

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期
Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM _{2.5} 污染防治的健康效益评估	张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震 (513)
区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估	武文琪, 张凯山 (523)
2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估	姚森, 张哈宇, 王晓琦, 杨书申 (534)
广州市2020年春节期间烟花爆竹燃放对空气质量的影响	裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅 (546)
长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性	夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青 (556)
南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析	张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗 (564)
天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征	丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂 (574)
输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析	张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖 (584)
洛阳市秋冬季PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价	齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青 (595)
郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析	王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩 (604)
基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案	李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦 (616)
汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析	叶露, 邵菁菁, 俞华明 (624)
兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估	郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强 (634)
2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析	李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政 (643)
珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价	王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩 (653)
乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险	史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新 (663)
乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系	王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴 (673)
张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响	王维, 李叙勇 (681)
三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因	杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷 (688)
巢湖沉积物氮磷分布及污染评价	王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平 (699)
巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策	杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌 (712)
氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响	徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇 (723)
降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响	陈敏, 许浩震, 王雪竹, 肖尚斌 (732)
典型喀斯特河流-水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素	刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂茂, 刘文胜 (740)
江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状	王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶 (749)
尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征	黄福义, 朱永官, 苏建强 (761)
涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析	郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生 (766)
天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析	何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良 (776)
秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响	张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏 (786)
环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性	张丽娟, 徐杉, 赵峰, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟 (796)
浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响	黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强 (808)
松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应	于宗灵, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟 (819)
汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测	韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅 (831)
两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物	李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢慧君, 胡振, 张建 (842)
人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除	周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕 (850)
紫外氯胺组消毒供水系统中病毒微生物的分布特征	韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧 (860)
高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除	孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江 (867)
胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性	汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靛, 祝建中 (874)
电凝聚氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析	谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康 (883)
微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制	陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒 (891)
河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌 (900)
南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价	陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗 (909)
复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果	丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江 (917)
石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田	李光辉, 成晴, 陈宏 (925)
叶面喷施纳米MnO ₂ 对水稻富集镉的影响机制	周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣 (932)
典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞 (941)
辣椒果实高中低镉累积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较	邵晓庆, 贺章味, 徐卫红 (952)
4种草本植物对镉的富集特征	陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄 (960)
不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征	熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王鑫燕, 王子芳, 高明 (967)
降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响	高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎 (977)
水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征	林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (988)
铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响	葛艺, 徐民氏, 徐绍辉, 徐艳 (996)
臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响	李品, 周慧敏, 冯兆忠 (1004)
颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述	李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷 (1013)
《环境科学》征订启事	(522)
《环境科学》征稿简则	(722)
信息	(748, 899, 924)

降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响

陈敏^{1,2}, 许浩霆¹, 王雪竹¹, 肖尚斌^{1,2}

(1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 宜昌 443002)

摘要: 甲烷是一种重要的温室气体, 水库的甲烷源汇效应备受关注, 然而观测时间的代表性不足以及缺乏对非良好天气状况的考虑制约了 CH_4 排放的准确估计。本研究以三峡水库香溪河库湾为研究对象, 针对 2019 年夏季一场完整降雨径流事件在库湾中游断面开展跟踪连续监测, 初步探讨了降雨以及来流过程对库湾甲烷浓度与释放的影响。结果表明, 降雨事件前后, 库湾中游监测断面处水-气界面甲烷通量变化范围为 $0.011 \sim 0.326 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 表现为大气甲烷的“源”。风速和降雨均能够通过调节气体传输速率影响水-气界面的甲烷排放, 其中风速的驱动作用更为显著。流域降雨导致的底部异重流抵达监测断面时, 水体底层甲烷浓度明显升高, 很可能受到上游及沿程输入的影响。此次来流量偏小不足以破坏水温分层结构, 底部高浓度甲烷向上扩散过程中, 氧化消耗作用明显, 对表层甲烷浓度以及水-气界面甲烷释放的影响十分有限。

关键词: 三峡水库; 香溪河库湾; 甲烷; 降雨径流事件; 气体传输速率

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0732-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007063

Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir

CHEN Min^{1,2}, XU Hao-ting¹, WANG Xue-zhu¹, XIAO Shang-bin^{1,2}

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Yichang 443002, China)

Abstract: Methane is an important greenhouse gas and whether reservoirs act as a source or sink of methane has attracted great attention worldwide. However, unrepresentative sampling periods and a lack of consideration of unfavorable weather conditions have limited the accurate estimation of CH_4 emission from reservoirs. This study focused on the middle reach of Xiangxi Bay in the Three Gorges Reservoir to track an entire rainfall-runoff event via on-site measurements in the summer of 2019, and initiatively investigated the impact of rainfall and inflow processes on methane concentration and emission. Results showed that from before to after the rainfall event, methane flux at the air-water interface ranged between 0.011 and $0.326 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, indicating a net source of methane to the atmosphere. Both wind velocity and rainfall affected methane evasion from the surface by altering the gas transfer velocity, with the effect of wind being more prominent. Methane concentrations at the bottom layer significantly increased when rainfall-induced density flow from the watershed arrived at the sampling section. This was likely due to methane export from upstream and along the flow path. During this event, discharge was too small to destratify the water column, and methane was strongly oxidized as it diffused upwards, having little impact on surface methane concentrations and air-water methane flux.

