1.65\pm1.80)$ ,  $(2.20\pm1.83)$  $\mu$ mol·L<sup>-1</sup>。其中,自然塘CH<sub>4</sub>浓度显著(P<0.05)低于 排污塘和养殖塘,但与灌溉塘之间无显著差异(P> 0.05)。此外,排污塘CH,浓度与养殖塘也无显著差异 (P>0.05)。总体上,养殖塘CH4浓度最高。

#### 表 1 观测期间 4 种不同类型水体基本理化参数特征

Table 1 Physicochemical parameters in the four ponds during the observation period

池塘类型 Pond type	水深 Water depth/m	面积 Area/km²	水温 Water temperature/ ℃	DO/ (mg•L <sup>-1</sup> )	COD/ (mg•L <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> -N/ (mg•L <sup>-1</sup> )	$NH_4^*-N/$ $(mg \cdot L^{-1})$	TN/ (mg·L <sup>-1</sup> )	TP/ (mg•L <sup>-1</sup> )
自然塘	2.0~3.0	0.004	22.62±8.27a	9.86±3.04a	3.36±0.78c	0.46±0.19a	0.29±0.09b	1.35±0.25b	0.07±0.04b
排污塘	0.5~1.0	0.007	22.43±9.99a	8.94±3.80a	6.84±1.07a	0.67±0.21a	$0.68 \pm 0.48 a$	2.89±1.13a	0.35±0.25a
灌溉塘	1.0~2.0	0.010	22.90±9.51a	7.73±2.77a	$4.65 \pm 1.05 \mathrm{b}$	0.56±0.33a	$0.33 \pm 0.15 \mathrm{b}$	$1.45 \pm 0.35 \mathrm{b}$	$0.08 \pm 0.03 \mathrm{b}$
养殖塘	0.3~0.5	0.003	22.03±8.72a	9.29±4.25a	$4.64 \pm 0.93 \mathrm{b}$	0.48±0.15a	$0.39 \pm 0.12 \mathrm{b}$	1.33±0.12b	$0.07 \pm 0.04 \mathrm{b}$

注:表格中的数据为平均值±标准偏差,不同字母表示不同池塘达P<0.05差异性显著水平。

Note: Data in the table are mean ± standard deviation. Different letters indicate significant differences of different ponds with P<0.05.

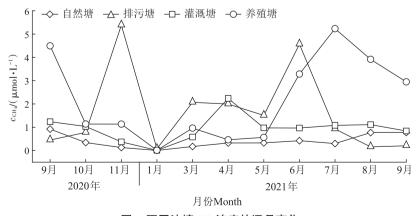


图 4 不同池塘 CH4浓度的逐月变化

Figure 4 Monthly CH<sub>4</sub> concentrations in different ponds

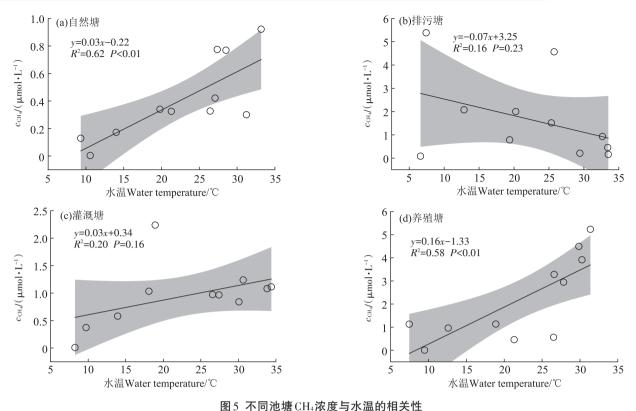


Figure 5 Correlations between CH<sub>4</sub> concentration and water temperature in different ponds

## 2.3 CH<sub>4</sub>浓度的时间变化

本研究中不同景观池塘 CH4浓度呈现不同季节变化特征(图4)。自然塘 CH4浓度具有暖季高冷季低的特征,最高值出现在2020年9月(0.920 µmol·L<sup>-1</sup>),最低值出现在2021年1月(0.003 µmol·L<sup>-1</sup>)。值得注意的是,排污塘的 CH4浓度出现了两个峰值。灌溉塘春、夏、秋、冬4个季节的平均 CH4浓度分别为1.260、1.050、0.870、0.008 µmol·L<sup>-1</sup>,冬季 CH4浓度显著(P<0.05)低于春季和夏季。养殖塘 CH4浓度具有显著的季节变化特征,表现为夏季>秋季>春季>冬季。

### 2.4 CH<sub>4</sub>浓度的影响因子

水温是影响水体  $CH_4$ 浓度变化的重要因子。图 5 为 4 个景观池塘  $CH_4$ 浓度与水温的相关性。结果表明,自然塘和养殖塘水温与  $CH_4$ 浓度呈现显著正相关关系,分别控制 62% ( $R^2$ =0.62,P<0.01)和 58% ( $R^2$ =0.58,P<0.01)的  $CH_4$ 浓度变化。但对于营养盐负荷较高的排污塘和灌溉塘, $CH_4$ 浓度与水温则无显著相关性(排污塘: $R^2$ =0.16,P=0.23;灌溉塘: $R^2$ =0.20,P=0.16)。

