

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第10期

Vol.38 No.10

**2017**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析 ..... 曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 徐家平 (3987)  
卫星遥感在 NO<sub>x</sub> 总量控制中的应用 ..... 武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇 (3998)  
京津冀城市群空气污染的模式总结与治理效果评估 ..... 王振波, 梁龙武, 林雄斌, 刘海猛 (4005)  
南京北郊冬春季气溶胶数浓度变化特征分析 ..... 吴丹, 张璠, 刘刚, 吴明, 夏俊荣, 盖鑫磊, 李凤英, 杨孟 (4015)  
冬季临安大气本底站气溶胶来源解析及其粒径分布特征 ..... 施双双, 王红磊, 朱彬, 林旭, 郭婷, 沙丹丹, 蒋琳, 张玉欣, 师远哲 (4024)  
成都市大气颗粒物粒径分布及水溶性离子组成的季节变化特征 ..... 陶月乐, 李亲凯, 张俊, 李斯奇, 李晓东 (4034)  
泉州市大气 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子季节变化特征及来源解析 ..... 张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 张棕巍, 许文质 (4044)  
2011~2012 年北京大气 PM<sub>2.5</sub> 中重金属的污染特征与来源分析 ..... 周雪明, 郑乃嘉, 李英红, 段菁春, 谭吉华, 张元勋, 贺克斌, 马永亮 (4054)  
厦门海沧区 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素污染评价及来源分析 ..... 赵莉斯, 于瑞莲, 徐玲珍, 胡恭任, 吴鑫, 陈衍婷 (4061)  
道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素污染特征及健康风险评价 ..... 张静, 张衍杰, 方小珍, 李风华, 吴琳, 毛洪钧 (4071)  
福建九仙山大气 PM<sub>10</sub> 及部分化学组成的季节变化 ..... 魏雅, 林长城, 胡清华, 吴水平 (4077)  
北京城区冬季空气污染时期 C2~C6 碳氢化合物含量特征 ..... 李月, 魏巍, 杨干, 陈东升, 程水源, 韩力慧 (4084)  
2016 年北京市春节大气颗粒物污染特征激光雷达监测分析 ..... 石琳琳, 李令军, 李倩, 姜磊, 周一鸣, 李云婷, 刘保献, 张大伟 (4092)  
廊坊市夏季臭氧体积分数影响因素及生成敏感性 ..... 李磊, 赵玉梅, 王旭光, 刘炜, 佟洁, 宋丽芸, 李怀瑞, 王清川 (4100)  
人类活动对漓江地表水体水-岩作用的影响 ..... 李磊, 赵玉梅, 王旭光, 刘炜, 佟洁, 宋丽芸, 李怀瑞, 王清川 (4108)  
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 ..... 卢晓漩, 彭文杰, 李强, 房君佳, 靳振江, 宋昂, 黄炳惠, 于爽 (4120)  
岩溶关键带微量元素运移的时空变化:以豫西鸡冠洞为例 ..... 梁沙, 杨琰, 张娜, 孙喆, 张萍, 田宁, 凌新有, 任小敏 (4130)  
龟石水库夏季富营养化状况与蓝藻水华暴发特征 ..... 苟婷, 马千里, 王振兴, 王丽, 姚玲爱, 许振成, 赵学敏, 梁荣昌, 蓝郁 (4141)  
阿哈水库叶绿素 a 时空分布特征及其与藻类、环境因子的关系 ..... 罗宜富, 李磊, 李秋华, 焦树林, 李红梅, 陈峰峰 (4151)  
天目湖沙河水库浮游植物群落结构的时空异质性 ..... 孙祥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 史浩辰, 杭心语, 徐涤非 (4160)  
程海沉积物重金属时空变化及人为污染与潜在生态风险 ..... 于真真, 刘恩峰, 张恩楼, 林琪, 沈吉, 王荣, 李艳玲 (4169)  
自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征 ..... 左继超, 郑海金, 奚同行, 王凌云, 聂小飞, 刘昭 (4178)  
邻苯二甲酸酯在三峡库区消落带非淹水期土壤中污染特征及健康风险 ..... 杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4187)  
滦河干流水体多环芳烃与有机氯农药季节性分布、组成及源解析 ..... 王乙震, 张世禄, 孔凡青, 袁媛 (4194)  
潍坊滨海经济技术开发区饮用水中有机磷酸酯的水平及人体暴露风险评估 ..... 董政, 马玉龙, 李珺琪, 袁浩东, 金军, 王英 (4212)  
道路灰尘中有机磷阻燃剂污染特征及人体暴露 ..... 李静, 王俊霞, 许婉婷, 尚荣双, 顾海东, 温耀进, 张丽君 (4220)  
居民经手口途径摄入含 PAHs 颗粒物的致癌风险评价 ..... 佟瑞鹏, 杨校毅, 张磊, 程蒙召 (4228)  
基于空间自相关的地下水脆弱性时空演变 ..... 刘宇, 兰双双, 张永祥, 李芳春, 侯树楷 (4236)  
Ag-AgI/CN/MA 复合物的制备及其可见光催化性能 ..... 张塞, 张丽丽, 胡春 (4245)  
凤眼莲对富营养化水体中氨氮化和反硝化微生物的影响 ..... 李洁, 蒋丽娟, 王晓琳, 肖琳 (4253)  
利用含 Cu(II) 废水强化微生物燃料电池处理含 Cr(VI) 废水 ..... 熊晓敏, 吴夏芈, 贾红华, 雍晓雨, 周俊, 韦萍 (4262)  
生态高负荷土地快速渗滤系统处理猪场废水的效能及微生态 ..... 宿程远, 刘凡凡, 钟余, 黄智, 郑鹏, 农志文, 卢宇翔 (4271)  
细菌对城市污水中小球藻生长和油脂积累的影响 ..... 涂仁杰, 金文标, 韩松芳, 陈洪一 (4279)  
污水处理厂消毒技术对抗生素抗性菌的强化去除 ..... 刘亚兰, 马岑鑫, 丁河舟, 邱勇, 李冰, 王硕, 李激 (4286)  
AnMBR-A-MBR 和 A<sup>2</sup>-MBR 工艺处理焦化废水效果与急性毒性物质特征对比 ..... 朱佳迪, 李菲菲, 陈吕军 (4293)  
基于实时控制技术的 CANON 工艺稳定性运行 ..... 孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (4302)  
新型硫铁复合填料强化再生水深度脱氮除磷 ..... 周彦卿, 郝瑞霞, 刘思远, 王丽莎 (4309)  
连续流亚硝化中试反应器的启动及其能力提升 ..... 朱强, 刘凯, 董石语, 顾澄伟, 王凡, 李祥, 黄勇 (4316)  
基于不同接种污泥复合型厌氧氨氧化反应器的快速启动特征 ..... 阎刚, 李田, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (4324)  
两段式曝气对好氧颗粒污泥脱氮性能的影响 ..... 王文啸, 卞伟, 王盟, 阚睿哲, 赵青, 梁东博, 李军 (4332)  
醋糟高效厌氧消化体系构建 ..... 周云龙, 许之扬, 赵明星, 施万胜, 黄振兴, 何迪, 阮文权 (4340)  
基于总量及形态的土壤重金属生态风险评价对比:以龙岩市适中镇为例 ..... 王蕊, 陈明, 陈楠, 刘冠男, 张二喜, 刘晓端, 张佳文 (4348)  
锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价 ..... 陈凤, 董泽琴, 王程程, 韦雪花, 胡宇, 张丽娟 (4360)  
三峡库区典型消落带 CH<sub>4</sub> 排放的变化特征及影响因素 ..... 柴雪思, 郝庆菊, 黄哲, 范志伟, 江长胜 (4370)  
地膜覆盖对菜地生态系统 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 冯迪, 郝庆菊, 张凯莉, 石将来, 石孝均, 江长胜 (4380)  
不同用量竹炭对污泥堆肥过程温室气体排放的影响 ..... 向秋洁, 杨雨洽, 张成, 相欣奕, 木志坚 (4390)  
半固态培养条件下烟曲霉去除土壤中镉 ..... 陈耀宁, 汪元南, 黎媛萍, 李辉, 陈艳容, 伍艳馨, 苟宇, 朱福造, 张道利, 刘耀, 曾光明 (4398)  
猪粪堆肥过程中金霉素去除及重金属形态变化 ..... 温沁雪, 曹永森, 陈志强 (4405)  
堆肥-生物强化对重度石油污染土壤的修复作用 ..... 吴蔓莉, 陈凯丽, 叶茜琼, 祁燕云, 徐会宁, 王卓, 薛鹏飞, 朱常琳 (4412)  
微生物多样性对土壤碳代谢特征的影响 ..... 安丽芸, 李君剑, 严俊霞, 李洪建 (4420)  
冬小麦田 O<sub>3</sub> 气孔与非气孔沉降及风险评估 ..... 徐静馨, 郑有飞, 赵辉, 储仲芳, 黄积庆, 袁月 (4427)  
中国西南酸雨区降水化学特征研究进展 ..... 周晓得, 徐志方, 刘文景, 武瑶, 赵童, 蒋浩 (4438)  
《环境科学》征稿简则(4261) 《环境科学》征订启事(4270) 信息(4186, 4404, 4446)