Key words: Three Gorges Reservoir; Xiangxi Bay; methane; rainfall-runoff event; gas transfer velocity

甲烷是一种重要的温室气体, 在大气中的浓度自 1750 年以来增加了 151%, 是二氧化碳增幅的约 4 倍, 且在百年尺度上 CH_4 的全球变暖效率是 CO_2 的 28 ~ 34 倍^[1]。水电一直以来被认为是无碳的清洁能源, 但这一传统观念自 90 年代遭到学术界的广泛质疑^[2], 尤其是水库甲烷的源汇问题^[3]。Deemer 等^[4]新近估计的全球人工水库 CH_4 年排放量约为 18 Mt, 远低于 16 年前 St. Louis 等^[5]估计的 70 Mt。这种巨大差异不仅存在于全球尺度研究上, 即便对于单个水库(尤其是河道型水库), CH_4 通量估计亦存在较大不确定性, 这是由于 CH_4 排放具有高度的时空差异性。以三峡水库为例, 由于库内地形特征、沉积物底质和水体理化性质等诸多方面的非均质性, 干流与支流^[6]、水位消落区和永久淹没区^[7]、干流或支流沿程不同断面^[8] CH_4 通量均存在明显差

异。 CH_4 排放的时间差异性主要源自季节更替、水位周期性涨落及水文、气象因子的多变性, 如水文气象条件的变化能够导致 1 d 内 CH_4 扩散通量最大值高出最小值 10 倍以上^[9]。然而, 当前研究多基于每月 1 ~ 2 次或典型日连续监测, 且多在良好天气状况下开展观测, 制约了对水文气象因素的全面考虑, 缺乏对降雨、大风等天气条件下的观测很可能影响 CH_4 排放的准确估计^[10]。

事实上, 降雨事件及其伴随的径流过程极可能对水库或库湾甲烷释放过程产生影响。一方面, 雨滴对水面的击打^[11,12]及风力对表层水体的扰

收稿日期: 2020-07-07; 修订日期: 2020-08-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807513, 51979148); 湖北省自然科学基金创新群体项目(2019CFA032)

作者简介: 陈敏(1985 ~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为淡水生态系统碳循环, E-mail: minchen@ctgu.edu.cn

动^[12,13]能够改变水面的气体传输速率,影响水-气界面的 CH_4 扩散通量. 有关风速因子的研究较为丰富,但构建的风速模型大多依据低风速条件下的观测,对大风及风雨共同的影响考虑很少,对降雨事件中水-气界面的 CH_4 释放规律认识不足. 另一方面,流域降雨导致的来流过程可能对分层水环境在一段时间内产生持续性扰动^[14],很可能影响 CH_4 在水柱内的迁移转化. Huang 等^[15]通过对三峡水库澎溪河库湾水利年内每月 1 次的采样研究发现,库湾 CH_4 排放高值出现在泄水期及低水位运行初期,推断夏季频繁的暴雨洪水对水温分层的破坏导致排放量的降低. 而 Guérin 等^[16]对老挝 NT2 水库为期 3.5a 中 2 周 1 次的观测研究表明,当水体表层与深层温差急剧下降的时候, CH_4 释放量最大,很可能源于泄水和来流过程对水温分层的扰动和破坏,致使深水层高浓度 CH_4 更易迁移至水-气界面. 两项研究观点不同,说明理清流量过程引起的分层水体扰动对 CH_4 迁移转化及排放的影响可能需要更高频率的观测数据.

三峡工程作为世界大型水电工程之一,成库后的碳排放问题一直是国内外广泛关注的焦点^[17]. 三峡库区地处长江流域典型的多雨区和多暴雨区^[18],温室气体排放观测中对降雨因素的考虑显得尤为必要. 本文以三峡水库香溪河库湾为研究对象,针对完整的降雨径流事件开展跟踪连续监测,初步探讨降雨过程水-气界面 CH_4 通量变化特征及其影响因素,讨论垂向上 CH_4 浓度变化对来流过程的响应. 通过将降雨因素纳入考虑,以期对湖库等水域生态系统 CH_4 排放的准确估计提供科学参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域

香溪河是三峡库首的第一大支流,干流长 94 km,流域面积 3 099 km^2 ,地处亚热带季风气候区. 香溪河流域夏季雨水充沛,多年平均降雨量 1 015.6 mm,多年平均流量 47.4 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. 河口处向上游约 26~40 km,水流速度减缓形成香溪河库湾. 基于库湾中游峡口镇三峡大学水生态与环境野外观测站,依托水上实验平台对 2019 年 7 月 30 日至 8 月 1 日的一次完整降雨径流过程进行监测. 此次降雨事件发生于 7 月 30 日且全流域范围普遍降雨,监测点处雨量为 22.2 mm(中雨),流域面雨量为 16.4 mm. 研究区域及监测点位置如图 1 所示.

1.2 监测方法

1.2.1 现场环境因子监测

利用观测站野外自动气象站实时连续观测降

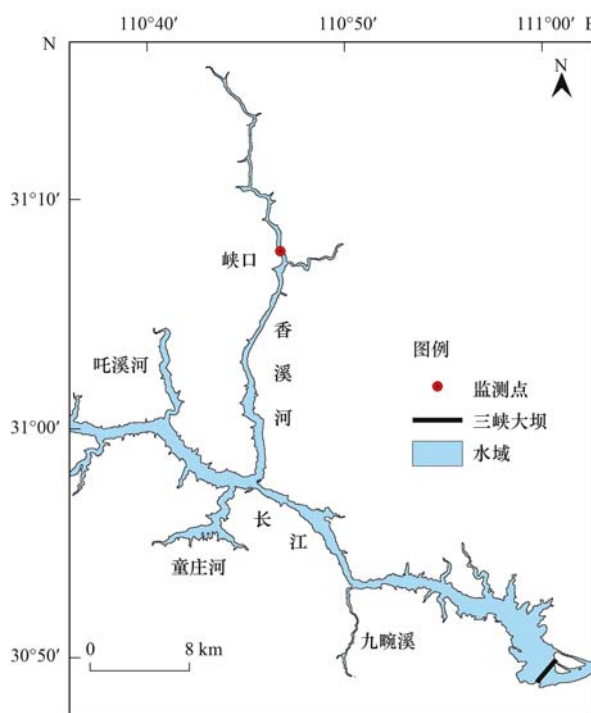


图 1 香溪河库湾及监测点位置

Fig. 1 Location of the Xiangxi Bay and the observation site

雨、风速和气温等气象要素. 水温、DO、浊度、pH 和叶绿素等采用 HydrolabDS5 多参数水质仪从表层(距水面约 0.2 m)到水底连续均匀地进行监测. Vector 声学多普勒三维点式流速仪固定于水体底部,可连续测定底部流速.

