

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.2
第41卷 第2期

目次

基于GAM模型分析中国典型区域网格化PM _{2.5} 长期变化影响因素	南洋, 张倩倩, 张碧辉 (499)
我国PCDD/Fs网格化大气排放清单	陈露露, 黄韬, 陈凯杰, 宋世杰, 高宏, 马建民 (510)
成都平原PM _{2.5} 中碳质组分时空分布特征与来源	史芳天, 罗彬, 张巍, 刘培川, 郝宇放, 杨文文, 谢绍东 (520)
南京江北新区冬季PM _{2.5} 中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析	邱晨晨, 于兴娜, 丁铖, 时政, 张瑞芳, 侯思宇, 侯新红 (529)
南京北郊四季PM _{2.5} 中有机物的污染特征及来源解析	李栩婕, 施晓雯, 马嫣, 郑军 (537)
长三角背景点夏季大气PM _{2.5} 中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析	薛国艳, 王格慧, 吴灿, 谢郁宁, 陈玉宝, 李杏茹, 王心培, 李大鹏, 张思, 葛双双, 丁志健 (554)
2017年秋季长春市PM _{2.5} 中多环芳烃的污染来源及健康风险评价	张艺璇, 曹芳, 郑涵, 张东东, 翟晓瑶, 范美益, 章炎麟 (564)
京津冀及周边区域PM _{2.5} 叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析	朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 王帅, 李亮, 王威, 王光, 刘冰, 王晓彦, 李健军 (574)
河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析	齐艳杰, 于世杰, 杨健, 尹沙沙, 程家合, 张瑞芹 (587)
河南省气溶胶光学特性的时空变化特征	张瑞芳, 于兴娜 (600)
黑炭气溶胶质谱仪(SP-AMS)分析春季PM _{2.5} 中水溶性有机气溶胶	黄雯倩, 陈彦彤, 李旭东, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲, 盖鑫磊 (609)
南京市黑炭气溶胶时间演变特征及其主要影响因素	杨晓旻, 施双双, 张晨, 王红磊, 王振彬, 朱彬 (620)
连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势	乔月珍, 陈凤, 李慧鹏, 赵秋月 (630)
挥发性有机物污染控制方案的运行费用效能比较	羌宁, 史天哲, 缪海超 (638)
西安市大气降水污染和沉降特征及其来源解析	丁铖, 于兴娜, 侯思宇 (647)
4种动物养殖场空气中抗生素耐药菌的生物多样性及群落结构	沙云菲, 孙兴滨, 辛文鹏, 高浩泽, 程首涛, 高敏, 王旭明 (656)
辽宁省2000~2030年机动车排放清单及情景分析	金嘉欣, 孙世达, 王芃, 林应超, 王婷, 吴琳, 魏宁, 常俊雨, 毛洪钧 (665)
国六柴油机DPF再生时VOCs排放特性	钱枫, 薛常鑫, 许小伟, 马东, 李朋, 祝能 (674)
南小河流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义	郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 刘亚平, 赵思吟 (682)
乐安河中下游重金属时空分布特征及风险评价	余杨, 吕雅宁, 王伟杰, 渠晓东, 刘聚涛, 温春云 (691)
温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系	朱利英, 陈媛媛, 刘静, 王亚炜, 王春荣, 魏源送, 张育新 (702)
新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化	宣文怡, 朱广伟, 黎云祥, 吴志旭, 郑文婷, 兰佳, 王裕成, 许海, 朱梦圆 (713)
环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估	宋佳伟, 徐刚, 张扬, 吕迎春 (728)
洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化	刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 倪兆奎, 王圣瑞 (734)
西安市降雪中DOM荧光特性和来源分析	杨毅, 韩丽媛, 刘焕武, 雷颖, 李兢, 徐会宁 (743)
透水砖铺装的设施构造对运行效果的影响	张佳炜, 刘勇, 金建荣, 李田 (750)
微米SiC/石墨烯复合物光催化降解罗丹明B	朱红庆, 杨兵, 魏世强, 杨静静, 张进忠 (756)
锰铁改性针簇莫来石对水中BPA和EE2的去除	周秋红, 龙天渝, 何靖, 郭劲松, 高俊敏 (763)
载钼磁性水热生物炭的制备及其除磷性能	宋小宝, 何世颖, 冯彦房, 花昀, 唐婉莹, 朱秋蓉, 薛利红, 杨林章 (773)
复合金属改性生物炭对水体中低浓度磷的吸附性能	孙婷婷, 高菲, 李莉, 黎睿, 董磊 (784)
磁性硅藻土负载纳米过氧化钙对水中磷酸盐吸附	徐楚天, 李大鹏, 张帅, 耿雪, 陈丽媛, 宋小君, 郭超然, 黄勇 (792)
污水厂尾水受纳河段沉积物磷形态及释放风险效应	汤宁, 李如忠, 王丰庆, 何瑞亮, 刘超 (801)
生物膜生态浮床对城市尾水净化特征分析	赵志瑞, 张佳瑶, 李铎, 李方红 (809)
磁凝凝对市政污水中抗生素抗性基因和重金属抗性基因的削减效能	于雯超, 郑利兵, 魏源送, 王哲晓, 张鹤清, 黄光华, 焦赞仪, 吴振军 (815)
四环素抗生素对污泥中四环素抗性基因丰度和表达水平的作用影响	阮晓慧, 钱雅洁, 薛罡, 高品 (823)
异养硝化细菌Pseudomonas aeruginosa YL的脱氮过程及N ₂ O产生特性	杨垒, 崔坤, 任勇翔, 郭淋凯, 张志昊, 肖倩, 陈宁, 汪旭晖 (831)
包埋厌氧氨氧化菌的环境因子影响特性及群落结构分析	王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (839)
包埋反硝化填料强化二级出水深度脱氮性能研究及中试应用	周亚坤, 杨宏, 王少伦, 何海超, 刘宗跃, 苏扬, 张辉 (849)
厌氧时间对间歇进水-间歇曝气的好氧颗粒污泥系统影响	张杰, 王玉颖, 李冬, 曹思雨, 李帅 (856)
除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺	李冬, 刘博, 王文琪, 张杰 (867)
桂西南地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价	王佛鹏, 肖乃川, 周浪, 虎瑞, 宋波 (876)
青藏高原表土重金属污染评价与来源解析	杨安, 王艺涵, 胡健, 刘小龙, 李军 (886)
黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析	莫雪, 陈斐杰, 游冲, 刘福德 (895)
管理措施对黄土高原油松人工林土壤水溶性碳氮及其三维荧光特征的影响	宋亚辉, 张娇阳, 刘鸿飞, 薛蕊, 李秧秧 (905)
生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响	周慧华, 袁旭音, 熊钰婷, 韩年, 叶宏萌, 陈耀祖 (914)
水热炭减少稻田氨挥发损失的效果与机制	余姗, 薛利红, 花昀, 李德天, 谢斐, 冯彦房, 孙庆业, 杨林章 (922)
接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化反硝化活性的影响及其微生物机制	刘猷, 王磊, 曹湛波, 段灏 (932)
基于漂浮箱法和扩散模型测定淡水养殖鱼塘甲烷排放通量的比较	胡涛, 黄健, 丁颖, 孙志荣, 徐梦凡, 刘树伟, 邹建文, 吴双 (941)
超高效液相色谱串联质谱法同时测定叶菜中13种抗生素	陈乾, 刘洋, 肖丽君, 邹德玉, 刘海学, 吴惠惠 (952)
青菜中镉的吸收和累积对硒的响应规律	余焱, 罗丽韵, 刘哲, 付平南, 李花粉 (962)
两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制	卞建林, 郭俊梅, 王学东, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 曹柳, 成永霞, 任战红, 王杰, 周小勇 (970)
可生物降解螯合剂GLDA强化三叶草修复镉污染土壤	贺玉龙, 余江, 谢世前, 李佩柔, 周宽, 何欢 (979)
我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析	穆虹宇, 庄重, 李彦明, 乔玉辉, 陈清, 熊静, 郭丽莉, 江荣凤, 李花粉 (986)
畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥过程中微生物群落演替及其与环境因子的关系	蔡涵冰, 冯雯雯, 董永华, 马中良, 曹慧锦, 孙俊松, 张保国 (997)
4种粪便堆肥过程中抗生素的降解特性	朱为静, 朱凤香, 王卫平, 洪春来, 姚燕来 (1005)

基于漂浮箱法和扩散模型法测定淡水养殖鱼塘甲烷排放通量的比较

胡涛¹, 黄健¹, 丁颖¹, 孙志荣¹, 徐梦凡¹, 刘树伟^{1,2}, 邹建文^{1,2}, 吴双^{1,2*}

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2. 江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心, 南京 210095)

摘要: 本研究以我国东南部地区淡水养殖鱼塘为研究对象, 于2017年9月到2018年8月采用漂浮箱法和扩散模型法同步原位观测其CH₄排放通量, 旨在明确运用两种不同方法观测CH₄的排放特征、排放强度及其驱动因子, 综合比较两种方法观测结果的差异性, 其中扩散模型法能够进一步量化扩散传输对CH₄排放通量的贡献。结果表明, 两种方法观测的CH₄排放通量有相似的季节变化特征, 即夏秋季排放高, 冬春季排放低。通过漂浮箱法观测淡水养殖鱼塘CH₄排放通量的变化范围为0.14~3.13 mg·(m²·h)⁻¹, 其年平均排放通量为(0.86±0.30) mg·(m²·h)⁻¹, 而由扩散模型法估算出鱼塘CH₄排放通量变化范围为0.04~1.41 mg·(m²·h)⁻¹, 其年平均排放通量为(0.45±0.08) mg·(m²·h)⁻¹。基于两种方法观测的CH₄排放通量具有相同的环境驱动因子, CH₄排放通量与水温、底泥可溶性有机碳(DOC)和水体化学需氧量(COD)呈现显著的正相关关系, 与水体溶解氧(DO)呈现出极显著的负相关关系。综合比较两种方法观测结果, 发现由扩散模型法估算出的淡水养殖鱼塘CH₄排放通量约为漂浮箱法测定结果的45%左右($P < 0.01$), 扩散模型法可能低估淡水养殖系统CH₄排放通量。综上所述, 漂浮箱法更适合用于观测我国东南部内陆地区淡水养殖生态系统CH₄排放。