# 三峡库区典型消落带 CH<sub>4</sub> 排放的变化特征及影响因素

柴雪思, 郝庆菊, 黄哲, 范志伟, 江长胜\*

(西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

**摘要:** 为了探讨亚热带水库消落带 CH<sub>4</sub> 的排放规律, 选取三峡库区王家沟一典型消落带内 5 个高程(180、175、165、155 及 140 m)为研究对象, 其中 175、165 和 155 m 位于消落带上, 180 m 高程为永不淹水的陆地, 140 m 高程为永久淹水对照区。采用静态暗箱、浮箱/气相色谱法对各高程生态系统 CH<sub>4</sub> 的排放进行了为期两年的连续观测。结果表明, 175 m 和 165 m 高程在实验观测的第一年 CH<sub>4</sub> 排放通量变化不明显, 而 155 m 和 140 m 高程处表现为单峰型的夏季 CH<sub>4</sub> 排放高峰; 次年三峡水库实现最高蓄水位 175 m 后, 175 m 高程在淹水期间 CH<sub>4</sub> 排放呈现单峰态, 之后表现为源汇交替的无规律排放, 而 165 m、155 m 以及 140 m 高程均大致呈现出冬季高 CH<sub>4</sub> 排放的单峰态; 在整个观测期间, 180 m 高程 CH<sub>4</sub> 排放通量较为稳定, 未出现明显峰值。另外, 位于消落带上的 175、165 和 155 m 高程均表现为淹水期 CH<sub>4</sub> 排放大于落干期。各高程处 CH<sub>4</sub> 年累积排放量为 140 m (99.58 kg·hm<sup>-2</sup>) > 155 m (82.98 kg·hm<sup>-2</sup>) > 165 m (65.38 kg·hm<sup>-2</sup>) > 180 m (6.32 kg·hm<sup>-2</sup>) > 175 m (4.27 kg·hm<sup>-2</sup>), 表明淹水时间越长的土壤, 其环境更有利于 CH<sub>4</sub> 的产生。相关性分析显示, 陆地与消落带落干期的 CH<sub>4</sub> 排放与土壤碳组分及 pH 无显著相关性, 但 CH<sub>4</sub> 排放通量随土壤含水率的增加而增大; 水-气界面上, 140 m 高程 CH<sub>4</sub> 排放通量与水深有显著线性负相关关系; 表明土壤含水率是影响消落带落干期 CH<sub>4</sub> 排放的关键因子之一, 而水-气界面上 CH<sub>4</sub> 的排放则受到淹水深度的调控。

**关键词:** 三峡库区; 消落带; CH<sub>4</sub> 排放; 季节变化; 影响因素

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)10-4370-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201702003

## Characteristics and Influencing Factors of CH<sub>4</sub> Emissions from the Drawdown Area of the Three Gorges Reservoir

CHAI Xue-si, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, FAN Zhi-wei, JIANG Chang-sheng\*