1.2.2 水-气界面 CH_4 通量及水中 CH_4 浓度监测

观测过程大体分为降雨过程和来流过程两个阶段. 降雨过程前后,水-气界面 CH_4 通量采用静态浮箱连接便携式温室气体分析仪(Picarro G2301)测定,每次观测持续 15 min 左右. 观测时将浮箱倒置于水面,用绳子将箱体固定于观测船,漂浮装置底部悬挂重物,以保证风雨中浮箱的位置稳定. 表层水体溶解 CH_4 浓度采用自主专利的快速监测水体溶解痕量气体浓度的装置(专利编号:201810635867.2)及方法^[19]连接温室气体分析仪连续测定. 来流过程中,每 1~2 h 进行一次垂向剖面监测,通过水泵从水体表层到水底连续分层抽取水样,采用相同方法测定不同水层的溶解 CH_4 浓度,且与多参数水质仪分层监测同步.

1.3 数据分析

1.3.1 水-气界面 CH_4 通量及气体传输速率计算

CH_4 通量计算依据以下公式^[20]:

$$F = \frac{K \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot V}{A \cdot F_3} \quad (1)$$

式中, F 为水-气界面 CH_4 通量, $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; K 为

浮箱内甲烷浓度随时间变化的斜率, $10^{-6} \cdot \text{min}^{-1}$; F_1 为甲烷体积分数 10^{-6} 到 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 单位的转换系数 (655.47); F_2 为分钟与小时的转换系数 (60); V 为浮箱置于水面时其内部的空气体积, m^3 ; A 为水上部分浮箱覆盖水面的面积, m^2 ; F_3 为 μg 与 mg 的转换系数 (1 000)。

气体传输速率 k 可通过薄边界层公式 (thin boundary layer equation, TBLE) 反推:

$$F = k \cdot (c_w - c_{\text{eq}}) \quad (2)$$

式中, c_w 为 CH_4 在表层水体的溶解浓度, $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; c_{eq} 为表层水体与大气达到平衡时的 CH_4 浓度, 依据大气甲烷浓度、水温 和 文献 [21] 中的公式计算。

为便于不同气体和不同水温条件下气体传输速率的比较, 普遍采用式 (3) [22] 对 k 进行标准化:

$$\frac{k_{600}}{k} = \left(\frac{600}{\text{Sc}} \right)^{-n} \quad (3)$$

式中, Sc 为一定温度条件下 CH_4 气体的 Schmidt 数, 依据水温计算 [13]; k_{600} 是当 Schmidt 数为 600 时的气体传输速率, $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$; n 是与风速相关的系数, 当 10 m 高度处风速 $U_{10} > 3.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 式 (3) 中 n 取 0.5, 当 $U_{10} \leq 3.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, n 取值为 $2/3$ [23], 其中 U_{10} 依据实测风速和观测高度计算得到 [24]。

1.3.2 统计分析

本文采用 SPSS 22.0 和 Matlab 2013a 软件进行数据统计分析, 主要包括线性、非线性回归分析和滑

动 t 检验突变分析。

2 结果与分析

2.1 降雨过程水-气界面甲烷通量及环境因子变化特征

2019 年 7 月 30 日监测平台处强降雨过程持续较短 (约 30 min), 本次监测捕捉了包括降雨前后数小时在内的完整过程 (图 2)。该过程中水-气界面甲烷交换通量均为正值, 表现为大气甲烷的“源”, 变化范围为 $0.011 \sim 0.326 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 与已报道的香溪河库湾峡口断面夏季监测结果相当 [25, 26], 在降雨前及降雨过程中波动明显, 而整个过程中表层水体甲烷浓度变化不大, 维持在 $(0.141 \pm 0.008) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的水平。气体传输速率 k_{600} (波动范围 $0.43 \sim 11.81 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$) 与甲烷释放通量变化趋势高度一致, 均在降雨前约 1 h 出现明显的上升, 在降雨开始后达到峰值, 然后随着降雨结束迅速递减至初始平稳的水平。山区降雨多伴有大风, 此次降雨发生前风速确有明显增加, 从相对稳定的低风速状态 ($0 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 增至 $(6.29 \pm 2.48) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 且其波动趋势与甲烷释放速率变化过程较为一致, 但 k_{600} (或甲烷通量) 峰值的出现略滞后于风速峰值。同时, 水温与气温的差值在该过程中亦发生明显改变, 降雨前约 30 min 气温降低导致水气温差开始迅速增加, 进而由负值转变为正值且维持在 $\sim 4^\circ\text{C}$, 直至降雨完全结束。

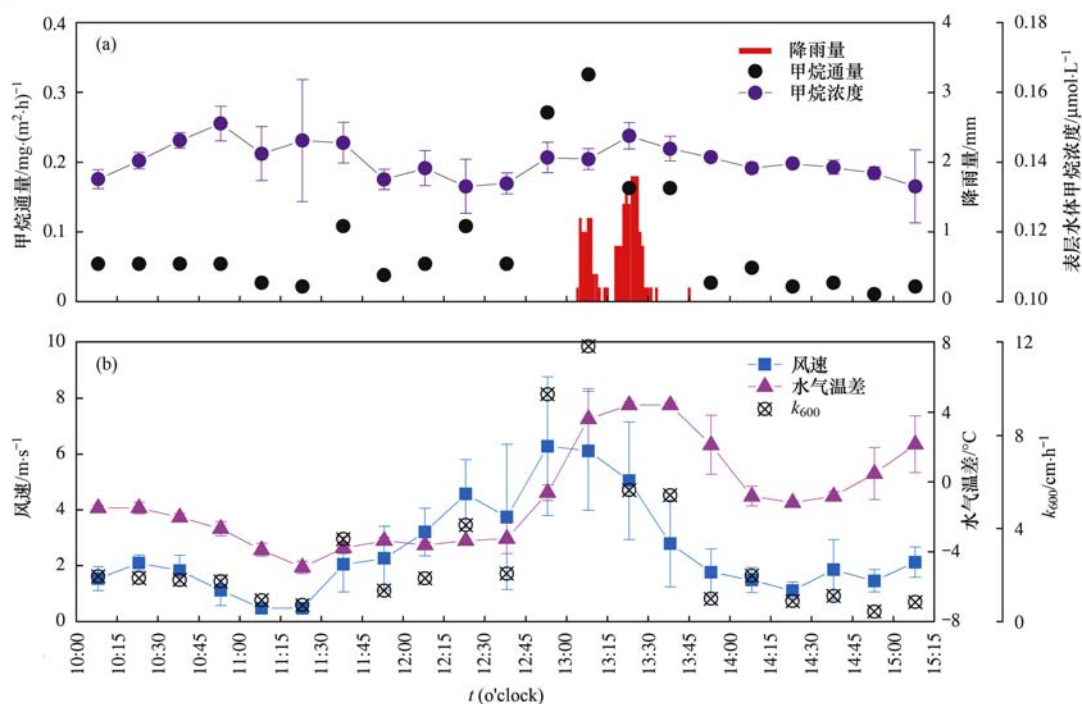


图 2 降雨事件前后甲烷通量、浓度及环境因子变化情况

Fig. 2 Temporal dynamics of methane flux, methane concentration and environmental variables from before to after the rainfall event