关键词: 甲烷; 通量; 养殖鱼塘; 漂浮箱法; 扩散模型法

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)02-0941-11 DOI: 10.13227/j.hjks.201905092

Comparison of Floating Chamber and Diffusion Model Methods for Measuring Methane Emissions from Inland Fish-Aquaculture Ponds

HU Tao¹, HUANG Jian¹, DING Ying¹, SUN Zhi-rong¹, XU Meng-fan¹, LIU Shu-wei^{1,2}, ZOU Jian-wen^{1,2}, WU Shuang^{1,2*}

(1. College of Resource and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resources Utilization, Nanjing 210095, China)

Abstract: Freshwater aquaculture ponds collectively cover a large area in southeast China. They are an important anthropogenic source of CH₄ emissions, however current knowledge of CH₄ emissions from aquaculture ponds is limited. During September 2017 and August 2018, two independent sampling campaigns of CH₄ flux measurements over annual cycles were carried out in a fish-aquaculture pond in southeast China using a floating chamber and diffusion model methods for comparison. The purpose of this study is to investigate the variation of CH₄ fluxes obtained from the fish-aquaculture pond, analyze the emission mechanisms, and amplify the CH₄ emissions inventory. The diffusion model method can further quantify the contribution of diffusion transmission to CH₄ emissions. The seasonal variations of CH₄ fluxes measured by the two methods were similar, with higher CH₄ fluxes appearing in summer and fall and lower CH₄ fluxes appearing in spring and winter. CH₄ fluxes measured by the floating chamber method and diffusion model method ranged from 0.14-3.13 mg·(m²·h)⁻¹ and 0.04-1.41 mg·(m²·h)⁻¹, respectively, and the respective average values were (0.86±0.30) mg·(m²·h)⁻¹ and (0.45±0.08) mg·(m²·h)⁻¹. The CH₄ fluxes were positively related to water temperature, dissolved organic carbon (DOC) and chemical oxygen demand (COD), but negatively related to the water dissolved oxygen (DO) concentration in the fish-aquaculture pond. CH₄ fluxes calculated by diffusion model methods were 45% lower than those determined by the floating chamber methods over annual cycles. The result suggested that the floating chamber method is more suitable than the diffusion model method for measurements of CH₄ fluxes in freshwater aquaculture ecosystems.

Key words: methane; emissions; fish-aquaculture pond; floating chamber; diffusion model

甲烷(CH₄)作为大气中的重要温室气体,它对由温室气体造成的全球辐射强迫贡献率达到了18%^[1]。在一百年时间尺度上,CH₄的增温潜势(global warming potential, GWP)是相同分子数量二氧化碳的28倍^[2]。另外,甲烷还会参与一系列大气中的化学反应,会影响甚至改变全球气候系统。水生生态系统(aquatic ecosystems)作为大气中CH₄的主要来源,据报道其CH₄的排放约占全球CH₄排放源

的40%~50%^[3]。水生生态系统是地球表面各类水域生态系统的总称,由于含盐量的不同而被分为淡水生态系统和海洋生态系统,其中,全球淡水生态系

收稿日期: 2019-05-14; 修订日期: 2019-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41301244, 41771268); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41907072)

作者简介: 胡涛(1994~),男,硕士研究生,主要研究方向为环境污染与全球变化, E-mail: 15705105190@163.com

* 通信作者, E-mail: wushuang@njau.edu.cn

统 CH₄ 排放量折算为二氧化碳量(CO₂)能够抵消陆地生态系统碳吸收量的 25%,是一个不可忽视的 CH₄ 排放源^[4,5].

近年来,淡水水产养殖作为 CH₄ 的一个重要排放源而受到全世界的关注^[6]. 中国是世界最大的淡水水产养殖生产国,占全球产量的 60% 左右. 此外,我国水产养殖的面积和数量正在稳步上升,据报道,至 2013 年我国淡水养殖湿地养殖规模已经达到 $2.62 \times 10^6 \text{ hm}^2$,其中约 70% 的淡水养殖产量都是在粗放型和半密集型的池塘中进行的^[7]. 众所周知,中国是渔业大国,为了满足我国日益增长的人口对蛋白质食品的需求,近年来我国大力发展淡水鱼类

养殖业,淡水鱼养殖总产量一直都是高居全球第一^[8]. 然而在水产养殖过程中为了加速自身的生产力,往往会通过投喂大量的有机饵料而增加养分投入^[9~11],从而影响水体底泥中的微生物和水产养殖生态系统的碳氮循环过程,最终导致 CH₄ 的产生和排放^[12~14].

目前关于监测水-气界面 CH₄ 排放通量缺少统一的规定和方法,国内外常用的一些测定水-气界面 CH₄ 排放通量的方法主要有漂浮箱法、扩散模型法、倒置漏斗法、涡度相关法和可调谐二极管激光吸收光谱法(TDLAS)等^[15],每种方法都有它独特的优势和自身的不足,具体如表 1 所示.

表 1 水-气界面 CH₄ 排放通量主要研究方法
Table 1 Methods for measuring CH₄ fluxes at water-air interface

测定方法	适用范围	优缺点
漂浮箱法	小区域水面短期观测	原理简单,操作便捷,可控制程度高但劳动成本过大,观测区域小,手动误差高
扩散模型法	任何水生系统表层水体观测	适用范围广泛,操作简单,可以长时间连续观测但精度不高,受外界环境因素干扰太大,而且只涉及扩散排放
倒置漏斗法	用于研究有一定深度的大型水库,且以冒泡方式排放为主的水体	主要收集通过冒泡方式排放的温室气体,精准度高,但局限性明显,时间空间变异大,观测不连续
涡度相关法	常用于海洋等宏观大尺度均匀水体表面	可以在无人值守的情况下实现大区域、长期的气体排放观测,但对观测对象外界环境要求较高且技术成本较大
TDLAS 法	实现对大面积水库区域进行长期、连续观测	精准度高,响应值快,观测气体种类全面,但投入成本大,技术要求高

对于内陆淡水水体 CH₄ 排放的观测,大多数研究通常采用漂浮箱法或者扩散模型法^[16~19]. 漂浮箱法是根据待测气体浓度随着时间的变化率而计算出覆盖区域气体排放通量的一种测量方法^[20,21],因其操作简便的特性,早在上个世纪中叶,国外学者就用漂浮箱法来观测 CH₄ 的排放通量^[22]. 漂浮箱法的原理是把一个顶部密封,底部中通的箱子放在测量水体的表面,以便于收集水-气界面释放出来的 CO₂ 和 CH₄ 等待测气体,再通过浓度随时间的变化率计算出气体排放通量. 目前通过漂浮箱法现场采集的气体样本主要是通过气相色谱测定. 漂浮箱法因其操作简单,测量精准并可以同时分析出多种温室气体而被广泛应用在水体温室气体排放的研究中^[6,12,23,24]. 扩散模型法的原理是通过对表层和大气温室气体同步测量,计算出温室气体的溶存浓度差,再根据水-气界面的气体扩散速率,从而计算出水体温室气体排放通量^[25]. 扩散模型法是通过在采样点采集水样,提取水样中溶存的温室气体,由气相色谱测出温室气体的浓度,再根据现场测定的风速、水温等参数,结合由 Henry 定律^[26] 计算出的溶存温室气体浓度,通过水-气界面分子扩散模型,得到温室气体的最终排放通量. 扩散模型法因其收集样品步骤简便,测定区域广阔,可以实现观测不同类型水体温

室气体排放通量等优点,因此其在测定水体温室气体中也得到了广泛的应用^[27~30].

由于漂浮箱法主要涵盖 CH₄ 通过冒泡传输和扩散传输途径所产生的排放通量,因此大多数学者采用漂浮箱法来测定淡水养殖池塘 CH₄ 排放. 如杨平等^[31] 基于漂浮箱法对福建闽江河口混养鱼塘养殖湿地 CH₄ 排放进行了为期 5 个多月的观测研究; Hu 等^[32] 通过漂浮箱法对我国南方内陆地区某一淡水养殖鱼塘 CH₄ 排放进行为期两年的观测;宋红丽等^[33] 通过漂浮箱法在山东省黄河口附近一个虾塘养殖湿地观测了为期一年的 CH₄ 排放通量. 尽管有相关研究表明,冒泡传输几乎包含了水体所有的 CH₄ 排放^[34],但扩散传输仍是 CH₄ 排放中不能忽略的一个重要传输途径,但鲜有研究通过扩散模型法测定我国内陆地区淡水养殖池塘 CH₄ 排放通量,将扩散传输对排放通量的测定贡献进行具体量化,明确其在 CH₄ 排放中所占的比重. 因此开展基于两种方法同步观测我国淡水养殖池塘 CH₄ 排放的对比研究具有重要意义. 本文同时采用漂浮箱法和扩散模型法观测我国东南部地区江苏省兴化市淡水养殖鱼塘 CH₄ 排放通量,通过比较两种方法观测养殖鱼塘自 2017 年 9 月到 2018 年 8 月全年的 CH₄ 排放强度、排放特征以及驱动因子,有助于更加全面了解养殖鱼塘生态系统水-气界面 CH₄ 交换过程,准确评

估其 CH₄ 排放强度,以及不同传输途径对其 CH₄ 排放的贡献量提供更多的科学依据和理论基础,从而有助于降低当前农业淡水养殖池塘 CH₄ 排放估算的不确定性,以期为编制国家农业温室气体排放清单提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验地点位于我国的江苏省兴化市新银村 (N32°52', E119°50')。该地区属于亚热带季风气候,年均气温 14.8℃,年均降水量1 090 mm。本次试验观测的淡水养殖鱼塘拥有连续 3 a 以上的养殖历史,水域面积为 20 亩(1 亩 = 667 m²),观测时间自

