ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第12期

Vol.37 No.12

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 37 卷 第 12 期
2016 年 12 月 15 日

目 次(卷终)

基于数值计算的细颗粒物采样管路传输损失评估 …… 罗李娜,程真,朱雯斐,张强,楼晟荣,乔利平,晏乃强(4457)
南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析 …… 秦鑫,张泽锋,李艳伟,沈艳,赵姝慧(4467)
南京青奥会期间不同天气条件下大气气溶胶中水溶性离子的分布特征 …… 师远哲,安俊琳,王红磊,邹嘉南,王俊秀(4475)
苏州市 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子的季节变化及来源分析 …… 王念飞,陈阳,郝庆菊,王欢博,杨复沫,赵晴,薄宇,贺克斌,姚玉刚(4482)
成都西南郊区春季 $PM_{2.5}$ 中元素特征及重金属潜在生态风险评价 …… 杨怀金,杨德容,叶芝祥,张恒德,马学款,汤志亚,毛冬艳(4490)
泉州市大气降尘中稀土元素地球化学特征及来源解析 …… 张棕巍,于瑞莲,胡恭任,胡起超,王晓明(4504)
青奥会期间基于 $\delta^{13}C$ 观测的大气 CO_2 来源解析 …… 徐家平,李旭辉,肖薇,次仁旺姆,温学发,刘寿东,杜雪婷,曹畅(4514)
民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析 …… 韩博,黄佳敏,魏志强(4524)
畜禽养殖场空气中可培养抗生素耐药菌污染特点研究 …… 张兰河,贺雨伟,陈默,高敏,仇天雷,王旭明(4531)
有序介孔材料过滤脱除纳米颗粒物 …… 邢奕,王骢,路培,李子宜,刘应书,于晗(4538)
基于 DOC + CDPF 技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性 …… 楼狄明,张允华,谭丕强,胡志远(4545)
亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征 …… 龙丽,肖尚斌,张成,张文丽,谢恒,李迎晨,雷丹,穆晓辉,张军伟(4552)
浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析 …… 马沛明,施练东,张俊芳,胡菊香,赵先富(4560)
太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应 …… 高敏,胡维平,邓建才,胡春华(4570)
利用 UV-vis 及 EEMs 对比冬季完全混合下两个不同特征水库溶解性有机物的光学特性 …… 黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,龙圣海,李扬,夏超,从海兵(4577)
三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估 …… 杨兵,何丙辉,王德宝(4586)
太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价 …… 武旭跃,邹华,朱荣,王靖国(4596)
滇池不同湖区沉积物正构烷烃的分布特征及其环境意义 …… 余丽燕,韩秀秀,黄晓虎,吴亚林,杨浩,黄涛,余艳红,黄昌春(4605)
洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性 … 王书锦,刘云根,王妍,侯磊,张超(4615)
蠡湖表层沉积物氮矿化过程及其赋存形态变化 …… 赵丽,王书航,姜霞,黄晓峰,陈俊伊(4626)
三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究 …… 卓海华, 孙志伟, 谭凌智, 吴云丽, 兰静(4633)
模拟巢湖流域氯菊酯的迁移转化和生态风险 …… 刘亚莉,王继忠,彭书传,陈天虎(4644)
有机质胶体对卡马西平在多孔介质中迁移影响模拟实验 …… 张思,何江涛,朱晓婧(4651)
无机型城市景观水体表观污染的悬浮颗粒物粒度分布特征:以中国运河苏州段为例 …… 李倩倩,潘杨,贡丹燕,黄勇,夏侯刚(4662)
清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应 …… 吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,吴永贵(4671)
南方典型农田区浅层地下水污染特征 …… 郭卉, 虞敏达, 何小松, 罗岳平(4680)
水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用 … 马燕华, 苏春利, 刘伟江, 朱亚鹏, 李俊霞(4690)
粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果 …… 沈庆然,侯娟,李田(4700)
超滤的预处理工艺对比研究:化学混凝与电絮凝 …… 赵凯, 杨春风, 孙境求, 李静, 胡承志(4706)
QCM-D 与 AFM 联用解析 EfOM 在 SiO_2 改性 PVDF 超滤膜表面的吸附机制 …… 姜家良,王磊,黄丹曦,黄松,朱振亚,徐亚伟,李青青(4712)
群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能 …… 赵畅,王文昭,徐期勇(4720)
水力负荷对生物沉淀池污染物净化性能的影响特性 …… 王文东,马翠,刘荟,范银萍,刘国旗,张珂(4727)
外加微量 N_2H_4 下 SBR 中硝化微生物特性 …… 肖芃颖, 张代钧, 卢培利(4734)
部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析 …… 鲁航,信欣,管蕾,邹长武,余静(4741)
典型油田多环芳烃污染对土壤反硝化微生物群落结构的影响 …… 姚炎红,王明霞,左小虎,李振轮,罗锋,周志峰(4750)
生物强化膜生物反应器(MBR)处理邻苯二甲酸二乙酯(DEP)效果及微生物群落结构分析 …… 张可,关允,罗鸿兵,陈伟,陈佳,陈强(4760)
开闭路条件下沉积物微生物燃料电池阳极细菌群落差异解析 …… 吴义诚,邓全鑫,王泽杰,郑越,李岱霖,赵峰(4768)
全氟辛酸(PFOA)厌氧生物可降解性 …… 李飞,陈轶丹,周真明,廖晓斌,马红芳,苑宝玲(4773)
水肥用量对玉米季土壤 CO_2 排放的综合影响 …… 杨硕欢,张保成,王丽,胡田田(4780)
福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性 …… 姚雄,余坤勇,曾琪,杨玉洁,张今朝,刘健(4789)
基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估 …… 杨阳,陈卫平,李艳玲,王美娥,彭驰(4800)
北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系 …… 柴立伟,刘梦娇,蒋大林,樊灏,曹晓峰,黄艺(4806)
准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征 …… 刘芳,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,王楠,杨春,夏楠,高宇潇(4815)
河北平原潮土中微生物对氮降解特征 …… 张灿灿,庞会从,高太忠,张静,李晓玉,付胜霞(4830)
砷-菲对蜈蚣草根部不同碳基团的影响 …… 廖晓勇,龚雪刚,阎秀兰,马旭,吴泽赢(4841)
碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力 …… 蔡函臻,宁西翠,王权,张增强,任秀娜,李荣华,王美净,Mukesh Kumar Awasthi(4848)
不同热解及来源生物炭对西北黄土吸附敌草隆的影响 …… 孙航, 蒋煜峰, 石磊平, 慕仲锋, 展惠英(4857)
南丹矿业活动影响区人群头发中重金属含量特征 …… 田美玲,钟雪梅,夏德尚,伏凤艳,陆素芬,李藜,宋波(4867)
Mg-Al-Me(Me = La,Ce,Zr)复合氧化物制备及其除氟性能 …… 汪爱河,周康根,刘行, 陈泉州,刘芳(4874)
铁锰复合氧化物/壳聚糖珠:一种环境友好型除磷吸附剂 …… 付军,范芳,李海宁,张高生(4882)
不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出及生物可给性 …… 王春峰, 陈冠飞, 朱艳臣, 姚丹, 皇晓晨, 王连军(4891)
《环境科学》第 37 卷(2016 年)总目录 …… (4899)
《环境科学》征稿简则(4466) 《环境科学》征订启事(4699) 信息(4489,4881)

亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征

龙丽[1],肖尚斌[1*],张成[2,3],张文丽[4],谢恒[4],李迎晨[1],雷丹[1],穆晓辉[1],张军伟[1]

(1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 三峡大学电气与新能源学院, 宜昌 443002; 3. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074; 4. 三峡大学(武汉)生物与制药学院, 宜昌 443002)

摘要: 为研究亚热带富营养化浅水池塘水-气界面 CH_4 释放通量特征,以宜昌地区 5 个浅水池塘为对象,利用静态通量箱法进行了为期一年的水-气界面 CH_4 通量监测. 结果表明,这 5 个池塘 CH_4 的年释放量分别为 4.495、12.702、6.827、8.920、17.560 mg·(m²·h)⁻¹. 其中扩散通量分别为 0.075、0.087、0.118、0.086、0.151 mg·(m²·h)⁻¹,冒泡通量分别为 4.420、12.616、6.709、8.834、17.409 mg·(m²·h)⁻¹,CH_4 冒泡量占 CH_4 释放总量的 98% 以上,并且 CH_4 释放量明显高于其他水域生态系统(湖泊、水库). 可见在富营养化浅水水域中,CH_4 释放量较大,且冒泡排放是 CH_4 的主要排放方式,而只关注扩散排放而忽略冒泡排放则会大大低估 CH_4 释放量.