2.2 来流过程水体溶存甲烷浓度和环境因子剖面分布及变化

2019 年 7 月 30 日降雨结束后, 针对水体甲烷溶存浓度和常规理化参数, 自当日下午 16:00 连续分层监测至 2019 年 8 月 1 日下午 17:00, 以捕捉由流域降雨导致的完整来流过程。监测断面处甲烷浓度和环境因子剖面分布及变化情况如图 3 所示。总体而言, 甲烷溶存浓度随深度增加趋于增大, 底部浓度呈现明显高值且波动显著 [$(0.835 \pm 0.515) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$], 明显高于上层水体。水体理化因子均表现出明显的垂向分布规律。受夏季气温、光照等气象因素的影响, 垂向上水温、叶绿素和 DO 均呈现随深度增加而递减的趋势, 且表层水体波动最为明显, 分别达 $(28.90 \pm 0.91) ^\circ\text{C}$ 、 $(8.75 \pm 3.31) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(11.69 \pm 1.33) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 电导率呈现出表层低、深层高的分布特征, 且各层相对稳定, 变幅不大; 浊度则是表、底层偏高且波动范围大 [表层 $(11.09 \pm$

$3.22) \text{NTU}$ 和底层 $(11.24 \pm 2.50) \text{NTU}$], 而中间层偏低且变化较小。

在香溪河库湾, 上游来流主要以顺坡底部异重流的形式从底部流向河口^[27]。为进一步分析来流过程对甲烷浓度的影响, 对连续监测的底部流速进行了滑动 t 检验 [图 4(a)], 滑动统计量分别于 7 月 31 日 5:00 和 20:00 超过显著性水平 ($\alpha = 0.05$), 说明流速分别在这两个时刻开始增加和减小。通过统计量变化特征分析可知, 7 月 30 日峡口以上流域降雨导致的来流于 7 月 31 日 05:00 至 8 月 1 日 09:00 通过监测断面, 流量于 7 月 31 日 20:00 左右达到峰值。该过程中, 甲烷浓度随流量增加明显增大, 并随流量消退迅速减小, 但其后仍出现大幅波动 [图 4(a)]。底部来流抵达监测断面后, 水温、DO 和电导率均显著降低, 而浊度明显增加, 且都在流量过程中出现一定程度的波动变化 [图 4(b)]。

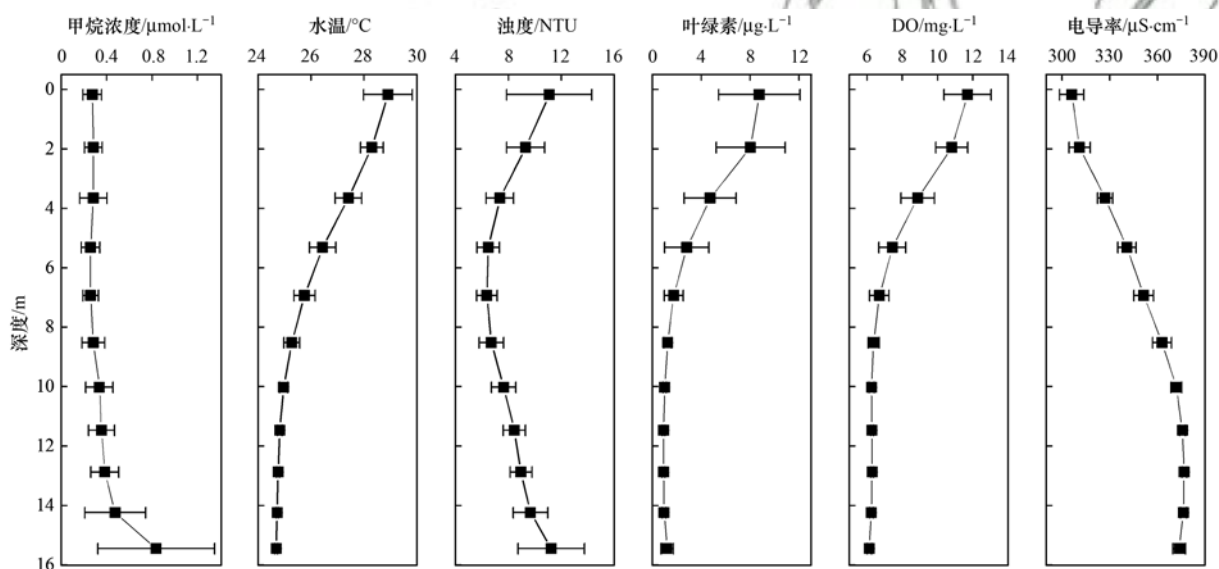


图3 降雨后 2 d 内观测断面水体甲烷浓度和水环境因子垂向分布

Fig. 3 Profile distributions of dissolved methane concentrations and aquatic environmental variables at the observation section during 2 days after the rainfall event

3 讨论

3.1 风速和降雨对水-气界面甲烷释放的影响

据已有研究推测, 降雨过程中, 风速^[13]和降雨^[11]均能够通过对表层水体的扰动影响水-气界面的气体交换通量。香溪河峡口观测的此次降雨事件前后表层水体甲烷浓度变化不大, 而甲烷通量与风速的变化趋势较为一致 (图 2), 水-气界面气体交换受风速的驱动作用明显。观测时段内相同平均风速条件下 (如 12:45 ~ 13:00 和 13:00 ~ 13:15、12:15 ~ 12:30 和 13:15 ~ 13:30), 降雨时水-气界面甲烷

