

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



2019

Vol.40 No.12

第40卷 第12期

目次(卷终)

研究报告

- 京津冀秋冬季 PM_{2.5} 污染概况和预报结果评估 朱媛媛, 高愈霄, 刘冰, 王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 汪巍, 丁俊男, 李健军, 段小丽 (5191)
- 2016 ~ 2017 年采暖期华北平原东部 PM_{2.5} 组分特征及来源解析 张逸琴, 王杰, 高健, 徐仲均, 车飞, 马彤, 杨艳, 刘素, 闫璐璐 (5202)
- 霾不同发展阶段下污染气体和水溶性离子变化特征分析 王振彬, 刘安康, 卢文, 杨晓旻, 王红磊, 陈魁, 夏丽 (5213)
- 上海郊区家庭妇女 PM_{2.5} 重金属组分暴露水平、来源与健康风险 罗燃燃, 戴海夏, 张蕴晖, 乔利平, 马英歌, 周敏, 夏斌, 朱清扬, 赵迎亚, 黄成 (5224)
- 固定污染源可凝结颗粒物测量方法 蒋靖坤, 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 郝吉明 (5234)
- 家具企业挥发性有机物排放特征及其环境影响 张嘉妮, 曾春玲, 刘锐源, 姚懿娟, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (5240)
- 抗生素企业 VOCs 排放清单及影响范围模拟 竹涛, 吕怡蓉, 边文璟, 牛文凤, 袁前程, 段二红, 于洋, 林军 (5250)
- 新乡市机动车排放对道路灰尘中重金属与多环芳烃污染的影响 李琦路, 吴锦涛, 张颖, 孙玉静, 乔泓钦, 张子伟, 裴梦园, 张孟琼, 任明浩 (5258)
- 成都市道路积尘中全氟化合物的污染特征及暴露风险评估 方淑红, 朱和祥, 叶芝祥, 印红玲, 孙静 (5265)
- 祁连山北坡中段降水稳定同位素特征及水汽来源分析 张百娟, 李宗省, 王昱, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 桂娟 (5272)
- 长江南京段水源水中抗生素的赋存特征与风险评估 封梦娟, 张芹, 宋宁慧, 卜元卿, 杨正标, 刘艳华, 郭瑞昕, 陈建秋, 张圣虎 (5286)
- 夏秋季混凝剂对复合锰氧化膜去除地表水中氨氮和锰的影响 程丽杰, 黄廷林, 程亚, 张莎莎, 阮昭意, 卢磊 (5294)
- 浙江省 H 市供水系统消毒副产物及其健康风险评价 刘俊萍, 于建全, 李青松, 马晓雁, 杨玉龙, 贾佳 (5302)
- 三峡库区城镇化背景下河流 DOM 的吸收及荧光光谱特征 陈昭宇, 李思悦 (5309)
- 川西高原河流水体 CDOM 的光化学降解特性 刘堰杨, 孙辉, 刘琛, 王小沁 (5318)
- 三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征 曹瑞霞, 刘京, 邓开开, 先宇, 王伟, 方芳, 欧阳文娟, 郭劲松 (5330)
- 九龙江流域河流磷输出对土地利用模式及水文状况的响应 黄亚玲, 唐莉, 黄金良, 肖才荣 (5340)
- 不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响 方娜, 刘玲玲, 游清徽, 田娜, 吴燕平, 阳文静 (5348)
- 太湖草藻型湖区磷赋存特征及其环境意义 耿雪, 文帅龙, 孙培荣, 徐楚天, 李大鹏, 黄勇 (5358)
- 太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价 方家琪, 祁闯, 张新厚, 韩睿明, 黄和笑, 王卓森, 王国祥 (5367)
- 降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响 李晓虹, 雷秋良, 周脚根, 张亦涛, 李影, 胡万里, 武淑霞, 翟丽梅, 王洪媛, 刘宏斌 (5375)
- 外源 Ca²⁺ 和 K⁺ 作用下河口区碱蓬水质净化效果和耐盐碱提高机制 吴丹, 孙萍, 陈广琳, 陈友媛, 彭昌盛 (5384)
- 泽泻 (*Alisma orientale*) 对全氟化合物的吸收和传输特征-浓度的影响 王团团, 李贝贝, 王赛, 华佩, 陈军, 应光国 (5394)
- 复合人工湿地中反硝化除磷作用的发生及其稳定性 刘冰, 郑煜铭, 李清飞, 赵承美, 魏巍, 张凯 (5401)
- 铅、镉和铜改性沸石添加控制底泥磷释放的对比 刘婷, 赵钰颖, 林建伟, 詹艳慧, 秦琴 (5411)
- 生物炭结构性质对氨氮的吸附特性影响 陈梅, 王芳, 张德俐, 易维明 (5421)
- 溶解氧对悬浮与附着生长系统短程硝化反应的影响机制 王嗣禹, 刘灵婕, 王芬, 季民 (5430)
- 间歇恒定/梯度曝气对 SNAD 工艺启动的影响 李冬, 刘志成, 徐贵达, 李帅, 张杰 (5438)
- 共基质模式下铁盐脱氮反应器的运行性能及微生物学特征 王茹, 刘梦瑜, 刘冰茵, 赵治国, 袁林江 (5446)
- 阶梯曝气对城市污水好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 魏子清, 劳会妹, 李帅, 张杰 (5456)
- 酵母菌降解胞外聚合物提升剩余活性污泥的脱水性能 俞心怡, 向金豪, 刘英, 龚天翼, 张彬辉, 吕文洲 (5465)
- 基于 GEE 的 1998 ~ 2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响 娄佩卿, 付波霖, 林星辰, 闭璐, 马瑞雪, 唐廷元 (5473)
- 基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价 解雪峰, 濮励杰, 朱明, 吴涛, 许艳 (5484)
- 淹水增加对闽江河口淡水潮汐湿地孔隙水地球化学特征及 CO₂ 和 CH₄ 排放通量的影响 李敬, 黄佳芳, 罗敏, 刘育秀, 谭季, 朱爱菊, 王声钰, 仝川 (5493)
- 养殖塘 CH₄ 排放特征及其影响因素 王娇, 肖薇, 张秀芳, 张弥, 张文庆, 刘强, 陈争, 董保华, 李旭辉 (5503)
- 施肥对高梁地土壤呼吸及其温度敏感性的影响 严俊霞, 张媛, 焦晓燕 (5515)
- 高硒高镉区土地安全区划方法 王锐, 侯宛苓, 李雨潼, 余涛, 陈娟 (5524)
- 不同配比复合材料对农田镉污染土壤的修复效果 陈树兰, 许晨阳, 耿增超, 王强, 祝乐, 龚园, 拓卫卫 (5531)
- 水铝钙石对不同镉污染农田重金属的钝化效果及机制 吴秋梅, 刘刚, 王慧峰, 胡文友, 黄标 (5540)
- 狮子山矿区不同土地利用类型对土壤微生物群落多样性的影响 黄健, 朱旭炎, 陆金, 孙雨, 赵兴青 (5550)
- 林地转型耕地对东北丘陵区白浆土 *cbbL* 细菌群落丰度和结构的影响 王蕊, 吴宪, 李刚, 修伟明, 王丽丽, 张贵龙 (5561)
- 粤港澳大湾区场地污染特征、治理修复与环境管理研究专辑
- 粤港澳大湾区污染场地土壤风险管控制度体系建设与思考 常春英, 董敏刚, 邓一荣, 肖荣波, 刘丽丽 (5570)
- 粤港澳大湾区土壤污染问题计量及可视化分析 张宁, 张盛, 杨海超, 张建通 (5581)
- 城市生活垃圾填埋场的物质存量特征及其环境影响: 以粤港澳大湾区为例 马仕君, 周传斌, 杨光, 赵志岚, 刘懿颀 (5593)
- 粤港澳大湾区丘陵区带某电镀场地重金属污染特征与迁移规律分析 侯文隽, 龚星, 詹泽波, 刘锋, 黄子航, 杨立宏, 林晓琛 (5604)
- 粤港澳大湾区典型化工场地苯系物污染特征及迁移规律 邓一荣, 陆海建, 董敏刚, 程洲, 庄长伟, 肖荣波, 钟音, 彭平安 (5615)
- 针铁矿-富里酸复合材料对铅镉污染土壤的钝化修复性能 刘千钧, 李想, 周阳媚, 唐杰鹏, 林亲铁, 姚琨 (5623)
- 广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价 陈洁宜, 刘广波, 崔金立, 肖唐付 (5629)
- Hydrus-1D 模型在推导基于保护地下水的土壤风险控制值中的应用 林挺, 罗飞, 朱艳, 杨坤, 郝秀平 (5640)
- 《环境科学》第 40 卷(2019 年) 总目录 (5649)
- 《环境科学》征订启事(5233) 《环境科学》征稿简则(5285) 信息(5357, 5420, 5429)

养殖塘 CH₄ 排放特征及其影响因素

王娇^{1,2}, 肖薇^{1,2*}, 张秀芳^{1,3}, 张弥^{1,2}, 张文庆^{1,4}, 刘强^{1,2}, 陈争^{1,2}, 董保华⁵, 李旭辉¹

(1. 耶鲁-南京信息工程大学大气环境中心, 南京 210044; 2. 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; 3. 南京信息工程大学无锡研究院, 无锡 214105; 4. 南京信息工程大学滨江学院, 无锡 214105; 5. 安徽省天长市气象局, 天长 239300)

摘要: 富营养化的养殖塘是重要的甲烷(CH₄)排放源。为明确养殖塘 CH₄ 排放特征及其影响因素, 本研究利用倒置漏斗法和体积扩散模型法, 分别对安徽全椒两个养殖塘冬、春季 CH₄ 冒泡通量和扩散通量进行了多日连续观测。结果表明, 冬季 CH₄ 冒泡通量白天高于夜间, 夜间几乎为零; 春季夜间高于白天。在季节尺度上, 冬季 CH₄ 冒泡通量显著低于春季, 分别为 3.92 mg·(m²·d)⁻¹ 和 106.94 mg·(m²·d)⁻¹; 冬季 CH₄ 扩散通量略高于春季, 分别为 2.81 mg·(m²·d)⁻¹ 和 0.87 mg·(m²·d)⁻¹。自然因素(水温 and 气压)与 CH₄ 冒泡通量和扩散通量显著相关。其中随水温的升高、气压的降低, CH₄ 冒泡通量分别呈指数递增和线性递增趋势。人工管理措施(冬季排水和春季施粪)会显著提高 CH₄ 冒泡通量, 但对扩散通量的影响并不显著。在冬季排水期间, 水深与 CH₄ 冒泡通量显著负相关; 在春季鸡粪投放点, CH₄ 冒泡通量可高达 1002.30 mg·(m²·d)⁻¹。本研究可为评估小型养殖塘对全球碳循环的贡献提供数据支撑。

