

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第6期

Vol.39 No.6

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京市二次有机气溶胶生成潜势的日变化规律 刘俊, 楚碧武, 贺泓 (2505)

太原冬季 PM_{2.5} 影响霾污染的关键尺度谱特征 杨素英, 余欣洋, 赵秀勇, 李义宇, 孙洪娉, 田芷洁, 李岩, 吴尚, 王梓航 (2512)

盘锦市冬季 PM_{2.5} 水溶性离子特征及来源分析 张蕾, 姬亚芹, 王士宝, 赵静琦, 张军, 李越洋, 张伟 (2521)

广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析 古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 田智林, 李梅, 程鹏 (2528)

热带树木燃烧颗粒物中脱水糖和醋非烯的排放特征 金诚妙, 崔敏, 韩勇, 陈颖军, 唐娇, 李军, 张干 (2538)

天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用 蔡子颖, 韩素芹, 张敏, 姚青, 刘敬勇 (2548)

亚热带农田和林地大气氨湿沉降与混合沉降比较 朱潇, 王杰飞, 沈健林, 肖润林, 王娟, 吴金水, 李勇 (2557)

京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估 卢亚灵, 周佳, 程曦, 张伟, 蒋洪强 (2566)

北京北运河河流生态系统健康评价 顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨 (2576)

长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析 董磊, 汤显强, 林莉, 邴超, 黎睿, 吴敏 (2588)

福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征 张丹丹, 郭亚平, 任红云, 周昕原, 黄福义, 张娴 (2600)

三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价 方志青, 陈秋禹, 尹德良, 王志康, 孙涛, 王永敏, 谢德体, 王定勇 (2607)

三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征 潘婵娟, 黎睿, 汤显强, 夏振尧, 李青云, 杨文俊, 许文年 (2615)

基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源 孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 梁慧雅 (2624)

天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响 孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 李恒鹏, 李慧贇 (2632)

重庆雪玉洞洞穴滴水水地球化学时空变化特征及其环境意义 曾泽, 蒋勇军, 吕现福, 曾思博, 胡刘焯, 雷佳琪 (2641)

岩溶地表河旱季有色溶解有机质组成及来源: 以金佛山碧潭河为例 刘跃, 贺秋芳, 刘宁坤, 刘九程, 王正雄, 段世辉 (2651)

托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义 李永格, 李宗省, 冯起, 肖莲柱, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟 (2661)

五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响 彭文杰, 李强, 宋昂, 靳振江 (2673)

西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例 张耀文, 李洪, 李嘉, 宋洋, 张陵蕾, 李永, 蒲迅赤, 黄文典 (2680)

四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子 郑诚, 陆开宏, 徐镇, 郑志明, 朱津永 (2688)

营养盐添加对水华蓝藻——卵孢金胞藻生长和竞争影响的原位实验 王梦梦, 张玮, 张军毅, 尚光霞, 杜彩丽, 王丽卿 (2698)

植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响 刘森, 陈开宁 (2706)

江汉平原水稻灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险 华玲玲, 张富林, 翟丽梅, 刘宏斌, 范先鹏, 王洪霞 (2715)

冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除 柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 王瑞, 柳蒙蒙, 郑嘉熹, 魏源送 (2724)

臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制 董秉直, 高昊旸, 胡孟柳 (2732)

中试 SAD-ASBR 系统处理含盐废水的启动与工艺特性 于德爽, 唐佳佳, 张军, 王晓霞, 赵红, 韩长民, 孙捷 (2740)

海藻酸钙/聚 N-异丙基丙烯酰胺半互穿网络凝胶球的除磷性能 曾学阳, 骆华勇, 张耀坤, 荣宏伟, 曾子君, 钟广汇 (2748)

玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性 龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 杨靖新, 袁树森 (2756)

硝化细菌的培养及包埋固定化中试 杨宏, 胡银龙 (2763)

不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能 安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 邵兆伟, 赵智超, 黄剑明, 陈永志 (2770)

高含固污泥厌氧消化中蛋白质转化规律 詹瑜, 施万胜, 赵明星, 许之扬, 阮文权, 宋联, 朱葛 (2778)

污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化 李玉, 方文, 祁光霞, 魏勇红, 刘建国, 李润东 (2786)

丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响 高晨晨, 游佳, 陈轶, 郑兴灿, 尚巍, 张文安 (2794)

同步去除并富集磷酸盐生物膜驯化过程中微生物种群分析 孟璇, 潘杨, 章豪, 廖恒弘, 徐林建, 冯鑫, 单捷 (2802)

四环素对人粪便好氧堆肥过程及微生物群落演替的影响 时红蕾, 王晓昌, 李倩, 刘源 (2810)

长期定位有机物料还田对关中平原夏玉米-冬小麦轮作土壤 NO 排放的影响 袁梦轩, 王晋峰, 谭跃慧, 魏静, 杨学云, 顾江新 (2819)

菌渣还田量对紫色水稻土净温室气体排放的影响 祁乐, 高明, 周鹏, 王富华, 高泳钦, 陈仕奇, 吴思琪, 邓静霖, 文婷 (2827)

¹³C 脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入 孙昭安, 陈清, 韩笑, 吴文良, 孟凡乔 (2837)

西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响 杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 肖孔操, 李德军 (2845)

江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布 吕建树, 何华春 (2853)

黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布 于元赫, 吕建树, 王亚梦 (2865)

典型小城市土壤重金属空间异质性及风险评价: 以临安市为例 郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 林子也, 赵科理, 吴东涛, 傅伟军 (2875)

西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价 周艳, 陈楠, 邓绍坡, 王金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金 (2884)

典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及风险评价 张红桔, 赵科理, 叶正钱, 许斌, 赵伟明, 顾晓波, 张华锋 (2893)

生物炭添加对湿地植物生长及氧化应激响应的影响 黄磊, 陈玉成, 赵亚琦, 肖广全, 杨志敏 (2904)

厌氧条件水稻土铁对砷释放的影响 王欣, 钟松雄, 陈志良, 何宏飞, 董家华, 陈晓丽 (2911)

矿业活动影响区稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险 田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞, 周浪, 宋波 (2919)

硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响 刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 林亲铁, 刘千钧, 钟松雄, 黄玲, 张建强 (2927)

吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征 李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 李红娜, 叶婧, 李峰, 吴翠霞 (2936)