通量相较无雨时更高, 说明降雨过程中甲烷排放受到风雨共同的影响。此外, 自降雨开始水气温差发生明显改变, 由气温 $>$ 水温转变为水温 $>$ 气温, 气温低于水温进一步持续会造成表层一定深度水体的掺混, 增大水-气界面的气体传输速率^[28], 这一点较好地解释了雨停以后 13:30 ~ 13:45 时段内高通量仍得以维持的现象。

由气体传输速率 k_{600} 和风速 U_{10} 的回归分析可知 (表 1), 指数函数关系表现出最优的拟合效果, 幂函数略次之。由分段线性回归可以发现, 高风速条件下 ($U_{10} \geq 3.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 气体传输速率和风速呈现高

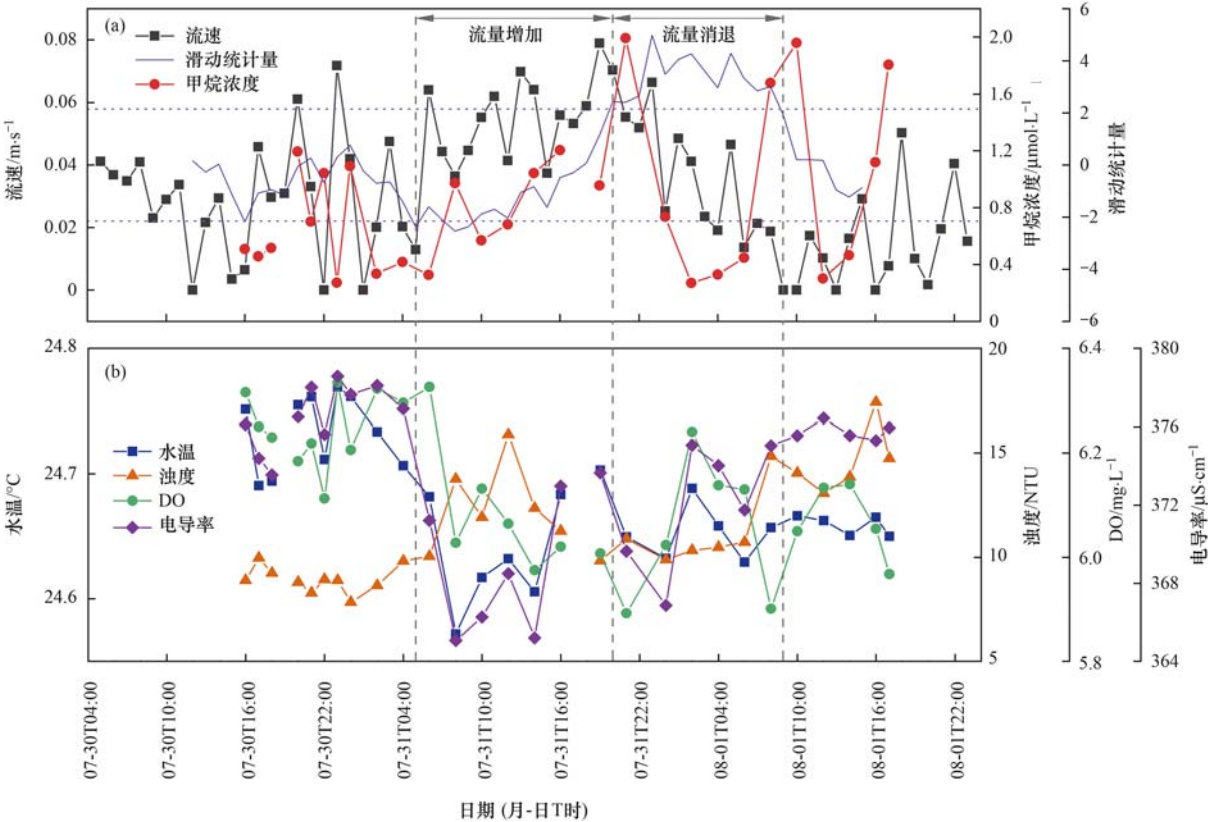


图4 降雨后库湾底部来流过程及甲烷浓度和水环境因子变化情况
Fig. 4 Post-rainfall inflow process and temporal evolution of methane concentrations and aquatic environmental variables at the bottom of the bay

度正相关,且随风速 U_{10} 增大 k_{600} 增加显著,而低风速状态下 ($U_{10} < 3.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) k_{600} 离散度较高,与风速的拟合效果明显较差,且斜率低于高风速状态下的变幅(图5). 事实上,低风速条件下气体传输速率 k_{600} 和风速 U_{10} 的相关性较弱,这一结论在已往研究中已得到证实^[12,28,29],说明除风速外还存在其他主导因子,例如对流冷却对水-气界面气体交换的贡献^[30,31]. 有研究表明,蒸发状态下(水温 > 气温)水-气界面气体交换速率可以提高约 4%~30%^[32,33]. 此外,分段拟合结果与 Crusius 等^[34] 构建的分段线性关系相似,尤其是低风速条件下,线性关系十分接近,而高风速范围本研究中 k_{600} 值更小,且随风速增加 k_{600} 增幅更低,

但与 Liss 等^[23] 回归得到的海洋环境气体交换速率方程 ($k_{600} = 2.85U_{10} - 9.65$, $3.6 < U_{10} \leq 13$) 高度一致. 总体而言,本研究中气体传输速率高于 Xiao 等^[28] 仅在低风速条件下对小型池塘观测的拟合结果,在低于 $5 \sim 6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速范围内小于基于 Cole 等^[30] 的幂函数和 Guérin 等^[12] 的指数函数关系的估计值,而超过该风速基于本研究指数模型的 k_{600} 值更高,源于强降雨过程中降雨和风速对气体传输速率的叠加影响. 由于本次降雨过程持续时间较短,不足以定量分析气体传输速率和降雨量(或降雨强度)的关系,但确有针对湖泊水库的观测研究表明,降雨强度对气体传输速率 k_{600} 的贡献达到 2%~25%^[12,35].