2017 年 9 月 16 日到 2018 年 8 月 16 日包含了整个鱼苗的养殖、生长期,鱼塘底泥的基本理化性质见表 2。试验鱼塘的养殖模式为当地常规的河鱼养殖模式即主养鲫鱼(约占总量的 80%),辅养白鲢(约占 20%)的高效生产养殖模式^[35]。本试验观测开始时间即为养殖关键期,每天用自动投料机投放饲料 4 次,分别为 08:00 和 11:00, 14:00 和 17:00,饲料投喂量根据河鱼的具体生长情况而作出改变,11 月左右河鱼达到可上市规格即停止投料。淡水养殖鱼塘中无水生植物,不过有时会有一些蓝藻影响水质,消耗水中的氧气,因此根据具体情况定时打开叶轮式增氧机。养殖鱼塘一般在夏季保持水深在 2.5 m 左右,其他季节一般 1.5 m 左右。

表 2 淡水养殖鱼塘底泥的基本理化性质

Table 2 Physicochemical properties of sediment in fish-aquaculture pond						
项目	pH (H ₂ O, 1:2.5)	TOC /g·kg ⁻¹	TN /g·kg ⁻¹	DOC /g·kg ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·kg ⁻¹
参数值	8.07	14.6	1.77	63.30	38.50	8.60

1.2 气体及水样的采集

淡水养殖鱼塘采用漂浮箱法和扩散模型法同步观测 CH₄ 的排放通量。整个鱼塘布置 3 个栈桥,每个栈桥设置 3 个平行采样点,栈桥分布按照鱼塘的水生环境、深浅程度以及地理位置设置 3 个采样点,采样点 1 为自然生长区,该位置远离自动投料机,处于鱼塘的上风口方向,不会造成蓝藻或其他有机质的累积,采样点 2 为营养富集区,该位置处于鱼塘的下风口,易造成有机质的大量累积,采样点 3 为饵料投喂区,该区域 CH₄ 排放受鱼类活动影响较

大。采样点水温和风速情况如图 1 所示。漂浮箱法是通过气相色谱直接测定采集的气体从而计算出 CH₄ 的排放通量。漂浮箱由气体采集箱、底座和泡沫漂浮板组成。气体采集箱和底座是由 PVC 材料制成,规格为直径 40 cm,高 50 cm 的圆柱体,并且箱体都采用了厚约 1 cm 的海绵和锡箔纸来包裹以避免由于箱体内外温差过大而影响测定结果。本次试验周期为 1 a,采样频率为每周一次,恶劣天气情况除外,每个采样点设置的 3 个平行同时进行采样,采样时间固定在上午 08:00 ~ 11:00,箱体密闭后的 0、5、

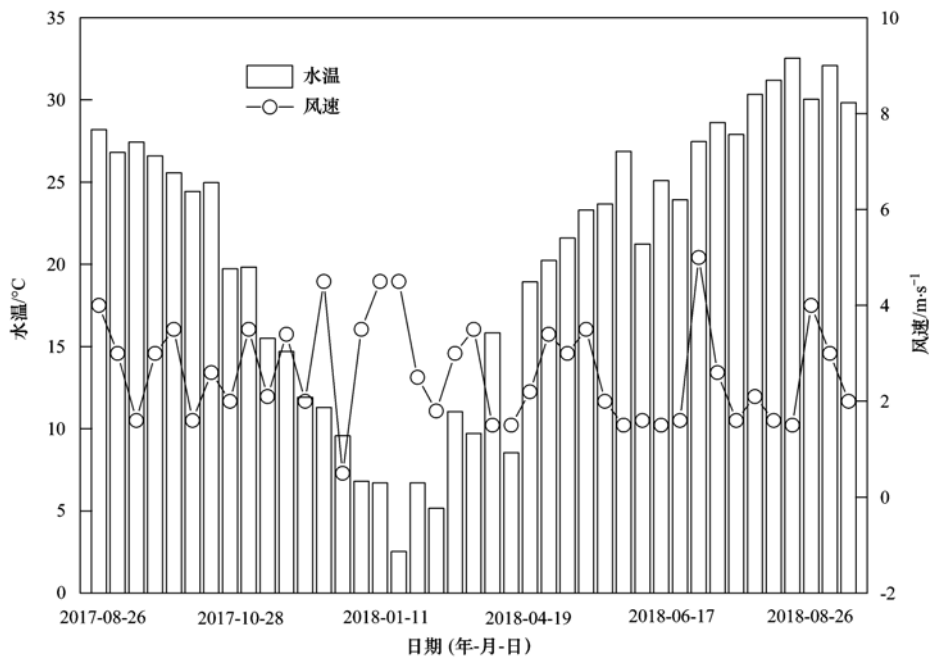


图 1 采样点水温风速情况
Fig. 1 Water temperature and wind speed at sampling sites

10、15 和 20 min 分别进行气体采集,每次采集 1 L 左右,气样储存在体积为 1.5 L 的气袋中(大连德林 Co., Ltd., 中国). 采样过程中的第 0 min 和第 20 min 纪录箱体上温度计的度数,作为采样时的箱温和环境温度. 扩散模型法估算 CH_4 排放是在箱法相同采样点采集水体表面下方约 10 cm 处水样,采样频率也为每周一次,将水样注满提前准备好的 150 mL 的聚乙烯瓶中,避光保存,48h 之内送回实验室,通过气相平衡法置换出水样中溶存的 CH_4 气体,由气相色谱进行分析^[33].

1.3 CH_4 排放通量的计算

1.3.1 漂浮箱法

CH_4 的排放通量 (flux) 是指在单位时间内单位面积上该气体的排放量. 当排放通量的数值为正值时则表示往大气中排放,负值则为吸收. 漂浮箱法是一种直接观测的方法,原理简单,操作方便, CH_4 的排放通量计算公式如下:

$$F = k \cdot \rho \cdot \frac{V}{A} \cdot \frac{dc}{dt} \cdot \frac{T_0}{T_0 + T} \cdot \frac{p}{p_0} \quad (1)$$

式中, F 表示 CH_4 的排放通量, $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; k 表示量纲换算系数; V 表示气体采集箱的容积, m^3 ; A 表示箱体与水体表面接触的面积, m^2 ; dc/dt 表示漂浮箱内初始 CH_4 浓度的变化率, $\mu\text{L} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$; ρ 表示 CH_4 的密度, $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; T 表示采样时采集箱内的平均温度, $^\circ\text{C}$; p 表示采样时的大气压, hPa ; T_0 表示标准状况下的气温 273 K, p_0 表示一个标准大气压 (1 013 hPa).

1.3.2 扩散模型法

扩散模型法是一种通过扩散模型计算水体中溶存的气体浓度而得出该气体排放通量的方法. 本次试验中水气界面 CH_4 排放通量的计算采用的是 Liss 等^[36]提出的双层模型法. 计算公式如下:

$$F = K_w \times (c_{\text{obs}} - c_{\text{eq}}) \quad (2)$$

式中, K_w 表示气体交换速度, $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$; c_{obs} 表示平衡前水样的 CH_4 浓度, $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 是用来表示表层水体在采样时的气体浓度; c_{eq} 表示采样时大气分压同实际水温条件下的纯水达到平衡时的水体中 CH_4 的浓度, $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$.

在实际水温条件下, Henry 定律可用于计算 CH_4 的 c_{eq} 值, 即:

$$c_{\text{eq}} = K_H \times p_A \quad (3)$$

式中, p_A 表示 CH_4 的大气分压, 根据江苏地区的大气成分状况确定采样点 CH_4 的大气分压约为 $2 \times 10^{-6} \text{ atm}$ (0.2 Pa); K_H 表示采样时实际水温下的气体 Henry 常数, $\text{mmol} \cdot (\text{L} \cdot \text{atm})^{-1}$; 计算公式为:

$$K_H = K_H^0 \times e^{K_T(\frac{1}{T} - \frac{1}{T^0})} \quad (4)$$

由 Henry 定律和文献[37]计算得出, $T^0 = 298 \text{ K}$, T 表示实际绝对温度 (K), K_H^0 表示在实际绝对温度和一个标准大气压下的 Henry 常数, CH_4 的值为 $1\,308 \text{ mmol} \cdot (\text{L} \cdot \text{atm})^{-1}$; K_T 的 CH_4 取值为 2 675, 是表征 Henry 常数随温度变化的参数.

待测出气液平衡后 CH_4 的浓度, 再利用以下公式 (Johnson 等^[38]) 计算出平衡前水样中 CH_4 的溶存浓度, 公式如下:

$$c_{\text{obs}} = c_0 (\beta RT / 22.4 + V_0 / V_1) \quad (5)$$

式中, c_0 表示平衡后测定的 CH_4 气体的浓度, $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; V_0 和 V_1 分别代表平衡器内气室和水样的体积, mL ; 22.4 代表的是气体的摩尔体积, $\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$; R 值一般取 $0.008\,2 \text{ L} \cdot \text{atm} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$, 是理想气体的状态常数; T 代表的是平衡过程中的实际水温 (K); β 代表的是 CH_4 气体溶解度, $\text{L} \cdot (\text{L} \cdot \text{atm})^{-1}$; 也就是在一个标准大气压下, CH_4 气体作为溶质能够溶解在水体中的最大体积. β 值的计算公式如下:

$$\beta = 22.4 \times 10^{-6} K_H \times p_g \quad (6)$$

其中, K_H 表示 CH_4 在平衡温度条件下的 Henry 常数, $\text{mmol} \cdot (\text{L} \cdot \text{atm})^{-1}$; p_g 则表示 CH_4 的纯气压力, 也就是 1 atm.

最终, 根据已经计算出的气体浓度 c_{obs} (水样平衡前) 和 c_{eq} (水样平衡时), 分别通过 4 种不同的估算公式即 LM86、W92a、W92b 和 RC01 计算出 K_w 值, 并取 4 个值的平均数作为计算 CH_4 排放通量的双层模型公式中的最终 K_w 值, 因为仅依赖一个模型估算 CH_4 通量, 可能会大幅度高估或低估 CH_4 的排放^[39].