关键词: 水-气界面; 甲烷; 扩散排放; 冒泡排放; 通量; 浅水池塘

中图分类号: X144 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2016)12-4552-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201605093

Characteristics of Methane Flux Across the Water-air Interface in Subtropical Shallow Ponds

LONG Li[1], XIAO Shang-bin[1*], ZHANG Cheng[2,3], ZHANG Wen-li[4], XIE Heng[4], LI Ying-chen[1], LEI Dan[1], MU Xiao-hui[1], ZAHNG Jun-wei[1]

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 4. College of Biotechnology & Pharmaceutical Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Five shallow ponds of Yichang were selected to illustrate the characteristics of methane (CH_4) in subtropical eutrophic shallow ponds. CH_4 flux across the water-air interface was quantified with static floating chamber method for one year. Annual CH_4 fluxes of the five ponds were 4.495, 12.702, 6.827, 8.920, 17.560 mg·(m²·h)⁻¹ respectively. Diffusive CH_4 fluxes were 0.075, 0.087, 0.118, 0.086, 0.151 mg·(m²·h)⁻¹ respectively and bubble emissions were 4.420, 12.616, 6.709, 8.834, 17.409 mg·(m²·h)⁻¹ respectively. Over 98% of total CH_4 flux was bubble emission and CH_4 flux was apparently higher than other aquatic ecosystems. So the CH_4 flux of shallow waters was high and bubble emission was the dominant way. CH_4 emission would be largely underestimated if the research only focus on the diffusion discharge and ignore the bubble emission.

Key words: the water-air interface; methane; diffusion emission; bubble emission; flux; shallow ponds

甲烷(CH_4)是大气中含量仅次于二氧化碳(CO_2)的重要温室气体,在大气中虽然只有 10 a 的留存时间,但其红外吸收能力却是 CO_2 的 20 ~ 30 倍[1~3]. 大气 CH_4 浓度在经历了 20 世纪 90 年代前后 10 多年相对稳定的时期后,2007 年以来再次开始增加,然而导致大气 CH_4 浓度变异的原因并不明了,这种不确定性也导致了应用气候模型预测未来气候变化情景的不确定性[4,5]. 已有研究表明,湿地是最重要的大气 CH_4 源,其贡献约占全部 CH_4 释放量的 20% ~40%. 湖泊、堰塘和水库面积约为地球表面的 3%,其中天然湖泊和堰塘的面积约 4.2×10^6 km²,水库面积约 2.6×10^5 km²,农用堰塘约 7.7×10^4 km²[6]. 目前,CH_4 的排放研究主要集中在海洋、湖泊、稻田和大型水库[7~10],很少涉及到那些面积较小、水深较浅、且自然地理特征复杂多样的浅水池塘. 而这些池塘通常因泥炭丰富具有较高的 CO_2 和 CH_4 排放量[11,12],其在全球的面积/数量以及在全球碳循环中的重要性可能被严重低估[6,13,14]. 如位于亚热带气候的宜昌,至 2016 年已经建成水库中大型 2 座、中型 23 座、小型 409 座,而

收稿日期: 2016-05-13; **修订日期**: 2016-07-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41273110); 湖北省自然科学基金项目(2014CFB672); 2015 年三峡大学研究生科研创新基金项目(2015CX009); 湖北省教育厅科研计划项目(Q20151209); 湖北省自然基金指导性计划项目(2015CFC834)

作者简介: 龙丽(1992 ~),女,硕士研究生,主要研究方向为生态水利,E-mail: 616317325@qq.com

* 通讯联系人,E-mail:shangbinx@163.com

建成堰塘多达约 8.27 万口. 由于化肥在农业领域的使用,导致上个世纪全球尺度上可供初级生产利用的 N 和 P 分别增长了 2 倍和 4 倍[15]. 在 21 世纪,水体富营养化进一步扩展为全球性的问题[16~19],特别是在热带发展中国家更为明显[20],这为 CH_4 的产生提供了更多的内源有机质. 同时,水体富营养化促进了水体氧消耗和沉积物的厌氧降解[21,22],从而有利于甲烷产生. 本研究通过对宜昌地区 5 个富营养化池塘进行为期一年的 CH_4 通量观测,通过了解浅水池塘 CH_4 的年释放特征及其差异性,以期为系统认识小型浅水湿地碳循环提供参考.

1　材料与方法

1.1　研究区域概况

这 5 个池塘位于湖北省宜昌市西陵区,属于亚热带季风性湿润气候,区内年平均降雨量为1 100 ~ 1 300 mm,年平均日照时数为1 538 ~ 1 883 h,年平均气温为 16.9℃[23],水体总氮(TN)、总磷浓度(TP)分别为 2.0 ~ 3.0 $mg\cdot L^{-1}$ 和 0.02 ~ 2.30 $mg\cdot L^{-1}$. 这 5 个池塘的自然地理特征见表 1.

表 1　观测池塘的基本自然地理属性

Table 1　Features of physical geography of five ponds

池塘编号	平均水深/m	面积/m^2	地理坐标	表观特征
1	0.6	450	30°45′43″N, 111°20′06″E	家用鱼塘,水面有生活垃圾,一年换一次水
2	1.0	200	30°45′25″N, 111°20′56″E	家用鱼塘,水体呈绿色,长年不换水
3	1.1	800	30°45′23″N, 111°20′57″E	家用鱼塘,一年换一次水
4	1.6	300	30°45′06″N, 111°21′01″E	商业性鱼塘,不换水,但会进水确保水量
5	1.2	375	30°44′54″N, 111°20′49″E	家用鱼塘,长年不换水,水面有生活垃圾

1.2　现场监测与水质分析

分别于 2014 年 11 月至 2015 年 10 月对宜昌地区 5 个池塘进行了为期一年的 CH_4 通量原位观测实验,采样频率为每月一次,中下旬进行实验采样,每次采样从上午 09:00 左右开始,按照 1 号池塘、2 号池塘、3 号池塘、4 号池塘、5 号池塘依次进行. 实验期间采用哈希多参数水质检测仪(DataSonde5,美国)现场测定水温(T)、pH 和溶解氧,便携式气象站(YGY-QXY,中国)现场测定风速、气温和气压,并采取表层水样两瓶(一瓶加酸保存). 将样品瓶放入恒温箱保存,野外实验结束后带回实验室放入冰箱中保存,并在一周内进行水质指标分析[24],水质指标分析参考文献[24].

采用密闭式静态通量箱-温室气体分析仪(DLT-100,美国)系统观测水-气界面 CH_4 通量. 该通量箱底部中通、不透明,表层为隔热材料,以减少光线和热量对 CH_4 的影响,体积 43.30 L,底面积 0.096 m^2(直径为 0.35 m,高度为 0.45 m). 通量箱内顶部装有 2 个小风扇,以使箱体内的气体混合均匀. DLT-100 具有高分辨率、高精度的特点,能以 1Hz 的频率连续、实时地观测通量箱内 CH_4 浓度. 已有研究人员利用其进行了相关分析[25~28]. 本研究每个观测点的通量观测持续 15 min 左右,一个点观测完后将箱体提起让箱体内气体与外部环境气体充分交换混合,再进行下一个点的观测. 每个池塘有两个不同的观测点.