关键词: 养殖塘; CH₄ 冒泡通量; CH₄ 扩散通量; 自然因素; 人工管理措施

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)12-5503-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.201905149

Methane Emission Characteristics and Its Influencing Factors over Aquaculture Ponds

WANG Jiao^{1,2}, XIAO Wei^{1,2*}, ZHANG Xiu-fang^{1,3}, ZHANG Mi^{1,2}, ZHANG Wen-qing^{1,4}, LIU Qiang^{1,2}, CHEN Zheng^{1,2}, DONG Bao-hua⁵, LI Xu-hui¹

(1. Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. NUIST-Wuxi Research Institute, Wuxi 214105, China; 4. Binjiang College of Nanjing University of Information Science & Technology, Wuxi 214105, China; 5. Tianchang Meteorology Bureau of Anhui Province, Tianchang 239300, China)

Abstract: Eutrophic aquaculture ponds are important methane (CH₄) sources. In order to quantify CH₄ emission characteristics and its influencing factors over aquaculture ponds, we conducted several intensive observations over two ponds located in Quanjiao County, Anhui Province, in 2018. The ebullition and diffusion flux of CH₄ were measured in two seasons (winter and spring) using the inverted-funnel and bulk diffusion model, respectively. In winter, the CH₄ ebullition flux during the daytime was higher than that at night (almost zero), whereas the diurnal pattern was found to be reversed in spring. Seasonally, the CH₄ ebullition flux over the ponds was significantly lower in winter [3.92 mg·(m²·d)⁻¹] than in spring [106.94 mg·(m²·d)⁻¹], while the diffusion flux in winter [2.81 mg·(m²·d)⁻¹] was slightly higher than in spring [0.87 mg·(m²·d)⁻¹]. The CH₄ ebullition and diffusion flux can be significantly controlled by natural factors such as water temperature and air pressure. It was revealed that the CH₄ ebullition flux in the studied ponds increased exponentially with increasing water temperature, and increased linearly with decreasing air pressure. Furthermore, we found that artificial management measures (i.e., winter drainage and spring manure treatment) could significantly enhance the CH₄ ebullition flux rather than diffusion flux. For instance, the CH₄ ebullition flux was found to increase with water depth decrease during the winter drainage period, while in the spring, the CH₄ ebullition flux could reach as high as 1002.30 mg·(m²·d)⁻¹ with chicken manure applicated. This study can provide data support for assessing the contribution of small ponds to the global carbon cycle.

Key words: aquaculture ponds; CH₄ ebullition flux; CH₄ diffusion flux; natural factors; artificial management measures

内陆水体是大气甲烷(CH₄)重要的自然排放源^[1], 在全球碳循环中发挥着重要的作用^[2]。目前有关内陆水体 CH₄ 排放的研究主要集中在自然水体^[3], 相比之下, 有关养殖塘排放 CH₄ 的研究较少。据估计, 全球养殖塘的总表面积已达到 110 832 km²^[4], 且由于养殖塘具有较高内缘比及较浅水深

的特点, 通常会导致较高的 CH₄ 排放量^[5]。因此, 明确养殖塘 CH₄ 排放特征及其影响, 对于准确估算内

收稿日期: 2019-05-20; 修订日期: 2019-07-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41575147)

作者简介: 王娇(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为地-气温室气体交换, E-mail: 1757775938@qq.com

* 通信作者, E-mail: wei.xiao@nuist.edu.cn

陆水体对全球 CH_4 排放的贡献有重要意义。

水体中, CH_4 排放到大气中的方式主要有扩散、冒泡和植物介导^[6,7]。目前,国内外对 CH_4 排放通量的观测方法主要有涡度相关法^[8]、通量梯度法^[9]、箱式法^[5,10]、倒置漏斗法^[1,3]和体积扩散模型法^[11]。其中,涡度相关法和通量梯度法能观测到通过各个途径排放的 CH_4 总量,但是不能分别量化各个途径的 CH_4 排放量^[8,9];箱式法可以分别观测 CH_4 冒泡和扩散,但其观测 CH_4 冒泡是根据箱体内存空气 CH_4 浓度差来确定,可能会忽略一些较小的冒泡^[5];倒置漏斗法可以准确地观测从底泥产生的 CH_4 冒泡^[1,3];体积扩散模型法可以有效观测 CH_4 扩散量^[11]。养殖塘中挺水植物较少,通过植物介导的排放可以忽略,冒泡和扩散为 CH_4 排放的主要方式。选用倒置漏斗法和体积扩散模型法分别对冒泡和扩散通量进行观测,有助于量化两种排放途径的排放特征、比例及各自的影响因素,对于清楚认识养殖塘乃至内陆水体 CH_4 排放的控制机制具有重要的意义。

养殖塘 CH_4 排放同时受到自然因素和人工管理措施的影响。对于自然因素,目前已有较多研究表明,水温是控制自然水体 CH_4 排放的主导因子^[1,10],但有关水温对养殖塘 CH_4 排放影响的研究相对较少。对于人工管理,影响 CH_4 通量的措施主要包括排水晒塘和施粪。排水晒塘是养殖塘冬季主要的人工管理措施,水位在短时间内快速下降。自然条件下水位缓慢变动对水体 CH_4 排放的影响已有较多研究^[12,13],但短期内水位快速下降对养殖塘 CH_4 排放的影响尚不明确。此外,在我国养殖塘中,通常会在春季一次性投放大量鸡粪作为饲料,但由于水生动物对鸡粪的利用率较低,底泥中会残余很多鸡粪中的有机质^[14],从而影响养殖塘 CH_4 的排放

量。有研究发现,投放有机饲料会显著提高养殖塘 CH_4 排放量^[15],但一次性投放大量鸡粪对养殖塘 CH_4 排放量的影响尚不清楚。因此,结合自然因素和人工管理措施对养殖塘 CH_4 排放的影响是目前值得关注的问题。

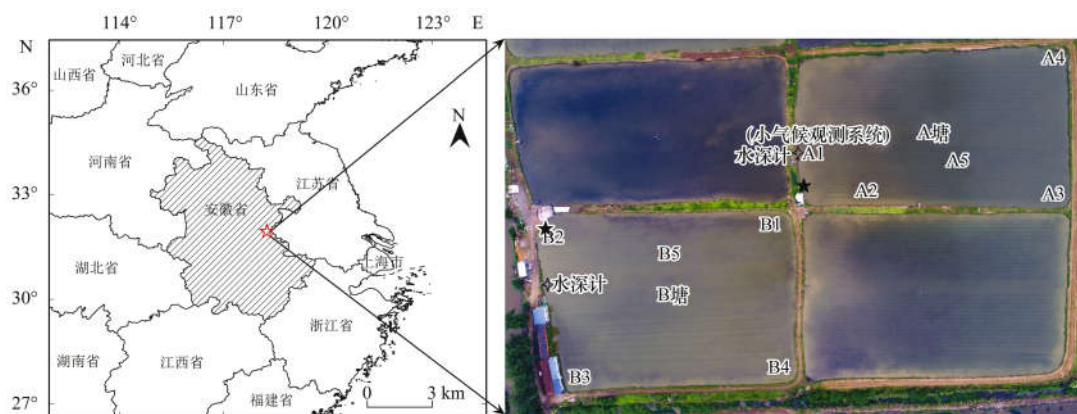
长江中下游地区是我国重要的淡水养殖区域^[16],养殖塘面积广,富营养化程度严重,人工管理措施对 CH_4 排放的影响不可忽视^[17]。本研究在安徽淡水养殖密集区域选取了两个养殖塘,基于倒置漏斗法和体积扩散模型法,对冬季和春季的 CH_4 冒泡通量和扩散通量进行观测,分析冬、春季 CH_4 冒泡通量和扩散通量的时空变化特征;探讨气象要素和水质参数变化等自然因素与春季施粪和冬季排水这两种典型的养殖塘人工管理措施对 CH_4 排放的影响。

1 材料与方法

1.1 研究对象

本研究对象位于中国安徽省全椒淡水养殖区中的两个鱼类养殖塘(118.25°E,31.97°N),每个塘分别选取了5个采样点(图1)。其中A塘面积7168 m²,B塘面积7524 m²,水深1.8~1.9 m。两个塘岸边有8个采样点,距离岸边约1.5 m,A5和B5距岸边约10 m。

A、B塘均养殖了鲢鱼、鳊鱼、鲫鱼、草鱼、青鱼和鳙鱼,年产量分别为500、750、2500、3000、3000和250 kg。冬季两塘均进行了排水,但由于人工条件的限制,排水时间存在一定的先后顺序。其中B塘在1月19日进行排水,1月24日基本排干,其水深变化如图2所示(试验期间);A塘在2月6日进行排水,2月11日基本排干(非试验期)。A、B塘均会在排水结束后3 d左右重新注水。春季3月初在A塘和B塘一次性加入约1 t和2 t的鸡粪作



★表示鸡粪投放点

图1 采样点位置示意和无人机拍摄照片

Fig. 1 Location of the sampling sites and a photo taken by a drone

为饲料(图 1),其余时期不施加鸡粪. 在春季试验期间,A、B 塘每天中午施加 1 次饲料.

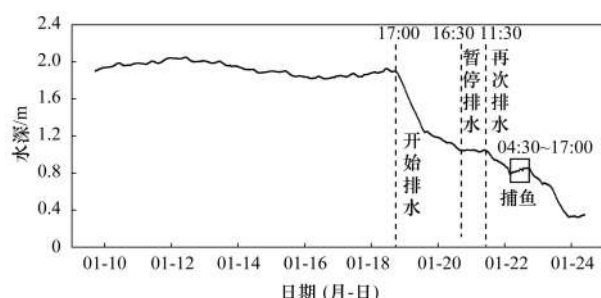


图 2 冬季试验期间 B 塘水深的时间序列

Fig. 2 Time series of water depth of pond B during winter campaign

1.2 采样时间

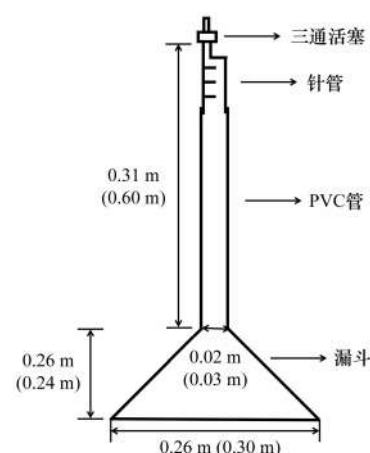
本研究对养殖塘冬、春季 CH₄ 冒泡通量和扩散通量进行观测. 冬季的采样时间为 2018 年 1 月 10 ~ 23 日. 对于冒泡通量观测,1 月 10 ~ 12 日为密集采样时间,每隔 6 h 取一次气样,取样时间为 06:00、12:00、18:00 和 24:00;1 月 13 ~ 23 日为非密集采样时间,每隔 24 h 取一次气样,因冬季夜间和上午水面可能出现结冰现象,故将取样时间设为下午 15:00 ~ 16:00 之间. 对于扩散通量观测,由于日变化较小不做密集观测,1 月 13 ~ 23 日每天中午 12:00 收集水样. 春季的采样时间为 2018 年 4 月 11 ~ 27 日. 其中对于冒泡通量观测,4 月 11 ~ 13 日为密集采样时间;4 月 14 ~ 27 日为非密集采样时间. 春季扩散通量观测,每天采样时间与冬季相同.