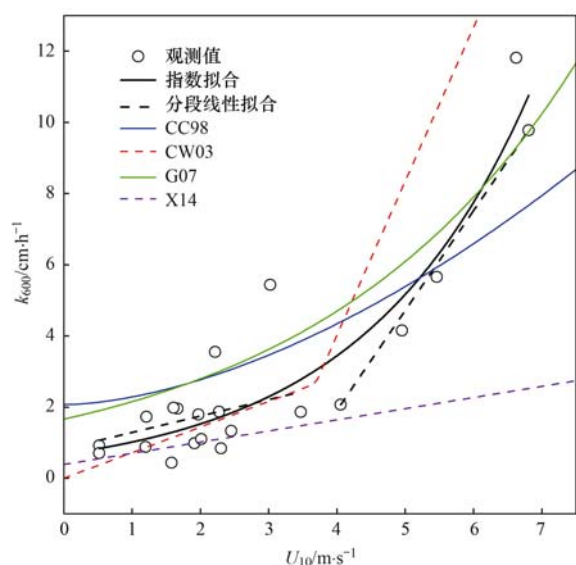
表1 香溪河峡口观测断面气体传输速率 k_{600} 与风速 U_{10} 的关系函数

Table 1 Relationship between gas transfer velocity k_{600} and wind speed U_{10} at the Xiaokou observation section of the Xiangxi Bay				
函数类型	公式	R^2	P	n
线性函数	$k_{600} = 1.430U_{10} - 1.042$	0.752	<0.0001	21
分段线性函数	$k_{600} = 0.461U_{10} + 0.826$, $U_{10} < 3.7$	0.274	0.0375	16
	$k_{600} = 2.806U_{10} - 9.317$, $U_{10} \geq 3.7$	0.931	0.0079	5
指数函数	$k_{600} = 0.678\exp(0.406U_{10})$	0.862	<0.0001	21
幂函数	$k_{600} = 0.015U_{10}^{3.361} + 1.413$	0.846	<0.0001	21

3.2 水体甲烷浓度对上游来流过程的响应初探

通过雨后持续 2 日的监测观察到,观测断面底部出现了较为明显的来流过程,底部流速最高达

$0.079 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [图4(a)]. 当来流抵达监测断面后,水温、DO 和电导率出现下降,而浊度增加,说明来流对底部水体存在一定程度的扰动. 底层甲烷溶存



CC98: 文献[30]的幂函数; CW03: 文献[34]的分段线性函数;
G07: 文献[12]的指数函数; X14: 文献[28]的线性函数

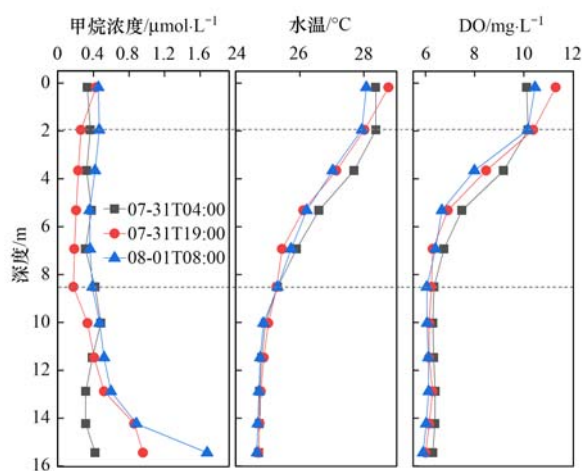
图5 气体传输速率 k_{600} 与风速 U_{10} 的拟合曲线
及其与湖泊/水库/池塘研究结果的对比

Fig. 5 Fitting curves for the relationships between gas transfer velocity k_{600} and wind speed U_{10} and their comparison with other studies of lentic systems

浓度随流量增加呈现明显的上升趋势, 出现该现象的原因可能在于: 顺坡底部异重流对底层水体的扰动导致沉积物-水界面甲烷释放通量增加, 使底部水体甲烷浓度升高, 然而库湾水体溶存的微弱甲烷含量变化并不足以使水体 DO 发生显著降低, 底部高浓度甲烷更可能是通过异重流带来的。一方面, 有研究表明, 库尾表层水体溶存甲烷浓度显著高于下游且沿程呈现明显的递减趋势^[36], 顺坡底部来流过程可能将上游的高浓度甲烷带入下游。另一方面, 由于流域面雨量不及大雨级别, 造成的来流偏小 (平均流速 $0.033 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 沿程受深层土壤输出、沉积物释放的影响较大, 且该影响自上游向下游可能存在叠加效应, 导致来流抵达观测断面后出现高浓度甲烷和更低的溶氧水平。

图6显示了顺坡底部异重流抵达监测断面、达到流量峰值至流量基本消退水体垂向甲烷浓度、水温和 DO 的变化情况。总体而言, 此次来流过程并未破坏水温分层结构, 相对于表底层温差 (约 4°C), 底部的降温幅度显得十分微弱, 而纪道斌等^[14]的监测研究发现, 暴雨带来的异重流过程能够使该监测断面底部约 10 m 深度发生明显的垂向掺混。此次来流较小, 对分层水环境的扰动并不明显, 溶氧垂向分布基本未受到破坏, 氧跃层稳定且与温跃层较为一致 (图6), 异重流带来水体底部甲烷浓度的增加, 而向上扩散过程中, 甲烷氧化消耗明显, 于氧跃层下

部边界达到极低值。Lei 等^[26]在香溪河库湾的原位监测实验表明, 甲烷氧化速率最高值便出现在夏季的水体底层, 因为该层常年受异重流影响, 溶氧量接近饱和, 不同于深水湖泊的厌氧滞温层, 因此好氧甲烷氧化作用明显。他们估算, 库湾产生的甲烷在扩散进入大气之前有 $69\% \sim 98\%$ 会被氧化过程消耗, 表现出显著的“碳汇”效应。由图6可知, 底部甲烷浓度虽在来流过程中有所增加, 但垂向迁移过程仍受制于较稳定的分层水环境, 对表层甲烷浓度以及水-气界面甲烷释放的影响十分有限。