1.3　计算方法

水-气界面气体交换通量是指单位时间内单位面积上气体的浓度变化量,正值表示水体向大气排放气体,负值表示水体吸收大气中的气体. 当通量箱内没有气泡或者只有很少的气泡时,箱体里 CH_4 的浓度就会随着时间的变化逐渐上升或者下降,使时间-气体浓度曲线呈现直线趋势. 在这种情况下,笔者直接用 Lambert 等[29]给出的简单线型回归方法计算气体释放速率和通量,即采用以下公式计算水-气界面温室气体通量:

$$F = k \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot V \cdot A^{-1} \cdot F_3^{-1} \qquad (1)$$

式中,F 为水-气界面 CH_4 通量[$mg\cdot(m^2\cdot h)^{-1}$],k 为在观测时间内通量箱内 CH_4 浓度随时间的变化率($10^{-6}\cdot min^{-1}$),F_1 为$\mu L\cdot L^{-1}$到 $\mu g\cdot m^{-3}$的转换系数(CH_4 为 655.47),F_2 为 min 与 h 的转换系数(60),V 为通量箱在水面时箱体内的气体体积(m^3),A 为水上部分通量箱的面积(m^2),F_3 为 μg 到 mg 的转化系数(1 000).

当有气泡进入箱体时,箱体内气体(主要是 CH_4)浓度就会急剧上升,利用 DLT-100 高频采样的优势,可以计算出冒泡浓度. 结合图 1 说明具体方法:先对一段相对长且稳定的直线段,即 AB,进行线性拟合,得到 CH_4 扩散浓度与时间的变化方程;再根据此方程计算观测时间末,即 C 点处 CH_4 的扩散浓度;观测时间末 D 点处 CH_4 的实测浓度与 C 点处拟合的 CH_4 的扩散浓度的差值即为观测时间

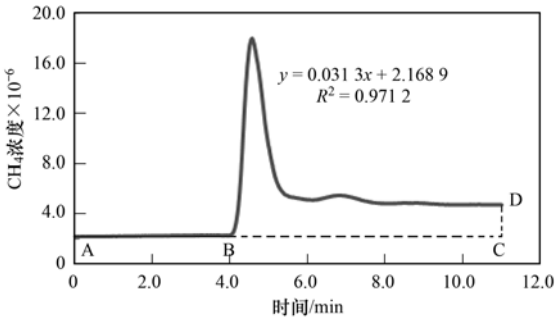

图 1 有气泡进入通量箱时 CH_4 浓度随时间变化示意

Fig. 1 Changes of CH_4 concentration with time in the presence of bubbles

内的冒泡浓度.

2 结果与讨论

2.1 环境因子

观测期间水温最低 6.34℃,最高 30.90℃,平均水温 18.4 ~ 20.5℃(表 2). 水体基本处于中性或弱碱性,最小 pH 6.95,最大 pH 9.61,平均值 7.95 ~ 8.86. 溶解氧变化较大,在 1.68 ~ 22.28 mg·L^{-1}之间波动,平均值 6.19 ~ 13.75 mg·L^{-1}. 叶绿素 a 变化最大,最小 7.1 mg·m^{-3},最大高达 553.6 mg·m^{-3},均值 99.0 ~ 317.6 mg·m^{-3}. 变异系数值显

表 2 观测期间水温、pH、溶解氧和叶绿素 a 情况[1)]

Table 2 Water temperature, pH, dissolved oxygen and chlorophyll a during the observation period

池塘编号	水温/℃					pH				
	min	max	ave	std	CV	min	max	ave	std	CV
1	6.34	30.60	18.4	9.29	0.50	6.97	9.12	7.95	0.73	0.09
2	6.54	30.30	19.0	8.81	0.46	7.16	9.61	8.10	0.82	0.10
3	8.62	30.70	19.4	8.72	0.45	7.76	9.43	8.86	0.59	0.07
4	7.93	30.90	19.8	8.98	0.45	7.42	9.60	8.63	0.73	0.08
5	8.30	30.03	20.5	8.32	0.41	6.95	9.61	8.31	0.81	0.10
池塘编号	溶解氧/mg·L^{-1}					Chl-a/mg·m^{-3}				
	min	max	ave	std	CV	min	max	ave	std	CV
1	1.68	12.31	6.19	2.73	0.44	25.1	222.2	110.8	67.18	0.61
2	1.75	11.61	7.12	3.51	0.49	106.0	553.6	317.6	134.98	0.43
3	7.05	21.55	12.95	4.51	0.35	7.1	386.8	99.0	119.69	1.21
4	8.68	22.28	13.75	4.09	0.30	28.0	281.8	133.7	70.47	0.53
5	6.39	16.39	10.32	2.82	0.27	51.2	103.2	77.1	15.52	0.20

1)表中 min 为最小值,max 为最大值,ave 为平均值,std 为标准偏差,CV 为变异系数,下同

示,一年中各观测点 pH 变化很小,而水温、溶解氧和叶绿素 a 的差异相对较大,这与季节变化有关,响应于地球的自转和太阳辐射.

观测期内气温、气压和风速的变化情况见表 3,由表可知,最小气温为 6.0℃,最高气温为 41.7℃,平均气温 17.7 ~ 27.2℃(表 3). 年内气压变化很小,最小为 986.9 hPa,最大为 1 024.2 hPa,均值 1 002.6 ~ 1 005.5 hPa. 观测期内风速很小,大多数情况处于无风状态(因此变异系数较大),最大风速仅 0.65 m·s^{-1},平均风速 0.06 ~ 0.28 m·s^{-1}. 气温和气压的变化响应于地球的自转和公转以及太阳辐射.

表 3 观测期间主要气象因子[1)]

Table 3 Main meteorological factors during the observation period

池塘编号	气温/℃					气压/hPa					风速/m·s^{-1}				
	min	max	ave	std	CV	min	max	ave	std	CV	min	max	ave	std	CV
1	6.0	30.1	17.7	9.52	0.54	988.0	1 023.7	1 005.5	12.2	0.01	0.00	0.51	0.06	0.15	2.43
2	6.3	29.2	19.8	8.63	0.44	988.1	1 024.2	1 005.5	11.7	0.01	0.00	0.19	0.02	0.06	2.68
3	7.6	30.8	23.3	8.03	0.34	987.8	1 023.3	1 005.3	12.4	0.01	0.00	0.26	0.08	0.11	1.43
4	9.0	40.4	25.9	9.06	0.35	987.2	1 020.0	1 003.8	11.3	0.01	0.00	0.65	0.32	0.28	0.86
5	12.5	41.7	27.2	9.06	0.33	986.9	1 019.1	1 002.6	10.4	0.01	0.00	0.51	0.14	0.22	1.58

2.2 扩散通量

图 2 是 1 号池塘水-气界面 CH_4 扩散通量年变化情况,2015 年 10 月 CH_4 扩散通量值异常,舍去,因此 1 号池塘只有 11 个有效数据. 从中可以看出,观测期间 1 号池塘处于排放状态,排放量在 0.028 ~ 0.196 mg·(m^2·h)$^{-1}$范围内变化. 其中,2015 年 5 月和 2015 年 8 月的 CH_4 排放量较大,分别为 0.196 mg·(m^2·h)$^{-1}$和 0.166 mg·(m^2·h)$^{-1}$,其余 9 个月

的 CH_4 排放量均在 0.10 mg·(m^2·h)$^{-1}$以下. CH_4 是微生物在厌氧条件下分解沉积物中的有机质的产物,而温度对微生物活性具有重要影响[30,31],因此温度是决定 CH_4 产量的重要因素. 监测指标显示 2015 年 5 月和 2015 年 8 月 1 号池塘在观测期间具有较高的水温和气温,产 CH_4 微生物的活性也相应较高.