水体CH<sub>4</sub>主要是在厌氧环境下有机质降解产生的,一般与DO关系密切。图6为4个景观池塘CH<sub>4</sub>浓

度与DO的相关性。结果表明,自然塘、排污塘以及养殖塘DO与CH<sub>4</sub>浓度呈现显著的负相关关系,分别控制 $60\%(R^2=0.60,P<0.01)$ 、 $49\%(R^2=0.49,P<0.01)$ 和 $82\%(R^2=0.82,P<0.01)$ 的 CH<sub>4</sub>浓度变化。但是,灌溉塘 CH<sub>4</sub>浓度与DO无显著相关性( $R^2=0.21,P=0.15$ )。

水体CH4的产生是一个动态、复杂的过程,受到 诸多环境因子的调控。图7为不同景观池塘CH4浓度 与TN浓度的相关性。结果表明,排污塘和养殖塘 CH4浓度与TN呈现显著的正相关关系(排污塘: R2= 0.51, P<0.05; 养殖塘: R<sup>2</sup>=0.52, P<0.05), 考虑到池塘 CH4产生和排放主要受有机质的影响,CH4与TN的正 相关关系表明TN可间接影响CH4的动态变化。但自 然塘和灌溉塘CH4浓度均与TN无显著(P>0.05)相关 性。此外,统计分析(表2)也发现自然塘CH4浓度与COD 和NH4-N呈显著正相关,排污塘CH4浓度与NO3-N和 NHi-N、TN呈显著正相关,养殖塘CH4浓度与NOi-N 呈显著正相关。同时,统计分析表明本研究中4种不 同景观池塘 CH4浓度变化均与 DOC 浓度无显著相 关性。此外,整合所有数据分析发现,该流域池塘水 体 CH<sub>4</sub>也与 DO 浓度 (R<sup>2</sup>=0.38, P<0.05) 和 NH<sub>4</sub>-N 浓度  $(R^2=0.17, P<0.05)$  显著相关。

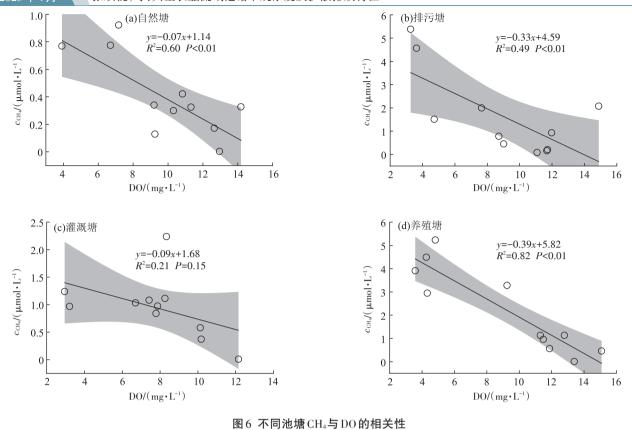


Figure 6 Correlations between CH<sub>4</sub> concentration and DO in different ponds

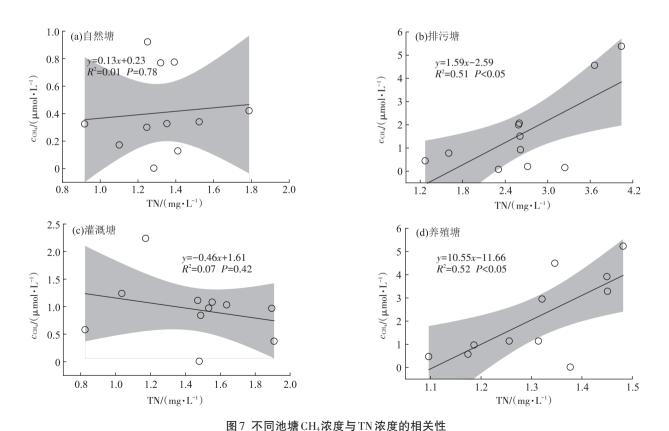


Figure 7 Correlations between CH<sub>4</sub> and TN concentrations in different ponds

938 农业环境科学学报 第42卷第4期

#### 表 2 CH<sub>4</sub>浓度与水体理化指标的相关性

Table 2 Correlations between CH<sub>4</sub> concentration and water environmental factors

池塘类型 Pond type	水温 Water temperature/℃	DO/ (mg•L <sup>-1</sup> )	COD/ (mg·L <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> -N/ (mg·L <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> -N/ (mg•L <sup>-1</sup> )	TN/ (mg•L <sup>-1</sup> )	TP/ (mg•L <sup>-1</sup> )	DOC/ (mg·L <sup>-1</sup> )
自然塘	0.79**	-0.77**	0.72*	0.19	0.69*	0.03	0.09	0.20
排污塘	-0.40	-0.70**	-0.19	0.61*	0.59*	0.71*	0.07	0.21
灌溉塘	0.45	-0.46	-0.11	-0.05	-0.20	-0.27	0.07	0.19
养殖塘	0.76**	-0.91**	0.52	0.74*	0.03	0.72*	0.50	0.22

注:\*\*表示相关性在0.01水平上显著;\*表示相关性在0.05水平上显著(单尾检测)。

Note: \*\* indicates significant correlation at 0.01 level; \* indicates significant correlation at 0.05 level(one-tailed test).