1.4 相关环境因子的测定

在整年的野外观测试验中, 每两周会采集一次淡水养殖鱼塘中的表层底泥, 用于动态监测底泥中可溶性有机碳 (DOC) 的含量. DOC 的测定方法: 称取约 10 g 左右 (误差不超过 $\pm 0.1 \text{ g}$) 的鲜土于 150 mL 的聚乙烯塑料瓶内, 再加入 100 mL 的超纯水, 密封好后在 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的摇床上振荡 1 h, 接着在 $6\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的离心机上离心 10 min, 最后将上层清液用 $0.45 \mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤, 过滤出的液体采用 Multi N/C3000 分析仪测定^[40, 41]. 土壤矿物质有机氮 (MN) 包括铵态氮 (NH_4^+) 以及硝态氮 (NO_3^-) 用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KCl}$ 按水土比 5:1 浸提, $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡 1 h 后过滤, 其含量用 Skalar^{plus} San 流动分析仪测定; 土壤有机碳 (TOC) 的测定采用重铬酸钾氧化法; 土壤总氮 (TN) 的测定采用凯

氏定氮法.

试验地采集气体的同时,会对淡水养殖鱼塘水体的溶解氧(DO)和水温作一个动态监测,使用便携式溶解氧仪(TY1055-12,美国 YSI)对水体下方 10 cm 左右处进行测量. 试验观测期内,每隔一周采集鱼塘的水样,并同步监测水样中化学需氧量(COD)以及水体的 pH. 在实验室中利用 COD 仪(JY-CTL-12,美国)分析水样中 COD 含量;利用 pH 计(pH610,德国)测定水体 pH. 利用电导率仪(DDS-307,上海)测定水体电导率(EC).

1.5 数据分析与统计方法

本研究中的统计分析,包括相关分析、回归分析和方差分析等均采用分析软件 SPSS 19.0 完成,采用 OriginPro 9.0 软件对数据进行作图.

2 结果与分析

2.1 基于漂浮箱法和扩散模型法观测的鱼塘 CH_4 排放规律及排放强度

试验观测期内,采用漂浮箱和扩散模型两种方法同时观测淡水养殖鱼塘 CH_4 排放通量,发现两种方法观测的 CH_4 排放通量具有相同的季节排放特征,其排放强度大小接近,但扩散模型法观测的 CH_4 排放通量均低于漂浮箱法的观测结果. 图 2 表示的是整个鱼类生长季淡水鱼塘在两种方法观测下其 CH_4 排放通量的月平均变化情况. 从中可见,在两种观测方法下,淡水养殖鱼塘 CH_4 排放总体上呈现出夏秋季(6~11月)排放高,冬春季(12月~次年5月)排放低的季节变化规律.

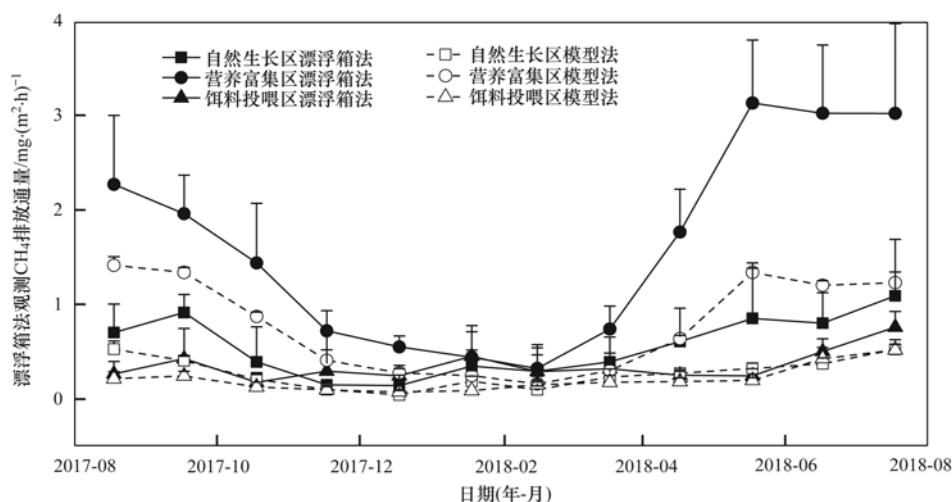


图2 基于漂浮箱法和扩散模型法鱼塘 CH_4 月平均排放的季节变化

Fig. 2 Seasonal patterns of monthly average CH_4 fluxes from fish pond

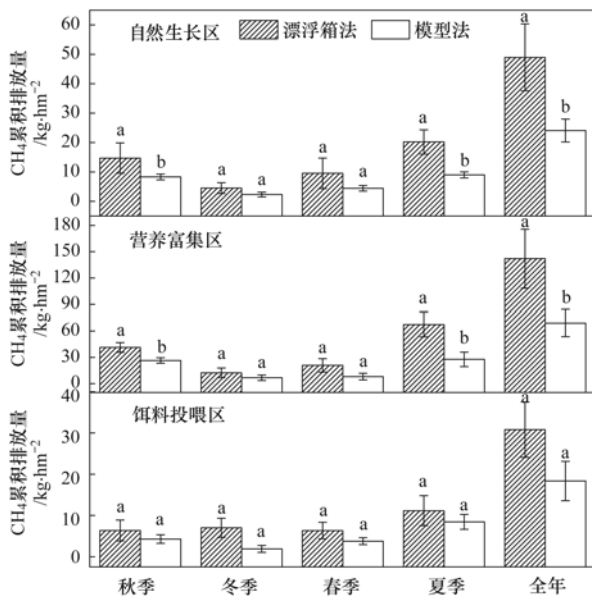
由漂浮箱法观测的结果可以看出,各个采样点之间的 CH_4 排放通量存在差异,营养富集区与自然生长区、饵料投喂区的差异尤其明显,在 1~3 月之间,3 个采样点 CH_4 排放都达到一年中最低值,排放强度没有明显差异,其余时间营养富集区的 CH_4 排放强度要远远高于其他两个采样点,扩散模型法观测的 CH_4 排放结果也呈现相同的规律. 通过两种方法 CH_4 排放通量观测结果的对比,在 1~3 月内各个采样点之间两种方法观测的 CH_4 排放通量大小基本没有差异,均达到了全年的排放最低值,而在其他时间段内,扩散模型法观测的 CH_4 排放通量大小仅为漂浮箱法的一半左右;在 7、8 月,两种观测方法均观测到 CH_4 的排放峰值,通过漂浮箱法观测的营养富集区与自然生长区、饵料投喂区 3 个采样点的排放峰值大小分别为 1 090.60、3 129.68 和 759.27 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,其 CH_4 排放通量的年平均值分别为 (0.57 ± 0.29) 、 (1.63 ± 0.44) 和 $(0.38 \pm$

$0.17)\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$;扩散模型法观测的 3 个采样点排放峰值分别为 600.46、1 413.89 和 518.45 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,其 CH_4 排放通量的年平均值分别为 (0.30 ± 0.08) 、 (0.81 ± 0.09) 和 $(0.23 \pm 0.08)\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$.

2.2 基于漂浮箱法和扩散模型法观测的鱼塘 CH_4 季节及年累积排放特征

淡水养殖鱼塘基于两种方法观测下 CH_4 不同季节及全年累积排放通量如图 3 所示,从中可以看出,总体而言,基于两种方法观测的 CH_4 累积排放量在自然生长区、营养富集区和饵料投喂区这 3 个采样点在夏季(6~8 月)和秋季(9~11 月)均高于其他两个季节,并且均在夏季达到 CH_4 累积排放峰值,自然生长区、营养富集区和饵料投喂区这 3 个采样点采用漂浮箱法观测的累积排放峰值分别为 20.22、67.47 和 11.15 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;采用扩散模型法观测的累积排放峰值分别为 9.01、27.73 和 8.44

$\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. 在观测期内,基于漂浮箱法测定淡水养殖鱼塘 CH_4 全年累积排放量在自然生长区、营养富集区和饵料投喂区分别为 48.96、142.03 和 30.82 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;扩散模型法测定淡水养殖鱼塘 CH_4 累积排放量分别为 24.09、69.01 和 18.35 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. 方差分析结果表明,基于两种方法观测的自然生长区和营养富集区的 CH_4 累积排放量在夏季、秋季以及全年有显著的差异 ($P < 0.05$),而在其他季节以及饵料投喂区的整个观测期,两种方法观测的 CH_4 累积排放量并无明显差异.



相同字母表示该两者间差异性不显著 ($P > 0.05$),
不同字母表示差异性达到显著水平 ($P < 0.05$)

图3 各采样点基于漂浮箱法和模型法 CH_4 季节及
年计累积排放量

Fig. 3 CH_4 season and annual cumulative emissions
at each sampling point

2.3 基于漂浮箱法和扩散模型法测定的鱼塘 CH_4 排放通量的比较

在整个观测期间,淡水养殖鱼塘通过漂浮箱法观测的 CH_4 排放通量变化范围分别为:自然生长区 $0.14 \sim 1.09 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 、营养富集区 $0.32 \sim 3.13 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和饵料投喂区 $0.18 \sim 0.77 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$;而由扩散模型法观测的 CH_4 排放通量区间分别为:自然生长区 $0.04 \sim 0.60 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 、营养富集区 $0.16 \sim 1.41 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和饵料投喂区 $0.08 \sim 0.52 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$. 为了进一步比较基于两种方法观测下淡水养殖鱼塘的 CH_4 排放通量,笔者在此通过强制过零点线性回归对淡水养殖鱼塘 CH_4 排放通量进行分析,分析结果如图4所示.从中可以看出,在淡水养殖鱼塘中通过漂浮箱法观测出的 CH_4 排放

通量与扩散模型法观测出的结果存在着一定的差异,就平均水平来说,扩散模型法观测的 CH_4 排放通量约为漂浮箱法测定结果的 45% 左右 (线性回归方程斜率为 0.45, $r^2 = 0.89$).