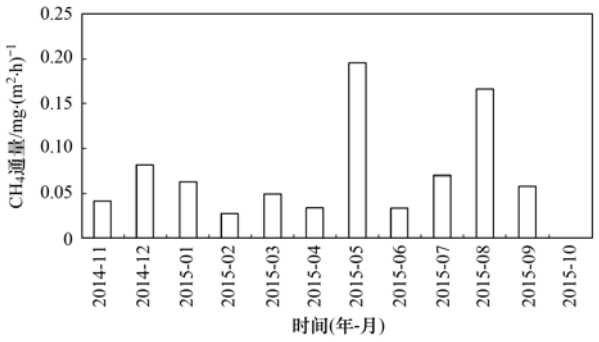

图 2　1 号池塘水-气界面 CH_4 扩散通量年变化

Fig. 2　CH_4 annual flux across the water-air interface of pond 1

2 号池塘水-气界面 CH_4 扩散通量年变化情况见图 3,从中可以看出其 CH_4 扩散通量在 0.011 ~ 0.222 mg·(m^2·h)$^{-1}$之间变化,均为正值,说明在观测期间 2 号池塘处于排放状态. 2014 年 12 月 2 号池塘在观测期间的水温和气温虽然较低,但其 CH_4 扩散通量较大,为 0.165 mg·(m^2·h)$^{-1}$,这是由于水面有浮游植物覆盖的原因. 1992 年的 Tucurui 水库研究中,水面有浮游植物的区域释放的 CH_4 量是开阔水域的 1056 倍[32]; 1995 年的 Varzea 湖研究中,有浮游植物覆盖的水面的 CH_4 释放量是开阔水域的 3.25 倍[33]. 2015 年 9 月 2 号池塘的 CH_4 释放量最大,其水温和气温也较大,并且温差(气温与水温差值的绝对值)最大. 2015 年 10 月的 CH_4 释放量最小,但其Chl-a浓度最高,达 553.60 mg·m^{-3}. Chl-a 浓度上升,藻类光合作用强度增强,O_2 产生量增加,水中溶解氧浓度也相应变大,产 CH_4 微生物活性减弱,CH_4 产量减小,对应的 CH_4 释放量也减少.

图 4 是 3 号池塘水-气界面 CH_4 扩散通量年变化情况,3 号池塘 2015 年 2 月换水,2015 年 8 ~ 10 月被占用,因此没有这 4 个月的数据. 从中可以看出,3 号池塘的 CH_4 释放量呈现先下降、后上升、再下降的趋势,在 0.030 ~ 0.269 mg·(m^2·h)$^{-1}$范围内变化. 2015 年 1 月的 CH_4 释放量最小,监测指标表明,其气温和水温较低,溶解氧和Chl-a较高. 温度较低,产 CH_4 微生物的活性也较低,又处于溶解氧较

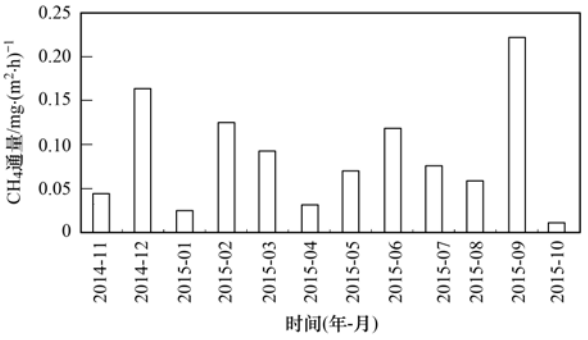

图 3　2 号池塘水-气界面 CH_4 扩散通量年变化

Fig. 3　CH_4 annual flux across the water-air interface of pond 2

高的环境,CH_4 的产量就相应低. 2015 年 5 月 CH_4 的释放量最大,环境因子分析显示对应的风速最大,水温和气温较大. 风速较大,水面的波动也相应较大,而较大的水面波动会导致较大的 CH_4 释放量[34].

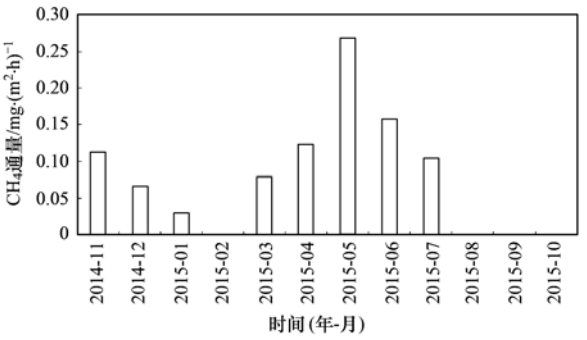

图 4　3 号池塘水-气界面 CH_4 扩散通量年变化

Fig. 4　CH_4 annual flux across the water-air interface of pond 3

图 5 是 4 号池塘水-气界面 CH_4 扩散通量年变化情况,2015 年 10 月 4 号池塘被占用,无 CH_4 通量数据. 从中可知,4 号池塘水-气界面 CH_4 扩散通量的年变化范围为 0.006 ~ 0.178 mg·(m^2·h)$^{-1}$. 2015 年 2 月的 CH_4 释放量很大,达 0.169 mg·(m^2·h)$^{-1}$,是因为其水面有很多浮游植物. 2015 年 4 月、7 月和 9 月的 CH_4 释放量也很大,分别为 0.111、0.178 和 0.162 mg·(m^2·h)$^{-1}$,主要是由于较高的气温和水温引起的[35,36]. 2015 年 8 月的 CH_4 释放量最小,只有 0.007 mg·(m^2·h)$^{-1}$,环境因子分析表明,2015 年 8 月观测期间的温差最大,且其溶解氧和Chl-a的浓度均较大.

图 6 是 5 号池塘水-气界面 CH_4 扩散通量年变化情况,从中可以看出,5 号池塘水-气界面 CH_4 释放量波动较大,在 0.012 ~ 0.422 mg·(m^2·h)$^{-1}$之间变化. 2014 年 12 月、2015 年 1 月和 2015 年 2 月 5

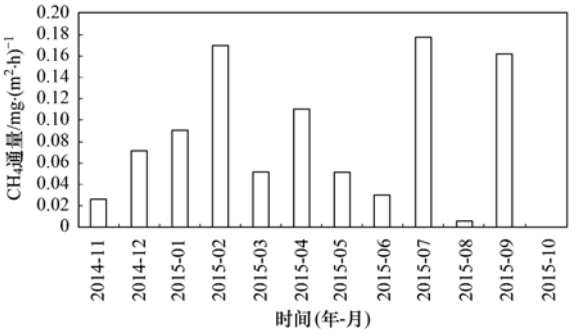

图 5 4 号池塘水-气界面 CH_4 扩散通量年变化

Fig. 5 CH_4 annual flux across the water-air interface of pond 4

号池塘的 CH_4 释放量很大,分别为 0.381、0.262 和 0.422 mg·(m²·h)⁻¹,这是由于这 3 个月 5 号池塘水面覆盖了很多浮游植物. 2015 年 6 月和 2015 年 9 月 CH_4 的释放量较大,分别为 0.207 mg·(m²·h)⁻¹和 0.193 mg·(m²·h)⁻¹,环境因子分析表明其对应的水温和气温也较高,产 CH_4 微生物的活性也相应较高[37]. 较低的水温和气温导致了 2014 年 11 月 5 号池塘的 CH_4 释放量很小,只有 0.124 mg·(m²·h)⁻¹. 2015 年 5 月、7 月以及 10 月的水温和气温虽然较高,但水体中高浓度的溶解氧和Chl-a营造了一个含氧量较高的环境,使得在厌氧环境中产生的 CH_4 量很少,因此这 3 个月的 CH_4 的释放量很小,不足 0.024 mg·(m²·h)⁻¹.