## 2.5 CH4扩散通量时空变化特征

REAL

基于野外实测数据,结合水-气界面扩散模型计 算得到本研究中4种景观池塘CH4扩散通量。结果表 明,烔炀河流域4种景观池塘均是大气CH4的排放源, 自然塘、灌溉塘、排污塘以及养殖塘 CH4扩散排放通 量分别为(0.54±0.49)、(1.16±0.87)、(1.62±1.59)、 (3.23±4.09) mmol·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>。养殖池塘 CH<sub>4</sub>扩散通量 最高,显著(P<0.05)高于自然池塘和灌溉池塘的CH4 扩散通量,与CH<sub>4</sub>溶存浓度变化趋势一致。另外,在 公式(3)中用于计算 $CH_4$ 扩散通量的 $d_{eq}$ 一般小于 0.003 μmol·L⁻¹,且用于通量计算的风速来自采样期 间气象站实时观测数据,4种景观塘的CH4扩散通量 时间变化特征也与溶存浓度一致(自然塘: $R^2$ =0.68, P<0.01;灌溉塘 R<sup>2</sup>=0.78, P<0.01;排污塘 R<sup>2</sup>=0.74, P< 0.01; 养殖塘  $R^2$ =0.78, P<0.01), 说明本研究中4种小 型池塘水-气界面CH4扩散通量主要受CH4溶存浓度 驱动,与已有研究相一致[1,4]。综合4个不同景观池塘 逐月调查数据, 烔炀河流域池塘年均 CH4 扩散通量为  $(1.64\pm1.50) \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 

## 3 讨论

#### 3.1 不同景观池塘 CH4浓度及其排放强度对比分析

本研究发现 CH<sub>4</sub>溶存浓度及其扩散排放在4种不同景观池塘之间呈现显著差异。总体上,自然塘因受人为活动影响程度小,碳氮负荷相对较低(表1),具有最低的 CH<sub>4</sub>浓度和扩散通量<sup>[25-27]</sup>。养殖塘具有最高的 CH<sub>4</sub>浓度和扩散通量,其 CH<sub>4</sub>排放量是自然塘的6倍。养殖塘接纳含有大量碳、氮的饲料及其他物质的投入,有机质含量高,为 CH<sub>4</sub>的产生提供了有利条件<sup>[8,10,28]</sup>,进而成为大气 CH<sub>4</sub>的显著排放源<sup>[29]</sup>。同时,养殖塘水深较浅(表1),有利于水底产生的 CH<sub>4</sub>输送到水表<sup>[30-31]</sup>,增加水体 CH<sub>4</sub>溶存浓度及其扩散排放。此外,野外采样发现养殖塘分布着大量水生植被(图

1),可为CH<sub>4</sub>的产生提供直接的有机碳源等,直接促进CH<sub>4</sub>的产生和排放<sup>[8,32]</sup>。流域内人为活动干扰等导致养殖塘成为大气CH<sub>4</sub>的热点排放区域,其CH<sub>4</sub>扩散排放量远高于自然塘。

受流域农业活动和居民污水排放影响强烈的灌 溉塘和排污塘也具有较高的CH4浓度和扩散排放(图 3),灌溉塘和排污塘的CH4扩散排放分别是自然塘的 2.2 倍和3.0 倍。由于农田排水、淋溶、径流和土壤侵 蚀,大量外源负荷进入到灌溉塘中,为微生物提供有 机底物进而刺激CH4的产生,导致灌溉塘CH4浓度及 其排放通量显著升高[16,33-34]。同时,随着农业化肥的 施用量增加,大量的外源负荷进入水体,进而可能影 响水体 CH4的产生和排放[25,35]。排污塘水体交换能力 差,有机质等营养物质丰富,较高的氮磷负荷进一步 刺激水体生物代谢活动,导致CH4的大量排放[36-37]。 同时,生活污水输入可直接增加外源CH4输入,提高 CH4浓度和排放通量[8,34]。值得注意的是,表征有机物 污染的COD在排污塘最高(表1)。因此,流域内农业 活动持续进行以及居民污水的排放,大量陆源有机质 进入池塘,丰富的外源负荷补给为池塘等水体CH4产 生提供更多可利用底物,提升水体CH4浓度及其排放 潜力[38-39]。