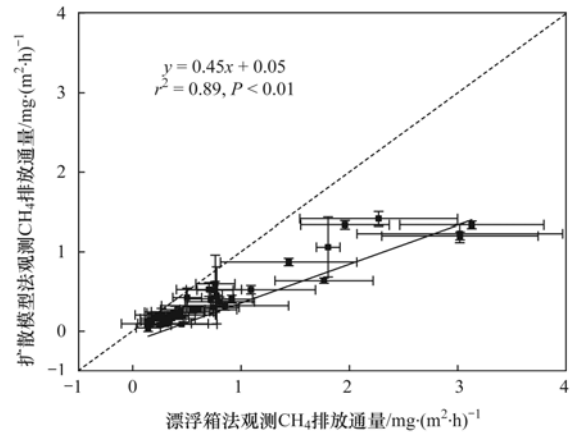


图4 基于漂浮箱法和扩散模型法鱼塘 CH_4 月平均排放
通量比较 (平均值 $\pm$ 标准差)

Fig. 4 Comparison of monthly mean CH_4 fluxes determined
by chamber-based and diffusion model-based
methods in fish pond (mean $\pm$ SD)

2.4 基于漂浮箱法和扩散模型法观测的鱼塘 CH_4 排放通量对环境因子的响应

在对淡水养殖鱼塘全年养殖周期 CH_4 排放通量进行观测的同时,笔者对鱼塘中 3 个采样点的底泥和水体的理化性质也进行了同步监测,其全年动态变化如图5所示.在观测期间,淡水养殖鱼塘 3 个采样点之间水温的变化趋势基本一致,且水温呈现出明显的季节变化,整体与我国南方气温季节变化相同,即夏秋季节温度高,冬春季节温度较低.在整个试验观测期间,水温变化范围为 $2.2 \sim 33.5^\circ\text{C}$,平均水温为 20.3°C .养殖鱼塘水体中的 pH 在观测期间存在显著的季节波动,而底泥中的 pH 无明显季节变化,在整个观测期内,底泥中 pH 变化范围为 $7.5 \sim 8.4$,平均值为 8.0;水体中 pH 变化范围为 $7.1 \sim 9.1$,平均值为 8.2.由此可见,在整个观测期,淡水养殖鱼塘水体 pH 的平均水平要高于底泥.水体中的溶解氧 (DO) 在整个观测期间也存在明显的季节变化,而且季节变化趋势与水温刚好相反,溶解氧在整个观测期间的变化范围为 $2.3 \sim 15.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 $9.74 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.在全年的观测期内,鱼塘底泥的可溶性有机碳 (DOC) 和底泥中的矿物质氮 (MN) 呈现出相似的季节变化规律,与水温的季节变化规律一致.自然生长区、营养富集区和饵料投喂区底泥中 DOC 含量的年均值分别是 54.66、64.54 和 44.72 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.自然生长区、营养富集区和饵料投喂区底泥中 MN 全年的平均值分别为

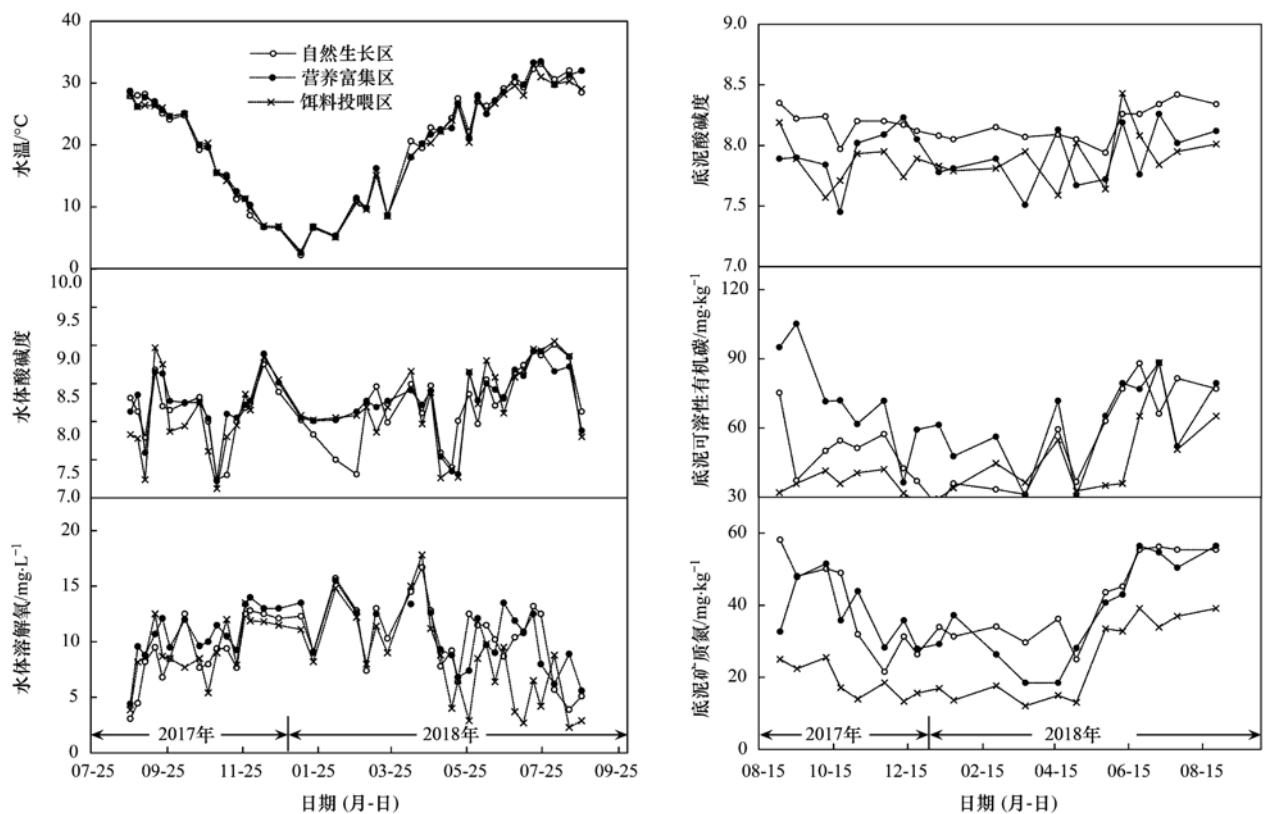


图5 鱼塘水体及底泥基本理化性质全年动态变化

Fig. 5 Annual pattern of water and sediment parameters in fish pond

40.46、37.78 和 21.65 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 相关性分析表明,两种方法观测的 CH_4 排放通量均与水温、底泥 DOC、水体 COD 呈显著正相关,与水体 DO 呈极显著负相关,由此可见 CH_4 排放量对水温、底泥 DOC、COD 以及 DO 的响应强度很高 ($P<0.01$, 表 3),但 CH_4 排放通量对 pH 和 EC 等理化指标并未发现明显的相关关系,表明其对这些理化指标的响应强度较弱.

表3 基于漂浮箱法和扩散模型法 CH_4 排放通量和鱼塘系统中参数之间的 Pearson 相关性¹⁾

项目	WT	DO	WpH	WEC	COD	SpH	SEC	MN	DOC
FCH_4F	0.488 **	-0.463 **	0.171	-0.088	0.442 **	0.048	0.216	0.577 **	0.660 **
MCH_4F	0.348 **	-0.250 **	0.100	-0.042	0.419 **	0.049	0.189	0.438 **	0.610 **

1) WT:水温; DO:溶解氧; WpH:水体 pH; WEC:水体电导率; COD:化学需氧量; SpH:底泥 pH; SEC:底泥电导率; MN:矿物质有机氮; DOC:溶解性有机碳; FCH_4F :漂浮法甲烷排放; MCH_4F :模型法甲烷排放; * 表示 $P<0.05$, ** 表示 $P<0.01$

3 讨论

3.1 淡水养殖鱼塘 CH_4 排放量

本研究中淡水养殖鱼塘通过漂浮箱法观测的 CH_4 排放通量年平均值为 $(0.86 \pm 0.30) \text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$;扩散模型法观测的 CH_4 排放通量的年平均值为 $(0.45 \pm 0.08) \text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$.

以年为周期对我国东南部内陆淡水养殖生态系统 CH_4 排放进行原位观测的研究相对较少,且大部分研究均采用漂浮箱法对 CH_4 排放通量进行观测,例如,杨平等^[31]对福建闽江河口混养鱼塘养殖湿地 CH_4 排放进行为期半年的研究,观测发现 CH_4 的平均排放通量为 $3.15 \text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$;Liu 等^[6]基于漂

浮箱法在江苏兴化河蟹养殖湿地比较有无水草对 CH_4 排放通量的影响,研究发现有水草时 CH_4 的年平均排放通量为 $0.37 \text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,没有水草时, CH_4 的年平均排放通量为 $0.21 \text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$;马煜春等^[42]基于漂浮箱法在江苏常熟一个混养鱼塘进行长达一年的 CH_4 排放观测,研究发现该鱼塘养殖湿地 CH_4 年平均排放通量为 $0.73 \text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$;Wu 等^[19]通过漂浮箱法对兴化市新舍村养殖鱼塘进行为期 1 a 的观测,发现 CH_4 的平均排放通量为 $0.51 \text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$;宋红丽等^[33]在山东省黄河口附近一个虾塘养殖湿地 CH_4 排放进行为期一年的观测,研究发现 CH_4 的年平均排放通量要显著低于其他研究结果,仅为 $0.0059 \text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$. 总体而

言,除去显著偏低的 CH_4 排放结果后,我国东南部内陆淡水养殖池塘 CH_4 年平均排放通量的变化范围为 $0.21 \sim 3.15 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,本研究基于两种方法观测的 CH_4 排放通量均处于此范围之内。

淡水养殖鱼塘基于两种方法观测的 CH_4 排放通量具有相似的季节变化特征(图2),即夏秋季排放高,冬春季排放低,这与 Liu 等^[6]在江苏兴化蟹/鱼养殖湿地进行的 CH_4 排放观测试验以及马煜春等^[42]在太湖混养鱼塘进行的 CH_4 排放观测试验所得出的结论一致,造成这一结果原因可能是:一方面夏秋季温度一般高于冬春季,温度高会增强池塘底泥中一些微生物如产甲烷菌的活性,从而刺激 CH_4 的产生,尽管水温不是决定底泥中微生物活性的关键因素,但是在微生物生长所需要的最佳温度范围内,水温的上升不仅可以提高微生物的活性,还能加快生物化学反应的过程^[43];另一方面夏秋季是鱼塘养殖的关键期,饵料的投入要高于其他季节,大量含高 C、N 饵料的投入会给产甲烷菌等微生物提供充分的底物,从而提高了 CH_4 的排放,这也是鱼塘 CH_4 排在夏秋季高于冬春季的原因。此外,由图3可以看出,在夏季,营养富集区观测的 CH_4 累积排放量要显著高于在自然生长区和饵料投喂区观测的 CH_4 累积排放量,但在冬季,营养富集区与自然生长区和饵料投喂区观测的 CH_4 累积排放量并无明显差异,其原因可能是营养富集区产甲烷菌等微生物可利用的底物多于另外两个区域,从而使得该区域 CH_4 排放增加。而在冬季,尽管营养富集区仍然含有丰富的产甲烷底物,但该区域水温过低,导致产甲烷菌等微生物活性不足,对底物利用率不高;且鱼类在水温较低时生命活动不够旺盛,对水体溶解氧的消耗小,水体溶解氧高,不能为 CH_4 产生提供了有利的厌氧环境^[31]。