喷施锌肥对油菜镉生物可给性的影响 王林, 谷朋磊, 李然, 徐应明, 孙约兵, 梁学峰, 代晶晶 (2944)

贵州草海底栖动物汞分布及其对沉积物汞的响应特征 许议元, 曾玲霞, 何天容, 陈梦瑜, 钱晓莉, 李振吉 (2953)

废旧轮胎翻新过程中多环芳烃排放及健康风险 付建平, 赵波, 黎玉清, 刘沙沙, 尹文华, 黄锦琼, 周长风, 张素坤, 贺德春, 韩静磊 (2963)

县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态 孙秀峰, 施开放, 吴健平 (2971)

颗粒尺寸对纳米氧化物环境行为的影响 严玉鹏, 唐亚东, 万彪, 王小明, 刘凡, 冯雄汉 (2982)

防晒剂的海洋环境行为与生物毒性 朱小山, 黄静颖, 吕小慧, 杜永芬, 蔡中华 (2991)

《环境科学》征订启事 (2527) 《环境科学》征稿简则 (2723) 信息 (2826, 2852, 2910)

五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响

彭文杰^{1,2}, 李强^{2,3*}, 宋昂^{2,3}, 靳振江^{1*}

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541004; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 国土资源部/广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004; 3. 联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 桂林 541004)

摘要: 近年来水库温室气体备受关注, 为揭示水库水气界面 CO₂ 和 CH₄ 在时间和空间上的变化特征, 于 2016 年 7~12 月采用静态箱法在五里峡水库对其 CO₂ 和 CH₄ 排放速率进行 4 次监测, 并测试微型光合生物初级生产力等. 结果表明, 五里峡水库夏季为大气 CO₂ 的汇, 变化范围在 -30.14 ~ -3.47 mg·(m²·h)⁻¹, 秋、冬季均为大气 CO₂ 的源, 变化范围在 15.57 ~ 115.06 mg·(m²·h)⁻¹. 甲烷排放速率在夏季变化幅度明显, 变化范围在 0.08 ~ 1.03 mg·(m²·h)⁻¹, 而在秋、冬季变化稳定, 变化范围在 -0.07 ~ 0.43 mg·(m²·h)⁻¹. 受水库周期性蓄水和排水影响, CO₂ 和 CH₄ 排放速率在空间上表现为水库消落带和坝尾较低而库区较高的分布格局. 此外, CO₂ 和 CH₄ 排放速率时空变化与微型光合生物初级生产力分别呈显著负相关和正相关 (r 为 -0.477 和 0.771). 这是因为产甲烷菌能够将夏季微型光合生物固定的有机碳转化成 CH₄ 释放到大气中, 从而使微型光合生物对水圈 CO₂ 和 CH₄ 循环产生负反馈效应和正反馈效应. 因此, 本研究结果为进一步评估微型生物对岩溶水体碳循环的贡献提供了理论依据.

关键词: 五里峡水库; 温室气体排放速率; 时空变化; 初级生产力

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)06-2673-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201709119

Spatial-Temporal Variations of CO₂ and CH₄ Flux Through a Water-air Interface Under the Effect of Primary Productivity in Wulixia Reservoir

PENG Wen-jie^{1,2}, LI Qiang^{2,3*}, SONG Ang^{2,3}, JIN Zhen-jiang^{1*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Land and Resources & Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China; 3. International Research Centre on Karst under the Auspices of UNESCO, Guilin 541004, China)

Abstract: In recent years, the effect of greenhouse gas has been a focus. In order to reveal the spatial-temporal variations of CO₂ and CH₄ flux through a water-air interface, Wulixia reservoir was selected as a typical case for measuring CO₂ and CH₄ flux using a floating chamber during four study periods in 2016. The primary productivity of the water was also studied. The results indicate that surface-layer water in Wulixia reservoir is a CO₂ sink in summer, varying between -30.14 and -3.47 mg·(m²·h)⁻¹. However, it is the source of CO₂ in autumn and winter, varying between 15.57 mg·(m²·h)⁻¹ and 115.06 mg·(m²·h)⁻¹. The variation of methane flux is obvious in summer, but it is stable in autumn and winter. The spatial distribution of CO₂ and CH₄ show that they are higher in the typical bay area and lower in the tailing dam as well as in the drawdown zone of the reservoir. In addition, the spatial and temporal variation of CO₂ and CH₄ are negatively and positively correlated with primary productivity (r -0.477 and 0.771), respectively. Due to the high activity of photosynthetic micro-organisms in summer, CO₂ can be sequestered, allowing the surface-layer water in Wulixia reservoir to be a CO₂ sink. In addition, methanogenic bacteria can oxidize organic carbon produced by photosynthetic micro-organisms. Therefore, CH₄ has a negative correlation with primary productivity. The results provide important information for the study of microorganism functions in karst water systems.

Key words: Wulixia reservoir; greenhouse gases flux; spatial and temporal variation; primary productivity

过去通常认为, 水库又称“人工湖泊”或“人工湿地”是大气二氧化碳和甲烷等温室气体的主要排放源^[1-4], 其排放强度与水环境、淹没的土壤及植被类型等因素有关^[5-7]. 此外, 水库产生的温室气体是水体中自身或陆源的有机质通过水体微生物分解产生, 并通过气泡排放、植物传输和扩散、水轮机、溢洪道和大坝下游等途径由

水体逃逸至大气环境^[8]. 耿雪萌^[9]利用 Wetland-

收稿日期: 2017-09-13; 修订日期: 2017-12-02

基金项目: 广西自然科学基金项目(2015GXNSFGA139010, 2014GXNSFCA118012); 中国地质科学院项目(YYWF201505); 中国地质调查局子项目(DD20160305-05)

作者简介: 彭文杰(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为岩溶生物地球化学, E-mail: liqiang@karst.ac.cn

* 通信作者, E-mail: glqiangli@163.com; zhenjiangjin@163.com

DNDC 模型得出密云水库消落带 CH_4 总排放量为 $15.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 而 Bevelhimer 等^[10] 在调查美国东南部的水库时发现: 水库 CO_2 释放速率为 $994 \sim 2760 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, CH_4 释放速率为 $6 \sim 187 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 此外, Deemer 等^[11] 通过计算发现全球通过水库年释放的温室气体高达 0.8 Pg ($0.5 \sim 1.2 \text{ Pg}$). 然而最新研究结果表明: 河流、湖泊和水库具有高度的环境异质性和微生物群落多样性, 是碳氮转化的主要场所, 固定的有机碳相当于海洋固碳总量的近 40%^[12]. 此外, 总面积约为 $1.6 \times 10^6 \text{ km}^2$ 的非碳酸盐型淡水水域对溶解无机碳的滞留率仅为 $5 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 而总面积约为 $0.18 \times 10^6 \text{ km}^2$ 的碳酸盐型淡水水域对溶解无机碳的平均滞留率为 $100 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ^[13]. 尽管宋昂等^[14]、Li 等^[15] 以及卢晓漩等^[16] 认为微型光合生物(光合细菌等)对岩溶水体有机碳的固定具有重要的贡献, 然而关于微型光合生物对岩溶水体二氧化碳和甲烷释放速率的影响至今鲜见报道.