不同池塘 CH<sub>4</sub>浓度和扩散通量的差异表明池塘类型是不可忽视的影响因素。全球数据表明,湖泊水体 CH<sub>4</sub>浓度和排放量与其面积呈现显著负相关关系<sup>[1,40]</sup>,池塘水体因其面积极小,具有较高 CH<sub>4</sub>排放量<sup>[3]</sup>。本研究表明,不同类型池塘 CH<sub>4</sub>浓度和排放量差异显著(图3)。其中,自然塘外源负荷相对较低,其 CH<sub>4</sub>浓度和排放量低于全球同等面积池塘的均值,但其他3种类型池塘则显著高于全球均值<sup>[1]</sup>。瑞典农业流域不同土地利用类型/用途小型池塘的 CH<sub>4</sub>年均排放量差异极大,变化范围为 0.02~7.59 mmol·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>,且主要受外源碳氮负荷驱动<sup>[3]</sup>。综上,人为活动

干扰强度是导致农业流域池塘等水体 CH4排放强度 出现差异的主要原因。

## 3.2 池塘 CH4浓度变化的影响因素

本研究野外连续采样调查表明,自然塘和养殖塘 CH4浓度均有明显的时间变化(图4)。水体CH4动态 变化特征是生物地球化学及其他环境因素综合作用 的结果[41-42]。水温是重要的水体物理参数,水体CH4 的产生和排放对水温的依赖性较强,温度的变化可导 致水体 CH4 发生相应的变化[4,43]。本研究统计分析结 果表明水温对不同景观池塘CH。浓度影响程度不同 (图5),其中,水温分别控制自然塘和养殖塘62%和 58%的CH4浓度变化。自然塘受人为活动影响程度 低,因此水温是其CH4浓度时间变化的关键驱动因 子[4]。养殖塘CH4浓度与水温具有显著正相关关系, 这表明水产养殖中的水热条件显著影响 CH₄的产生 和排放。同时,植被生物量是水体CH4动态变化的关 键影响因子,野外调查发现养殖塘分布着大量植被, 因此温度可通过影响植被生长间接影响 CH4变化[42]。 但是,排污塘和灌溉塘CH4浓度与水温无显著相关性 (P>0.05),考虑到排污塘和灌溉塘接纳了大量外源负 荷,温度对CH4动态变化的影响可能受到其他因素的 制约。

相关研究表明,外源负荷输入等可改变温度对水 体CH4产生和排放的影响[40-41]。排污塘和灌溉塘受人 为活动影响强烈,其有机质和营养盐等负荷也高于自 然塘(表1)。同时,排污塘CH4浓度与NO3-N、NH4-N 和TN呈现显著正相关关系(表2)。考虑到水体CH4 产生和排放主要与有机质含量相关,表明大量外源氮 负荷输送可显著促进有机质降解,进而刺激水体CH4 产生和排放,与已有研究相一致[25,44]。本研究中排污 塘和灌溉塘营养盐负荷要普遍高于城市池塘等其他 受人为活动影响强烈的小型水体图。排污塘易受到 人为活动干扰,生活污水排放至池塘导致水体受到严 重污染,直接影响池塘中碳氮等元素的循环过程,致 使其CH4变化对营养盐也较为敏感<sup>[8,45]</sup>。值得注意的 是,本研究发现灌溉塘CH,浓度与水温均无显著相关 性,这可能是因为随着农业化肥的不断使用,大量的 碳氮通过淋溶径流和农业灌排等方式进入灌溉塘,改 变 CH4的产生和循环过程[33]。综上,温度并不是池塘 等小型水体CH4动态变化的唯一调控因子,在评估全 球变暖对池塘CH4排放影响时需要考虑多因子的综 合调控效应。

研究表明池塘CH4浓度与溶解氧具有显著负相

关关系(图6)。DO浓度可很好地指示自然塘、排污 塘、养殖塘CH4浓度的变化,其分别控制自然塘、排污 塘、养殖塘 CH4浓度 60%、49%、82% 的变化。水体 CH4产生和排放一般需要厌氧环境,低溶解氧有利于 CH4生成和排放,因此本研究中池塘CH4浓度与DO呈 显著负相关关系[25,46]。此外,高营养盐负荷不仅通过 刺激微生物活动和增加氧气消耗来促进CH4的产生, 其引起的耗氧量增加也可以抑制 CH。的氧化消耗,致 使水体保持较高CH4溶存浓度[4,25]。例如,本研究中 排污塘的营养盐负荷最高,但其DO浓度相对偏低 (表1)。DO不仅是衡量水环境的重要指标,也能指 示水体生物化学循环过程[47]。因此,DO可作为重要 环境指标指示生物化学过程对水体 CH4产生和排放 的影响[25,45]。