3.2 漂浮箱法和扩散模型法测定 CH_4 排放通量的比较

国内外学者已经对淡水水体 CH_4 排放的观测做了大量的研究,但是大部分都是通过漂浮箱法或者扩散模型法中的单一方法进行的研究,而同时通过两种方法对某一特定淡水水体进行 CH_4 排放观测的却鲜有报道^[43~46]。Duchemin 等^[20]通过两种方法对加拿大两座大型淡水水库 CH_4 排放进行监测,结果表明,漂浮箱法观测的 CH_4 排放通量的值高于扩散模型法的观测结果,甚至某段时期的排放结果会存在数量级上的差异,类似于本研究中自然生长区在夏季通过漂浮箱法 CH_4 累积排放量达到 $20.22 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,而通过模型法 CH_4 累积排放量只有 9.01

$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。高洁等^[39]通过漂浮箱法和扩散模型法对模拟池塘 CH_4 排放通量进行比较研究,结果表明,两种方法所观测的 CH_4 排放通量存在显著差异,且扩散模型法观测的排放通量相当于漂浮箱法的 $34\% \sim 68\%$,与本研究由扩散模型法估测出的 CH_4 排放通量约为漂浮箱法测定结果的 45% 左右相一致。综上所述,笔者初步推测,通过扩散模型法估算出的淡水水体 CH_4 排放通量可能会低估它的实际排放值。产生上述结果,可能与两种方法所包含的水-气界面 CH_4 排放途径有关。漂浮箱法和扩散模型法作为目前最常用的两种监测水-气界面 CH_4 排放的方法,漂浮箱法可以同时捕获包括冒泡和扩散两种传输途径的 CH_4 排放^[46,47],但漂浮箱法在实际采样过程中可能因为人操作或者受恶劣天气干扰的原因而导致水面剧烈波动,从而造成箱体内部气体浓度的变化,进而影响其测定结果的准确性;而扩散模型法估算的仅仅是水体通过扩散过程所传输的 CH_4 排放通量,不包括其他传输途径,因此其测定的 CH_4 排放通量在结果的组成上就有缺失,再加上扩散模型法估算精准度的关键在于确定气体交换速度 K_w 值,但是 K_w 值受到水温、水体流速、风速等多重因素共同作用,因此由扩散模型法估算出的 CH_4 排放通量结果存在较大的不确定性^[15]。由此可见,本研究结果中扩散模型法估测的 CH_4 排放通量约为漂浮箱法测定结果的 45% 左右,一方面说明本研究观测的我国东南部养殖鱼塘通过扩散途径排放的 CH_4 约占其 CH_4 总排放途径的 45% 左右,另一方面说明通过冒泡排放途径释放的 CH_4 排放通量要高于扩散途径所释放的 CH_4 排放通量。综合看来,漂浮箱法虽存在一定误差,但它比模型法更易控制,且观测结果更为全面和精确,而扩散模型法存在较多不确定因素。因此漂浮箱法更适合应用于本研究淡水养殖鱼塘 CH_4 排放通量的观测。

3.3 环境因子对 CH_4 排放的影响

淡水养殖鱼塘基于漂浮箱法和扩散模型法测定出的 CH_4 排放通量具有相同的环境驱动因子。 CH_4 排放通量与水温呈显著正相关关系(表3),表明 CH_4 的排放受淡水养殖鱼塘水温影响较强,温度是影响其 CH_4 排放的一个重要环境因子。由于温度上升会刺激产甲烷菌的活性,从而引发 CH_4 排放的增加^[48],因此淡水养殖鱼塘会呈现出显著的季节性变化,此结论与先前在天然湖泊或者人造水库中的研究一致。Xing 等^[49]报道了中国一个浅水和富营养化的湖泊中 CH_4 排放的季节变化,研究发现 CH_4 在夏季排放最高,在春、秋、冬季都排放较低。Natchimuthu 等^[50]发现浅水池塘里 CH_4 不管是通过

冒泡还是扩散排放,均与池塘的水热状况有关,并进一步指出温度是影响 CH_4 排放的一个重要因素. 此外,温度的波动可能会引起溶解氧的季节性变化,这种变化可以抑制或者促进沉积物中 CH_4 的产生.

Huang 等^[47]在三峡水库 CH_4 排放的研究中发现,在夏天水体中溶解氧较低,会抑制 CH_4 在排放过程中的氧化作用,从而促使 CH_4 的排放增加. 该结论与本试验中得出的 CH_4 排放与溶解氧呈现极显著负相关的结论一致(表 3),由此可见溶解氧是影响养殖鱼塘 CH_4 排放的另外一个关键因素.

在整个观测期间淡水养殖鱼塘 CH_4 的排放通量与水体中的 COD 呈现极显著正相关(表 3). COD 作为衡量水体中有机物质多少的指标,通常用以表示水体受有机物污染的程度. 而人工养殖鱼塘,每天都有大量的有机饲料投入,自然受有机物污染程度较高. 与此同时,有机质的过度累积会为 CH_4 产生提供底物,并且过量的有机质还会消耗水体中的溶解氧,从而抑制 CH_4 在传送途中被甲烷氧化菌的氧化作用. 蔡博峰等^[52]的研究表明,中国污水处理厂 CH_4 的排放受 COD 影响显著,有效去除或者大幅度降低 COD 浓度可以减少 CH_4 排放. Yang 等^[51]在对中国台湾省台北市某一河流水体的研究中也表明 CH_4 排放通量与 COD 浓度呈显著的正相关关系.

底泥中的 DOC 含量也是影响鱼塘 CH_4 排放的重要指标. 夏季为鱼塘养殖关键期,大量含高碳、氮的有机饵料会投入养殖鱼塘,其中虽然有大部分被鱼类消耗,但仍有小部分沉入塘底,再加上鱼类粪便,大大增加了池塘底部底泥的有机质,提高了底泥中 DOC 的含量,为 CH_4 的产生提供了充足的底物.

4 结论

(1)全年的观测期内,淡水养殖鱼塘基于漂浮箱法 CH_4 的年平均排放通量为 $(0.86 \pm 0.30) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,基于扩散模型法 CH_4 的年平均排放通量为 $(0.45 \pm 0.08) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 淡水养殖鱼塘基于漂浮箱法和扩散模型法观测的 CH_4 排放通量具有相似的季节排放特征,总体呈现夏秋季排放高,冬春季排放低的趋势.

(2)由扩散模型法估测出的 CH_4 排放通量可能会低估实际观测结果. 尽管两种方法都是目前监测内陆淡水水体最常使用的方法,但漂浮箱法因其包含的 CH_4 排放途径全面,准确性高,且受干扰因素少等优点得到更多采用,更适用于淡水养殖水体 CH_4 排放观测研究.

(3)本研究中基于漂浮箱法和扩散模型法观测

出的 CH_4 排放通量具有相同的环境驱动因子. CH_4 排放通量与水温、底泥可溶性有机碳(DOC)以及水体化学需氧量(COD)呈显著正相关,与水体溶解氧(DO)表现出极显著负相关.

致谢:感谢江苏省低碳农业与温室气体减排重点实验室(南京农业大学)对本研究的支持. 陈杰、纪程、耿亚军、孔德雷和李晨等在采样和实验方面提供帮助,在此一并致谢!

参考文献:

- [1] Tsutsumi Y, Mori K, Hirahara T, *et al.* Technical report of global analysis method for major greenhouse gases by the world data center for greenhouse gases [R]. Geneva: World Meteorological Organization, 2009. 1-12.
- [2] Stocker T F, Qin D H, Plattner G, *et al.* Climate change 2013: the physical science basis [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 119-1217.
- [3] Whiting G J, Chanton J P. Primary production control of methane emission from wetlands[J]. *Nature*, 1993, **364** (6440): 794-795.
- [4] Bastviken D, Tranvik L J, Downing J A, *et al.* Freshwater methane emissions offset the continental carbon sink [J]. *Science*, 2011, **331** (6013): 50.
- [5] Cole J J, Prairie Y T, Caraco N F, *et al.* Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget[J]. *Ecosystems*, 2007, **10** (1): 172-185.
- [6] Liu S W, Hu Z Q, Wu S, *et al.* Methane and nitrous oxide emissions reduced following conversion of Rice paddies to inland crab-fish aquaculture in Southeast China [J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, **50** (2): 633-642.
- [7] Yuan J J, Xiang J, Liu D Y, *et al.* Rapid growth in greenhouse gas emissions from the adoption of industrial-scale aquaculture [J]. *Nature Climate Change*, 2019, **9** (4): 318-322.
- [8] The state of world fisheries and aquaculture: opportunities and challenges[R]. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, Italy. 2014.
- [9] Serrano-Grijalva L, Sánchez-Carrillo S, Angeler D G, *et al.* Effects of shrimp-farm effluents on the food web structure in subtropical coastal lagoons[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2011, **402** (1-2): 65-74.
- [10] Zhang Y, Bleeker A, Liu J G. Nutrient discharge from China's aquaculture industry and associated environmental impacts [J]. *Environmental Research Letters*, 2015, **10** (4): S109.
- [11] Xiao X, Agusti S, Lin F, *et al.* Nutrient removal from Chinese coastal waters by large-scale seaweed aquaculture[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**: 46613.
- [12] Yang P, He Q H, Huang J F, *et al.* Fluxes of greenhouse gases at two different aquaculture ponds in the coastal zone of southeastern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **115**: 269-277.
- [13] 胡敏杰, 任鹏, 黄佳芳, 等. 外源氮、硫添加对闽江河口湿地 CH_4 、 CO_2 排放的短期影响[J]. *环境科学*, 2016, **37** (9): 3606-3615.
- [14] Hu M J, Ren P, Huang J F, *et al.* Short-term effects of nitrogen and sulfate addition on CH_4 and CO_2 emissions in the tidal marsh of Minjiang River estuary[J]. *Environmental Science*, 2016, **37** (9): 3606-3615.
- [14] Batson J, Noe G B, Hupp C R, *et al.* Soil greenhouse gas emissions and carbon budgeting in a short-hydroperiod floodplain