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** Five levels (180 m, 175 m, 165 m, 155 m, and 140 m) in a typical drawdown area in Wangjiagou in the Three Gorges Reservoir were selected to study CH<sub>4</sub> emissions from subtropical reservoirs. The experimental period lasted two years from September 2010 to August 2012. The methods of static opaque chambers during the drainage period and floating chambers during flooding period were used in this study. The elevations of 175 m, 165 m, and 155 m were all located in the drawdown area, whereas the 180 m elevation was located in the land and never flooded. The 140 m elevation was permanently flooded and used as a control area. The results showed that the CH<sub>4</sub> fluxes showed no significant trends at 175 m and 165 m in the first year of the experiment, while the fluxes showed a single peak pattern with the climax in the summer at 155 m and 140 m. At 175 m, the CH<sub>4</sub> emissions showed a single peak pattern with the climax during its flooding period, and then showed not regular CH<sub>4</sub> emission sources or sinks alternately in the second year, whereas the CH<sub>4</sub> fluxes at 165 m, 155 m, and 140 m presented a single-peak shape with winter climax. During the entire observation period, the CH<sub>4</sub> emission fluxes at 180 m were stable and showed no obvious peaks. In addition, CH<sub>4</sub> fluxes were higher during the flooding period than in the drainage period at 175 m, 165 m, and 155 m. The order of the annual CH<sub>4</sub> cumulative emissions at the five elevations was 140 m (99.58 kg·hm<sup>-2</sup>) > 155 m (82.98 kg·hm<sup>-2</sup>) > 165 m (65.38 kg·hm<sup>-2</sup>) > 180 m (6.32 kg·hm<sup>-2</sup>) > 175 m (4.27 kg·hm<sup>-2</sup>), suggesting that the soil was more conducive to CH<sub>4</sub> production when the flooding period was longer. Correlation analysis indicated that there were no significant correlations between CH<sub>4</sub> fluxes and the soil carbon component and pH on land and during the drainage period but CH<sub>4</sub> fluxes increased with the increase in soil water content. There was a significant linear negative correlation between CH<sub>4</sub> emissions from the gas-water interface at 140 m and in water. The soil moisture content was one of the key factors affecting the CH<sub>4</sub> fluxes during the drainage period, while during flooding period, the CH<sub>4</sub> fluxes were regulated by flooding depth.

**Key words:** Three Gorges Reservoir; drawdown area; CH<sub>4</sub> emissions; seasonal variation; influencing factors

收稿日期: 2017-02-02; 修订日期: 2017-05-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41275160, 40975095); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2015A013, XDJK2013A009)

作者简介: 柴雪思(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态系统碳氮循环, E-mail: 1770661805@qq.com

\* 通信作者, E-mail: jiangcs@126.com

CH<sub>4</sub> 是主要温室气体之一, 对全球气候变暖的贡献率达到了 20%<sup>[1]</sup>, IPCC 报告<sup>[2]</sup> 指出, 在 100 a 尺度下, 单位质量 CH<sub>4</sub> 的 GWP 值是 CO<sub>2</sub> 的 28 倍. 目前, 大气中 CH<sub>4</sub> 含量约为  $1.8 \times 10^{-6}$ , 达到工业化前含量的两倍以上. 水库作为重要的人工湿地, 在调蓄洪水、保护和利用水资源、开发水电等方面对社会经济的发展做出了巨大贡献. 然而, 水库也已经被认为是重要的人为 CH<sub>4</sub> 排放源, 在全球范围内其估测排放量达到了  $4 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ , 占天然湖泊 CH<sub>4</sub> 排放量的 6%<sup>[3~5]</sup>. 大坝不仅影响生态系统的完整性<sup>[6~8]</sup>, 还可能对陆地生态系统的温室气体排放产生重大负面影响<sup>[9]</sup>.

自 20 世纪 90 年代起, 在温带和热带地区, 如巴西、加拿大、法属圭亚那、美国、芬兰等国家广泛开展了水库温室气体排放的研究<sup>[10~12]</sup>; 在中国, 水库占全国湿地总面积的 5.93%, 有关水库温室气体排放的研究从 2007 年才逐渐开展<sup>[13]</sup>. 截至目前, 涉及水库 CH<sub>4</sub> 排放通量研究的有二滩水库<sup>[14]</sup>、密云水库<sup>[15]</sup> 以及三峡水库. 较早关于三峡水库 CH<sub>4</sub> 排放通量的研究认为三峡库区新生湿地具有较高的 CH<sub>4</sub> 排放通量, 是 CH<sub>4</sub> 的重要排放源<sup>[16]</sup>. 而之后的一些研究则表明, 库区消落带不论是在淹水期还是落干期, 其水-气界面或土-气界面的 CH<sub>4</sub> 排放通量均远低于文献<sup>[17, 18]</sup> 的报道. 除此之外, 有学者认为库区消落带在淹水期间为 CH<sub>4</sub> 排放源, 落干期间为 CH<sub>4</sub> 吸收汇<sup>[19]</sup>. 关于三峡库 CH<sub>4</sub> 排放的研究并不匮乏, 但是, 以上提到的研究在对 CH<sub>4</sub> 排放的监测时间上都有一定的限制性, 采样高程也相对单一. 因此, 本文选取三峡库区的涪陵区珍溪镇王家沟一典型消落带为研究对象, 通过为期 2 a 的野外实验, 探讨消落带不同海拔高程上 CH<sub>4</sub> 排放通量的季节变化及其差异, 并对相关影响因素进行分析, 以期精确估算水库温室气体排放量提供依据, 并为减少水库温室气体在水利工程及水电开发过程中排放提供参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

本实验研究区域位于重庆市涪陵区珍溪镇王家沟流域(北纬 29°54', 东经 107°27'). 该流域位于涪陵区东北部, 为亚热带季风气候, 年平均气温在 17~18℃ 之间, 最低气温为 -2.5℃, 积温在 5 300~5 600℃ 之间, 年降雨量在 1 000~1 100 mm 之间, 太阳辐射量年平均为 3 360.02 MJ·m<sup>-2</sup>. 土壤类型

主要是水稻土和紫色土, 土壤 pH 介于 5.60~8.50, 具有典型的山地、丘陵夹沟谷的地形、地貌特征, 地貌类型以低山丘陵为主, 海拔高度介于 153~307 m, 地势从北到南逐渐降低并延伸至长江. 丘陵顶部多为旱地, 并伴有少量次生林或未利用荒地, 中部主要为土坎或石坎梯田, 底部地势平坦、以水田为主. 采样区域主要被草本植物覆盖, 常见植物主要有空心莲子草 [*Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb.]、狗牙根 [*Cynodon dactylon* (Linn.) Pers.]、苍耳 (*Xanthium sibiricum* Patr.) 和稗草 [*Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv]. 其消落带地势平坦, 受人为影响因素较少, 属于三峡水库典型流域开阔河段冲击土型-消落区, 有利于开展三峡水库消落带温室气体排放的研究工作. 实验期间库区水位变化如图 1 所示.