小型池塘水体较浅,水域面积与周长比值高,单 位面积接纳的陆源碳更多,沉积物有机质代谢产生的 CH4也更容易输送到水表并排放到大气中[39]。同时, 小型水体沉积物碳累积速率高,也有利于微生物分解 产生 CH4[8,27]。 野外实测数据表明,本研究中灌溉塘 水体沉积物有机质含量可达18 g·kg-1,远高于其他流 域水体沉积物有机质含量[48]。自然塘 CH4排放量最 低,观测数据表明其水体DOC浓度(6.17 mg·L<sup>-1</sup>)也显 著(P<0.05)低于排污塘(12.08 mg·L-1)、养殖塘(9.36 mg·L<sup>-1</sup>)和灌溉塘(8.91 mg·L<sup>-1</sup>)。因此,沉积物及水 体有机碳的矿化速率可能是CH。动态变化的主要调 控因子。同时,该流域处于亚热带季风区,降雨频繁, 降雨一方面可携带营养盐等外源负荷输入池塘,刺激 CH4产生和排放,另一方面可将农业流域内产生的 CH4输入到池塘,直接促进CH4的排放[25]。因此,池塘 水体作为农业流域的组成部分,其CH4来源、产生和 排放过程具有复杂性,进一步致使不同景观池塘CH4 排放的季节变化特征不同。

## 3.3 农业流域不同景观池塘 CH4排放综合评估

小型池塘是大气CH4重要排放源,也是目前全球 CH4排放研究重点关注的对象[1,7]。本研究中农业流 域4个池塘CH4扩散通量平均值为(1.64±1.16) mmol· m-2·d-1, 是全球同等面积小型池塘 CH4排放 (0.65 mmol·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>)的2.5倍<sup>[1]</sup>,是全球平均湖泊CH<sub>4</sub>扩散排 放通量的近11倍[49]。相关研究表明富营养化湖泊是 显著的CH4排放源[50],本研究中池塘CH4扩散排放通 量分别是周边太湖和巢湖 CH4排放通量 16 倍和 7 倍 多[4,51]。因此,在众多CH4排放源中,农业流域池塘等 水体CH4扩散排放等不容忽视。

农村流域水体生源要素积累是影响池塘水体 CH4产生和排放增强的重要因素。本研究中养殖塘、 排污塘和灌溉塘因大量碳氮等牛源要素累积,其CH4 浓度分别是自然塘的5.4、4.0倍和2.3倍,对应的CH4 扩散通量分别为自然塘的6.0、3.0倍和2.2倍。其中, 受农业施肥以及农村生活污水排放影响,灌溉塘 (1.16 mmol·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>)和排污塘(1.62 mmol·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>) CH4扩散排放与城市高污染负荷景观水体排放量处 于相当水平<sup>[8]</sup>。基于1 a 的监测结果,不同池塘 CH4年 排放量分别为31.54(自然塘)、72.54(灌溉塘)、 126.16 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>(排污塘)和170.32 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>(养 殖塘),其CH4排放潜力低于我国稻田CH4排放平均 水平,但与某些湿地处于相同水平[52]。前期研究表明 包括池塘在内的我国湖库湿地 CH4排放总量为 0.46 Tg·a<sup>-1[52]</sup>,结合我国池塘面积统计结果[15],估算得到我 国池塘水体CH4扩散排放量可达到0.31 Tg·a<sup>-1</sup>,是不 可忽视的CH4自然排放源。尤其值得注意的是,该研 究区域内养殖塘是大气 CH4热点排放区域, CH4扩散 排放高达3.23 mmol·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>,需要重点关注。渔业统 计年鉴表明,2020年我国池塘养殖面积为2.625×106 hm<sup>2[53]</sup>,据此估算得到我国养殖塘CH4排放总量为 0.50 Tg·a<sup>-1</sup>。另外,在"退养还湖"政策影响下,湖泊养 殖面积不断下降[54],池塘养殖将会成为我国主要淡 水养殖方式,养殖规模和面积会逐年递增。因此,为 准确估算我国内陆水体对大气CH4收支的影响,需要 重点关注长江中下游等区域养殖塘 CH4的动态变化 趋势。

农业流域水塘具备蓄水、纳污、灌溉和养殖等多种功能,本研究结果表明不同用途/类型池塘 CH4排放差距显著,忽略池塘用途可能导致农业流域池塘 CH4排放估算存在较大不确定性。另外,考虑到水体 CH4排放空间异质性极大[1.4.9],为准确量化不同景观类型池塘 CH4排放的差异,未来还要进行更多的野外调查。此外,已有研究表明,小型池塘 CH4扩散排放在塘内不同点位间变化极小,但在受人为活动干扰后(例如排水和饵料投放等),其存在一定的空间变化[55]。因此,尽管本研究中池塘面积极小(表1),但在综合评估池塘水体 CH4扩散排放时,塘内空间变化也需考虑。

## 4 结论

(1)为期1a的逐月野外调查结果表明,烔炀河农村流域小型池塘是大气CH<sub>4</sub>的显著排放源,年均CH<sub>4</sub>溶存浓度为(1.30±0.78) μmol·L<sup>-1</sup>, CH<sub>4</sub>扩散排放通量