依据较稳定的水温分层结构, 虚线将水体从上而下分为上部混合层、中部温跃层和底部滞温层

图6 监测断面甲烷浓度、水温和溶解氧剖面分布变化情况

Fig. 6 Variation in profile distributions of methane concentrations, water temperature, and dissolved oxygen at the observation section

于湖库而言, 水体分层结构的打破往往出现在季节性混合期 (overturn), 累积于温跃层以下的高浓度甲烷得以快速向上迁移释放, 形成甲烷排放的“热期” (hot moment)^[4]。Fernández 等^[37]针对温带湖泊的全年监测研究表明, 夏季水温分层期间水体底部存储的甲烷约 46% 在秋季湖水混合期得以释放, 占到全年甲烷扩散通量的 80% 。不同类型湖泊表现出的占比不一^[4], 但已有研究指出, 秋季水体垂向混合速率是影响底部累积甲烷释放的重要因素, 更快速地掺混会导致更高释放比例及甲烷排放水平^[38]。事实上, 相比于季节性混合持续时间, 雨季来流对水温分层的扰动更为迅速^[14]。Guérin 等^[16]的研究发现, 当 NT2 水库表底层温差降至 2°C 以下时, 甲烷释放尤为显著, 不定期的来流过程导致短时内水温分层破坏, 成为甲烷排放的另一重要“热期”。香溪河库湾与河道型水库类似, 异重流特征明显^[27], 上游水体来源于神农架林区, 终年水温较低, 在香溪河上游以顺坡底部异重流形式潜入库湾向河口运动^[39], 夏季受流域内强降雨及产汇流影

响,异重流过程尤甚. 由纪道斌等^[14]的监测结果可知,暴雨产生的上游低温洪水可以导致库湾上游段表底层温差骤降高达 6℃,库湾中游监测平台断面底部约 10 m 深度水层上下温差降幅达 2~3℃,反映出底部来流对分层水体的明显扰动,为底部高浓度甲烷的向上迁移提供了条件. 此外,甲烷氧化消耗也是甲烷迁移及释放的重要决定性因素. 香溪河库湾在春夏季虽呈现明显的水温分层,但受异重流影响,水柱 DO 均处于较高水平,Lei 等^[26]的研究发现库湾甲烷消耗速率主要受制于甲烷浓度,夏季水体底层甲烷浓度最高,消耗速率最大,但中、上层消耗速率仅为底层约 1/3,且低于其他各季节水平,夏季水柱总甲烷消耗速率为四季中的最低值,甲烷迁移过程中的氧化消耗比例(69%)也最低. 当然,这是他们基于良好天气状况下的观测结果,显著来流过程导致的潜在“热期”并未考虑,甲烷快速迁移过程中氧化消耗比例很可能会更低. 本研究观测的降雨径流事件不足以扰动分层水体,后续监测将竭力捕捉更大量级的暴雨洪水事件,以阐明甲烷迁移释放对上游来流的具体响应.

4 结论

(1)2019 年 7 月 30 日发生在香溪河的降雨事件前后,库湾中游监测断面处水-气界面甲烷通量变化范围为 0.011~0.326 mg·(m²·h)⁻¹,表现为大气甲烷的“源”. 风速和降雨均能够通过调节气体传输速率影响水-气界面的甲烷释放,其中风速的驱动作用更为显著,气体传输速率与风速呈现良好的非线性(R^2 达 0.862)和分段线性(高风速段 R^2 达 0.931)关系.

(2)流域降雨导致的底部异重流抵达监测断面时,甲烷浓度明显升高,很可能受到上游及沿程输入的影响. 此次来流过程未破坏水温分层结构,底部高浓度甲烷向上扩散过程中,氧化消耗作用明显,对表层甲烷浓度以及水-气界面甲烷释放的影响十分有限.

(3)降雨径流事件能够从降雨过程对表层水体的扰动和来流过程对深层水体的扰动两方面对库湾甲烷释放产生影响,但影响程度与降雨径流量级相关.

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 712-714.
- [2] Rudd J W M, Harris R, Kelly C A, et al. Are hydroelectric reservoirs significant sources of greenhouse gases? [J]. AMBIO,

1993, **22**(4): 246-248.

- [3] Giles J. Methane quashes green credentials of hydropower[J]. Nature, 2006, **444**(7119): 524-525.
- [4] Deemer B R, Harrison J A, Li S Y, et al. Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: a new global synthesis [J]. BioScience, 2016, **66**(11): 949-964.
- [5] St. Louis V L, Kelly C A, Duchemin é, et al. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate[J]. BioScience, 2000, **50**(9): 766-775.
- [6] Zhao Y, Wu B F, Zeng Y. Spatial and temporal patterns of greenhouse gas emissions from Three Gorges Reservoir of China [J]. Biogeosciences, 2013, **10**(2): 1219-1230.
- [7] Chen H, Yuan X X, Chen Z L, et al. Methane emissions from the surface of the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011, **116**(D21), doi: 10.1029/2011JD016244.
- [8] Yang L, Lu F, Wang X K, et al. Spatial and seasonal variability of diffusive methane emissions from the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2013, **118**(2): 471-481.
- [9] Xiao S B, Wang Y C, Liu D F, et al. Diel and seasonal variation of methane and carbon dioxide fluxes at Site Guojiaba, the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, **25**(10): 2065-2071.
- [10] 程炳红, 郝庆菊, 江长胜. 水库温室气体排放及其影响因素研究进展[J]. 湿地科学, 2012, **10**(1): 121-128.
- [10] Cheng B H, Hao Q J, Jiang C S. Research progress on the emission of greenhouse gases from reservoir and its influence factors[J]. Wetland Science, 2012, **10**(1): 121-128.
- [11] Takagaki N, Komori S. Effects of rainfall on mass transfer across the air-water interface [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2007, **112**(C6), doi: 10.1029/2006JC003752.
- [12] Guérin F, Abril G, Serça D, et al. Gas transfer velocities of CO₂ and CH₄ in a tropical reservoir and its river downstream [J]. Journal of Marine Systems, 2007, **66**(1-4): 161-172.
- [13] Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1992, **97**(C5): 7373-7382.
- [14] 纪道斌, 李媛, 孔松, 等. 典型暴雨洪水对三峡水库香溪河库湾水华的影响 [J]. 中国农村水利水电, 2013, (6): 39-44.
- [14] Ji D B, Li Y, Kong S, et al. The influence of a typical storm flood on the water bloom in the Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir [J]. China Rural Water and Hydropower, 2013, (6): 39-44.
- [15] Huang Y, Yasarer L M W, Li Z, et al. Air-water CO₂ and CH₄ 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**(5), doi: 10.1007/s10661-017-5926-2.
- [16] Guérin F, Deshmukh C, Labat D, et al. Effect of sporadic destratification, seasonal overturn, and artificial mixing on CH₄ emissions from a subtropical hydroelectric reservoir [J]. Biogeosciences, 2016, **13**(12): 3647-3663.
- [17] Qiu J. Chinese dam may be a methane menace [J]. Nature, 2009, doi: 10.1038/news.2009.962.
- [18] 张有芷, 张少婕, 王政祥. 长江三峡区间暴雨洪水分析 [J]. 人民长江, 1999, **30**(3): 11-13.
- [18] Zhang Y Z, Zhang S J, Wang Z X. Storm flood in Three Gorges intervening area of Yangtze River [J]. Yangtze River, 1999, **30**