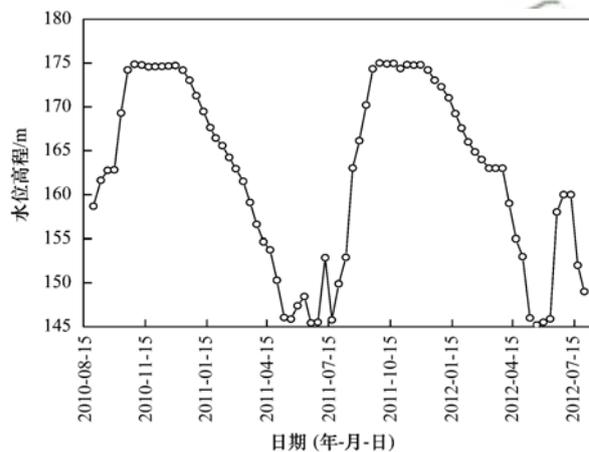


图 1 2010 年 9 月~2012 年 8 月三峡水库水位变化

Fig. 1 Daily variations in the water level at the dam site of the Three Gorges Reservoir from September 2010 to August 2012

### 1.2 样点布设

在流域内选择开阔河段冲积土型消落区为研究对象, 在 155、165、175 和 180 m 高程处选择地势平坦、能代表原始消落区特征且土壤均匀的地方各设立 1 个平行于河岸的长方形 (10 m × 3 m) 的研究小区, 其中 180 m 高程处小区作为从不淹水点, 另设 140 m 高程为永久淹水对照区. 小区出露水面后所有取样均在栈桥上进行, 在每个小区内布置 3 个 500 mm × 500 mm × 200 mm 的不锈钢底座, 上端有深 30 mm、宽 20 mm 的密封水槽. 试验期间, 底座固定在小区内. 小区淹水后所有试验同样在原小区, 不同的是, 淹水后通过小船采用静态浮箱法测定水体表面 CH<sub>4</sub> 通量, 水面观测设置 4 个重复. 本研究试验时间为 2010 年 8 月 31 日至 2012 年 9 月 1 日.

### 1.3 气体样品的采集与分析

消落区落干期间  $\text{CH}_4$  排放通量观测采用静态暗箱法进行. 采集气体的箱体均设计成分节组合式标准箱, 由底座、延长箱和顶箱组成, 顶箱和延长箱均由 1 mm 厚 304 K 薄不锈钢板制成, 延长箱和顶箱容积相同, 尺寸为 500 mm × 500 mm × 500 mm, 箱体外覆保温隔热材料, 根据作物生长需要可适时安装延长箱. 顶箱内上部有两个轴流扇, 用于混合箱内气体, 外侧面安装有电源接头和气体样品接口. 底座的每侧壁上距离地表 10 cm 以下开有 9 个直径 2 cm 的圆孔, 以利于水分、土壤微生物、养分等侧向交流. 底座架设在每个处理小区的中间, 在植物生长期都固定在采样点上. 为了减少采样时对箱内外植物的损坏, 在植物生长季内通过安置两个内外铁丝框把采样箱与植物隔离开. 采样时, 分别于扣箱后 0、10、20 和 30 min 时抽取箱内气体用事先抽成真空的体积为 25 mL 的血清瓶保存, 记录准确采样时间并按顺序对气样编号. 自 2010 年 8 月至 2012 年 9 月连续采样. 采样时间选在上午 09:00 ~ 11:00, 每周采集一次.

淹水期间  $\text{CH}_4$  排放通量观测采用静态浮箱法<sup>[20]</sup>进行. 浮箱箱体被设计成底部开口, 内部抛光的不锈钢圆柱体(高 50 cm, 内径 50 cm), 于箱体外部距底面 20 cm 左右设置固定浮圈, 在浮圈的上方安装一根聚乙烯的平衡管(长 2 m, 内径 0.5 cm), 在箱顶中间位置连接气体样品接口及温度探头. 采样时, 先将小船开至设定好的浮标处, 抛锚固定小船, 在船上固定位置横放两根长为 6 m 的竹竿, 在船的两侧分别露出竹竿约 2 m, 将 4 个浮箱用绳子固定分别固定在竹竿的四端, 先将箱子底部朝上放置 5 min, 将浮箱放入水中打开平衡管端头塞子, 轻压箱子上部 1 ~ 2 min 后盖上平衡管塞子, 再用配有三通阀的 60 mL 注射器从箱内抽取第 1 个气体样品, 打入事先抽成真空的体积为 25 mL 的血清瓶保存, 记录准确采样时间并按顺序对气样编号, 每 15 min 采集 1 个气样, 共采集 4 个气样.

气体样品采集期间同步观测温度、气压、水面风速和空气湿度. 前后分别用 JM624 便携式测温表测定箱内空气温度、地表温度、地下 5 cm 处温度以及表层水体温度, 用美国 NK Kestrel 4500 Pocket Weather Tracker 风速测定仪测定观测点即时大气温度、水面风速、空气湿度、气压.

采集的气体样品立即送回实验室用 Agilent 7890A 气相色谱仪测定  $\text{CH}_4$  含量, 并计算各处理排

放通量.  $\text{CH}_4$  采用前检器 FID(检测温度 200℃, 柱温 55℃), 载气为高纯  $\text{N}_2$ , 具体分析方法及工作条件见文献[21]; 气体的通量表示单位时间单位面积观测箱内该气体质量的变化, 根据 4 个气样浓度随采样时间的变化速率计算<sup>[22]</sup>, 用公式表示为:

$$F = H \times \frac{273}{273 + T} \times \frac{P}{P_0} \times \rho \times \frac{dc}{dt}$$

式中,  $F$  为排放通量 [ $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ];  $H$  为箱内气室高度 (cm);  $T$  为采样期间箱内平均温度 (°C);  $P$  为采样时的大气压 (Pa);  $P_0$  为标准状况下的大气压 (Pa);  $\rho$  为被测气体的密度 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $dc/dt$  为采样期间采样箱内  $\text{N}_2\text{O}$  的含量变化速率.  $F$  为负值时表示吸收, 为正值时表示排放.

全年  $\text{CH}_4$  排放总量和平均排放通量通过内插累加求得. 其中 155 m 高程在 2011 年 10 月 20 日至 2012 年 2 月 2 日淹水期间  $\text{CH}_4$  排放通量用 165 m 高程同时期数据代替.

### 1.4 土壤样品的采集与分析

在每个高程上分别设置 3 个面积为 1 m × 1 m 的样方, 每个样方内设置 3 个采样点, 采样深度为 0 ~ 20 cm, 在每个采样点内采用蛇形采样法采集土样, 充分混合后去杂, 分成两部分: 一部分鲜土样放置于冰箱中并于 4℃ 以下保存, 用来测定土壤含水量、SMBC 和 DOC 等; 另一部分土壤样品风干, 以测定 SOC、pH 等.