1.3 冒泡通量的观测方法

1.3.1 倒置漏斗装置及其观测方法

本文采用倒置漏斗法观测水-气界面上通过冒泡形式排放的 CH₄ 通量,即 CH₄ 冒泡通量. 装置底端是一个白色的圆形塑料漏斗,上面连接一段聚四氟乙烯 PVC 管和一个聚丙烯针管,最上端是一个三通活塞,整个装置需保持密封状态(图 3). 采样器这种下宽上窄的窄颈设计可以有效限制 CH₄ 从采样器反向扩散回水中. 冬季试验采用的漏斗最大底面积约为 0.053 m²;春季对漏斗进行了些微调整,通过更大的漏斗面积(0.071 m²),使漏斗接触水面的面积越大,但计算方法相同.

本试验需要将组装好的采样器放置在 10 个采样点. 对于岸边的 8 个采样点,修建栈桥用于取样;对于采样点 A5 和 B5,利用事先绑好的绳索将采样装置拉回岸边进行取样,同时保证漏斗不离开水面,不会影响漏斗内收集到的气体. 首先将装置扣在水面上(漏斗下边缘位于水面以下约 20 cm),每个漏斗通过浮动泡沫稳定. 用一个针管连接三通活塞,手动将装置中的残留空气全部抽干净,使之充满水.



括号外的数值为改装前装置的大小,

括号内的数值为改装后装置的大小

图 3 倒置漏斗示意

Fig. 3 Diagram of the inverted funnel

通过冒泡排放的 CH₄ 气体会从漏斗下方开口向上方汇集,装置中的水面随之下降. 每天在固定的时间采样,采样时使用针管连接三通活塞,收集倒置漏斗装置中的气体,采用 Parafilm® M 封口膜对其进行密封处理后带回实验室,利用气相色谱仪(Agilent GC6890N, Agilent Technologies Inc., CA, USA)分析其中的 CH₄ 浓度. 对于试验方法的具体原理,参见 Huttunen 等^[18]的研究.

1.3.2 CH₄ 冒泡通量的计算方法

本文采用 Wik 等^[12]的方法计算 CH₄ 冒泡通量,计算方法如下:

$$F_b = \frac{C \times V \times M}{A \times t \times V_m} \times \frac{1}{1000} \quad (1)$$

式中, F_b 为 CH₄ 冒泡通量[$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]; C 为气相色谱仪测得的 CH₄ 摩尔分数($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$); V 为漏斗收集的气体体积(L); M 为 CH₄ 的摩尔质量,取值为 $16.04 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$; A 为漏斗的最大面积(m^2); t 为每次收集气体的时间(d); V_m 为气体摩尔体积 $22.4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$.

1.4 扩散通量的观测方法

1.4.1 体积扩散模型法原理及其观测方法

本文采用体积扩散模型法观测养殖塘水-气界面通过扩散形式排放的 CH₄ 通量,即 CH₄ 扩散通量. 体积扩散模型法的原理是基于水中溶解的 CH₄ 浓度与水体和大气之间平衡的 CH₄ 浓度的差异,再结合气体交换系数计算 CH₄ 扩散通量^[11,19].

试验期间,每天用采水器(SC-I 型手持取样器)在 8 个岸边采样点取水(A5 和 B5 因距离较远,不取水样). 取水期间应避免水样接触空气,减少水样中气体被氧化. 取水深度为水下 20 cm,水样用 300 mL 的玻璃瓶存放,充满玻璃瓶,使瓶中没有空气.

为防止漏气,用 Parafilm® M 封口膜将瓶口密封,放置于 4℃ 的条件下保存. 定期带回南京信息工程大学地气交换实验室进行预处理和测量. 测量前,先在瓶塞上插两个注射器针头,通过一个针头向瓶子中注入体积分数为 99.99% 的高浓氮气,水会从另外一个针头被顶出,顶空 30 mL 水样后,将玻璃瓶密封,手动剧烈摇晃 5 min 左右,然后静置 30 min,最后,利用气相色谱仪测量顶空气体中的 CH₄ 浓度.

1.4.2 CH₄ 扩散通量的计算方法

本文采用 Cole 等^[20] 的方法计算 CH₄ 扩散通量,计算方法如下:

$$F_d = k \times (c_w - c_{eq}) \quad (2)$$

式中, F_d 为 CH₄ 扩散通量 [$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]; k 为气体交换传输系数 ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$), 取决于风速, 具体公式见 Juutinen 等^[21] 的描述; c_w 为水体中溶解的 CH₄ 原始浓度 ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$), 顶空后的玻璃瓶摇晃静置达到平衡, 根据物料平衡得到:

$$c_w V_L = c_L V_L + c_g V_g \quad (3)$$

式中, c_g 为玻璃瓶中 CH₄ 在水样的气相 (顶空的部分) 和液相 (剩余的水样) 中达到平衡时在气相中的浓度 ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$), 通过气相色谱仪测得; V_g 为玻璃瓶中气相的体积 (mL); c_L 为 CH₄ 在水样的气相和液相中达到平衡时在液相中的浓度 ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$), 由亨利系数 H_r 计算得到, 具体公式见 Johnson 等^[22] 的描述; V_L 为玻璃瓶中液相的体积 (mL). 则 c_w 的计算公式为:

$$c_w = c_g \times \left(\frac{c_L}{c_g} + \frac{V_g}{V_L} \right) \quad (4)$$

c_{eq} 是在特定的温度下, 大气中的 CH₄ 浓度与水体中的 CH₄ 浓度达到平衡时水中的 CH₄ 浓度 ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$), 计算公式为:

$$c_{eq} = \frac{c_{bg}}{18 \times H_r} \quad (5)$$

式中, c_{bg} 为 CH₄ 大气背景浓度 ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$), 利用开路式 CH₄ 分析仪 (Li-7700, LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA) 观测得到.

1.5 辅助观测

辅助观测包括气象要素、水温、水深、水体 pH 值和溶解氧等. 试验期间利用小气候观测系统 (Dynakmet, Dynamax Inc., Houston, TX, USA) 原位在线观测气温、气压、风速和风向等气象要素. 用水温计 (T109, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA) 原位连续观测水下 20 cm 处的水温. 使用多参数水质分析仪 (YSI 650MDS, YSI Ins., Yellow Springs, OH, USA) 测量采样点水底 (底泥上方约 5

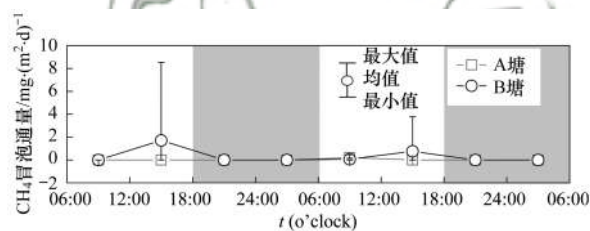
cm 处) 的 pH 值和溶解氧 (DO) 浓度. 利用水深计 HOBO (U20-001-01, Onset Computer Corporation Ins., Bourne, MA, USA) 对养殖塘水深进行连续观测.

2 结果与分析

2.1 冬季 CH₄ 通量的变化特征

2.1.1 冬季 CH₄ 冒泡通量的日变化特征

冬季 CH₄ 冒泡通量的昼夜变化如图 4 所示. A 塘白天和晚上 CH₄ 冒泡通量均值分别为 $0.05 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 其中 06:00 ~ 12:00 排放的 CH₄ 冒泡通量最大. B 塘白天和晚上 CH₄ 冒泡通量均值分别为 $0.63 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 其中 12:00 ~ 18:00 之间 CH₄ 冒泡通量最大. 说明观测期间养殖塘晚上没有 CH₄ 冒泡通量, 而白天 CH₄ 冒泡排放明显.