为了解岩溶区水库微型光合生物对岩溶水体 CO_2 和 CH_4 排放速率的影响, 本文选择桂林五里峡水库作为研究对象, 设置消落带、中游、交汇处、坝前、坝尾等 5 个采样点, 运用静态箱法, 结合微型光合生物初级生产力, 探讨岩溶区水库微型光合生物与岩溶水体 CO_2 和 CH_4 排放速率的关系, 以期为进一步评估微型生物对岩溶水体碳循环的贡献提供了理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

五里峡水库位于广西桂林市兴安县漠川河上游, 库区位于 $25^\circ 30' 06'' \sim 25^\circ 35' 31'' \text{N}$, $110^\circ 44' 41'' \sim 110^\circ 47' 12'' \text{E}$ 之间. 五里峡水库建于 1972 年, 主要由湘江支流漠川河补给, 库容约 $1.08 \times 10^9 \text{ m}^3$, 是一座以灌溉为主, 兼有发电、防洪、漓江补水等综合功能的大型水库. 五里峡水库受亚热带季风气候影响, 多年平均气温 19.0°C , 12 月平均气温 8.79°C , 多年平均降水量 1887.1 mm ^[17], 12 月占全年 3.3%. 水库中、上游库区分布于岩溶区, 出露的地层主要为中泥盆统东岗岭阶(D_2d) 碳酸盐岩; 下游及大坝地区出露的地层主要为中泥盆统信都组(D_2^s 、 D_2d) 砂岩夹页岩地层, 岩溶区面积占水库库区总面积的 45%, 主要岩溶地貌为峰丛谷地, 为地表水补给型半岩溶水库.

1.2 采样与分析

2016 年在五里峡水库消落带(WLX01)、中游(WLX03)、交汇处(WLX04)、坝前(WLX05)、坝尾(WLX02)共设置 5 个采样点(见图 1), 使用浮游静态箱(暗箱)采集 CO_2 、 CH_4 气体, 采集的方法是静态箱在下水前, 接箱内通风扇使箱内气体混合均匀, 静态箱下水时先采集一次箱内气体作为背景浓度, 再分别隔 5、5、10、15 min 采集一次气体, 保存于 1 L 气样袋中, 密封避光保存, 每个点共 5 个气袋, 气样袋取回实验室后 48 h 内用 Agilent 7890B 气相色谱仪进行 CO_2 、 CH_4 浓度分析. 利用 YSI EXO 水质监测和测量平台(美国 YSI 公司)现场检测溶解氧(dissolved oxygen, DO)、水温(T)、pH、DIC 带回实验室通过 TOC-V 分析仪(日本岛津公司)测定.

为了解水体微型光合生物初级生产力, 按照王桂云等^[18]的方法: 采集 50 mL 原水样装入可密封的玻璃瓶中, 共采集 2 瓶, 其中一瓶水样加入 10 滴饱和氯化汞, 然后 2 瓶水样都加 $100 \mu\text{L NaH}^{14}\text{CO}_3$ 溶液密封现场悬挂培养 48 h, 培养液用 $0.22 \mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤, 最后将过滤膜用 1220C 超低本底液闪仪测量 ^{14}C 放射性活度.

1.3 温室气体排放速率及初级生产力计算方法

水-气界面的 CO_2 和 CH_4 排放速率计算公式^[19] 见式(1):

$$\text{Flux} = \text{Slope} \times F_1 \times F_2 \times V \times (F_3 \times S)^{-1} \quad (1)$$

式中, Slope 为时间-浓度关系图中的斜率($\times 10^{-6} \text{ min}^{-1}$), F_1 为分子摩尔质量(CO_2 为 $44 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$; CH_4 为 $6 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$), F_2 为 min 和 h 的转换系数(60), V 为浮游箱内套入的空气体积(m^3), F_3 为 μg 和 mg 的转换系数(1000), S 为水上浮游箱的表面积(m^2), Flux 为温室体排放速率 [$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$].

初级生产力计算公式见式(2):

$$\text{PP}_{\text{AL}} = 1000 \times (R_{\text{AL}} - R_{\text{K}}) \times W / (R \times N) \quad (2)$$

式中, PP_{AL} 为光照下水体固碳速率 $\mu\text{g} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, R_{AL} 为不过 $3 \mu\text{m}$ 膜水样 ^{14}C 放射性活度(Bq), R_{K} 为加氯化汞水样有机 ^{14}C 放射性活度(Bq), W 为 DIC 浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), R 为原液有机 ^{14}C 的放射性活度(Bq), N 为时间(h).

1.4 数据处理

用 Origin 8.5 对水-气界面的 CO_2 和 CH_4 排放速率进行作图分析; 利用 SPSS 19.0 进行相关分析



图 1 五里峡水库采点示意

Fig. 1 Sampling sites in Wulixia reservoir

(双尾).

2 结果与分析

2.1 五里峡水库二氧化碳和甲烷排放速率

五里峡水库温室气体排放速率结果如图 2 所

示. 五里峡水库二氧化碳排放速率变化明显, 而甲烷排放速率变化不大. 2016 年 7 月库区甲烷的波动范围最为明显, 其波动区间为 $0.08 \sim 1.03 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 库区二氧化碳(除 WZX05 点)排放速率均为负值, 说明库区向大气吸收二氧化碳. 2016 年 10 月库区二氧化碳的波动范围为 $20.65 \sim 115.06 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 其中 WZX05 点二氧化碳排放速率达到最大值为 $115.06 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; 2016 年 12 月, 五里峡水库二氧化碳的波动范围为 $-13.00 \sim 47.47 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 甲烷的波动范围为 $-0.03 \sim 0.07 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 对比 5 个采样点二氧化碳平均排放速率, WZX01 的平均排放速率最低为 $14.92 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 而 WZX05 的平均排放速率最高为 $72.26 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 因此五里峡水库温室气体排放速率在空间上总体呈现在库区较高, 而消落带(WZX01)、坝尾(WZX02)较低的格局.