- (3): 11-13.
- [19] Xiao S B, Liu L, Wang W, *et al.* A Fast-Response Automated Gas Equilibrator (FaRAGE) for continuous in situ measurement of CH₄ and CO₂ dissolved in water[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, **24**(7): 3871-3880.
- [20] Lambert M, Fréchet J L. Analytical techniques for measuring fluxes of CO₂ and CH₄ from hydroelectric reservoirs and natural water bodies[A]. In: Tremblay A, Varfalvy L, Roehm C, *et al* (Eds.). *Greenhouse Gas Emissions - Fluxes and Processes: Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments*[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2005. 37-60.
- [21] Wiesenburg D A, Guinasso Jr N L. Equilibrium solubilities of methane, carbon monoxide, and hydrogen in water and sea water[J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 1979, **24**(4): 356-360.
- [22] Jähne B, Libner P, Fischer R, *et al.* Investigating the transfer processes across the free aqueous viscous boundary layer by the controlled flux method[J]. *Tellus B*, 1989, **41**(2): 177-195.
- [23] Liss P S, Merlivat L. Air-sea gas exchange rates: introduction and synthesis[A]. In: Buat-Ménard P (Ed.). *The Role of Air-Sea Exchange in Geochemical Cycling* [M]. Dordrecht: Springer, 1986. 113-127.
- [24] Amorcho J, Devries J J. A new evaluation of the wind-stress coefficient over water surfaces [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1980, **85**(C1): 433-442.
- [25] Xiao S B, Liu D F, Wang Y C, *et al.* Temporal variation of methane flux from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir [J]. *Scientific Reports*, 2013, **3**, doi: 10.1038/srep02500.
- [26] Lei D, Liu J, Zhang J W, *et al.* Methane oxidation in the water column of Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir[J]. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2019, **47**(9), doi: 10.1002/clen.201800516.
- [27] 纪道斌, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾水动力特性分析[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2010, **40**(1): 101-112.
- Ji D B, Liu D F, Yang Z J, *et al.* Hydrodynamic characteristics of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir[J]. *Science in China (Series G)*, 2010, **40**(1): 101-112.
- [28] Xiao S B, Yang H, Liu D F, *et al.* Gas transfer velocities of methane and carbon dioxide in a subtropical shallow pond[J]. *Tellus B*, 2014, **66**(1), doi: 10.3402/tellusb.v66.23795.
- [29] Vachon D, Prairie Y T, Cole J J. The relationship between near-surface turbulence and gas transfer velocity in freshwater systems and its implications for floating chamber measurements of gas exchange[J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(4): 1723-1732.
- [30] 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.
- [31] 张成, 吕新彪, 龙丽, 等. 极低风速条件下水-气界面甲烷气体传输速率分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4162-4167.
- Zhang C, Lü X B, Long L, *et al.* Gas transfer velocity of CH₄ at extremely low wind speeds[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4162-4167.
- [32] Liss P S, Balls P W, Martinelli F N, *et al.* The effect of evaporation and condensation on gas transfer across an air-water-interface[J]. *Oceanologica Acta*, 1981, **4**(2): 129-138.
- [33] Ward B, Wanninkhof R, McGillis W R, *et al.* Biases in the air-sea flux of CO₂ resulting from ocean surface temperature gradients [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2004, **109**(C8), doi: 10.1029/2003JC001800.
- [34] Crusius J, Wanninkhof R. Gas transfer velocities measured at low wind speed over a lake [J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, **48**(3): 1010-1017.
- [35] Frost T, Upstill-Goddard R C. Meteorological controls of gas exchange at a small English lake [J]. *Limnology and Oceanography*, 2002, **47**(4): 1165-1174.
- [36] Paranaíba J R, Barros N, Mendonça R, *et al.* Spatially resolved measurements of CO₂ and CH₄ concentration and gas-exchange velocity highly influence carbon-emission estimates of reservoirs [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(2): 607-615.
- [37] Fernández J E, Peeters F, Hofmann H. Importance of the autumn overturn and anoxic conditions in the hypolimnion for the annual methane emissions from a temperate lake [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(13): 7297-7304.
- [38] Vachon D, Langenegger T, Donis D, *et al.* Influence of water column stratification and mixing patterns on the fate of methane produced in deep sediments of a small eutrophic lake [J]. *Limnology and Oceanography*, 2019, **64**(5): 2114-2128.
- [39] 杨正健, 刘德富, 马骏, 等. 三峡水库香溪河库湾特殊水温分层对水华的影响[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2012, **45**(1): 1-9, 15.
- Yang Z J, Liu D F, Ma J, *et al.* Effects of special vertical layered water temperatures on algal bloom in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2012, **45**(1): 1-9, 15.

CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, YANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangsuhai Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangsuhai	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)