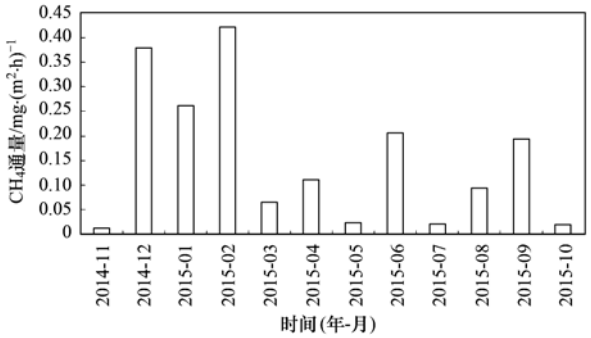

图 6 5 号池塘水-气界面 CH_4 扩散通量年变化

Fig. 6 CH_4 annual flux across the water-air interface of pond 5

2.3 冒泡通量

CH_4 在水中的溶解度很小,厌氧条件下微生物分解沉积物中的有机质产生 CH_4,部分 CH_4 气泡在上升到水面的过程中被氧化成 CO_2[38],而在浅水区域 CH_4 气泡在被氧化之前就能到达水面,以气泡的方式释放到大气中. Samuel 水库[39]的研究表明,水深小于 5m 的水域的 CH_4 冒泡释放量占整个水库 CH_4 冒泡释放量的 96.77% ~97.22%. 可见浅水水域 CH_4 的释放以冒泡排放为主. 在这一年中总共监测到 39 次明显的冒泡现象,其中 1 号池塘 6 次,2 号池塘 7 次,3 号池塘 7 次,4 号池塘 8 次,5 号池塘 11 次. 图 7 是一年内水-气界面 CH_4 冒泡总量,从中可知,观测期内 CH_4 冒泡总量最小的是 1 号池塘,为 26.518 mg·(m²·h)⁻¹,最大的是 5 号池塘,高达 156.684 mg·(m²·h)⁻¹. 4 号池塘的 CH_4 冒泡量大约只有 5 号池塘 CH_4 冒泡量的一半,3 号池塘的 CH_4 冒泡量是 1 号池塘 CH_4 冒泡量的 1.5 倍左右,5 号池塘的 CH_4 冒泡量约是 2 号池塘 CH_4 冒泡量的 2.5 倍. 观测期间,单次 CH_4 冒泡通量最大的高达 64.551 mg·(m²·h)⁻¹,最小的仅有 0.005 mg·(m²·h)⁻¹,可见 CH_4 冒泡存在高度的差异性.

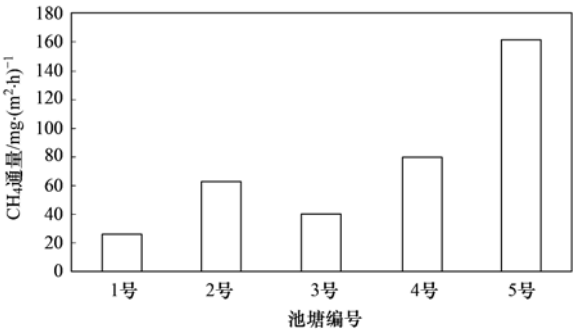

图 7 CH_4 冒泡通量

Fig. 7 CH_4 bubble emissions

同时,CH_4 冒泡排放表现出明显的季节变化规律(图 8):秋季(12 月 ~ 次年 2 月)最大,夏季(3 ~ 5 月)和春季(6 ~ 8 月)次之,冬季(9 ~ 11 月)最小. 秋季 CH_4 冒泡排放量为 136.594 mg·(m²·h)⁻¹,是冬季 CH_4 冒泡排放量[23.147 mg·(m²·h)⁻¹]的 5.90 倍. 夏季和春季 CH_4 冒泡排放量介于两者之间,分别为 121.727 mg·(m²·h)⁻¹、84.567 mg·(m²·h)⁻¹. 夏季和秋季的 CH_4 冒泡量很高,冬季的 CH_4 冒泡量很低,这是因为夏季和秋季温度较高,直接刺激产甲烷菌的活性使其趋于活跃[35],大幅度增加了 CH_4 的产量,从源头上促进 CH_4 释放[40];同时水温也能对气泡的形成产生影响,有研究表明[41],水温较高的沉积物中 CH_4 的累积量大于扩散量,最终导致 CH_4 过饱和从而形成气泡.

2.4 年平均情况

表 4 是一年中 5 个池塘水-气界面 CH_4 释放情况. 从中可以看出,5 个池塘 CH_4 平均扩散通量较小,在 0.075 ~ 0.151 mg·(m²·h)⁻¹之间波动,低于洞庭湖、鄱阳湖水-气界面 CH_4 扩散通量,高于巢

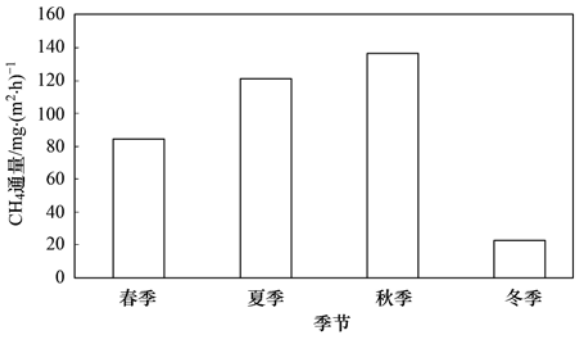

图 8　CH_4 冒泡通量季节性变化

Fig. 8　Seasonal variation of CH4 bubble emissions

湖、洱海水-气界面 CH_4 扩散通量[42]. 但平均冒泡通量很大,最小的为 4.420 mg·(m^2·h)$^{-1}$,是最大平均扩散通量的 30 倍左右,高于 Samuel 水库[0.083 ~ 2.912 mg·(m^2·h)$^{-1}$]和 Tucuru 水库[0.021 ~ 1.250 mg·(m^2·h)$^{-1}$][39]的 CH_4 冒泡释放量. 1 号池塘 CH_4 的扩散通量较小,其冒泡通量也较小,但 2 号池塘的 CH_4 扩散通量小,而冒泡通量却较大,可见 CH_4 扩散通量与冒泡通量之间没有必然的联系. CH_4 释放总量都很大,最大的高达 17.560 mg·(m^2·h)$^{-1}$,最小的也有 4.495 mg·(m^2·h)$^{-1}$,远远高于鄱阳湖星子湿地的 CH_4 释放量,同时这在一定程度上说明了不同的浅水池塘在 CH_4 释放量上存在着较大的差异. 5 个池塘 CH_4 冒泡通量均占 CH_4 总通量的 98% 以上,有的甚至高达 99.31%. 说明在浅水水体中,CH_4 主要以冒泡排放方式进入大气.

表 4　水-气界面 CH_4 年释放情况/mg·(m^2·h)$^{-1}$

Table 4　CH_4 annual flux across the water-air interface/mg·(m^2·h)$^{-1}$

池塘编号	平均扩散通量	平均冒泡通量	总通量
1	0.075	4.420	4.495
2	0.087	12.616	12.702
3	0.118	6.709	6.827
4	0.086	8.834	8.920
5	0.151	17.409	17.560

为了能够与其他淡水水域进行比较,本研究统计了一些不同淡水水域 CH_4 释放通量的基本情况(如表 5). 从表 5 中可以看出,美国 Olentangy 湿地的 CH_4 释放量较大,年排放量达 7.76 ~ 13.01 mg·(m^2·h)$^{-1}$(植被湿地具有较高的累积生产力),但仍然小于本文研究区域的 CH_4 释放量. 长江口盐沼泽地、闽江河口湿地、洞庭湖、三峡水库巴东段以及国外一些湖泊、水库的 CH_4 释放量明显低于本研究区域,并且洞庭湖、洱海和美国西部的 Shasta 水库还是 CH_4 的部分汇. 长春市城市湖泊的 CH_4 释放量变化范围较大,为 0.05 ~ 7.29 mg·(m^2·h)$^{-1}$,相差 7.24 mg·(m^2·h)$^{-1}$,同时长春市城市湖泊也属于浅水水域,并且部分也是富营养化水体. 这些都直接或间接说明了浅水池塘具有较高的 CH_4 释放量.

表 5　不同淡水水域 CH_4 释放通量[42~50]

Table 5　CH_4 flux of different fresh waters

研究区域	CH_4 释放通量/mg·(m^2·h)$^{-1}$
长春市城市湖泊	0.05 ~ 7.29
Olentangy 湿地(美国)	7.76 ~ 13.01
长江口盐沼泽地	0.96 ~ 3.80
闽江河口湿地	0.16 ~ 0.91
滇池	0.10 ~ 0.20
洞庭湖	-0.91 ~ 0.92
鄱阳湖	0.52 ~ 1.12
巢湖	0.01 ~ 0.04
洱海	-0.28 ~ 0.15
南四湖	0.01 ~ 0.07
三峡水库巴东段	0.01 ~ 0.23
F. D. Roosevelt 水库	0.07 ~ 0.34
Dworshak 水库	0.03 ~ 0.62
Wallula 水库	0.15 ~ 0.71
Shasta 水库	-0.06 ~ 1.22
Oroville 水库	0.05 ~ 0.44
New Melones 水库	0.11 ~ 0.85
Petit Saut 水库(法属圭亚那)	0.24 ~ 0.52
Mistumis 湖泊加拿大	0.024 ~ 0.033
Clarkie 湖泊	0.01 ~ 0.02
富营养化浅水池塘	4.50 ~ 17.56

3　结论

(1)宜昌地区这 5 个浅水池塘的 CH_4 均处于排放状态,且冒泡通量很大.