2.2 环境因子分析

为了解环境因子对五里峡水库温室气体排放速率的影响, 还检测了水库表层微型光合生物初级生产力、水温、DIC 和 pH 等指标(表 1). 结果表明: 五里峡水库表层水体温度变化范围为 $13.66 \sim 30.98 \text{ }^\circ\text{C}$, 并在 12 月表层水温最低, 7 月表层水温最高. 研究区水体受碳酸盐岩影响, 水体 pH 值介于 $7.19 \sim 9.52$ 之间, 平均值为 8.21, 结果与文献[14, 16]一致. 同时, DIC 浓度从 7~12 月逐渐递增; 而 WZX05 点的 DIC 浓度高于其它点. 库区微型光合生物的初级生产力在 7 月最高, 平均值达到 $2.78 \text{ } \mu\text{g} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$; 在 10 月最低, 平均值只有 $0.03 \text{ } \mu\text{g} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$. 受气体因素、水环境因素和陆地环境因素的共同影响^[20], 库区在 10 月初级生产力最小, 而 12 月 CO_2 和 CH_4 通量最低.

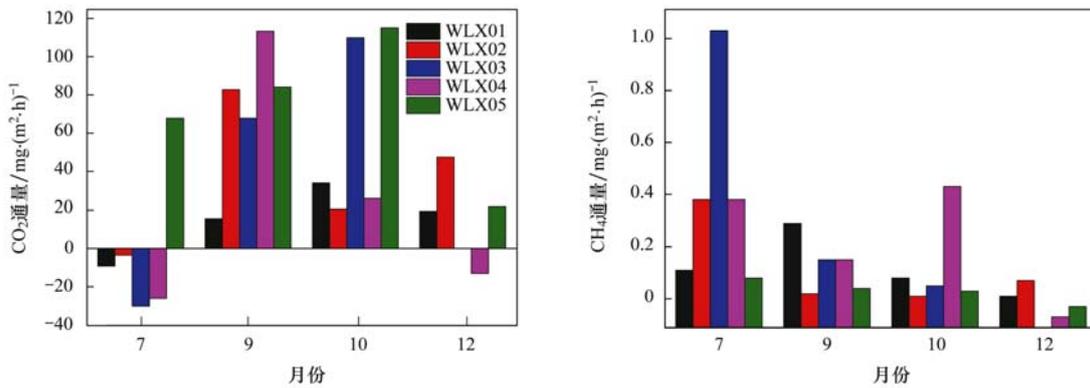


图 2 五里峡水库 CO_2 和 CH_4 排放速率

Fig. 2 Exchange flux rate of CO_2 and CH_4 in Wulixia reservoir

表 1 五里峡水库水体理化性质

Table 1 Physical and chemical characteristics of water samples in Wulixia reservoir

月份	采样点	溶解氧 /mg·L ⁻¹	pH	初级生产力 /μg·(L·h) ⁻¹	水温/°C	总无机碳 /mg·L ⁻¹
7	WLX01	8.88	9.43	0.60	27.57	36.58
	WLX02	4.99	7.19	0.11	21.01	36.23
	WLX03	8.51	8.99	6.61	29.94	47.10
	WLX04	7.75	9.46	4.73	30.98	42.12
	WLX05	7.69	9.52	1.81	30.91	39.58
9	WLX01	8.51	9.04	0.02	25.5	51.32
	WLX02	5.24	7.44	0.04	25.83	45.78
	WLX03	6.49	7.96	0.25	27.37	44.56
	WLX04	6.25	7.68	0.04	27.25	38.61
	WLX05	6.08	7.60	0.33	27.37	54.06
10	WLX01	10.42	8.24	0.00	20.58	13.13
	WLX02	10.13	8.82	0.00	20.42	65.67
	WLX03	8.94	7.59	0.01	20.66	44.28
	WLX04	8.07	7.89	0.05	20.18	24.39
	WLX05	7.62	7.45	0.09	20.54	58.16
12	WLX01	10.57	8.24	0.01	13.66	73.25
	WLX02	9.44	7.75	0.02	13.95	68.01
	WLX04	10.2	7.94	0.23	13.67	71.50
	WLX05	9.25	7.79	0.57	14.39	69.76

3 讨论

3.1 温室气体排放速率的时空变化

水库水体以溶解和颗粒形态存在的有机碳和无机碳是水气界面二氧化碳排放的物质基础,其中溶解无机碳以 CO₂、H₂CO₃、HCO₃⁻ 和 CO₃²⁻ 等形式为主并影响温室气体排放速率.五里峡水库二氧化碳和甲烷排放速率在时间尺度上存在显著差异.五里峡水库库区7月二氧化碳(除WLX05点)排放速率均为负值,说明夏季较高的水温(表1)有利于微型光合生物的生长,从而将水体中的溶解无机碳转变成有机碳,进而减少水气界面二氧化碳排放速率^[21, 22].五里峡水库二氧化碳排放速率9月最高,溶解氧平均值为6.514 mg·L⁻¹,远低于其它4个月的均值,这是因为水体微型光合生物经过7月旺盛生长的对数期和稳定的平台期后进入衰老期^[23].因此,在9月五里峡水库部分微型光合生物的死亡不但导致水体溶解氧急剧降低,而且还在细菌作用下将水体中的有机碳转变成溶解无机碳^[24]并释放到大气中.此外,夏季适宜的水温不但能使微型光合生物进入旺盛生长的对数期和稳定的平台期,而且还能使产甲烷菌进入旺盛生长的对数期和稳定的平台期,进而导致五里峡水库库区甲烷的排放速率在7月达到最大值,随后产甲烷菌进入衰老期和停滞期并在12月达到最小值^[25].从而使五里峡水库

在夏季具有一定的CO₂净汇效应,同时促进CH₄的排放,并在冬季是CO₂的排放源和减缓CH₄的排放.