在采集样品的同时用 JM624 型便携式测温计测定地下 5 cm 处土壤的温度; 土壤有机质 (SOC) 的测定采用重铬酸钾法-外加热法<sup>[23]</sup>; 土壤 pH 采用土: 水 = 1: 2.5 浸提, 酸度计法测定; 土壤含水量的测定采用烘干法<sup>[23]</sup>; 土壤微生物生物量碳 (SMBC) 的测定采用氯仿熏蒸- $\text{K}_2\text{SO}_4$  浸提法<sup>[23]</sup>; 土壤可溶性有机碳 (DOC) 的测定用 0.45 μm 的微孔滤膜过滤, 滤液直接在 Multi N/C 2000 分析仪测定.

### 1.5 数据统计与处理

利用 SPSS 17.0 对不同高程的年平均  $\text{CH}_4$  排放通量(2011 年 6 月至 2012 年 5 月)以及同一高程不同季节平均  $\text{CH}_4$  排放通量进行方差分析 (ANOVA), 当其通过方差齐次性检验时 ( $P > 0.05$ ), 进行均值间最小差异显著性 (LSD) 检验, 若不能通过方差齐次性检验 ( $P < 0.05$ ), 采用 Tamhane's  $T_2$  进行差异显著性检验. 采用配对  $t$  检验进行同一高程不同年份同一时段  $\text{CH}_4$  平均排放通量的比较. 将淹水期或落干期的各环境因素分别

与淹水期或落干期的 CH<sub>4</sub> 平均排放通量进行相关性分析, 当  $P < 0.05$  时认为两者之间显著相关,  $P < 0.01$  时两者之间极显著相关, Pearson 系数即为两者的相关性系数。

## 2 结果与分析

### 2.1 三峡库区消落区不同高程 CH<sub>4</sub> 排放的时间变化

图 2 为 2010 年 9 月 ~ 2012 年 8 月三峡水库消落区各高程 CH<sub>4</sub> 排放通量. 从中可知, 在观测期间内, 140 m 高程 CH<sub>4</sub> 排放通量均为正值. 2011 年 4 月底至 6 月底该高程保持较高的 CH<sub>4</sub> 排放通量, 其最大值为  $8.58 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , 最小值为  $0.74 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ . 在此之后, 除了在 2011 年 8 月 27 日、2012 年 2 月 2 日以及 2012 年 6 月 10 日出现较高的排放通量值 [分别为  $6.42$ 、 $5.59$  和  $3.54 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ], 该高程 CH<sub>4</sub> 排放通量基本保持在小于  $2 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  的排放水平. 在观测期间, 选取 2011 年 6 月 ~ 2012 年 5 月, 以 6 ~ 8 月为夏季, 9 ~ 11 月为秋季, 12 ~ 次年 2 月为冬季, 3 ~ 5 月为春季来

进行四季的划分. 发现该高程夏季 CH<sub>4</sub> 排放最高, 但各个季节 CH<sub>4</sub> 平均排放通量之间无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 见表 1. 140 m 高程 CH<sub>4</sub> 排放通量表现出明显的年变化, 配对  $t$  检验表明, 4 ~ 8 月期间 CH<sub>4</sub> 平均排放通量, 2011 年 [ $2.54 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ] 显著高于 2012 年 [ $0.73 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ] ( $P < 0.05$ ).

155 m 高程露出水面时间最短, 期间 CH<sub>4</sub> 排放通量不具明显的排放规律, 排放通量介于  $-2 \sim 2 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , 其通量最大值为  $1.96 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , 出现在 2011 年 9 月 14 日; 最小值为  $-0.52 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , 出现在 2012 年 6 月 12 日. 在观测期间该高程经历了 3 次淹水, 其 CH<sub>4</sub> 排放通量均为正值, 并基本表现为“单峰型”排放, 最大值分别为  $3.89$ 、 $6.5$  和  $1.11 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ . 但是在第一次淹水完成至第二次淹水前, 该高程完成了由 CH<sub>4</sub> 吸收汇到排放源的转化. 单因素方差分析发现, 该高程冬季 CH<sub>4</sub> 平均排放通量显著高于夏、春季 ( $P < 0.05$ ), 而秋季排放与其他季节之间无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 见表 1.

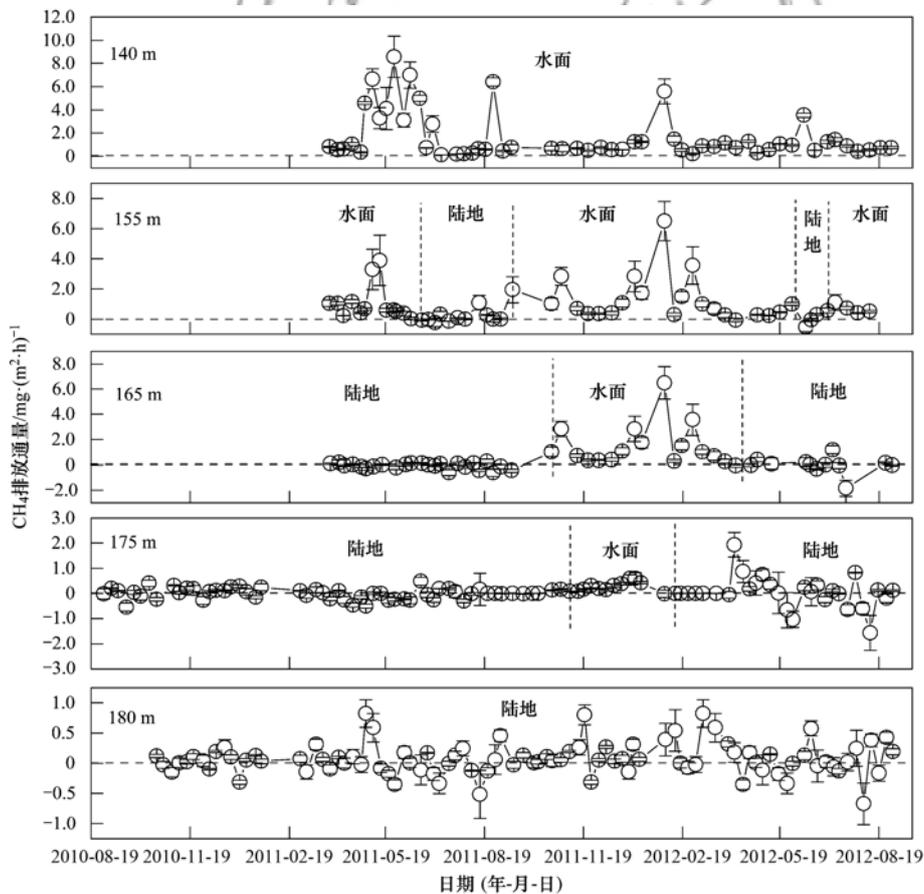


图 2 2010 年 9 月 ~ 2012 年 8 月三峡水库消落区各高程 CH<sub>4</sub> 排放通量

Fig. 2 CH<sub>4</sub> fluxes at different elevations in the drawdown area of the Three Gorges Reservoir from September 2010 to August 2012