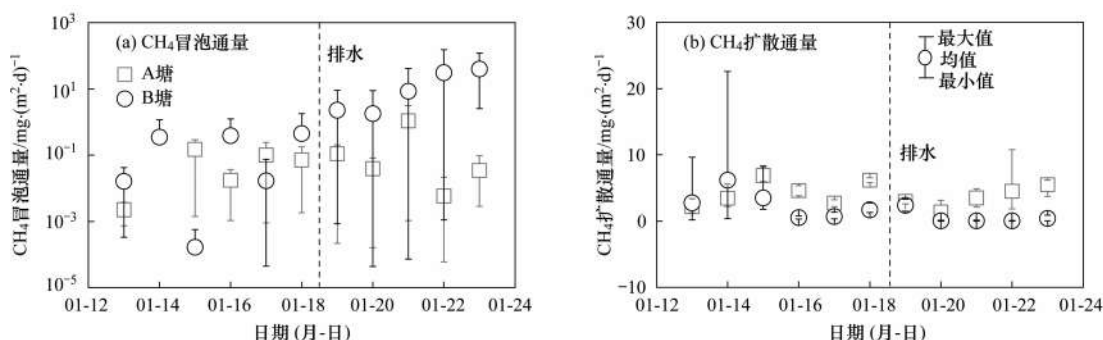
阴影为夜间; 日期为 1 月 10 ~ 12 日

图 4 冬季 CH₄ 冒泡通量的日变化特征

Fig. 4 Diurnal variability of CH₄ ebullition flux in winter

2.1.2 冬季 CH₄ 通量日均值的时间变化特征

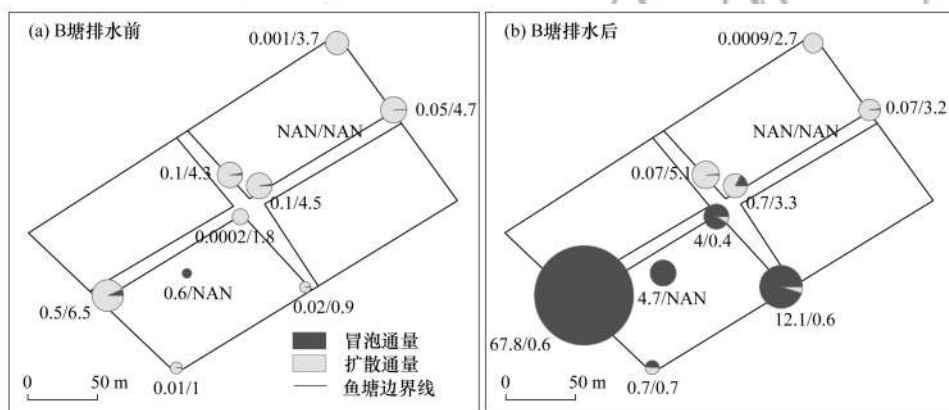
冬季排水前后 CH₄ 冒泡通量和扩散通量的时间变化如图 5 所示. A 塘在冬季观测期间 CH₄ 冒泡通量和扩散通量的日均值没有明显时间变化趋势. A 塘 1 月 19 日 (B 塘开始排水) 前 CH₄ 冒泡通量的均值为 $0.07 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 扩散通量的均值 $4.32 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; 1 月 19 日之后 CH₄ 冒泡通量的均值为 $0.25 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 扩散通量的均值为 $3.55 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. B 塘有排水活动, CH₄ 冒泡通量在排水后有明显的增加趋势, CH₄ 扩散通量在排水后没有明显的变化幅度, 有一个略微的降低趋势. B 塘排水前 CH₄ 冒泡通量的均值为 $0.20 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 扩散通量的均值为 $2.54 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; 排水后 CH₄ 冒泡通量的均值为 $16.62 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 扩散通量的均值为 $0.57 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 由此可见, 整个时段 A 塘和 B 塘 CH₄ 扩散通量相差较小; A 塘和 B 塘在均未排水的 6 d, CH₄ 冒泡通量相差不大; B 塘排水后 5 d 的 CH₄ 冒泡通量均值比其排水前增加了约 83 倍, 比 A 塘同时段 CH₄ 冒泡通量增加了约 66 倍.

图5 冬季 CH₄ 冒泡通量和扩散通量日均值的时间序列Fig. 5 Time series of daily mean values of CH₄ ebullition flux and diffusion flux in winter

2.1.3 冬季 CH₄ 通量的空间变化特征

冬季试验期间 CH₄ 通量的空间变化如图 6 所示. 在 B 塘排水前后, A 塘 CH₄ 通量(冒泡 + 扩散)的总体差异较小, CH₄ 排放均以扩散为主导, 分别占 CH₄ 排放的 98.6% 和 94.7% (除 A5 点). 对于 B 塘, 排水前后两个时段内 CH₄ 通量总体差异较大. 其中排水前 CH₄ 通量的空间差异较小, CH₄ 排放以

扩散为主导, 占 CH₄ 总排放量的 97.4%; 排水后 CH₄ 通量的空间差异变大, 最大空间差异达到 67.00 mg·(m²·d)⁻¹, CH₄ 排放以冒泡为主导, 占 CH₄ 排放的 83.8% (除 B5 点). 由此可见, 在 B 塘排水前后, A 塘 CH₄ 通量相当; B 塘在排水后的 CH₄ 通量均值 [21.73 mg·(m²·d)⁻¹] 远高于排水前的 CH₄ 通量 [2.68 mg·(m²·d)⁻¹], 约是排水前的 8.1 倍.



圆的大小与总通量成正比; 饼图表示冒泡和扩散对总通量的贡献百分比; 数值为冒泡通量/扩散通量, 单位为 mg·(m²·d)⁻¹; NAN 表示缺测

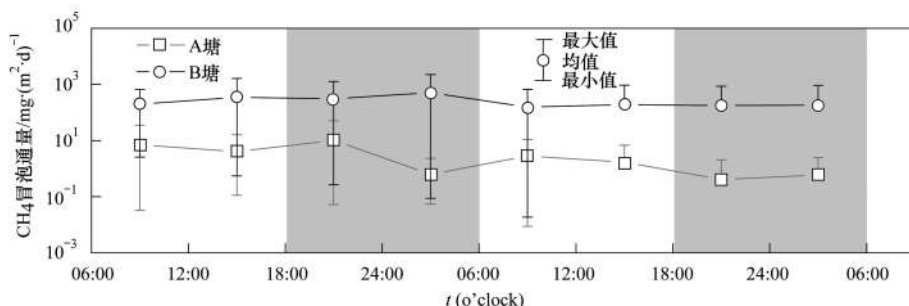
图6 冬季 CH₄ 通量的空间变化Fig. 6 Spatial pattern of CH₄ flux in winter

2.2 春季 CH₄ 通量的变化特征

2.2.1 春季 CH₄ 冒泡通量的日变化特征

春季 CH₄ 冒泡通量的昼夜变化如图 7 所示. A

塘白天排放的 CH₄ 冒泡通量均值略高于夜间, 分别为 3.93 mg·(m²·d)⁻¹ 和 2.98 mg·(m²·d)⁻¹, 其中 06:00 ~ 12:00 的 CH₄ 冒泡通量最大. B 塘白天排



阴影为夜间; 日期为 4 月 11 ~ 13 日

图7 春季 CH₄ 冒泡通量的日变化特征Fig. 7 Diurnal variability of CH₄ ebullition flux in spring

放的 CH_4 冒泡通量均值低于夜间,分别为 $224.07 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $293.13 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,其中 24:00 ~06:00 的 CH_4 冒泡通量最大. 整体而言,春季晚上排放的 CH_4 冒泡通量比白天高,约是白天的 1.3 倍.

2.2.2 春季 CH_4 通量日均值的时间变化特征

春季 CH_4 冒泡通量和扩散通量的时间变化如图 8 所示. A 塘 CH_4 冒泡通量随时间有明显的变化趋势,变化范围为 $0.02 \sim 32.10 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,均值为

为 $5.58 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; CH_4 扩散通量先升高再降低,变化范围为 $0.03 \sim 5.14 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,均值为 $0.97 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. B 塘 CH_4 冒泡通量有一个极低值为 $6.02 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,均值为 $208.30 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; CH_4 扩散通量随时间的变化趋势与 A 塘相似,变化范围为 $0 \sim 5.27 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,均值为 $0.77 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 由此可见,B 塘 CH_4 冒泡通量明显高于 A 塘,约为 A 塘的 37 倍;B 塘 CH_4 扩散通量与 A 塘相当.

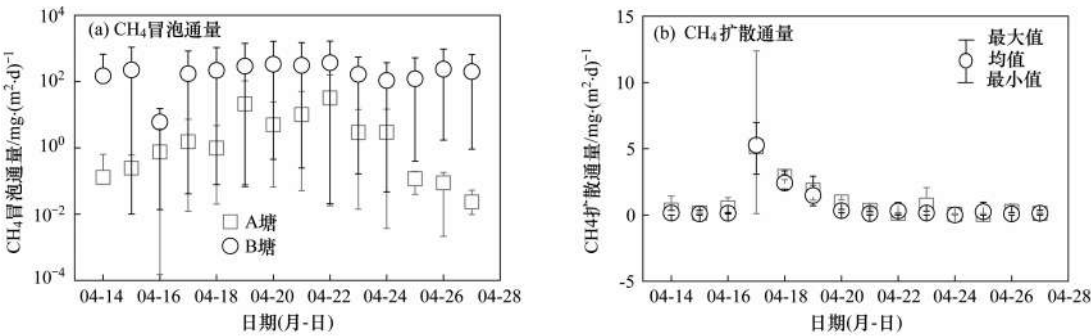


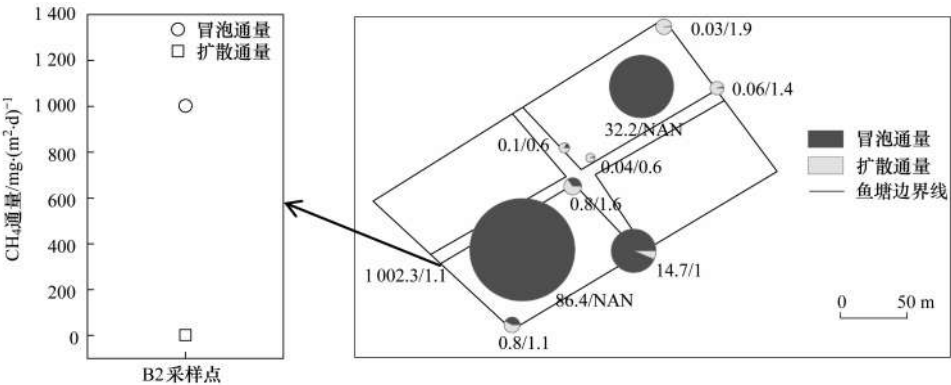
图 8 春季 CH_4 冒泡通量和扩散通量日均值的时间序列

Fig. 8 Time series of daily mean values of CH_4 ebullition flux and diffusion flux in spring

2.2.3 春季 CH_4 通量的空间变化特征

春季 A、B 塘 CH_4 通量的空间差异较大(图 9). A 塘 CH_4 通量的空间差异性较小, CH_4 排放整体以扩散为主导,占 CH_4 排放的 93.5% (除 A5 点). B 塘 CH_4 通量的空间差异性较大,最大差异可达 $1\,001.50 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. CH_4 排放整体以冒泡为主导,占 CH_4 排放的 67.2% (除 B5 点). 对比两塘所有采样点,可以发现 CH_4 通量的空间差

异性显著,最大差异可达 $1\,002.76 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 其中 CH_4 扩散通量的空间差异并不明显;冒泡通量存在显著的空间差异,B2 点的冒泡通量较其它采样点高了 2 ~ 3 个数量级,可达 $1\,002.30 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ (该采样点是鸡粪的投放点,底泥有机质含量较高). 此外,去除 B2 采样点,可以发现 B 塘的 CH_4 冒泡通量显著高于 A 塘,但扩散通量与 A 塘相差不大.