(2)在浅水水域中,冒泡排放对释放量有着决定性作用,忽略 CH_4 的冒泡排放会造成 CH_4 释放量的严重低估. 本实验中 CH_4 单次最大冒泡通量高达 64.55 mg·(m^2·h)$^{-1}$,CH_4 冒泡量占 CH_4 释放总量的 98.98%.

(3)CH_4 冒泡排放在时间和空间上都存在着很大的差异,探讨其规律需要全方位、长时间的观测研究,即在不同水深、靠近岸边和远离岸边的地方进行长时间观测研究.

参考文献:

[1] Le Mer J, Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review[J]. European Journal of Soil Biology, 2001, **37**(1): 25-50.

[2] 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.

[3] Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect[J]. Science, 1990, **248**(4960): 1217-1219.

[4] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis[A]. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, *et al* (Eds.). Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[C]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.

[5] Stocker B D, Roth R, Joos F, *et al*. Multiple greenhouse-gas feedbacks from the land biosphere under future climate change scenarios[J]. Nature Climate Change, 2013, **3**(7): 666-672.

[6] Downing J A, Prairie Y T, Cole J J, *et al*. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments[J]. Limnology and Oceanography, 2006, **51**(5): 2388-2397.

[7] 曹兴朋, 张桂玲, 马啸, 等. 春季东、黄海溶解甲烷的分布和海气交换通量[J]. 环境科学, 2013, **34**(7): 2565-2573.
Cao X P, Zhang G L, Ma X, *et al*. Distribution and air-sea fluxes of methane in the Yellow Sea and the East China Sea in the spring[J]. Environmental Science, 2013, **34**(7): 2565-2573.

[8] 邓欢, 蔡旅程, 姜允斌, 等. 运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 359-365.
Deng H, Cai L C, Jiang Y B, *et al*. Application of microbial fuel cells in reducing methane emission from rice paddy [J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 359-365.

[9] 谢燕, 陈曦, 胡正华, 等. 短期保护性耕作措施对大豆-冬小麦轮作系统温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1499-1506.
Xie Y, Chen X, Hu Z H, *et al*. Effects of short-time conservation tillage managements on greenhouse gases emissions from soybean-winter wheat rotation system [J]. Environmental Science, 2016, **37**(4): 1499-1506.

[10] 郭树芳, 齐玉春, 尹飞虎, 等. 不同灌溉方式对华北平原冬小麦田土壤 CO_2 和 N_2O 排放通量的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1880-1890.
Guo S F, Qi Y C, Yin F H, *et al*. Effect of irrigation patterns on soil CO_2 and N_2O emissions from winter wheat field in North China plain[J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1880-1890.

[11] Repo M E, Huttunen J T, Naumov A V, *et al*. Release of CO_2 and CH_4 from small wetland lakes in western Siberia[J]. Tellus B, 2007, **59**(5): 788-796.

[12] Riera J L, Schindler J E, Kratz T K. Seasonal dynamics of carbon dioxide and methane in two clear-water lakes and two bog lakes in northern Wisconsin, U. S. A.[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1999, **56**(2): 265-274.

[13] Kortelainen P, Rantakari M, Huttunen J T, *et al*. Sediment respiration and lake trophic state are important predictors of large CO_2 evasion from small boreal lakes[J]. Global Change Biology, 2006, **12**(8): 1554-1567.

[14] Bastviken D, Cole J J, Pace M L, *et al*. Fates of methane from different lake habitats: connecting whole-lake budgets and CH_4 emissions[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, **113**(G2): G02024.

[15] Falkowski P, Scholes R J, Boyle E, *et al*. The global carbon cycle: a test of our knowledge of earth as a system[J]. Science, 2000, **290**(5490): 291-296.

[16] Jin X C, Xu Q J, Huang C Z. Current status and future tendency of lake eutrophication in China[J]. Science in China Series C: Life Sciences, 2005, **48**(S2): 948-954.

[17] Davis J R, Koop K. Eutrophication in Australian rivers, reservoirs and estuaries - A Southern hemisphere perspective on the science and its implications[J]. Hydrobiologia, 2006, **559**(1): 23-76.

[18] von Sperling E, da Silva Ferreira A C, Gomes L N L. Comparative eutrophication development in two Brazilian water supply reservoirs with respect to nutrient concentrations and bacteria growth[J]. Desalination, 2008, **226**(1-3): 169-174.

[19] Yang J, Yu X Q, Liu L M, *et al*. Algae community and trophic state of subtropical reservoirs in southeast Fujian, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2012, **19**(5): 1432-1442.

[20] Von Sperling E, Souza A D. Long-term monitoring and proposed diffuse pollution control of a tropical reservoir[J]. Water Science and Technology, 2007, **55**(3): 161-166.

[21] Huttunen J T, Alm J, Liikanen A, *et al*. Fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous oxide in boreal lakes and potential anthropogenic effects on the aquatic greenhouse gas emissions [J]. Chemosphere, 2003, **52**(3): 609-621.

[22] 侯翠翠, 张芳, 李英臣, 等. 卫河新乡市区段春季溶解 CH_4 与 N_2O 浓度特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1891-1899.
Hou C C, Zhang F, Li Y C, *et al*. Characteristics of dissolved CH_4 and N_2O concentrations of Weihe River in Xinxiang section in spring[J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1891-1899.

[23] 王庆礼, 邓红兵, 郝占庆, 等. 梅子垭旅游资源评价及开发、保护规划研究[J]. 长江流域资源与环境, 1998, **7**(4): 347-352.
Wang Q L, Deng H B, Hao Z Q, *et al*. A preliminary study on evaluation and planning for the development and conservation of tourist resources in meiziya area[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 1998, **7**(4): 347-352.

[24] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring analysis method[M]. (4th ed.) Beijing: China Environmental Science Press, 2002.

[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**: 2500.

[26] 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.

[27] Herbst M, Friborg T, Ringgaard R, *et al*. Interpreting the variations in atmospheric methane fluxes observed above a restored wetland[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, **151**(7): 841-853.

[28] Schroth M H, Eugster W, Gómez K E, *et al*. Above- and below-ground methane fluxes and methanotrophic activity in a landfill-cover soil[J]. Waste Management, 2012, **32**(5): 879-889.

[29] Lambert M, Fréchette J L. Analytical techniques for measuring fluxes of CO_2 and CH_4 from hydroelectric reservoirs and natural

water bodies[A]. In: Tremblay A, Varfalvy L, Roehm C, *et al* (Eds.). Greenhouse Gas Emissions—Fluxes and Processes [C]. Berlin Heidelberg: Springer, 2005: 37-60.

[30] 李煜珊, 李耀明, 欧阳志云. 产甲烷微生物研究概况[J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 2025-2030.
Li Y S, Li Y M, Ouyang Z Y. A research overview of methanogens[J]. Environmental Science, 2014, **35**(5): 2025-2030.

[31] 赵静, 张桂玲, 吴莹, 等. 长江中溶存甲烷的分布与释放[J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 18-25.
Zhao J, Zhang G L, Wu Y, *et al*. Distribution and emission of methane from the Changjiang[J]. Environmental Science, 2011, **32**(1): 18-25.

[32] Rosa L P, Schaeffer R, dos Santos M A. Emissões de metano e dióxido de carbono de hidrelétricas na Amazônia comparadas às termelétricas equivalentes[J]. Cadernos de Energia, 1996, **9**: 109-157.