此外,五里峡水库库区断面温室气体排放速率在空间上存在显著的差异.WLX01点在库区的消落带,二氧化碳排放速率变化范围是-9.19~33.96 mg·(m²·h)⁻¹,甲烷排放速率变化范围是0.01~0.29 mg·(m²·h)⁻¹;WLX02点位于坝尾,该断面二氧化碳排放速率变化范围-3.47~82.72 mg·(m²·h)⁻¹,甲烷排放速率变化范围是0.01~0.38 mg·(m²·h)⁻¹,并且较其它断面变化速率较小.这是因为周期性蓄水和排水不但产生了较大面积的消落带影响流域内部陆地碳输入时空变化格局和水汽碳交换的速度和方式^[26, 27],而且还影响坝尾溢洪道流量,进而扰动CO₂和CH₄排放速率.作为水体碳积累作用较为典型的坝前断面(WLX05),其二氧化碳排放速率并没有表现为显著的碳汇,一定程度上表现为碳源.

3.2 影响温室气体排放速率的因素

初级生产力是指绿色植物利用太阳能进行光合作用,把无机碳固定并转变成有机碳的能力^[28].因此,水体微型光合生物通过光合作用将溶解无机碳转变成有机碳,进而影响温室气体排放速率.其初级生产力水平与光强、水温、透明度等环境因子有关^[29, 30].本研究结果显示(表2):五里峡水库水体

CO₂ 排放速率与初级生产力和 pH 呈显著负相关(r 为 -0.477 和 -0.520), 并与 DIC 呈弱负相关($r = -0.051$). 尽管水温不是影响水体微生物生长的关键因素^[31], 但在微型光合生物生长所需要的最佳温度范围内, 水温的上升不但能够促使微型光合生物快速生长, 而且还能使其细胞中的生物化学反应速率加快^[32], 进而将水体中更多的溶解无机碳固定下来转变成有机碳^[33]. 此外, 五里峡水库位于碳酸盐岩区, 水体中的主要阴离子为 HCO₃⁻. 岩溶水体的 pH 值主要取决于水中碳酸体系的平衡移动, 水温的升高将使原碳酸体系的平衡遭到破坏($r = -0.522$), 使水的 pH 值迅速增高($r = 0.494$)^[34]. 由于五里峡水库水体微型光合生物的快速生长和水中足够多的光合底物(溶解无机碳), 因此五里峡水库水体的微型光合生物通过形成初级生产力将溶解无机碳固定下来转变成有机碳. 从而说明微型光合生物的初级生产力是影响五里峡水库温室气体排放速率的重要因素($r = -0.477$). 该结果与宋昂等^[14]认为好氧不产氧光合细菌是五里峡水库有机碳的重要贡献者, 以及五里峡水库水体 DOM 整体呈现弱腐殖质化和自生源特征的结论^[15]一致. 从而说明水生微型生物的光合作用在岩溶碳固定过程

中扮演着重要的角色.

此外, 五里峡水库水体 CH₄ 排放速率与微型光合生物的初级生产力呈显著正相关($r = 0.771$). 微型光合生物形成的有机碳除一部分被暗呼吸利用外, 大部分输送到水库底部^[35]. 由于水库底部的有机碳在厌氧环境下能够被产甲烷菌转化成甲烷和二氧化碳^[36], 因此五里峡水库微型光合生物的初级生产力与 CH₄ 排放速率显著正相关. 该结果与 Wik 等^[37]关于夏季湖泊和水库升温能增加甲烷释放量结论相一致, 因为水温升高能增加微型光合生物的丰度, 提高水体的初级生产力. 五里峡水库水体微型光合生物通过形成初级生产力在减缓水气界面二氧化碳排放速率的同时, 还使水库底部埋藏的有机碳含量增加. 鉴于部分有机碳重新氧化成甲烷, 因此在五里峡水库水体微型光合生物的作用下水气界面的二氧化碳排放速率与甲烷排放速率显著负相关($r = -0.466$).

综上所述, 五里峡水库水体微型光合生物通过形成初级生产力改变了水气界面的二氧化碳排放速率与甲烷排放速率. 因此在不造成水库污染的前提下, 通过增加微型光合生物的初级生产力, 促进有机质的储存和掩埋, 进而减少返回大气的 CO₂ 通量.

表 2 温室气体排放速率与环境因子的相关性分析¹⁾

Table 2 Correlation between greenhouse gas efflux and environmental factors

组别	水温	pH	CO ₂ 排放速率	CH ₄ 排放速率	初级生产力
pH	0.494 *				
CO ₂ 排放速率	0.056	-0.520 *			
CH ₄ 排放速率	0.450	0.296	-0.466 *		
初级生产力	0.535 *	0.543 *	-0.477 *	0.771 **	
DIC	-0.522 *	-0.119	-0.051	-0.340	-0.098

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

4 结论

(1) 五里峡水库夏季为大气 CO₂ 的汇, 变化范围在 $-30.14 \sim -3.47 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 秋、冬季均为大气 CO₂ 的源, 变化范围在 $15.57 \sim 115.06 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, CO₂ 的“源/汇”关系相当复杂, 而 CH₄ 的“源/汇”关系单一, 甲烷排放速率在夏季变化幅度明显, 变化范围在 $0.08 \sim 1.03 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 而在秋、冬季变化稳定, 变化范围在 $-0.07 \sim 0.43 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 水库为大气 CH₄ 的源. 同时, 周期性蓄水和排水是影响五里峡水库不同位置 CO₂ 和 CH₄ 排放速率的重要因素, CO₂ 和 CH₄ 排放速率在空间上表现为水库消落带和坝尾较

低而库区较高的分布格局.

(2) 受气体因素、水环境因素和陆地环境因素的影响, 五里峡水库微型光合生物初级生产力与 CO₂ 排放速率呈显著负相关, 与 CH₄ 排放速率呈极显著正相关. 因此, CO₂ 和 CH₄ 通量与初级生产力的显著相关性说明水生微型生物的光合作用在岩溶碳固定过程中扮演着重要的角色.