圆的大小与总通量成正比;饼图表示冒泡和扩散对总通量的贡献百分比;数值为冒泡通量/扩散通量,单位为 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$;NAN 表示缺测

图 9 春季 CH_4 通量的空间变化

Fig. 9 Spatial patterns of CH_4 flux in spring

2.3 冬春季 CH_4 通量的对比及气象要素对其的影响分析

2.3.1 冬春季 CH_4 通量的对比分析

春季 A、B 塘 CH_4 冒泡通量均值显著高于冬

季,扩散通量明显低于冬季,总通量(冒泡 + 扩散)显著高于冬季(表 1). 冬、春季两塘 CH_4 冒泡通量的均值分别为 $3.92 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $106.94 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; 扩散通量的均值分别为 2.81

$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.87 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; 总通量的均值分别为 $6.73 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $107.81 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。综上所述, 春季 CH₄ 冒泡通量均值约是冬季的 27 倍; 扩散通量约是冬季的 0.31 倍; 总通量约为冬季的 16 倍。

表 1 冬、春季 CH₄ 通量 A、B 塘的均值

Table 1 Average values of CH₄ flux in ponds A and B during winter and spring

季节	CH ₄ 冒泡通量 / $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	CH ₄ 扩散通量 / $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	CH ₄ 总通量 / $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$
冬季	3.92	2.81	6.73
春季	106.94	0.87	107.81

2.3.2 气象要素对 CH₄ 冒泡通量和扩散通量的影响
气压、风速和水温 (20 cm) 随时间的变化趋势

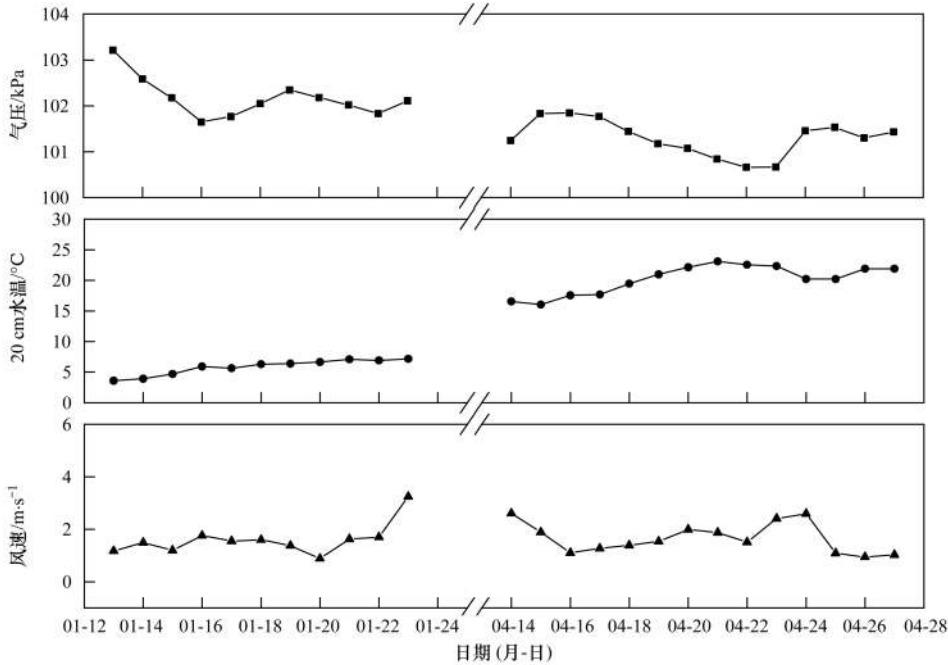


图 10 冬、春季试验期间气象要素 (气压、20 cm 水温、风速) 日均值的时间变化序列

Fig. 10 Time series of daily mean values of meteorological elements (air pressure, water temperature at 20 cm depth, and wind speed) during winter and spring campaigns

冬、春季两塘 CH₄ 冒泡通量和扩散通量的均值 (除冬季排水期和春季鸡粪投放点 B2) 与气压、水温 (20 cm) 和风速的关系如图 11 所示。可以看出, CH₄ 冒泡通量与气压显著负相关, 与水温 (20 cm) 显著正相关, 与风速的关系不显著。且随水温的升高, CH₄ 冒泡通量呈指数增加的趋势。分析水温和 CH₄ 冒泡通量的指数拟合曲线, 可以发现当温度高于 15℃ 时, CH₄ 冒泡通量迅速增加, 说明 CH₄ 冒泡通量的生物学下限温度为 15℃。同时, 随气压的降低, CH₄ 冒泡通量呈线性增加的趋势。从图 11 还可以看出, CH₄ 扩散通量与气压显著正相关, 与水温 (20 cm) 显著负相关, 与风速的关系不显著。且 CH₄ 扩散通量随水温的升高呈指数递减的趋势, 随气压的上升呈线性递增的趋势。

如图 10 所示。可以看出: 冬季试验期间气压变化范围为 101.7 ~ 103.2 kPa, 平均值为 102.2 kPa, 有一个波动下降的趋势。春季试验期间气压变化范围为 100.7 ~ 101.8 kPa, 均值较冬季试验期间低 0.9 kPa。冬季试验期间水温变化范围为 3.6 ~ 7.2℃, 平均值为 5.4℃。春季试验期间水温的变化范围 16.0 ~ 23.1℃, 平均值为 20.2℃, 两个季节水温有显著差异。日平均风速的波动较大, 冬季风速日均值的变化范围为 0.9 ~ 3.2 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (平均值为 1.6 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), 春季为 0.9 ~ 2.6 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (平均值为 1.7 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), 春季的风速比冬季略大。总之, 两个季节观测期间气压和水温 (20 cm) 有显著的变化, 而风速没有明显的差异。

2.4 冬季排水对 CH₄ 通量的影响

冬季 B 塘排水期 (1 月 18 ~ 23 日) CH₄ 冒泡通量和扩散通量随水深的变化特征如图 12 所示。CH₄ 冒泡通量与水深显著负相关, 且随着水深的迅速降低呈指数递增趋势, 即水位越浅, 水深的变化对 CH₄ 冒泡通量的影响就越大; CH₄ 扩散通量与水深的关系并不显著。综上所述, 水深的变化会显著影响养殖塘 CH₄ 冒泡通量, 但对 CH₄ 扩散通量的影响较小。

2.5 水质条件对 CH₄ 通量的影响

冬、春季两塘 CH₄ 冒泡通量和扩散通量与水质 (pH 值和溶解氧浓度) 的相关关系如表 2 所示。可以看出, 冬季 A 塘 CH₄ 冒泡通量和扩散通量与养殖塘 pH 值和溶解氧浓度的关系均不显著; B 塘

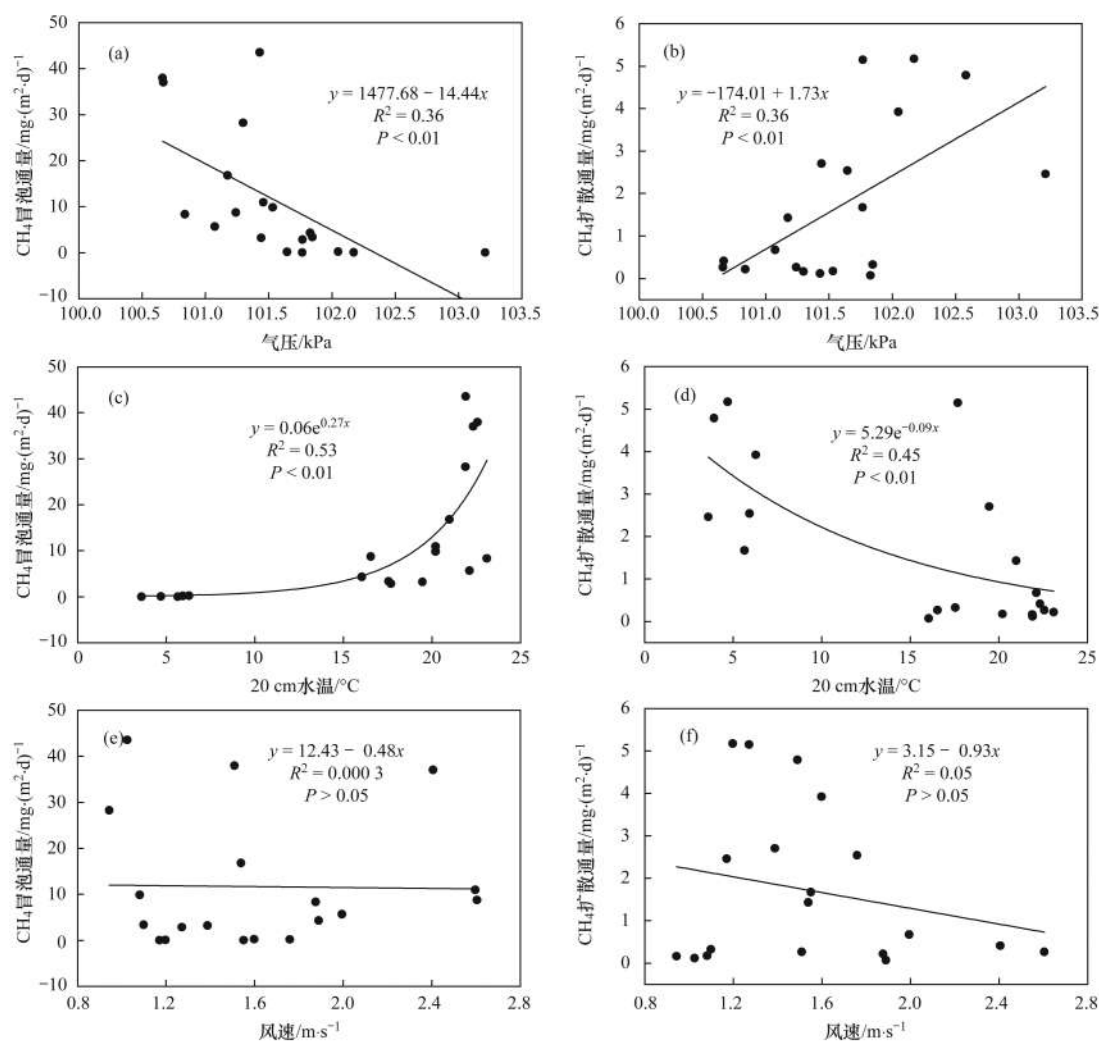


图 11 CH_4 冒泡通量和扩散通量随气压、20 cm 水温和风速的变化

Fig. 11 Variations of the CH_4 ebullition flux and diffusion flux with air pressure, water temperature at 20 cm depth, and wind speed