[33] Fearnside P M. Hydroelectric dams in the Brazilian Amazon as sources of 'Greenhouse' Gases[J]. Environmental Conservation, 1995, **22**(1): 7-19.

[34] Keller M, Stallard R F. Methane emission by bubbling from Gatun Lake, Panama[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, **99**(D4): 8307-8319.

[35] 赵小杰, 赵同谦, 郑华, 等. 水库温室气体排放及其影响因素[J]. 环境科学, 2008, **29**(8): 2377-2384.
Zhao X J, Zhao T Q, Zheng H, *et al*. Greenhouse gas emission from reservoir and its influence factors[J]. Environmental Science, 2008, **29**(8): 2377-2384.

[36] 沈李东. 亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展[J]. 环境科学, 2015, **36**(5): 1133-1140.
Shen L D. Research progress on microbial properties of nitrite-dependent anaerobic methane-oxidising bacteria[J]. Environmental Science, 2015, **36**(5): 1133-1140.

[37] 郭莹莹, 陈坚, 尹希杰, 等. 九龙江河口表层水体及沉积物中甲烷的分布和环境控制因素研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 558-564.
Guo Y Y, Chen J, Yin X J, *et al*. Spatial distribution of methane in surface water and sediment of Jiulongjiang estuary and the effect environment factors of it[J]. Environmental Science, 2012, **33**(2): 558-564.

[38] 王亮, 肖尚斌, 刘德富, 等. 香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析[J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1471-1475.
Wang L, Xiao S B, Liu D F, *et al*. Fluxes of greenhouse gases from Xiangxi River in summer and their influencing factors[J]. Environmental Science, 2012, **33**(5): 1471-1475.

[39] Rosa L P, Dos Santos M A, Matvienko B, *et al*. Biogenic gas production from major Amazon reservoirs, Brazil[J]. Hydrological Processes, 2003, **17**(7): 1443-1450.

[40] Jerman V, Metje M, Mandić-Mulec I, *et al*. Wetland restoration and methanogenesis: the activity of microbial populations and competition for substrates at different temperatures[J]. Biogeosciences, 2009, **6**(6): 1127-1138.

[41] Louis V L S, 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.

[42] 陈永根, 白晓华, 李香华, 等. 中国 8 大湖泊冬季水-气界面甲烷通量初步研究[J]. 湖泊科学, 2007, **19**(1): 11-17.
Chen Y G, Bai X H, Li X H, *et al*. A primary study of the methane flux on the water-air interface of eight lakes in winter, China[J]. Journal of Lake Sciences, 2007, **19**(1): 11-17.

[43] 温志丹, 宋开山, 赵莹, 等. 长春城市水体夏秋季温室气体排放特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 102-111.
Wen Z D, Song K S, Zhao Y, *et al*. Seasonal variability of greenhouse gas emissions in the Urban Lakes in Changchun, China[J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 102-111.

[44] 沙晨燕. 美国俄亥俄州人工河滨湿地甲烷排放[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(11): 2456-2464.
Sha C Y. Methane emission from riparian constructed wetland in Ohio, USA[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, **30**(11): 2456-2464.

[45] 李杨杰, 陈振楼, 王东启, 等. 长江口盐沼带湿地生态演替过程中甲烷排放研究[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(8): 2035-2042.
Li Y J, Chen Z L, Wang D Q, *et al*. Methane emission in the process of wetland vegetation succession in salt marsh of Yangtze River estuary[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(8): 2035-2042.

[46] 曾从盛, 王维奇, 张林海, 等. 闽江河口短叶茳芏潮汐湿地甲烷排放通量[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(2): 500-504.
Zeng C S, Wang W Q, Zhang L H, *et al*. Methane fluxes of cyperus malaccensis tidal wetland in Minjiang River estuary[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, **21**(2): 500-504.

[47] Soumis N, Duchemin É, Canuel R, *et al*. Greenhouse gas emissions from reservoirs of the western United States[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2004, **18**(3), doi: 10.1029/2003GB002197.

[48] Abril G, Guérin F, Richard S, *et al*. Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-years old tropical reservoir (Petit Saut, French Guiana)[J]. Global Biogeochem Cycles, 2005, **19**(4), doi: 10.1029/2005GB002457.

[49] Demarty M, Bastien J, Tremblay A. Carbon dioxide and methane annual emissions from two boreal reservoirs and nearby lakes in Quebec, Canada[J]. Biogeosciences Discuss, 2009, **6**(2): 2939-2963.

[50] 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.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 37 No. 12

Dec. 15, 2016

CONTENTS

Transport Loss Estimation of Fine Particulate Matter in Sampling Tube Based on Numerical Computation ····· LUO Li-na, CHENG Zhen, ZHU Wen-fei, *et al.* (4457)

Sources Analysis of Heavy Metal Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing ····· QIN Xin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, *et al.* (4467)

Distribution Characteristics of Water Soluble Ions Under Different Weather Conditions During the Youth Olympic Games in Nanjing ····· SHI Yuan-zhe, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, *et al.* (4475)

Seasonal Variation and Source Analysis of the Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Suzhou ····· WANG Nian-fei, CHEN Yang, HAO Qing-ju, *et al.* (4482)

Characteristics of Elements and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in $PM_{2.5}$ at the Southwest Suburb of Chengdu in Spring ····· YANG Huai-jin, YANG De-rong, YE Zhi-xiang, *et al.* (4490)

Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Rare Earth Elements in the Dustfall of Quanzhou City ····· ZHANG Zong-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, *et al.* (4504)

^{13}C-based Sources Partitioning of Atmospheric CO_2 During Youth Olympic Games, Nanjing ····· XU Jia-ping, LI Xu-hui, XIAO Wei, *et al.* (4514)

Gaseous Emission Characterization of Civil Aviation Aircraft During Takeoff ····· HAN Bo, HUANG Jia-min, WEI Zhi-qiang (4524)

Pollution Characteristics of Antibiotic Resistant Bacteria from Atmospheric Environment of Animal Feeding Operations ····· ZHANG Lan-he, HE Yu-wei, CHEN Mo, *et al.* (4531)

Removing Nano Particles by Filtration Using Materials with Ordered Mesoporous Structure ····· XING Yi, WANG Cong, LU Pei, *et al.* (4538)

Emission Characteristics of Gaseous Pollutants from City Bus Fueled with Biodiesel Based on DOC + CDPF Technology in Real Road Conditions ····· LOU Di-ming, ZHANG Yun-hua, TAN Pi-qiang, *et al.* (4545)

Characteristics of Methane Flux Across the Water-air Interface in Subtropical Shallow Ponds ····· LONG Li, XIAO Shang-bin, ZHANG Cheng, *et al.* (4552)

Succession of Phytoplankton Assemblages and Its Influencing Factors in Tangpu Reservoir, Zhejiang Province ····· MA Pei-ming, SHI Lian-dong, ZHANG Jun-fang, *et al.* (4560)

Responses of Physiological Indices of Typical Submerged Macrophytes to Water Quality in Taihu Lake ····· GAO Min, HU Wei-ping, DENG Jian-cai, *et al.* (4570)

Optical Characteristics of Dissolved Organic Matter from Two Different Full Mixed Reservoirs in Winter Based on UV-vis and EEMs ····· HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, *et al.* (4577)

Hanfeng Pre-dam Commissioning Eutrophication Status and Control Evaluation in Three Gorges Reservoir ····· YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (4586)

Occurrence, Distribution and Ecological Risk of Aantibiotics in Surface Water of the Gonghu Bay, Taihu Lake ····· WU Xu-yue, ZOU Hua, ZHU Rong, *et al.* (4596)

Distribution Characteristics of *n*-alkanes in Sediment Core and Implication of Environment in Different Lakes of Dianchi ····· YU Li-yan, HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, *et al.* (4605)

Vertical Distribution and Pollution Risk Assessment of Nitrogen, Phosphorus, and Organic Matter in Sediment of Inflowing Rivers of Erhai Lake Estuarine Wetland in Wet and Dry Seasons ····· WANG Shu-jin, LIU Yun-gen, WANG Yan, *et al.* (4615)