(3) 通过综合分析显示: 五里峡水库 CO₂ 和 CH₄ 通量并没有直接受到水温的影响, 而是通过水温影响初级生产力改变了水气界面的二氧化碳排放速率与甲烷排放速率. 五里峡水库 CO₂ 和 CH₄ 通量时空分布格局显著受到 pH 和初级生产力的影响, 并且水体微型光合生物通过形成初级生产力产生不同强度的温室气体排放. 从而为人们进一步评

估微生物对岩溶水体碳循环的贡献提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 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.
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.
- [2] Yang L, Lu F, Zhou X P, *et al.* Progress in the studies on the greenhouse gas emissions from reservoirs[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(4): 204-212.
- [3] Yang M, Grace J, Geng X M, *et al.* Carbon dioxide emissions from the littoral zone of a Chinese reservoir[J]. Water, 2017, **9**(7): 539.
- [4] Miller B L, Arntzen E V, Goldman A E, *et al.* Methane ebullition in temperate hydropower reservoirs and implications for US policy on greenhouse gas emissions [J]. Environmental Management, 2017, **60**(4): 615-629.
- [5] Kumar A, Sharma M P. Estimation of green house gas emissions from Koteswar hydropower reservoir, India[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017, **189**(5): 240.
- [6] Li Z, Zhang Z Y, Lin C X, *et al.* Soil-air greenhouse gas fluxes influenced by farming practices in reservoir drawdown area: A case at the Three Gorges Reservoir in China [J]. Journal of Environmental Management, 2016, **181**: 64-73.
- [7] 赵炎, 曾源, 吴炳方, 等. 三峡水库香溪河支流水域温室气体排放通量观测[J]. 水科学进展, 2011, **22**(4): 546-553.
Zhao Y, Zeng Y, Wu B F, *et al.* Observation on greenhouse gas emissions from Xiangxi River in Three Gorges Region [J]. Advances in Water Science, 2011, **22**(4): 546-553.
- [8] 杨平, 仝川. 淡水水生生态系统温室气体排放的主要途径及影响因素研究进展[J]. 生态学报, 2015, **35**(20): 6868-6880.
Yang P, Tong C. Emission paths and measurement methods for greenhouse gas fluxes from freshwater ecosystems: a review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(20): 6868-6880.
- [9] 耿雪萌, 杨萌, Grace J, 等. Wetland-DNDC 模型模拟密云水库消落带甲烷排放[J]. 资源与生态学报, 2016, **7**(4): 281-290.
Geng X M, Yang M, Grace J, *et al.* Simulating methane emissions from the Littoral zone of a reservoir by Wetland DNDC model[J]. Journal of Resources and Ecology, 2016, **7**(4): 281-290.
- [10] Bevelhimer M S, Stewart A J, Fortner A M, *et al.* CO₂ is dominant greenhouse gas emitted from six hydropower reservoirs in southeastern United States during peak summer emissions[J]. Water, 2016, **8**(1): 15.
- [11] 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.
- [12] 黄力, 冯雪莲, 杜全生, 等. 水圈微生物重大研究计划: 聚焦水圈微生物组研究的核心科学问题[J]. 中国科学院院刊, 2017, **32**(3): 266-272.
Huang L, Feng X L, Du Q S, *et al.* Focusing on key scientific issues of microbiome research in hydrosphere: NSFC major research plan for microbes in hydrosphere [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, **32**(3): 266-272.
- [13] Downing J P, Meybeck M, Orr J C, *et al.* Land and water interface zones[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 1993, **70**(1-4): 123-137.
- [14] 宋昂, 彭文杰, 何若雪, 等. 好氧不产氧光合细菌反馈作用下的五里峡水库坝前水体化学特征研究[J]. 岩矿测试, 2017, **36**(2): 171-179.
Song A, Peng W J, He R X, *et al.* Hydrochemistry characteristics in front of the Wulixia reservoir dam associated with feedback from aerobic anoxygenic phototrophic bacteria[J]. Rock and Mineral Analysis, 2017, **36**(2): 171-179.
- [15] Li Q, Song A, Peng W, *et al.* Contribution of aerobic anoxygenic phototrophic bacteria to total organic carbon pool in aquatic system of subtropical karst catchments, Southwest China: evidence from hydrochemical and microbiological study [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2017, **93**(6): 65.
- [16] 卢晓漩, 彭文杰, 李强, 等. 岩溶区水库冬季溶解有机质组成特征及来源: 以桂林五里峡水库为例[J]. 环境科学, 2017, **38**(10): 4120-4129.
Lu X X, Peng W J, Li Q, *et al.* Distinguishing the properties and sources of the dissolved organic matter in karst reservoir water during winter using three-dimensional fluorescence spectrum technology: A case study in Wulixia reservoir of Guangxi province [J]. Environmental Science, 2017, **38**(10): 4120-4129.
- [17] 陈超, 周广胜. 1961—2010 年桂林气温和地温的变化特征[J]. 生态学报, 2013, **33**(7): 2043-2053.
Chen C, Zhou G S. Analysis on variation characteristics of air temperature and ground temperature in Guilin from 1961 to 2010 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(7): 2043-2053.
- [18] 王桂云, 毛兴华, 吕瑞华, 等. ¹⁴C法测定海洋初级生产力[J]. 黄渤海海洋, 1984, **2**(1): 72-76.
Wang G Y, Mao X H, Lv R H, *et al.* The carbon-14 technique for determining marine primary productivity [J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1984, **2**(1): 72-76.
- [19] 彭文杰, 宋昂, 李强, 等. 一种便携式水土两用集气装置 [P]. 中国专利: CN201720042679. X, 2017-08-01.
- [20] 赵炎, 曾源, 吴炳方, 等. 水库水气界面温室气体通量监测方法综述[J]. 水科学进展, 2011, **22**(1): 135-146.
Zhao Y, Zeng Y, Wu B F, *et al.* Review of methods for measuring greenhouse gas flux from the air-water interface of reservoirs[J]. Advances in Water Science, 2011, **22**(1): 135-146.
- [21] Liu Z H, Zhao M, Sun H L, *et al.* "Old" carbon entering the South China Sea from the carbonate-rich Pearl River Basin: Coupled action of carbonate weathering and aquatic photosynthesis[J]. Applied Geochemistry, 2017, **78**: 96-104.
- [22] Yang M X, Liu Z H, Sun H L, *et al.* Organic carbon source tracing and DIC fertilization effect in the Pearl River: Insights from lipid biomarker and geochemical analysis [J]. Applied Geochemistry, 2016, **73**: 132-141.
- [23] Bidle K D, Falkowski P G. Cell death in planktonic, photosynthetic microorganisms [J]. Nature Reviews Microbiology, 2004, **2**(8): 643-655.
- [24] Zhu L, Che X, Liu H, *et al.* Greenhouse gas emissions and comprehensive greenhouse effect potential of *Megalobrama amblycephala* culture pond ecosystems in a 3-month growing