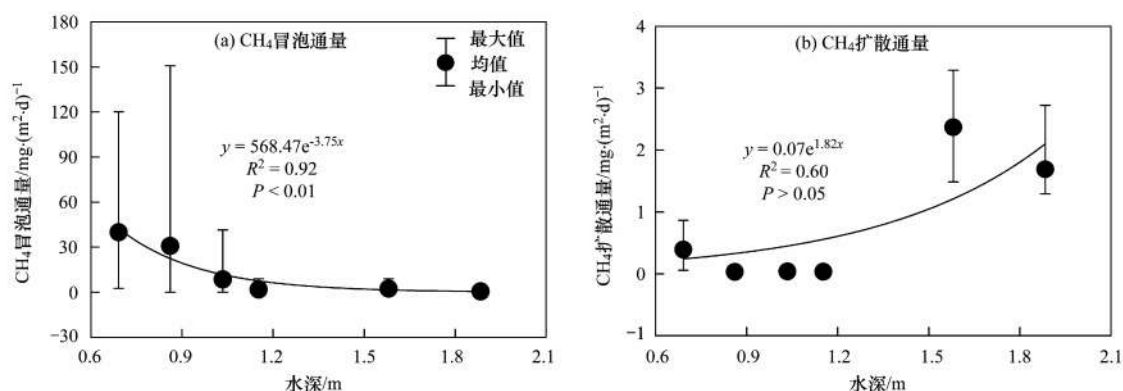


图 12 冬季 B 塘排水期 CH_4 冒泡通量和扩散通量随水深的变化

Fig. 12 Variations of CH_4 ebullition flux and diffusion flux with water depth during the drainage period of pond B in winter

CH_4 冒泡通量与养殖塘 pH 值和溶解氧浓度显著负相关, 扩散通量与其没有显著的相关关系, 这可能与冬季 B 塘排水有关. 春季 A、B 塘 CH_4 冒泡通量和扩散通量与 pH 值均无显著相关性. 综上所述, pH 值和溶解氧浓度控制着冬季 B 塘的 CH_4 冒泡通量.

3 讨论

3.1 冬、春季 CH_4 冒泡通量和扩散通量的比较

本研究得到冬、春季两塘 CH_4 冒泡通量的均值分别为 $3.92 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $106.94 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 通过 T 检验, 二者之间存在显著性

表 2 冬、春季 CH₄ 冒泡通量和扩散通量与水质 (pH 值和 DO 浓度) 的 Pearson 相关性分析¹⁾

Table 2 Pearson correlation analysis between CH₄ ebullition flux and diffusion flux with water quality (pH value and

水质	DO concentration) in winter and spring							
	冬季 CH ₄ 冒泡通量		冬季 CH ₄ 扩散通量		春季 CH ₄ 冒泡通量		春季 CH ₄ 扩散通量	
	A 塘	B 塘	A 塘	B 塘	A 塘	B 塘	A 塘	B 塘
DO	-0.391	-0.961 **	-0.118	0.377	/	/	/	/
pH	0.359	-0.957 **	-0.090	0.456	0.149	0.473	0.357	0.612

1) * * 表示在 0.01 上显著相关

差异 ($P < 0.001$). 造成这种现象的原因可能是: 春季养殖塘水温升高, 降低 O₂ 在水中的溶解度, 有利于底泥中产甲烷菌的生命活动, 加快了 CH₄ 的生产速率^[23,24]. 同时春季向养殖塘投放鸡粪, 增加底泥中的有机质, 提高产甲烷菌的数量和活性, 从源头大幅度增加了 CH₄ 的产生. Delontro 等^[25] 的研究表明, 水温在 10℃ 以上, 冒泡随温度的升高而剧烈增加. 本研究春季试验期间平均温度 (20.2℃) 在 10℃ 以上, 高于冬季 (5.4℃), 因而春季冒泡通量较高. 龙丽等^[5] 在宜昌 5 个浅水池塘的研究同样表明, 春季 CH₄ 冒泡通量高于冬季. 因此, 春季 CH₄ 冒泡通量显著高于冬季.

冬、春季 CH₄ 扩散通量的均值分别为 2.81 mg·(m²·d)⁻¹ 和 0.87 mg·(m²·d)⁻¹. 通过 *T* 检验, 二者之间存在显著性差异 ($P < 0.01$). 肖启涛^[26] 在太湖进行全湖取样, 发现采样期间, 冬季 CH₄ 扩散通量 [0.71 mg·(m²·d)⁻¹] 明显低于春季 [1.62 mg·(m²·d)⁻¹]. 这与本研究结果相反, 造成这种现象的原因可能是: 养殖塘与自然水体太湖不同, 冬季进行人工排水后, 春季会重新加入新鲜的水, 导致春季水中溶解的 CH₄ 浓度 (75.01 μmol·L⁻¹) 明显低于冬季排水前 (381.30 μmol·L⁻¹), 而大气中的 CH₄ 浓度在不同季节相差较小, 因而春季通过扩散形式排放到大气中的 CH₄ 就会减少. 因此, 养殖塘春季 CH₄ 扩散通量略低于冬季.

3.2 自然因素对养殖塘 CH₄ 通量的影响

3.2.1 水温和气压对 CH₄ 通量的影响

本研究发现, CH₄ 冒泡通量与水温显著正相关, 与气压显著负相关. 就水温而言, Aben 等^[27] 调研了亚洲、北美和欧洲范围内的浅水生态系统, 同样发现 CH₄ 冒泡通量与水温之间存在着强烈的正相关关系. 蒲旖旎等^[28] 的研究发现, 梅梁湾 CH₄ 冒泡通量随温度的升高, 呈指数增加的趋势, 这与本研究得到的结论相同. 就气压而言, Casper 等^[29] 发现了在气压迅速下降期间, CH₄ 冒泡会明显增加, 并得出气压每下降 2%, CH₄ 冒泡量就会增加约 10 倍. 这是因为气压降低时, 水中的溶解氧 (DO) 浓度减少, 同时静水压降低, 增加了 CH₄ 向大气的排放量^[27,28].

因此, 水温和气压是控制养殖塘 CH₄ 冒泡通量的重要气象因素.

CH₄ 扩散通量与水温显著负相关, 与气压显著正相关. 与本研究结果相反, Kifner 等^[30] 对美国缅因州 4 个池塘 4~8 月的研究发现, CH₄ 扩散通量与水温显著正相关. Rutegwa 等^[31] 在温带 3 个鲤鱼养殖塘 4~10 月的观测发现了相同的规律. 造成这种现象的原因可能是 Kifner 等^[30,31] 的研究主要集中在春夏季, 而本研究的试验时间为冬春季, 冬季人工管理活动 (冬季排水) 会对其结果造成很大的影响. 由此可见, 为更好地预测养殖塘 CH₄ 排放量, 需明确 CH₄ 冒泡通量和扩散通量与环境因素的关系.

3.2.2 水体溶解氧浓度和 pH 值对 CH₄ 通量的影响

根据以往的研究表明, 水体溶解氧浓度和 pH 值会对 CH₄ 排放量有较大影响^[26], 但是讨论它们对 CH₄ 排放量的两个组分 (冒泡通量和扩散通量) 单独影响的研究却很少见. 就冒泡通量而言, Crawford 等^[32] 对湿地的研究表明, 冒泡与溶解氧浓度密切相关. 这是因为 CH₄ 是在无氧的环境中产生的, 水中的溶解氧浓度越低, 可以减少 CH₄ 在上升过程中的氧化, 越有利于气泡的排放^[5]. 本研究冬季 A 塘 CH₄ 冒泡通量与溶解氧的关系并不显著, 但 B 塘 CH₄ 冒泡通量与溶解氧浓度显著负相关. 造成这种现象的原因是冬季试验期间 B 塘进行排水活动, 排水后溶解氧浓度均值 (86.44%) 明显低于排水前 (97.96%), 从而显著影响 CH₄ 冒泡量; 但 A 塘试验期间未排水, 溶解氧浓度变化较小, 对 CH₄ 冒泡量不会产生显著影响. 此外, 有研究表明, 水体 pH 值过高, 会抑制产甲烷菌的活性或对其产生危害, 导致 CH₄ 冒泡量降低^[33]. 本研究冬季 A 塘 CH₄ 冒泡通量与 pH 值之间没有显著的相关关系, 但 B 塘 CH₄ 冒泡通量与 pH 值之间显著负相关. 这是因为冬季 B 塘排水后 pH 值 (7.54) 较排水前 (8.17) 有明显地变化, 会对 CH₄ 冒泡通量产生显著的影响. 就扩散通量而言, 本研究冬季 A、B 塘 CH₄ 扩散通量与水体溶解氧浓度和 pH 值均无显著的相关关系. 这可能是因为冬季 CH₄ 扩散通量的变化较小, 且排水对其没有明显的影响. 因此, 养殖塘溶解氧浓度和 pH

值出现较大波动时,会显著影响 CH_4 冒泡通量。

3.3 人工管理措施对养殖塘 CH_4 通量的影响

3.3.1 春季施粪对 CH_4 通量的影响

牲畜粪便作为大气中 CH_4 的重要贡献者,约占农业 CH_4 排放总量的 10%,储存在底泥中的牲畜粪便可能是 CH_4 排放的重要来源^[34]。例如,Guo 等^[35]发现投放猪粪和牛粪会显著提高养殖塘的 CH_4 排放量。Chen 等^[14]在中国青岛海水养殖塘的研究同样表明,有饲料供应的养殖塘 CH_4 排放量会显著高于没有饲料供应的养殖塘,约是无饲料供应养殖塘 CH_4 排放量的 8 倍。本研究存在相同的现象,B2 采样点为鸡粪投放点, CH_4 通量显著高于其它所有采样点,最高差异可达 $1\,002.76\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 。这是因为养殖塘投入鸡粪后,一方面由于产 CH_4 菌广泛地分布在动物粪便中,会增加产 CH_4 菌的数量,通过生化途径可以促进 CH_4 的排放量^[36];另一方面会使养殖塘富营养化状态加重,底泥有机质含量增加,从而提高 CH_4 的排放量^[11]。

值得注意的是,本研究鸡粪投放点(B2点) CH_4 冒泡通量可达 $1\,002.30\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$, CH_4 扩散通量为 $1.10\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 。通过单因素方差分析,可以发现 B2 点 CH_4 冒泡通量与其它采样点存在显著性差异,但扩散通量与其它采样点并无明显差异。去除 B2 点,发现 B 塘的 CH_4 冒泡通量均值同样高于 A 塘,造成这种现象的原因可能是 B 塘施加的鸡粪数量是 A 塘的两倍。因此,投放鸡粪会增加养殖塘 CH_4 冒泡通量,且鸡粪投放点 CH_4 冒泡通量会显著高于其它采样点。