表 1 库区消落带不同高程处 CH<sub>4</sub> 平均季节排放通量<sup>1)</sup>/mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>

高程/m	夏	秋	冬	春
180	-0.08 ± 0.25a	0.17 ± 0.14a	0.16 ± 0.22a	0.16 ± 0.25a
175	-0.01 ± 0.24a	0.07 ± 0.03a	0.24 ± 0.13a	0.28 ± 0.59a
165	-0.10 ± 0.20b	0.62 ± 0.50b	2.38 ± 1.08a	0.21 ± 0.43b
155	0.19 ± 0.26b	1.37 ± 0.69ab	2.38 ± 1.08a	0.60 ± 0.26b
140	2.19 ± 0.52a	1.01 ± 0.32a	0.92 ± 0.41a	0.57 ± 0.18a

1)表中小写字母代表同一高程处不同季节间 CH<sub>4</sub> 排放通量的差异显著性

165 m 高程土壤在淹水前后, CH<sub>4</sub> 排放通量均处于较低的吸收和排放状态,除了在 2012 年 7 月 7 日出现最大值 0.99 mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>和 19 日出现最小值 -1.84 mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>,其余观测值均介于 -1.0 ~ 0.5 mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>之间. 该高程 CH<sub>4</sub> 在冬季淹水期处于高排放状态.

175 m 高程是三峡水库蓄水最高水位线,在淹水前,该高程 CH<sub>4</sub> 排放通量不具明显的排放规律,出现 CH<sub>4</sub> 源-汇交替现象. 在此期间, CH<sub>4</sub> 排放通量介于 -0.55 ~ 0.50 mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>之间. 淹水期间, CH<sub>4</sub> 通量大致呈现出“单峰型”排放,峰值出现在 2012 年 1 月 6 日,为 0.6 mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>,表现为弱 CH<sub>4</sub> 排放源. 淹水后, CH<sub>4</sub> 排放通量波动性增大,介于 -2.00 ~ 2.00 mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>之间,在 2012 年 4 月 7 日出现最大值 1.93 mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>,最小值出现在 2012 年 8 月,为 -1.57 mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>. 180 m 高程 CH<sub>4</sub> 排放通量较为稳定,未出现明显峰值,基本在零排放上下波动. 最大值出现在 2011 年 9 月,为 1.51 mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>,最小值为 -1.43 mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>,出现在 2012 年 2 月. 单因素方差分析表明,这 2 个高程各季节之间 CH<sub>4</sub> 平均排放通量均不具有显著差异( $P > 0.05$ );同时配对  $t$  检验表明 180 m 处 CH<sub>4</sub> 的排放也未表现出显著的年变化( $P > 0.05$ ),而 175 m 处 CH<sub>4</sub> 排放通量年变化明显,2011 年 3 ~ 8 月期间 CH<sub>4</sub> 排放通量显著低于 2012 年 3 ~ 8 月期间 CH<sub>4</sub> 排放通量( $P < 0.05$ ).

从图 2 可以看出,2012 年 3 月至 8 月间 180 m、175 m、165 m 高程土壤 CH<sub>4</sub> 排放通量波动性均强于 2011 年同期,而且在相同露出时间段内(2011 年 3 月至 8 月),高程越低,表现为 CH<sub>4</sub> 吸收越强烈.

## 2.2 三峡库区消落区不同高程的 CH<sub>4</sub> 排放总量

表 2 为库区不同高程处 CH<sub>4</sub> 年排放总量,其中 180 m 和 175 m 高程 CH<sub>4</sub> 年排放总量为 2010 年 9 月 ~ 2012 年 8 月两年内 CH<sub>4</sub> 排放总量的平均值,165、155 和 140 m 高程 CH<sub>4</sub> 年排放总量为 2011 年 9 月 ~ 2012 年 8 月一年内的值. 结果表明,除 175 m

高程外,随着高程的降低,CH<sub>4</sub> 年排放总量迅速增大. 其中,180 m 高程 CH<sub>4</sub> 年排放量为 6.32 kg·hm<sup>-2</sup>,高于 175 m 处 4.27 kg·hm<sup>-2</sup>的排放总量,并且 2010 年 9 月 ~ 2011 年 8 月期间 180 m 和 175 m 高程的 CH<sub>4</sub> 排放总量均显著低于 2011 年 9 月 ~ 2012 年 8 月的值( $P < 0.05$ ). 165、155 和 140 m 高程 CH<sub>4</sub> 年排放总量分别为 65.38、82.98 和 99.58 kg·hm<sup>-2</sup>,其中 165 m 和 155 m 高程在淹水期间的 CH<sub>4</sub> 排放总量分别占年排放总量的 108.03% 和 110.73%,显著高于成陆时期 CH<sub>4</sub> 排放总量( $P < 0.05$ ).

表 2 库区不同高程处 CH<sub>4</sub> 年排放总量/kg·hm<sup>-2</sup>

高程/m	2010-09 ~ 2011-08	2011-09 ~ 2012-08	
		淹水期	非淹水期
180	1.62	—	11.01
175	0.63	6.29	1.62
165	—	70.63	-5.27
155	—	91.88	-8.90
140	—	99.58	—