- season[J]. *Aquaculture International*, 2016, **24**(4): 893-902.
- [25] Brooker M R, Bohrer G, Mouser P J. Variations in potential CH₄ flux and CO₂ respiration from freshwater wetland sediments that differ by microsite location, depth and temperature [J]. *Ecological Engineering*, 2014, **72**: 84-94.
- [26] 李哲, 姚骁, 何萍, 等. 三峡水库澎溪河水-气界面 CO₂、CH₄ 扩散通量昼夜动态初探[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(4): 576-584.
- Li Z, Yao X, He P, *et al.* Diel variations of air-water CO₂ and CH₄ diffusive fluxes in the Pengxi River, Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(4): 576-584.
- [27] Cai Y H, Guo L D, Wang X R, *et al.* Abundance, stable isotopic composition, and export fluxes of DOC, POC, and DIC from the lower Mississippi River during 2006-2008[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, **120**(11): 2273-2288.
- [28] 张琪, 袁轶君, 米武娟, 等. 三峡水库香溪河初级生产力及其影响因素分析[J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(3): 436-444.
- Zhang Q, Yuan Y J, Mi W J, *et al.* Primary production and its influencing factors in Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(3): 436-444.
- [29] 邵晓阳, 徐耀阳, 韩新芹, 等. 香溪河官庄坪库湾叶绿素 a 及初级生产力的分布特征[J]. *水生生物学报*, 2006, **30**(1): 95-100.
- Shao X Y, Xu Y Y, Han X Q, *et al.* The distribution of chlorophyll a content and primary productivity in Guanzhuangping bay of Xiangxi River[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, **30**(1): 95-100.
- [30] Xing Y P, Xie P, Yang H, *et al.* Methane and carbon dioxide fluxes from a shallow hypereutrophic subtropical Lake in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(30): 5532-5540.
- [31] Amado A M, Meirelles-Pereira F, Vidal L O, *et al.* Tropical freshwater ecosystems have lower bacterial growth efficiency than temperate ones[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2013, **4**: 167.
- [32] Aigner S, Holzinger A, Karsten U, *et al.* The freshwater red alga *Batrachospermum turfosum* (Florideophyceae) can acclimate to a wide range of light and temperature conditions [J]. *European Journal of Phycology*, 2017, **52**(2): 238-249.
- [33] Lechleitner F A, Dittmar T, Baldini J U L, *et al.* Molecular signatures of dissolved organic matter in a tropical karst system [J]. *Organic Geochemistry*, 2017, **113**: 141-149.
- [34] 刘再华. 岩溶水文地球化学研究中 pH 值野外测定的必要性[J]. *中国岩溶*, 1990, **9**(4): 310-317.
- Liu Z H. Necessities of measuring pH in situ in the study of karst hydrogeochemistry[J]. *Carsologica Sinica*, 1990, **9**(4): 310-317.
- [35] 张凤菊, 薛滨, 姚书春, 等. 全新世大暖期中国湖泊碳埋藏速率初步研究[J]. *第四纪研究*, 2013, **33**(2): 401-402.
- Zhang F J, Xue B, Yao S C, *et al.* The organic carbon burial rates in Chinese Lake sediments during holocene megathermal [J]. *Quaternary Sciences*, 2013, **33**(2): 401-402.
- [36] Townsend-Small A, Disbennett D, Fernandez J M, *et al.* Quantifying emissions of methane derived from anaerobic organic matter respiration and natural gas extraction in Lake Erie [J]. *Limnology and Oceanography*, 2016, **61**(S1): S356-S366.
- [37] Wik M, Varner R K, Anthony K W, *et al.* Climate-sensitive northern lakes and ponds are critical components of methane release[J]. *Nature Geoscience*, 2016, **9**(2): 99-105.