为 $(1.64\pm1.50)$  mmol·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>。不同池塘 CH<sub>4</sub>年排放量分别为31.54(自然塘)、72.54(灌溉塘)、126.16 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>(排污塘)和170.32 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>(养殖塘),其CH<sub>4</sub>排放潜力与湿地 CH<sub>4</sub>排放处于同一数量级。

(2)农业活动以及生活污水排放致使流域内小型池塘成为大气  $CH_4$ 热点排放区域,相比于自然塘[ $CH_4$ 浓度:  $(0.41\pm0.29)~\mu mol \cdot L^{-1}$ ;  $CH_4$ 通量:  $(0.54\pm0.49)~\mu mol \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ],养殖塘、排污塘和灌溉塘  $CH_4$ 浓度分别是其5.4、4.0倍和2.3倍,对应的  $CH_4$ 扩散通量分别是其6.0、3.0倍和2.2倍。

(3)农村流域不同景观池塘 CH<sub>4</sub>浓度均表现出显著的时间变化特征,但因受外源碳氮等生源要素累积以及人为活动干扰等影响,不同景观池塘 CH<sub>4</sub>时间动态变化的影响因素有所不同。本研究结果表明,忽略池塘用途/类型可能导致农业流域池塘 CH<sub>4</sub>排放估算存在较大的不确定性。

#### 参考文献:

- [1] HOLGERSON M A, RAYMOND P A. Large contribution to inland water CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from very small ponds[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(3):222–226.
- [2] OLLIVIER Q R, MAHER D T, PITFIELD C, et al. Punching above their weight; large release of greenhouse gases from small agricultural dams[J]. Global Change Biology, 2019, 25(2):721-732.
- [3] PEACOCK M, AUDET J, BASTVIKEN D, et al. Small artificial waterbodies are widespread and persistent emitters of methane and carbon dioxide[J]. Global Change Biology, 2021, 27(20):5109-5123.
- [4] XIAO Q, ZHANG M, HU Z, et al. Spatial variations of methane emission in a large shallow eutrophic lake in subtropical climate[J]. *Journal of Geophysical Research–Biogeosciences*, 2017, 122(7):1597–1614.
- [5] HERRERO O S, ROMERO G C, CASPER P, et al. Methane emissions from contrasting urban freshwaters: rates, drivers, and a whole-city footprint[J]. Global Change Biology, 2019, 25(12):4234-4243.
- [6] HOLGERSON M A. Drivers of carbon dioxide and methane supersaturation in small, temporary ponds[J]. *Biogeochemistry*, 2015, 124 (1/2/3):305-318.
- [7] ROSENTRETER J A, BORGES A V, DEEMER B R, et al. Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources[J]. *Nature Geoscience*, 2021, 14(4):225-230.
- [8] 黄婷, 王晓锋, 刘婷婷, 等. 城市小型景观水体 CO<sub>2</sub>与 CH<sub>4</sub>排放特征及影响因素[J]. 生态学报, 2021, 41(15):6024-6037. HUANG T, WANG X F, LIU T T, et al. Spatiotemporal variations and influencing factors of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from urban small landscape waters[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(15):6024-6037.
- [9] YANG P, YANG H, SARDANDS J, et al. Large spatial variations in diffusive CH<sub>4</sub> fluxes from a subtropical coastal reservoir affected by sewage discharge in southeast China[J]. *Environmental Science & Tech*nology, 2020, 54(22):14192-14203.

- [10] 丁维新, 袁俊吉, 刘德燕, 等. 淡水养殖系统温室气体 CH4和 N2O 排放量研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4):749-761. DING W X, YUAN J J, LIU D Y, et al. CH4 and N2O emissions from freshwater aquaculture[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4):749-761.
- [11] LOGAN T J. Agricultural best management practices for water pollution control; current issues[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1993, 46(1/2/3/4):223-231.
- [12] 李玉凤, 刘红玉, 刘军志, 等. 农村多水塘系统景观结构对非点源污染中氮截留效应的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(11): 4999—5006. LI Y F, LIU H Y, LIU J Z, et al. Effect of different multipond network landscape structures on nitrogen retention over agricultural watersheds[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(11): 4999—5006
- [13] YIN C, SHAN B. Multipond systems: a sustainable way to control diffuse phosphorus pollution[J]. *AMBIO*, 2001, 30(6):369–375.
- [14] 李玉凤, 刘红玉, 皋鵬飞, 等. 农村多水塘系统水环境过程研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(9):2482-2489. LI Y F, LIU H Y, GAO P F, et al. Agricultural multi-pond systems and their hydrological processes: a review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(9):2482-2489.
- [15] LV M, WU S, MA M, et al. Small water bodies in China: spatial distribution and influencing factors[J]. Science China Earth Sciences, 2022, 65(8):1431-1448.
- [16] BORGES A V, DARCHAMBEAU F, LAMBERT T, et al. Effects of agricultural land use on fluvial carbon dioxide, methane and nitrous oxide concentrations in a large European river, the Meuse (Belgium)
  [J]. Science of the Total Environment, 2018, 610/611:342-355.
- [17] TANG W, XU Y J, MA Y, et al. Hot spot of CH<sub>4</sub> production and diffusive flux in rivers with high urbanization[J]. Water Research, 2021, 204:117624.
- [18] 李莹莹, 尤罗利, 陈永生, 等. 环巢湖地区多水塘景观时空格局演变特征及其驱动因素[J]. 生态学报, 2018, 38(17): 6280-6291. LI Y Y, YOU L L, CHEN Y S, et al. Spatial-temporal characteristics of multi-pond landscape change and their driving factors in the Chaohu basin, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(17): 6280-6291.
- [19] CRAWFORD J T, DORNBLASER M M, STANLEY E H, et al. Source limitation of carbon gas emissions in high-elevation mountain streams and lakes[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 120(5):952-964.
- [20] STRIEGL R G, KORTELAINEN P, CHANTON J P, et al. Carbon dioxide partial pressure and C<sup>13</sup> content of north temperate and boreal lakes at spring ice melt[J]. *Limnology and Oceanography*, 2001, 46 (4):941-945
- [21] International Hydropower Association (IHA). GHG measurement guidelines for freshwater reservoirs[M]. London: International Hydropower Association (IHA), 2010;72-78.
- [22] WANNINKHOF R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97 (C5):7373-7382.
- [23] COLE J J, CARACO N F. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF<sub>6</sub>[J]. Lim-