## 2.3 CH<sub>4</sub> 排放通量与环境因子的关系

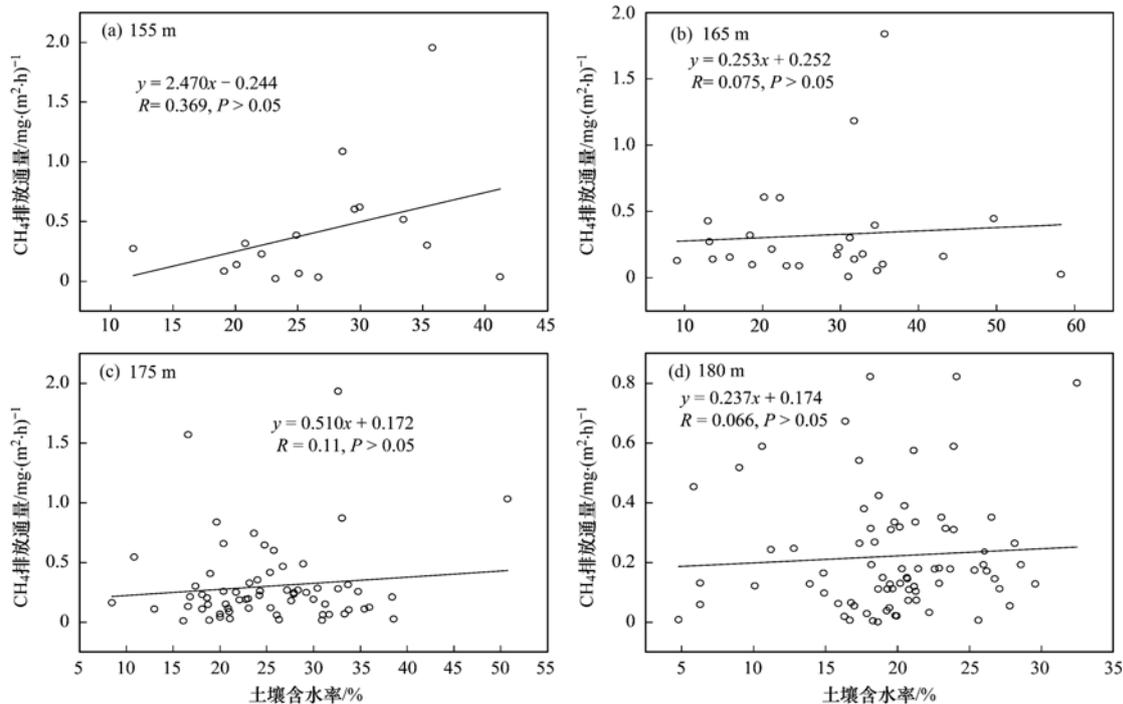
### 2.3.1 土-气界面 CH<sub>4</sub> 排放通量的影响因素

通过对 180 m 高程处土壤 DOC、SMBC、pH、地下 5cm 温度以及 SOC 等土壤环境因子与 CH<sub>4</sub> 平均排放通量进行相关性分析(表 3),发现该高程处 CH<sub>4</sub> 排放通量与外界环境因素之间无显著性相关关系( $P > 0.05$ );除此之外,相关分析表明,消落带落干时期 175、165 以及 155 m 高程处 CH<sub>4</sub> 排放通量与以上各土壤环境因子也均无显著相关关系( $P > 0.05$ ),表明三峡水库消落带碳组分及 pH 等均不是控制 CH<sub>4</sub> 排放的主要因素.

图 3 显示的是 CH<sub>4</sub> 排放通量与土壤含水率的关系. 从中可见,各高程 CH<sub>4</sub> 排放通量随土壤含水率的增加而增大,但没有达到显著水平. 但 175、165 和 155 m 各高程 CH<sub>4</sub> 排放通量随土壤含水率变化的变化速率显著高于 180 m,表明土壤含水率是影响 CH<sub>4</sub> 排放的关键因子之一.

表 3 不同高程 CH<sub>4</sub> 排放通量与土壤环境因子的相关关系Table 3 Correlations between CH<sub>4</sub> emission flux and soil environmental factors at different elevations

高程/m	DOC	SMBC	SOC	PH	地下 5 cm 温度
180	-0.012	-0.029	0.046	0.057	0.007
175	-0.178	0.004	0.037	-0.094	-0.024
165	-0.008	0.074	-0.313	-0.077	-0.171
155	0.495	0.429	-0.194	-0.082	-0.425

图 3 CH<sub>4</sub> 排放通量与土壤含水率的关系Fig. 3. Correlations between CH<sub>4</sub> fluxes and soil moisture content

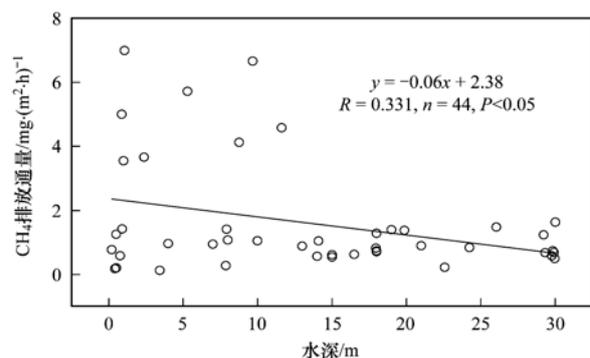
### 2.3.2 水-气界面 CH<sub>4</sub> 排放通量与水深的关系

淹水期间 CH<sub>4</sub> 平均排放通量的大小顺序为: 155 m > 140 m > 165 m > 175 m, 对应的值分别为 1.06、1.04、0.99 以及 0.27 mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>, 方差分析表明前 3 个高程的差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 但均显著高于 175 m 高程 ( $P < 0.05$ ), 可见不同高程下 CH<sub>4</sub> 排放通量有随水深增加而增大的趋势. 而 140 m 高程水-气界面 CH<sub>4</sub> 排放通量呈现出随水深降低而增大的趋势 (图 4), 并且 CH<sub>4</sub> 排放在水深小于 10 m 处水平较高.

## 3 讨论

### 3.1 三峡库区 CH<sub>4</sub> 排放通量的特征

采样期间, 本研究观察到三峡库区消落带落干时期及长期不淹水区域 CH<sub>4</sub> 排放通量为 -1.43 ~ 1.95 mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>, 远小于 Chen 等<sup>[16]</sup> 在三峡库区新生湿地的研究结果 [0.25 ~ 14.9

图 4 140 m 高程处水深与 CH<sub>4</sub> 排放通量的关系Fig. 4. Relationship between water depth and CH<sub>4</sub> emission flux at 140 m elevation

mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>]. Chen 等所做的研究其地点位于澎溪河消落带的湿地上, 气样采集期间土壤处于浅度淹水状态 (水深 2 ~ 9 m), 此时土壤处于厌氧环境, 更有利于 CH<sub>4</sub> 排放; 且其采样区域为自然条件下形成的湿地, 分布着众多挺水和浮水植物,

段晓男等<sup>[24]</sup>的研究发现相比于沉水植物,挺水植物具有更高的  $\text{CH}_4$  排放速率,从而会促进  $\text{CH}_4$  的产生和排放,造成其研究结果偏高. 140 m 高程水-气界面  $\text{CH}_4$  排放通量在类似研究中处于较高水平,在观测期内其值介于  $0.13 \sim 8.57 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  之间,2011 年 9 月~2012 年 8 月期间的年平均排放量为  $1.13 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,与李哲等<sup>[25]</sup>在龙溪河测得的  $\text{CH}_4$  排放通量的年均值  $0.11 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  [即  $1.76 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ] 接近,但远高于其在澎溪河所做的研究 [ $0.0074 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  即  $0.12 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ],这可能是由于本研究所在的王家沟流域与龙溪河均处于三峡水库库尾变动回水区,相比于位于库区库中常年回水区的澎溪河,王家沟流域与龙溪河具有极不稳定的水力以及生境条件,从而使得水体中浮游植物难以稳定生长,水体固碳能力也受到限