- wetland[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, **120**(1): 77-95.
- [15] 赵炎, 曾源, 吴炳方, 等. 水库水气界面温室气体通量监测方法综述[J]. *水科学进展*, 2011, **22**(1): 135-146.
Zhao Y, Zeng Y, Wu B F, *et al.* Review of methods for measuring greenhouse gas flux from the air-water interface of reservoirs[J]. *Advances in Water Science*, 2011, **22**(1): 135-146.
- [16] Amouroux D, Roberts G, Rapsomanikis S, *et al.* Biogenic gas (CH_4 , N_2O , DMS) emission to the atmosphere from near-shore and shelf waters of the north-western Black Sea[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002, **54**(3): 575-587.
- [17] 王洪君, 王为东, 卢金伟, 等. 太湖湖滨带秋、冬季 CH_4 排放特征及其影响因素初步研究[J]. *湿地科学*, 2006, **4**(1): 21-28.
Wang H J, Wang W D, Lu J W, *et al.* CH_4 emissions in autumn and winter from littoral zone of the Taihu Lake[J]. *Wetland Science*, 2006, **4**(1): 21-28.
- [18] 杨萌, 李红丽, 雷霆, 等. 北京密云水库甲烷排放通量时空特征及其影响因素研究[J]. *湿地科学*, 2011, **9**(2): 191-197.
Yang M, Li H L, Lei T, *et al.* Spatial-temporal characteristics of methane emission flux and its influence factors at Miyun reservoir in Beijing[J]. *Wetland Science*, 2011, **9**(2): 191-197.
- [19] Wu S, Hu Z Q, Hu T, *et al.* Annual methane and nitrous oxide emissions from rice paddies and inland fish aquaculture wetlands in southeast China[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **175**: 135-144.
- [20] Duchemin E, Lucotte M, Canuel R. Comparison of static chamber and thin boundary layer equation methods for measuring greenhouse gas emissions from large water bodies[J]. *Environmental Science and Technology*, 1999, **33**(2): 350-357.
- [21] Matthews C J D, St Louis V L, Hesslein R H. Comparison of three techniques used to measure diffusive gas exchange from sheltered aquatic surfaces[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(4): 772-780.
- [22] Copeland B J, Duffer W R. Use of a clear plastic dome to measure gaseous diffusion rates in natural waters[J]. *Limnology and Oceanography*, 1964, **9**(4): 494-499.
- [23] Yang P, Bastviken D, Lai D Y F, *et al.* Effects of coastal marsh conversion to shrimp aquaculture ponds on CH_4 and N_2O emissions[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2017, **199**: 125-131.
- [24] Yang P, Zhang Y, Lai D Y F, *et al.* Fluxes of carbon dioxide and methane across the water-atmosphere interface of aquaculture shrimp ponds in two subtropical estuaries: the effect of temperature, substrate, salinity and nitrate[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **635**: 1025-1035.
- [25] Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1992, **97**(C5): 7373-7382.
- [26] 胡英, 徐英年, Prausnitz J M. 气体溶解度的分子热力学(I)——气体在非极性溶剂中的 Henry 常数[J]. *化工学报*, 1987, **38**(1): 22-38.
Hu Y, Xu Y N, Prausnitz J M. Molecular Thermodynamics of gas solubility (I) Henry's constants of gases in nonpolar Solvents[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 1987, **38**(1): 22-38.
- [27] Roehm C, Tremblay A. Role of turbines in the carbon dioxide emissions from two boreal reservoirs, Québec, Canada[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, **111**(D24): D2410.
- [28] Guérin F, Abril G, Serça D, *et al.* Gas transfer velocities of CO_2 and CH_4 in a tropical reservoir and its river downstream[J]. *Journal of Marine Systems*, 2007, **66**(1-4): 161-172.
- [29] Guo Y D, Song C C, Wang L L, *et al.* Concentrations, sources, and export of dissolved CH_4 and CO_2 in rivers of the permafrost wetlands, northeast China[J]. *Ecological Engineering*, 2016, **90**: 491-497.
- [30] Upstill-Goddard R C, Salter M E, Mann P J, *et al.* The riverine source of CH_4 and N_2O from the republic of Congo, western Congo Basin[J]. *Biogeosciences*, 2017, **14**(9): 2267-2281.
- [31] 杨平, 仝川, 何清华, 等. 闽江口鱼虾混养塘水-气界面温室气体通量及主要影响因子[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(5): 1493-1503.
Yang P, Tong C, He Q H, *et al.* Greenhouse gases fluxes at water-air interface of aquaculture ponds and influencing factors in the Min River estuary[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(5): 1493-1503.
- [32] Hu Z Q, Wu S, Ji C, *et al.* A comparison of methane emissions following rice paddies conversion to crab-fish farming wetlands in southeast China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(2): 1505-1515.
- [33] 宋红丽, 刘兴土, 文波龙. 黄河三角洲养殖塘水-气界面 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量特征[J]. *生态环境学报*, 2017, **26**(9): 1554-1561.
Song H L, Liu X T, Wen B L. Greenhouse gases fluxes at water-air interface of aquaculture ponds in the Yellow River estuary[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(9): 1554-1561.
- [34] Miller B L, Arntzen E V, Goldman A E, *et al.* Methane ebullition in temperate hydropower reservoirs and implications for US policy on greenhouse gas emissions[J]. *Environmental Management*, 2017, **60**(4): 615-629.
- [35] 蒋吉生, 王永莉, 王义民, 等. 80:20 模式池塘高产高效鲫鱼养殖技术[J]. *科学养鱼*, 2000, (7): 18.
- [36] Liss P S, Slater P G. Flux of gases across the air-sea interface[J]. *Nature*, 1974, **27**(5438): 181-184.
- [37] Ravishankara A R, Turnipseed A A, Jensen N R, *et al.* Do hydrofluorocarbons destroy stratospheric ozone? [J]. *Science*, 1994, **263**(5143): 71-75.
- [38] Johnson K M, Hughes J E, Donaghay P L, *et al.* Bottle-calibration static head space method for the determination of methane dissolved in seawater[J]. *Analytical Chemistry*, 1990, **62**(21): 2408-2412.
- [39] 高洁, 郑循华, 王睿, 等. 漂浮通量箱法和扩散模型法测定内陆水体 CH_4 和 N_2O 排放通量的初步比较研究[J]. *气候与环境研究*, 2014, **19**(3): 290-302.
Gao J, Zheng X H, Wang R, *et al.* Preliminary comparison of the static floating chamber and the diffusion model methods for measuring water-atmosphere exchanges of methane and nitrous oxide from inland water bodies[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2014, **19**(3): 290-302.
- [40] Högborg M N, Högborg P. Extramatrical ectomycorrhizal mycelium contributes one-third of microbial biomass and produces, together with associated roots, half the dissolved organic carbon in a forest soil[J]. *New Phytologist*, 2002, **154**(3): 791-795.
- [41] 郝庆菊. 三江平原沼泽土地利用变化对温室气体排放影响的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(大气物理研究所), 2005.

- Hao Q J. Effect of land-use change on greenhouse gases emissions in freshwater marshes in the Sanjiang Plain [D]. Beijing: the Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [42] 马煜春, 孙丽英, 刘翠英, 等. 太湖地区两种典型水产养殖系统 CH_4 排放研究[J]. 生态环境学报, 2018, **27**(7): 85-91.
- Ma Y C, Sun L Y, Liu C Y, *et al.* Methane emission from two typical aquaculture ponds in Taihu Lake [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, **27**(7): 85-91.
- [43] 彭文杰, 李强, 宋昂, 等. 五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2673-2679.
- Peng W J, Li Q, Song A, *et al.* Spatial-temporal variations of CO_2 and CH_4 flux through a water-air interface under the effect of primary productivity in Wulixia Reservoir [J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2673-2679.
- [44] Beaulieu J J, Smolenski R L, Nierth C T, *et al.* High methane emissions from a midlatitude reservoir draining an agricultural watershed[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(19): 11100-11108.
- [45] Sawakuchi H O, Bastviken D, Sawakuchi A O, *et al.* Methane emissions from Amazonian Rivers and their contribution to the global methane budget[J]. Global Change Biology, 2014, **20**(9): 2829-2840.
- [46] Wu S, Li S Q, Zou Z H, *et al.* High methane emissions largely attributed to ebullitive fluxes from a subtropical river draining a rice paddy watershed in China[J]. Environmental Science and Technology, 2019, **53**(7): 3499-3507.
- [47] Huang Y, Yasarer L M W, Li Z, *et al.* Air-water CO_2 and CH_4 fluxes along a river-reservoir continuum: Case study in the Pengxi River, a tributary of the Yangtze River in the Three Gorges Reservoir, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017, **189**: 223.
- [48] Thérien N, Morrison K. Production of GHG from the decomposition of *in vitro* inundated phytomass and soil [A]. Tremblay A, Varfalvy L, Roehm C, *et al.* (Eds.). Greenhouse Gas Emissions-Fluxes and Processes. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005.
- [49] Xing Y P, Xie P, Yang H, *et al.* Methane and carbon dioxide fluxes from a shallow hypereutrophic subtropical Lake in China [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(30): 5532-5540.
- [50] Natchimuthu S, Selvam B P, Bastviken D. Influence of weather variables on methane and carbon dioxide flux from a shallow pond [J]. Biogeochemistry, 2014, **119**(1-3): 403-413.
- [51] Yang S S, Chen I C, Liu C P, *et al.* Carbon dioxide and methane emissions from Tanswei River in Northern Taiwan[J]. Atmospheric Pollution Research, 2014, **6**(1): 52-61.
- [52] 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 B F, Gao Q X, Li Z H, *et al.* Estimation of methane emissions of wastewater treatment plants in China [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(12): 3810-3816.