Variation of Nitrogen Forms in Sediments of Lihu Lake During Mineralization ····· ZHAO Li, WANG Shu-hang, JIANG Xia, *et al.* (4626)

Temporal and Spatial Variation Characteristics of the Heavy Metals Content in the Surface Sediment and the Potential Ecological Risk Trends in the Three Gorges Reservoir Area ····· ZHUO Hai-hua, SUN Zhi-wei, TAN Ling-zhi, *et al.* (4633)

Modeling the Environmental Behaviors and Ecological Risks of Permethrin in Chaohu Lake ····· LIU Ya-li, WANG Ji-zhong, PENG Shu-chuan, *et al.* (4644)

Simulation Experiment: Effect of Organic Colloid on Carbamazepine Transport in Porous Media ····· ZHANG Si, HE Jiang-tao, ZHU Xiao-jing (4651)

Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Inorganic Type Urban Landscape Water: Taking the Canal of Suzhou Section as Example ····· LI Qian-qian, PAN Yang, GONG Dan-yan, *et al.* (4662)

Rock Weathering Characteristics and the Atmospheric Carbon Sink in the Chemical Weathering Processes of Qingshuijiang River Basin ····· LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, *et al.* (4671)

Pollution Characteristics Analysis in Shallow Groundwater of Typical Farmland Area, Southern China ····· GUO Hui, YU Min-da, HE Xiao-song, *et al.* (4680)

Identification of Sulfate Sources in the Groundwater System of Zaozhuang: Evidences from Isotopic and Hydrochemical Characteristics ····· MA Yan-hua, SU Chun-li, LIU Wei-jiang, *et al.* (4690)

Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Extensive Green Roofs ····· SHEN Qing-ran, HOU Juan, LI Tian (4700)

Comparative Study on Pretreatment Process of Ultrafiltration: Chemical Coagulation and Electrocoagulation ····· ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, *et al.* (4706)

Adsorption Mechanisms Analysis of EfOM on PVDF Ultrafiltration Membranes Modified by SiO_2 Using QCM-D and AFM ····· JIANG Jia-liang, WANG Lei, HUANG Dan-xi, *et al.* (4712)

Isolation of Quorum Quenching Bacteria and Their Function for Controlling Membrane Biofouling ····· ZHAO Chang, WANG Wen-zhao, XU Qi-yong (4720)

Effects of Hydraulic Loading Rate on the Removal of Pollutants from an Integrated Biological Settling Tank ····· WANG Wen-dong, MA Cui, LIU Hui, *et al.* (4727)

Characteristics of Nitrobacteria in SBR with Trace N_2H_4 Addition ····· XIAO Peng-ying, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li (4734)

Start-up of Partial Nitritation AGS-SBR and Analysis of Its Microbial Community Composition ····· LU Hang, XIN Xin, GUAN Lei, *et al.* (4741)

Effects of PAHs Pollution on the Community Structure of Denitrifiers in a Typical Oilfield ····· YAO Yan-hong, WANG Ming-xia, ZUO Xiao-hu, *et al.* (4750)

Performance and Microbial Community Analysis of Bioaugmented Treatment of Diethyl Phthalate (DEP) in Membrane Bioreactor ····· ZHANG Ke, GUAN Yun, LUO Hong-bing, *et al.* (4760)

Comparative Analysis of the Bacterial Community on Anodic Biofilms in Sediment Microbial Fuel Cell Under Open and Closed Circuits ····· WU Yi-cheng, DENG Quan-xin, WANG Ze-jie, *et al.* (4768)

Anaerobic Biodegradability of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) ····· LI Fei, CHEN Yi-dan, ZHOU Zhen-ming, *et al.* (4773)

Comprehensive Effects of the Application of Water and Fertilizer Amount on CO_2 Emission from Soils of Summer-maize Field ····· YANG Shuo-huan, ZHANG Bao-cheng, WANG Li, *et al.* (4780)

Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in the Soil Erosion Area of West Mountains in Fujian Province, China ····· YAO Xiong, YU Kun-yong, ZENG Qi, *et al.* (4789)

Comprehensive Risk Evaluation of Cadmium in Soil-rice System Based on Uncertainty Analysis ····· YANG Yang, CHEN Wei-ping, LI Yan-ling, *et al.* (4800)

Fluorescence Properties of Glomalin and Its Relationship with Soil Physyicochemical Characteristics in Different Regions of Beijing City ····· CHAI Li-wei, LIU Meng-jiao, JIANG Da-lin, *et al.* (4806)

Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metal Pollution and Health Risk in Soil Around the Coal Industrial Area of East Junggar Basin ····· LIU Fang, Tashpolat Tiyip, Ilyas Nurmamat, *et al.* (4815)

Characteristics of Microbial Nitrogen Degradation in Fluvo-aquic Soil of Hebei Plain ····· ZHANG Can-can, PANG Hui-cong, GAO Tai-zhong, *et al.* (4830)

Influence of Arsenate and Phenanthrene on Carbon-groups of *Pteris vittata* L. Roots ····· LIAO Xiao-yong, GONG Xue-gang, YAN Xiu-lan, *et al.* (4841)

Effect of Alkali Solids Amendment on Sewage Sludge Aerobic Composting and the Potential of Related Products on Infertile Soil Amelioration ····· CAI Han-zhen, NING Xi-cui, WANG Quan, *et al.* (4848)

Adsorption and Influential Factors of Diuron on the Loess Soil by Adding Different Biochar Prepared at Varying Temperatures ····· SUN Hang, JIANG Yu-feng, SHI Lei-ping, *et al.* (4857)

Characteristics of Heavy Metal Contents in Human Hairs of Mine Contaminated Areas in Nandan County ····· TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, XIA De-shang, *et al.* (4867)

Preparation of Mg-Al-Me(Me = La, Ce, Zr) Composite Oxides for Efficient Fluoride Uptake ····· WANG Ai-he, ZHOU Kang-gen, LIU Xing, *et al.* (4874)

Fe-Mn Binary Oxide Impregnated Chitosan Bead (FMCB): An Environmental Friendly Sorbent for Phosphate Removal ····· FU Jun, FAN Fang, LI Hai-ning, *et al.* (4882)

Leaching Toxicity and Bioaccessibility of Heavy Metals in MSWI Fly Ash with Various Particle Sizes ····· WANG Chun-feng, CHEN Guan-fei, ZHU Yan-chen, *et al.* (4891)

《环境科学》第 6 届编辑委员会

主　编：赵进才

副主编：赵景柱　郝吉明　田　刚

编　委：（按姓氏笔画排序）

万国江　王华聪　王凯军　王绪绪　田　刚　田　静　史培军

朱永官　刘志培　刘　毅　汤鸿霄　孟　伟　周宗灿　林金明

赵进才　赵景柱　姜　林　郝郑平　郝吉明　聂永丰　黄　霞

黄　耀　鲍　强　潘　纲　潘　涛　魏复盛

环 境 科 学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976 年 8 月创刊）

2016 年 12 月 15 日　第 37 卷　第 12 期（卷终）

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 37　No. 12　Dec. 15, 2016

主　　管	中国科学院	**Superintended** by	Chinese Academy of Sciences
主　　办	中国科学院生态环境研究中心	**Sponsored** by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协　　办	（以参加先后为序） 北京市环境保护科学研究院 清 华 大 学 环 境 学 院	**Co-Sponsored** by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主　　编	赵进才	**Editor-in -Chief**	ZHAO Jin-cai
编　　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱（海淀区双清路 18 号，邮政编码：100085） 电话：010-62941102，010-62849343 传真：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	**Edited** by	The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE） P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel：010-62941102, 010-62849343; Fax：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出　　版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717	**Published** by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	**Printed** by	Beijing Bei Lin Printing House
发　　行	科 学 出 版 社 电话：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com	**Distributed** by	Science Press Tel：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	**Domestic**	All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 （北京 399 信箱）	**Foreign**	China International Book Trading Corporation（Guoji Shudian）, P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号：ISSN 0250-3301 / CN 11-1895/X　　**国内邮发代号**：2-821

国 内 定 价：120.00 元　　**国外发行代号**：M 205

国 内 外 公 开 发 行