- nology and Oceanography, 1998, 43(4):647-656.
- [24] 肖启涛. 太湖水-气界面温室气体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O)通量研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2014:18-19. XIAO Q T. Sudy on greenhouse gases(CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) fluxes of water-air interface in Lake Taihu[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2014:18-19.
- [25] XIAO Q, HU Z, HU C, et al. A highly agricultural river network in Jurong Reservoir watershed as significant CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> sources[J]. Science of the Total Environment, 2021, 769:144558.
- [26] 肖启涛, 廖远珊, 刘臻婧, 等. 藻型湖泊溶解有机碳特征及其对甲烷排放的影响[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2022, 14 (1):21-31. XIAO Q T, LIAO Y S, LIU Z J, et al. Characterictics of dissolved organic carbon in algal-dominated lake and its influence on methane emission[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2022, 14(1):21-31.
- [27] 杨平, 仝川. 淡水水生生态系统温室气体排放的主要途径及影响 因素研究进展[J]. 生态学报, 2015, 35(20):6868-6880. YANG P, TONG C. Emission paths and measurement methods for greenhouse gas fluxes from freshwater ecosystems: a review[J]. *Acta Ecologica Si*nica, 2015, 35(20):6868-6880.
- [28] YANG P, ZHANG Y, YANG H, et al. Ebullition was a major pathway of methane emissions from the aquaculture ponds in southeast China [J]. Water Research, 2020, 184:116176.
- [29] YUAN J, XIANG J, LIU D, et al. Rapid growth in greenhouse gas emissions from the adoption of industrial-scale aquaculture[J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9(4):318-322.
- [30] ENCINAS FERNÁNDEZ J, PEETERS F, HOFMANN H. On the methane paradox: transport from shallow water zones rather than in situ methanogenesis is the major source of CH<sub>4</sub> in the open surface water of lakes[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2016, 121(10):2717-2726.
- [31] VIZZA C, JONES S E, HART J A, et al. Pond methane dynamics, from microbial communities to ecosystem budget, during summer in Alaska[J]. *Limnology and Oceanography*, 2022, 67:450-467.
- [32] ZHANG M, XIAO Q, ZHANG Z, et al. Methane flux dynamics in a submerged aquatic vegetation zone in a subtropical lake[J]. Science of the Total Environment, 2019, 672:400-409.
- [33] WU S, LI S, ZOU Z, et al. High methane emissions largely attributed to ebullitive fluxes from a subtropical river draining a rice paddy watershed in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53 (7):3499-3507.
- [34] 刘臻婧, 肖启涛, 胡正华, 等. 太湖竺山湾甲烷扩散通量及其驱动机制[J]. 中国环境科学, 2022, 42(1):393-401. LIU Z J, XIAO Q T, HU Z H, et al. Methane diffusion flux and its driving factors in Zhushan Bay of Lake Taihu[J]. China Environmental Science, 2022, 42(1):393-401.
- [35] 胡敏杰, 任鵬, 黄佳芳, 等. 外源氮、硫添加对闽江河口湿地 CH4、CO2排放的短期影响[J]. 环境科学, 2016, 37(9): 3608-3615. HU M J, REN P, HUANG J F, et al. Short-term effects of nitrogen and sulfate addition on CH4 and CO2 emissions in the tidal marsh of Minjiang River estuary[J]. Environmental Science, 2016, 37(9): 3608-3615.