CONTENTS

Diurnal Variation of SOA Formation Potential from Ambient Air at an Urban Site in Beijing	LIU Jun, CHU Bi-wu, HE Hong (2505)
Characteristics of Key Size Spectrum of PM _{2.5} Affecting Winter Haze Pollution in Taiyuan	YANG Su-ying, YU Xin-yang, ZHAO Xiu-yong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Panjin	ZHANG Lei, JI Ya-qin, WANG Shi-bao, <i>et al.</i> (2521)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in the Rainy Season of Guangzhou City	GU Ying-gang, YU Xiao-fang, YANG Wen-da, <i>et al.</i> (2528)
Emission Characteristics of Dehydrated Sugar and Acephenanthrylene in Particles from Tropical Forest Burning	JIN Cheng-miao, CUI Min, HAN Yong, <i>et al.</i> (2538)
Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin	CAI Zi-ying, HAN Su-jin, ZHANG Min, <i>et al.</i> (2548)
Comparison Between Atmospheric Wet-only and Bulk Nitrogen Depositions at Two Sites in Subtropical China	ZHU Xiao, WANG Jie-fei, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2557)
Emission Reduction Benefits When Eliminating Yellow-label Vehicles in the Jing-jin-ji Region	LU Ya-ling, ZHOU Jia, CHENG Xi, <i>et al.</i> (2566)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China	GU Xiao-yun, XU Zong-xue, LIU Lin-fei, <i>et al.</i> (2576)
Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters During High Water Level Periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China	DONG Lei, TANG Xian-qiang, LIN Li, <i>et al.</i> (2588)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Downstream Areas of the Aojiang River, Fujian Province	ZHANG Dan-dan, GUO Ya-ping, REN Hong-yun, <i>et al.</i> (2600)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China	FANG Zhi-qing, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2607)
Assessment of Physico-chemical Properties and Phosphorus Fraction Distribution Characteristics in Sediments after Impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m	PAN Chan-juan, LI Rui, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2615)
Source of Nitrate in Surface Water and Shallow Groundwater Around Baiyangdian Lake Area Based on Hydrochemical and Stable Isotopes	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, DING fei, <i>et al.</i> (2624)
Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (2632)
Spatial and Temporal Variation Characteristics of Drip Water Hydrogeochemistry in the Xueyu Cave of Chongqing and Its Implications for Environmental Research	ZENG Ze, JIANG Yong-jun, LÜ Xian-fu, <i>et al.</i> (2641)
Distinguishing the Compositions and Sources of the Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Typical Karst River During the Dry Season; A Case Study in Bitan River, Jinfo Mountain	LIU Yue, HE Qiu-fang, LIU Ning-kun, <i>et al.</i> (2651)
Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin	LI Yong-ge, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> (2661)
Spatial-Temporal Variations of CO ₂ and CH ₄ Flux Through a Water-air Interface Under the Effect of Primary Productivity in Wulixia Reservoir	PENG Wen-jie, LI Qiang, SONG Ang, <i>et al.</i> (2673)
Spatiotemporal Succession Characteristics of Algal Functional Groups and Its Impact Factors for a Typical Channel-Type Reservoir in a Southwest Mountainous Area	ZHANG Yao-wen, LI Hong, LI Jia, <i>et al.</i> (2680)
Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir	ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, <i>et al.</i> (2688)
Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium <i>Chrysochloris ovalisporum</i> ; An In-situ Experiment	WANG Meng-meng, ZHANG Wei, ZHANG Jun-yi, <i>et al.</i> (2698)
Purification Effect of Submerged Macrophyte System with Different Plants Combinations and C/N Ratios	LIU Miao, CHEN Kai-ning (2706)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Concentration Dynamics in Natural Ditches Under an Irrigation-Drainage Unit in the Jiangnan Plain	HUA Ling-ling, ZHANG Fu-lin, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (2715)
Distribution and Treatment of Antibiotics in Typical WWTPs in Small Towns in China	CHAI Yu-feng, ZHANG Yu-xiu, CHEN Mei-xue, <i>et al.</i> (2724)
Effects and Mechanism of the Combination of Ozone-PAC as a Pretreatment for the Reduction of Membrane Fouling	DONG Bing-zhi, GAO Hao-yang, HU Meng-liu (2732)
Start-up and Process Characteristics of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) in a Pilot-scale Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR)	YU De-shuang, TANG Jia-jia, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (2740)
Phosphate Removal on Zirconium Alginate/Poly(<i>N</i> -isopropyl acrylamide) Hydrogel Beads with a Semi-interpenetrating Network	ZENG Xue-yang, LUO Hua-yong, ZHANG Yao-kun, <i>et al.</i> (2748)
Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater	LONG Bei-sheng, LIU Xun-lei, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (2756)
Nitrifying Bacteria Culture in Entrapment Immobilization	YANG Hong, HU Yin-long (2763)
Performance of the Removal of Nitrogen During Anaerobic Ammonia Oxidation Using Different Operational Strategies	AN Fang-jiao, PENG Yong-zhen, DONG Zhi-long, <i>et al.</i> (2770)
Transformation of Protein in Sludge During High Solids Anaerobic Digestion	ZHAN Yu, SHI Wan-sheng, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (2778)
Changes in Heavy Metal Speciation and Release Behavior Before and After Sludge Composting Under a Phosphate-rich Atmosphere	LI Yu, FANG Wen, QI Guang-xia, <i>et al.</i> (2786)
Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria	GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, <i>et al.</i> (2794)
Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate	MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Elevated Tetracycline Concentrations on Aerobic Composting of Human Feces: Composting Behavior and Microbial Community Succession	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian, <i>et al.</i> (2810)
Effect of Long-term Organic Amendments on Nitric Oxide Emissions from the Summer Maize-Winter Wheat Cropping System in Guanzhong Plain	YUAN Meng-xuan, WANG Jin-feng, TAN Yue-hui, <i>et al.</i> (2819)
Effects of Mushroom Residue Application Rates on Net Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, ZHOU Peng, <i>et al.</i> (2827)
Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via ¹³ C Pulse-labeling	SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China	YANG Yi, OUYANG Yun-dong, CHEN Hao, <i>et al.</i> (2845)
Identifying the Origins and Spatial Distributions of Heavy Metals in the Soils of the Jiangsu Coast	LÜ Jian-shu, HE Hua-chun (2853)
Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River	YU Yuan-he, LÜ Jian-shu, WANG Ya-meng (2865)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in Lin'an City and Its Potential Risk Evaluation	ZHENG Jing-zhi, WANG Chu-dong, WANG Shi-han, <i>et al.</i> (2875)
Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China	ZHOU Yan, CHEN Qiang, DENG Shao-po, <i>et al.</i> (2884)
Spatial Variation of Heavy Metals in Soils and Its Ecological Risk Evaluation in a Typical <i>Carya cathayensis</i> Production Area	ZHANG Hong-ju, ZHAO Ke-li, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (2893)
Influence of Biochar Application on Growth and Antioxidative Responses of Macrophytes in Subsurface Flow Constructed Wetlands	HUANG Lei, CHEN Yu-cheng, ZHAO Ya-qi, <i>et al.</i> (2904)
Effect of Iron on the Release of Arsenic in Flooded Paddy Soils	WANG Xin, ZHONG Song-xiong, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2911)
Concentrations and Health Risk Assessments of Heavy Metal Contents in Soil and Rice of Mine Contaminated Areas	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (2919)
Effect of Calcium Silicate-biological Humus Fertilizer Composite on Uptake of Cd by Shallots from Contaminated Agricultural Soil	LIU De-ling, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2927)
Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Greenhouse Soil and Vegetables in Siping City, Jilin Province	LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-hai, <i>et al.</i> (2936)
Effect of Foliar Zinc Application on Bioaccessibility of Cadmium and Zinc in Pakchoi	WANG Lin, GU Peng-lei, LI Ran, <i>et al.</i> (2944)
Mercury Distribution of Benthonic Animals and Response to Mercury in Sediments in Caohai Wetland, Guizhou Province	XU Yi-yuan, ZENG Ling-xia, HE Tian-rong, <i>et al.</i> (2953)
Discussion of Emissions and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from the Retreading Process of Waste Tires	FU Jian-ping, ZHAO Bo, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (2963)
Spatiotemporal Dynamics of CO ₂ Emissions in Chongqing; An Empirical Analysis at the County Level	SUN Xiu-feng, SHI Kai-fang, WU Jian-ping (2971)
Impact of Size on Environmental Behavior of Metal Oxide Nanoparticles	YAN Yu-peng, TANG Ya-dong, WAN Biao, <i>et al.</i> (2982)
Fate and Toxicity of UV Filters in Marine Environments	ZHU Xiao-shan, HUANG Jing-ying, LÜ Xiao-hui, <i>et al.</i> (2991)