3.3.2 冬季排水对 CH_4 通量的影响

冬季人工排水对养殖塘 CH_4 排放量的影响目前是值得关注的问题^[37]。Yang 等^[17]在中国东南部闽江口选择了一个排干养殖塘(水深为 0.05 m)和一个未排干养殖塘(水深为 1.2 m)进行观测,对比发现排干养殖塘排放的 CH_4 通量约是未排干养殖塘的 9.4 倍。本研究则观测了同一个养殖塘排水过程前后 CH_4 通量的变化特征,发现 B 塘在排水后的 CH_4 通量均值 [$21.73\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$] 也远高于排水前的 CH_4 通量 [$2.68\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$],约是排水前的 8.1 倍。造成这种现象的原因首先是因为水位的变动会引发静水压的变化,静水压为沉积物-水界面的压力,水位下降,静水压减小,气泡的浮力超过静水压,从而导致大部分底泥中储存的 CH_4 释放到大气中^[38]。其次是因为水深变浅,减少气泡在上升过程中的氧化,但气泡在水柱中被氧化的影响有限^[39]。最后在排水过程中,泵的抽水活动,会造成

底泥的扰动,从而释放出更多的气泡。本研究整个排水阶段养殖塘排放的 CH_4 通量均值为 $21.73\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$,显著低于团头鲂养殖塘晒塘阶段排放的 CH_4 通量 [$(44.54 \pm 22.96)\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$]^[40],高于闽江口未排水养殖塘排放的 CH_4 通量 [$(1.68 \pm 0.24)\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$]^[41]。因此,排水晒塘会显著增加养殖塘的 CH_4 排放量。

此外,本研究发现冬季排水期间, CH_4 冒泡通量与水深显著负相关,扩散通量与水深没有显著的相关关系。Delsontro 等^[7]观测了加拿大 10 个浅水池塘和 3 个浅水湖泊的 CH_4 冒泡通量和扩散通量,得出了相同的变化规律。张秀芳等^[42]同样发现养殖塘 CH_4 冒泡通量与水深显著负相关。综上所述,冬季排水期间,随水深的降低,养殖塘 CH_4 冒泡通量会显著增加。

4 结论

在日尺度上,养殖塘冬季 CH_4 冒泡通量白天高于夜间,春季夜间高于白天。在季节尺度上,冬、春季 CH_4 冒泡通量分别为 $3.92\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $106.94\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$;扩散通量分别为 $2.81\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $0.87\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 。自然因素(水温以及气压)控制着 CH_4 冒泡通量和扩散通量;人工管理措施(冬季排水和春季施粪)会显著影响 CH_4 冒泡通量,但对 CH_4 扩散通量的影响并不显著。本文的研究结果能为养殖塘系统对大气的温室气体贡献提供基础数据支撑和科学依据。

致谢:感谢南京信息工程大学大气环境中心地气小组的赵佳玉、黄文晶、谢燕红、蒲旖旎、王怡、胡勇博和谢成玉等在试验采样和样品处理中提供的帮助。

参考文献:

- [1] Davidson T A, Audet J, Jeppesen E, *et al.* Synergy between nutrients and warming enhances methane ebullition from experimental lakes[J]. *Nature Climate Change*, 2018, **8**(2): 156-160.
 - [2] Raymond P A, Hartmann J, Lauerwald R, *et al.* Global carbon dioxide emissions from inland waters[J]. *Nature*, 2013, **503** (7476): 355-359.
 - [3] Sepulveda-Jauregui A, Walter Anthony K M, Martinez-Cruz K, *et al.* Methane and carbon dioxide emissions from 40 lakes along a north-south latitudinal transect in Alaska[J]. *Biogeosciences*, 2015, **12**(11): 3197-3223.
 - [4] Verdegem M C J, Bosma R H. Water withdrawal for brackish and inland aquaculture, and options to produce more fish in ponds with present water use[J]. *Water Policy*, 2009, **11**(S1): 52-68.
 - [5] 龙丽, 肖尚斌, 张成, 等. 亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4552-4559.
- Long L, Xiao S B, Zhang C, *et al.* Characteristics of methane

- flux across the water-air interface in subtropical shallow ponds [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4552-4559.
- [6] Liu X H, Gao Y, Zhang Z H, *et al.* Sediment-water methane flux in a eutrophic pond and primary influential factors at different time scales[J]. *Water*, 2017, **9**(8): 601.
- [7] Delsontro T, Boutet L, St-Pierre A, *et al.* Methane ebullition and diffusion from northern ponds and lakes regulated by the interaction between temperature and system productivity [J]. *Limnology and Oceanography*, 2016, **61**(S1): S62-S77.
- [8] Eugster W, DelSontro T, Sobek S. Eddy covariance flux measurements confirm extreme CH₄ emissions from a Swiss hydropower reservoir and resolve their short-term variability[J]. *Biogeosciences*, 2011, **8**(9): 2815-2831.
- [9] 赵佳玉, 张弥, 肖薇, 等. 基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 41-51.
- Zhao J Y, Zhang M, Xiao W, *et al.* Greenhouse gas fluxes at water-air interface in small pond using flux-gradient method based on spectrum analyzer [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 41-51.
- [10] 贾磊, 蒲旖旎, 杨诗俊, 等. 太湖藻型湖区 CH₄、CO₂ 排放特征及其影响因素分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2316-2329.
- Jia L, Pu Y N, Yang S J, *et al.* Analysis of greenhouse gas emission characteristics and their influencing factors in the algae zone of lake Taihu[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2316-2329.
- [11] Xiao Q T, Zhang M, Hu Z H, *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.
- [12] Wik M, Crill P M, Varner R K, *et al.* Multiyear measurements of ebullitive methane flux from three subarctic lakes[J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2013, **118**(3): 1307-1321.
- [13] Harrison J A, Deemer B R, Birchfield M K, *et al.* Reservoir water-level drawdowns accelerate and amplify methane emission [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(3): 1267-1277.
- [14] Chen Y, Dong S L, Wang F, *et al.* Carbon dioxide and methane fluxes from feeding and no-feeding mariculture ponds [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **212**: 489-497.
- [15] Ma Y C, Sun L Y, Liu C Y, *et al.* A comparison of methane and nitrous oxide emissions from inland mixed-fish and crab aquaculture ponds[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **637-638**: 517-523.
- [16] 农业部渔业渔政管理局. 中国渔业年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015. 55-62.
- [17] Yang P, Lai D Y F, Huang J F, *et al.* Effect of drainage on CO₂, CH₄, and N₂O fluxes from aquaculture ponds during winter in a subtropical estuary of China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **65**: 72-82.
- [18] Huttunen J T, Lappalainen K M, Saarijärvi E, *et al.* A novel sediment gas sampler and a subsurface gas collector used for measurement of the ebullition of methane and carbon dioxide from a eutrophied lake[J]. *Science of the Total Environment*, 2001, **266**(1-3): 153-158.
- [19] 臧昆鹏, 王菊英, 赵化德, 等. 顶空平衡-双通道气相色谱法测定海水中溶解态甲烷和氧化亚氮[J]. *环境化学*, 2014, **33**(12): 2094-2101.
- Zang K P, Wang J Y, Zhao H D, *et al.* Simultaneous determination of dissolved CH₄ and N₂O in seawater using head space-dual channel GC system [J]. *Environmental Chemistry*, 2014, **33**(12): 2094-2101.
- [20] Cole J J, Caraco N F. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF₆ [J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, **43**(4): 647-656.
- [21] Juutinen S, Rantakari M, Kortelainen P, *et al.* Methane dynamics in different boreal lake types [J]. *Biogeosciences*, 2009, **6**(2): 209-223.
- [22] Johnson K M, Hughes J E, Donaghy 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.
- [23] Peters V, Conrad R. Sequential reduction processes and initiation of CH₄ production upon flooding of oxic upland soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, **28**(3): 371-382.
- [24] 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.
- [25] Delsontro T, McGinnis D F, Sobek S, *et al.* Extreme methane emissions from a Swiss hydropower reservoir: Contribution from bubbling sediments[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(7): 2419-2425.
- [26] 肖启涛. 太湖 CH₄ 通量的空间格局及影响因素分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
- 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.
- [27] Aben R C H, Barros N, Van Donk E, *et al.* Cross continental increase in methane ebullition under climate change[J]. *Nature Communications*, 2017, **8**: 1682.
- [28] 蒲旖旎, 贾磊, 杨诗俊, 等. 太湖藻型湖区 CH₄ 冒泡通量[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(10): 3914-3924.
- Pu Y N, Jia L, Yang S J, *et al.* The methane ebullition flux over algae zone of lake Taihu [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(10): 3914-3924.
- [29] Casper P, Maberly S C, Hall G H, *et al.* Fluxes of methane and carbon dioxide from a small productive lake to the atmosphere [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **49**(1): 1-19.
- [30] Kifner L H, Calhoun A J K, Norton S A, *et al.* Methane and carbon dioxide dynamics within four vernal pools in Maine, USA [J]. *Biogeochemistry*, 2018, **139**(3): 275-291.
- [31] Rutegwa M, Gebauer R, Vesely L, *et al.* Diffusive methane emissions from temperate semi-intensive carp ponds [J]. *Aquaculture Environment Interactions*, 2019, **11**: 19-30.
- [32] Crawford J T, Stanley E H, Spawn S A, *et al.* Ebullitive methane emissions from oxygenated wetland streams[J]. *Global Change Biology*, 2014, **20**(11): 3408-3422.
- [33] 苏跃朋, 马牲, 田相利, 等. 中国明对虾精养池塘氮、磷和碳收支的研究[J]. *南方水产*, 2009, **5**(6): 54-58.
- Su Y P, Ma S, Tian X L, *et al.* An experimental study on nitrogen, phosphorus and carbon budgets in intensive pond of shrimp *Fenneropenaeus chinensis* [J]. *South China Fisheries Science*, 2009, **5**(6): 54-58.
- [34] Serrano-Silva N, Sarria-Guzmán Y, Dendooven L, *et al.* Methanogenesis and methanotrophy in soil: A review [J]. *Pedosphere*, 2014, **24**(3): 291-307.
- [35] Guo G, Chen Y X, Tian F, *et al.* Effects of livestock manure properties and temperature on the methanogen community composition and methane production during storage [J]. *Environmental Technology*, 2018, doi: 10.1080/