- [36] 商东耀, 肖启涛, 胡正华, 等. 富营养化湖区 CH4排放特征及其影响 因素[J]. 环境科学, 2018, 39(11):5227-5236. SHANG DY, XIAO QT, HUZH, et al. CH4 emissions characteristics and its influencing factors in an eutrophic lake[J]. Environmental Science, 2018, 39(11):5227-5236.
- [37] BRIGHAM B A, BIRD J A, JUHL A R, et al. Anthropogenic inputs from a coastal megacity are linked to greenhouse gas concentrations in the surrounding estuary[J]. *Limnology and Oceanography*, 2019, 64 (6):2497-2511.
- [38] 洪妍, 张逸飞, 杨平, 等. 闽江河口区文武砂水库水体溶存 CH<sub>4</sub>浓度时空变化特征[J]. 环境科学学报, 2022, 42(4):1-10. HONG Y, ZHANG Y F, YANG P, et al. Spatiotemporal variations in dissolved CH<sub>4</sub> concentration in Wenwusha Reservoir from Min River Estuary, southeast China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42 (4):1-10.
- [39] 肖启涛. 太湖 CH4通量的空间格局及影响因子分析[D]. 南京:南京信息工程大学, 2017: 38-45. XIAO Q T. Spatial pattern of CH4 flux and its impact factors analysis in Lake Taihu[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2017: 38-45.
- [40] RASILO T, PRAIRIE Y T, DEL GIORGIO P A. Large-scale patterns in summer diffusive CH<sub>4</sub> fluxes across boreal lakes, and contribution to diffusive C emissions[J]. Global Change Biology, 2015, 21 (3): 1124-1139.
- [41] 肖启涛, 胡正华, 张弥, 等. 水力调控对湖泊甲烷扩散通量的影响 [J]. 湖泊科学, 2021, 33(2):561-570. XIAO Q T, HU Z H, ZHANG M, et al. Effects of water diversion on methane diffusion flux across the water-air interface in lakes[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33 (2):561-570.
- [42] DAVIDSON T A, AUDET J, SVENNING J C, et al. Eutrophication effects on greenhouse gas fluxes from shallow lake mesocosms override those of climate warming[J]. Global Change Biology, 2015, 21 (12): 4449-4463.
- [43] YVON-DUROCHER G, ALLEN A P, BASTVIKEN D, et al. Methane fluxes show consistent temperature dependence across microbial to ecosystem scales[J]. *Nature*, 2014, 507(7493):488-491.
- [44] WANG X, HE Y, CHEN H, et al. CH<sub>4</sub> concentrations and fluxes in a subtropical metropolitan river network: watershed urbanization impacts and environmental controls[J]. Science of the Total Environment, 2018, 622:1079-1089.

- [45] HU B, WANG D, ZHOU J, et al. Greenhouse gases emission from the sewage draining rivers[J]. Science of the Total Environment, 2018, 612;1454-1462.
- [46] SCHRIER-UIJL A P, VERAART A J, LEFFELAAR P A, et al. Release of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> from lakes and drainage ditches in temperate wetlands[J]. *Biogeochemistry*, 2011, 102(1/2/3):265-279.
- [47] JANE S F, HANSEN G J A, KRAEMER B M, et al. Widespread deoxygenation of temperate lakes[J]. *Nature*, 2021, 594(7861):66–70.
- [48] ZHAO Y, XIA Y, KANA T M, et al. Seasonal variation and controlling factors of anaerobic ammonium oxidation in freshwater river sediments in the Taihu Lake region of China[J]. *Chemosphere*, 2013, 93 (9):2124-2131.
- [49] LI M, PENG C, ZHU Q, et al. The significant contribution of lake depth in regulating global lake diffusive methane emissions[J]. Water Research, 2020:115465.
- [50] BEAULIEU J J, DELSONTRO T, DOWNING J A. Eutrophication will increase methane emissions from lakes and impoundments during the 21st century[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1):1375.
- [51] ZHANG L, LIAO Q J H, GAO R, et al. Spatial variations in diffusive methane fluxes and the role of eutrophication in a subtropical shallow lake[J]. Science of the Total Environment, 2021, 759:143495.
- [52] CHEN H, ZHU Q, PENG C, et al. Methane emissions from rice paddies natural wetlands, lakes in China; synthesis new estimate[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(1):19-32.
- [53] 农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京:中国农业出版社, 2021:49-50. Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs. China fisheries statistics yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2021:49-50.
- [54] 杨井志成, 罗菊花, 陆莉蓉, 等. 东太湖围网拆除前后水生植被群落遥感监测及变化[J]. 湖泊科学, 2021, 33(2):507-517. YANG J Z C, LUO J H, LU L R, et al. Changes in aquatic vegetation communities based on satellite images before and after pen aquaculture removal in East Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(2):507-517
- [55] 王娇, 肖薇, 张秀芳, 等. 养殖塘 CH4排放特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2019, 40(12):5503-5514. WANG J, XIAO W, ZHANG X F, et al. Methane emission characteristics and its influencing factors over aquaculture ponds[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(12):5503-5514.

(责任编辑:叶飞)