CONTENTS

Influencing Factors of Long-term Variations on Gridded PM _{2.5} of Typical Regions in China Based on GAM Model	NAN Yang, ZHANG Qian-qian, ZHANG Bi-hui (499)
Gridded Atmospheric Emission Inventory of PCDD/Fs in China	CHEN Lu-lu, HUANG Tao, CHEN Kai-jie, <i>et al.</i> (510)
Spatio-Temporal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} Across Multiple Sampling Locations in the Chengdu Plain	SHI Fang-tian, LUO Bin, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (520)
Diurnal Variations and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Nanjing Jiangbei New Area	QIU Chen-chen, YU Xing-na, DING Cheng, <i>et al.</i> (529)
Characterization, Seasonal Variation, and Source Apportionments of Particulate Amines (PM _{2.5}) in Northern Suburb of Nanjing	LI Xu-jie, SHI Xiao-wen, MA Yan, <i>et al.</i> (537)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes and PAHs in Summertime PM _{2.5} at Background Site of Yangtze River Delta	XUE Guo-yan, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (554)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Changchun City, Autumn of 2017	ZHANG Yi-xuan, CAO Fang, ZHENG Han, <i>et al.</i> (564)
Heavy Pollution Characteristics and Assessment of PM _{2.5} Predicted Model Results in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Surrounding Areas During November 23 to December 4, 2018	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i> (574)
Analysis of Characteristics and Meteorological Influence Factors of Ozone Pollution in Henan Province	QI Yan-jie, YU Shi-jie, YANG Jian, <i>et al.</i> (587)
Spatio-Temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Properties in Henan Province	ZHANG Rui-fang, YU Xing-na (600)
Analysis of Water Soluble Organic Aerosol in Spring PM _{2.5} with Soot Particle Aerosol Mass Spectrometry (SP-AMS)	HUANG Wen-qian, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (609)
Temporal Evolution and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Nanjing	YANG Xiao-min, SHI Shuang-shuang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (620)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in Summer and Autumn in Different Functional Zones of Lianyungang, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, LI Hui-peng, <i>et al.</i> (630)
Operation and Maintenance of Cost-Effective Volatile Organic Compounds Abatement Alternatives	QIANG Ning, SHI Tian-zhe, MIAO Hai-chao (638)
Pollution and Deposition Characteristics of Precipitation and Its Source Apportionment in Xi'an City	DING Cheng, YU Xing-na, HOU Si-yu (647)
Bacterial Diversity and Community Structure Antibiotic-resistant Bacteria in Bioaerosol of Animal Farms	SHA Yun-fei, SUN Xing-bin, XIN Wen-peng, <i>et al.</i> (656)
Vehicle Emission Inventory and Scenario Analysis in Liaoning from 2000 to 2030	JIN Jia-xin, SUN Shi-da, WANG Peng, <i>et al.</i> (665)
VOCs Emission Characteristics of DPF Regeneration in National VI Diesel Engine	QIAN Feng, XUE Chang-xin, XU Xiao-wei, <i>et al.</i> (674)
Characteristics and Significance of Stable Isotopes and Hydrochemistry in Surface Water and Groundwater in Nanxiaohegou Basin	GUO Ya-wen, TIAN Fu-qiang, HU Hong-chang, <i>et al.</i> (682)
Spatio-Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Middle and Lower Reaches of Le'an River	YU Yang, LÜ Ya-ning, WANG Wei-jie, <i>et al.</i> (691)
Spatio-temporal Evolution and Relationship of Water Environment Quality and Phytoplankton Community in Wenyu River	ZHU Li-ying, CHEN Yuan-yuan, LIU Jing, <i>et al.</i> (702)
High-Frequency Dynamics of Water Quality and Phytoplankton Community in Inflowing River Mouth of Xin'anjiang Reservoir, China	DA Wen-yi, ZHU Guang-wei, LI Yun-xiang, <i>et al.</i> (713)
Phosphorus Storage Capacity and Loss Risk in Coastal Reed Wetland Surrounding Bohai Sea	SONG Jia-wei, XU Gang, ZHANG Yang, <i>et al.</i> (728)
Spatio-Temporal Variation of Release Flux of Sediment Nitrogen and Phosphorus in High-Risk Period of Algal Bloom in Lake Erhai	LIU Si-ru, ZHAO Ji-dong, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (734)
Fluorescence Characteristics and Source Analysis of DOM in Snowfall of Xi'an	YANG Yi, HAN Li-yuan, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (743)
Performance Assessment of Permeable Interlocking Concrete Pavement Facility Structure	ZHANG Jia-wei, LIU Yong, JIN Jian-rong, <i>et al.</i> (750)
Photocatalytic Degradation of Rhodamine B with Micro-SiC/Graphene Composite Under Visible Light Irradiation	ZHU Hong-qing, YANG Bing, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (756)
Removal of BPA and EE2 from Water by Mn-Fe Embedded in Acicular Mullite	ZHOU Qiu-hong, LONG Tian-yu, HE Jing, <i>et al.</i> (763)
Fabrication of La-MHTC Composites for Phosphate Removal; Adsorption Behavior and Mechanism	SONG Xiao-bao, HE Shi-ying, FENG Yan-fang, <i>et al.</i> (773)
Adsorption of Low-Concentration Phosphorus from Water by Composite Metal Modified Biochar	SUN Ting-ting, GAO Fei, LIN Li, <i>et al.</i> (784)
Phosphate Adsorption from Water on CaO ₂ -loaded Magnetic Diatomite	XU Chu-tian, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (792)
Phosphorus Forms and Release Risk of Sediments in Urban Sewage Treatment Plant Effluent and Receiving Stream Reach	TANG Ning, LI Ru-zhong, WANG Yu-qing, <i>et al.</i> (801)
Purification Characteristics of Urban Tail Water from Sewage Treatment Plant by Biofilm Ecological Floating Bed	ZHAO Zhi-rui, ZHANG Jia-yao, LI Duo, <i>et al.</i> (809)
Removal Performance of Antibiotic Resistance Genes and Heavy Metal Resistance Genes in Municipal Wastewater by Magnetic-Coagulation Process	YU Wen-chao, ZHENG Li-bing, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (815)
Effect of Tetracycline Antibiotic on Abundance and Transcriptional Expression Level of Tetracycline Resistance Genes in Activated Sludge	RUAN Xiao-hui, QIAN Ya-jie, XUE Gang, <i>et al.</i> (823)
Denitrification Process and N ₂ O Production Characteristics of Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas aeruginosa</i> YL	YANG Lei, CUI Shen, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (831)
Environmental Factors Influence and Microbial Community Structure Analysis of Entrapped Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (839)
Research on Denitrification Performance of Enhanced Secondary Effluent by Embedded Denitrification Filler and Pilot Application	ZHOU Ya-kun, YANG Hong, WANG Shao-lun, <i>et al.</i> (849)
Temporal Anaerobic Effect on Aerobic Granular Sludge with Intermittent Influent-Intermittent Aeration	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i> (856)
Simultaneous Short-Cut Nitrification-Denitrification Phosphorus Removal Granules Induced by Phosphorus Removal Granules	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (867)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals on Farmland of Geochemical Anomaly Area in Southwest Guangxi	WANG Fo-peng, XIAO Nai-chuan, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (876)
Evaluation and Source of Heavy Metal Pollution in Surface Soil of Qinghai-Tibet Plateau	YANG An, WANG Yi-han, HU Jian, <i>et al.</i> (886)
Characteristics and Factors of Soil Enzyme Activity for Different Plant Communities in Yellow River Delta	MO Xue, CHEN Fei-jie, YOU Chong, <i>et al.</i> (895)
Effects of Management Measures on Soil Water-soluble Carbon and Nitrogen and Their Three-Dimensional Fluorescence Characteristics of <i>Pinus tabulaeformis</i> Plantations on Loess Plateau	SONG Ya-hui, ZHANG Jiao-yang, LIU Hong-fei, <i>et al.</i> (905)
Effects of Biochar Input on Changes of Available Nutrient Elements in Riparian Soils with Different Landuse Types	ZHOU Hui-hua, YUAN Xu-yin, XIONG Yu-ting, <i>et al.</i> (914)
Effect of Applying Hydrochar for Reduction of Ammonia Volatilization and Mechanisms in Paddy Soil	YU Shan, XUE Li-hong, HUA Yun, <i>et al.</i> (922)
Effects of Mycorrhizal Fungi on Nitrification and Denitrification in the Rhizospheric Soil of Aquatic Plants and Its Microbial Mechanism	LIU Duo, WANG Lei, CAO Zhan-bo, <i>et al.</i> (932)
Comparison of Floating Chamber and Diffusion Model Methods for Measuring Methane Emissions from Inland Fish-Aquaculture Ponds	HU Tao, HUANG Jian, DING Ying, <i>et al.</i> (941)
Simultaneous Quantitative Detection of Thirteen Common Antibiotics in Leafy Vegetables by Ultra-High Performance Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry	CHEN Qian, LIU Yang, XIAO Li-jun, <i>et al.</i> (952)
Accumulation and Translocation of Cd in <i>Brassica rapa</i> Under the Influence of Selenium	YU Yao, LUO Li-yun, LIU Zhe, <i>et al.</i> (962)
Tolerance Mechanism and Cadmium Enrichment Abilities in Two <i>Brassica napus</i> L. Cultivars	BIAN Jian-lin, GUO Jun-mei, WANG Xue-dong, <i>et al.</i> (970)
Enhanced Phytoextraction of Cadmium Contaminated Soil by <i>Trifolium Repens</i> with Biodegradable Chelate GLDA	HE Yu-long, YU Jiang, XIE Shi-qian, <i>et al.</i> (979)
Heavy Metal Contents in Animal Manure in China and the Related Soil Accumulation Risks	MU Hong-yu, ZHUANG Zhong, LI Yan-ming, <i>et al.</i> (986)
Microbial Community Succession in Industrial Composting with Livestock Manure and Peach Branches and Relations with Environmental Factors	CAI Han-bing, FENG Wen-wen, DONG Yong-hua, <i>et al.</i> (997)
Degradation Characteristics of Antibiotics During Composting of Four Types of Feces	ZHU Wei-jing, ZHU Feng-xiang, WANG Wei-ping, <i>et al.</i> (1005)