09593330. 2018. 1491640.
- [36] Bayrakdar A, Molaey R, Sürmeli R Ö, *et al.* Biogas production from chicken manure: Co-digestion with spent poppy straw[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, **119**: 205-210.
- [37] 杨平, 谭立山, 黄佳芳, 等. 初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH_4 和 N_2O 通量日变化特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 300-309.
Yang P, Tang L S, Huang J F, *et al.* Diurnal variations of CH_4 and N_2O fluxes from the drained aquaculture pond in the Minjiang river estuary during early winter[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 300-309.
- [38] Beaulieu J J, Balz D A, Birchfield M K, *et al.* Effects of an experimental water-level drawdown on methane emissions from a eutrophic reservoir[J]. *Ecosystems*, 2017, **21**(4): 657-674.
- [39] Bastviken D, Cole J, Pace M, *et al.* Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, **18**(4): GB4009.
- [40] 朱林, 车轩, 刘晃, 等. 团头鲂池塘养殖生态系统晒塘阶段温室气体排放通量分析[J]. *农业工程学报*, 2016, **32**(3): 210-215.
Zhu L, Che X, Liu H, *et al.* Greenhouse gas emissions of *Megalobrama amblycephala* culture pond ecosystems during sun drying of pond[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32**(3): 210-215.
- [41] 杨平, 全川, 何清华, 等. 闽江口养殖塘水-大气界面温室气体通量日进程特征[J]. *环境科学*, 2012, **33**(12): 4194-4204.
Yang P, Tong C, He Q H, *et al.* Diurnal variations of greenhouse gas fluxes at the water-air interface of aquaculture ponds in the Min river estuary[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(12): 4194-4204.
- [42] 张秀芳, 肖薇, 张弥, 等. 小型池塘水-气界面 CH_4 冒泡通量的观测[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 691-702.
Zhang X F, Xiao W, Zhang M, *et al.* Quantification of methane ebullition flux from small ponds using the inverted-funnel method[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 691-702.



CONTENTS

Concentration Characteristics and Assessment of Model-Predicted Results of PM _{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, LIU Bing, <i>et al.</i> (5191)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During the Heating Period of 2016-2017 in the Eastern Part of the North China Plain	ZHANG Yi-qin, WANG Jie, GAO Jian, <i>et al.</i> (5202)
Change in Characteristics of Pollution Gas and Water-soluble Ions at Different Development Stages of Haze	WANG Zhen-bin, LIU An-kang, LU Wen, <i>et al.</i> (5213)
Exposure Levels, Sources, and Health Risks of Heavy Metal Components of PM _{2.5} in Housewives in Rural Shanghai	LUO Ran-ran, DAI Hai-xia, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (5224)
Measuring the Condensable Particle Matter from a Stationary Source	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, WANG Gang, <i>et al.</i> (5234)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics of Furniture Manufacturing Enterprises and the Influence on the Atmospheric Environment	ZHANG Jia-mi, ZENG Chun-ling, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (5240)
VOCs Emission Inventory and Impact Range Simulation of Antibiotic Enterprises	ZHU Tao, LÜ Yi-rong, BIAN Wen-jing, <i>et al.</i> (5250)
Effects of Vehicle Emissions on Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Pollution in Road Dust in Xinxiang	LI Qi-lu, WU Jin-tao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5258)
Pollution Characteristics and Exposure Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Road Dust, Chengdu	FANG Shu-hong, ZHU He-xiang, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (5265)
Characteristics of Stable Isotopes and Analysis of Water Vapor Sources of Precipitation at the Northern Slope of the Qilian Mountains	ZHANG Bai-juan, LI Zong-xing, WANG Yu, <i>et al.</i> (5272)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Source Water of the Nanjing Reach of the Yangtze River	FENG Meng-juan, ZHANG Qin, SONG Ning-hui, <i>et al.</i> (5286)
Effects of Different Coagulants on Co-manganese Oxides Filter Media for Removing Ammonium and Manganese from Surface Water in Summer and Autumn	CHENG Li-jie, HUNAG Ting-lin, CHENG Ya, <i>et al.</i> (5294)
Disinfection By-products and the Relevant Health Risk in the Water Supply System in H City of Zhejiang Province	LIU Jun-ping, YU Jian-quan, LI Qing-song, <i>et al.</i> (5302)
Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter in Rivers of the Three Gorges Reservoir Area Under the Background of Urbanization	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (5309)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Natural Rivers of Western Sichuan Plateau	LIU Yan-yang, SUN Hui, LIU Chen, <i>et al.</i> (5318)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses and Runoff in a Typical Purple Soil Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CAO Rui-xia, LIU Jing, DENG Kai-kai, <i>et al.</i> (5330)
Responses of Riverine Phosphorus Exports to Land Use and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, TANG Li, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (5340)
Effects of Land Use Types at Different Spatial Scales on Water Quality in Poyang Lake Wetland	FANG Na, LIU Ling-ling, YOU Qing-hui, <i>et al.</i> (5348)
Environmental Significance of Phosphorus Fractions of Phytoplankton and Macrophyte-Dominated Zones in Taihu Lake	GENG Xue, WEN Shuai-long, SUN Pei-rong, <i>et al.</i> (5358)
Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake	FANG Jia-qi, QI Chuang, ZHANG Xin-hou, <i>et al.</i> (5367)
Effect of Rainfall Intensity on the Content of Nitrogen and Phosphorus Components in Plateau Areas: A Case Study of the Fengyu River Watershed	LI Xiao-hong, LEI Qiu-liang, ZHOU Jiao-gen, <i>et al.</i> (5375)
Water Purification Effect and Saline-alkali Tolerance Improvement Mechanism of <i>Suaeda salsa</i> in the Estuary Area	WU Dan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i> (5384)
Concentration-dependent Accumulation and Translocation of PFASs by Wetland Plant <i>Alisma orientale</i>	WANG Tuan-tuan, LI Bei-bei, WANG Sai, <i>et al.</i> (5394)
Occurrence of Denitrifying Dephosphatation in a Hybrid Constructed Wetland System and Its Stability	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, LI Qing-fei, <i>et al.</i> (5401)
Comparison of the Control of Sedimentary Phosphorus Release Using Zirconium-, Lanthanum-, and Lanthanum/Zirconium-Modified Zeolites as Sediment Amendments	LIU Ting, ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5411)
Effect of Biochar Structure on Adsorption Characteristics of Ammonia Nitrogen	CHEN Mei, WANG Fang, ZHANG De-li, <i>et al.</i> (5421)
Effect of Dissolved Oxygen on Partial Nitrification of Suspended and Attached Growth Systems	WANG Si-yu, LIU Ling-jie, WANG Fen, <i>et al.</i> (5430)
Effects of Different Intermittent Aeration Strategies on the Start-up of SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (5438)
Operational Performance and Microbiological Characteristics of an Iron-Salt Denitrification Reactor in Co-substrate Mode	WANG Ru, LIU Meng-yu, LIU Bing-yin, <i>et al.</i> (5446)
Effect of Step Aeration on a Municipal Sewage Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WEI Zi-qing, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (5456)
Improvement of the Dewaterability of Excess Activated Sludge with Mixed Yeasts by Degrading Extracellular Polymeric Substances	YU Xin-yi, XIANG Jin-hao, LIU Ying, <i>et al.</i> (5465)
Influence of Land Use Change on Ecosystem Service Value Based on GEE in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1998 to 2018	LOU Pei-qing, FU Bo-lin, LIN Xing-chen, <i>et al.</i> (5473)
Assessment of Soil Quality in Coastal Tidal Flat Reclamation Areas Based on MDS-TOPSIS Model	XIE Xue-feng, PU Li-jie, ZHU Ming, <i>et al.</i> (5484)
Effect of Increasing Tidewater Inundation on Porewater Geochemistries and CO ₂ and CH ₄ Effluxes in the Tidal Freshwater Marshes of the Minjiang River Estuary, Southeast China	LI Jing, HUANG Jia-fang, LUO Min, <i>et al.</i> (5493)
Methane Emission Characteristics and Its Influencing Factors over Aquaculture Ponds	WANG Jiao, XIAO Wei, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (5503)
Effect of Fertilization on Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in a Sorghum Field	YAN Jun-xia, ZHANG Yuan, JIAO Xiao-yan (5515)
Land Safety Zoning Method in High-Selenium and High-Cadmium Areas	WANG Rui, HOU Wan-ling, LI Yu-tong, <i>et al.</i> (5524)
Remediation Effects of Different Composite Materials on Cadmium-Contaminated Farmland Soil	CHEN Shu-lan, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (5531)
Hydrocalumite Passivation Effect and Mechanism on Heavy Metals in Different Cd-Contaminated Farmland Soils	WU Qiu-mei, LIU Gang, WANG Hui-feng, <i>et al.</i> (5540)
Effects of Different Land Use Types on Microbial Community Diversity in the Shizishan Mining Area	HUANG Jian, ZHU Xu-yan, LU Jin, <i>et al.</i> (5550)
Effects of Conversion of Forest to Arable Land on the Abundance and Structure of the <i>cbbL</i> -Harboring Bacterial Community in Albic Soil of the Hilly Region of Northeast China	WANG Rui, WU Xian, LI Gang, <i>et al.</i> (5561)
Thoughts on and Construction of a Risk Management and Control System for Contaminated Sites in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	CHANG Chun-ying, DONG Min-gang, DENG Yi-rong, <i>et al.</i> (5570)
Visualized Quantitative Research of Soil Pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHANG Ning, ZHANG Sheng, YANG Hai-chao, <i>et al.</i> (5581)
Characteristics and Environmental Impacts of Materials Stored in Municipal Solid Waste Landfills: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	MA Shi-jun, ZHOU Chuan-bin, YANG Guang, <i>et al.</i> (5593)
Heavy Metal Contamination and Migration in Correspondence of an Electroplating Site on the Hilly Lands of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China	HOU Wen-juan, GONG Xing, ZHAN Ze-bo, <i>et al.</i> (5604)
Pollution Characteristics and Migration of BTEX at a Chemical Contaminated Site in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DENG Yi-rong, LU Hai-jian, DONG Min-gang, <i>et al.</i> (5615)
Immobilization Impact of Goethite-Fulvic Acid Composites on Pb-Cd Contaminated Soil	LIU Qian-jun, LI Xiang, ZHOU Yang-mei, <i>et al.</i> (5623)
Mobilization of Heavy Metals in a Soil-Plant System and Risk Assessment in the Dabaoshan Mine Area, Guangdong Province, China	CHEN Jie-yi, LIU Guang-bo, CUI Jin-li, <i>et al.</i> (5629)
Calculation of the Soil Risk Control Value through a Hydrus-1D Model for Groundwater Protection	LIN Ting, LUO Fei, ZHU Yan, <i>et al.</i> (5640)
INDEX HUANJING KEXUE CONTENTS 2019, Vol. 40	(5659)