制,进而表现为  $\text{CH}_4$  的高排放;Chen 等<sup>[18]</sup>在三峡库区及库区下游流域测定水-气界面  $\text{CH}_4$  排放速率为  $0.24 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  和  $0.26 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  也远远低于本研究结果,不同于本研究,Chen 等是根据水位的涨落来进行气样的采集,没有固定高程,其采样时间段分别为春季(2~4月)、夏季(6月和9月)以及冬季(12月),采样高程的不固定以及采样时间的不连续可能是导致其研究结果与本研究有较大出入的原因之一.除此之外,在本研究中,140 m 高程水-气界面  $\text{CH}_4$  的日排放通量值高于王亮等<sup>[26]</sup>的研究结果 [ $2.11 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ],与国外部分水库相比,如表 4 所示可知热带地区水库,尤其是新生水库  $\text{CH}_4$  日排放通量明显大于我国三峡水库[本研究数据为  $27.12 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ],而温带地区水库则明显低于我国三峡水库.

表 4 不同水库水面  $\text{CH}_4$  的排放通量

Table 4 Emissions of greenhouse gases from different reservoir surfaces

气候带	水库名称	位置	面积 /km <sup>2</sup>	库龄 /a	$\text{CH}_4$ /mg·(m <sup>2</sup> ·d) <sup>-1</sup>
热带 <sup>[27]</sup>	Gatun Lake	巴拿马	430	84	412
	Curua-Una	巴西	72	21	66
	Tucuruí	巴西	2 800	13	190
	Samuel	巴西	29 700	10	160
	Petit Saut	圭亚那	300	1~2	1 140
亚热带(本研究)	三峡水库	中国	348.93	1~2	27.12
温带 <sup>[27]</sup>	Cabonga	魁北克	400	68~70	7.5
	Lokka	芬兰	417	28	5
	Porttipahtaf	芬兰	214	25	13
	F. D. Roosevelt	美国	306	—	2.3
	Shasta	美国	77	—	11.1

水温是造成位于不同气候带水库  $\text{CH}_4$  排放存在显著差异的重要原因. 水体中水生生物的生长、繁殖以及物质的分解均受到水体温度的直接影响,温度较高的热带地区,水库水体中生物的活动更加活跃,物质分解速度较快,有利于温室气体的排放;水温也影响水中气体的溶解度和水生植物的光合作用,气体在水中的溶解度与温度成反比<sup>[28]</sup>,温带地区温度偏低,气体在水中的溶解度大,从而形成气体的低排放;除此之外,水温还影响气泡的形成,Lousi 等<sup>[29]</sup>认为水温较高的沉积物中积累的  $\text{CH}_4$  量大于扩散到水中的量,导致  $\text{CH}_4$  过饱和而形成气泡,使得  $\text{CH}_4$  气体通过气泡的形式排放到大气中.

本研究发现,2011 年 6 月~2012 年 5 月期间 180、175 以及 140 m 高程处  $\text{CH}_4$  排放通量的季节

差异没有达到显著水平,而消落带 165 m 以及 155 m 高程处淹水时期排放通量显著高于干干时期,这主要是由于淹水时期水位上升,消落带暴露在大气中的土壤、植物被淹没,易分解植物迅速腐烂分解,为  $\text{CH}_4$  的释放提供基质.同时,沉积在消落带的有机物质也会转移到水体中,成为水库碳源.并且淹水条件会使水体底部呈持续稳定的厌氧环境,从而有利于  $\text{CH}_4$  产生.

### 3.2 三峡库区 $\text{CH}_4$ 累积排放量的特征

140 m 高程由于长期淹水,厌氧环境下产甲烷菌的活动频繁,相比长期不淹水的 180 m 高程,140 m 高程  $\text{CH}_4$  年累积排放量高出 15 倍左右;此外,在整个实验期间,位于消落带上的 175、165 以及 155 m 高程淹水时间分别约为 105、280 以及 353 d,这 3 个高程处  $\text{CH}_4$  年累积排放量呈现随淹水时间

增加而增加的趋势, 这是由于淹水时软体生物及绿色植被会快速腐烂被分解, 在缺氧的情况下释放出甲烷气体<sup>[9]</sup>. 同时, CH<sub>4</sub> 年累积排放量呈现该趋势还可能与土壤水分状况有关. 有研究表明, 土壤含水率与 CH<sub>4</sub> 的排放速率显著正相关, 其波动被认为是影响 CH<sub>4</sub> 释放最为强烈的因素<sup>[30]</sup>. 在本研究中, CH<sub>4</sub> 排放通量与含水率相关性并不显著, 这可能主要是由以下两方面引起的: 一是当水库水位到达某一高程前, 该高程土壤含水率迅速升高, 大量的 CH<sub>4</sub> 溶解于孔隙水而导致排入大气的 CH<sub>4</sub> 很少<sup>[31]</sup>; 二是在淹水后, 土壤在相当长一段时间内仍保持较高的含水率, 虽有利于 CH<sub>4</sub> 产生, 但由于大量的活性有机碳在淹水时溶于水以及被微生物分解利用, 因此当水位回落露出土壤时, CH<sub>4</sub> 排放通量仍较低. 由图 2 可知, 水位回落低于 175 m 时, 该高程在相当长一段时期内保持低 CH<sub>4</sub> 排放, 之后出现一个排放峰可能是因为大量的闭蓄态 CH<sub>4</sub> 的释放<sup>[32]</sup>.

除此之外, 175 m 高程和 180 m 高程 CH<sub>4</sub> 年累积排放量表现出了年际差异, 2011 年 9 月~2012 年 8 月(第二年)间的总排放量明显高于 2010 年 9 月~2011 年 8 月(第一年). 除了采样天数存在差异外, 可能还受到采样期间降雨的影响, 2012 年采样期间的降水量在春夏季(3~7 月)的日平均值明显高于 2011 年该时段的价值(3.11 mm > 1.98 mm), 在降雨量大、潮湿且炎热的季节, 消落区易形成腐败型沼泽地带, 腐败的植物体被淹没、腐烂、发酵后, 可能成为甲烷的排放源<sup>[33]</sup>; 并且, 180 m 高程在 2012 年 2 月初至 3 月底其 CH<sub>4</sub> 的排放明显高于 2011 年的同期数据, 该时期土壤中 SOC、DOC 以及 SMBC 的含量均表现为 2012 年高于 2011 年, 而有机底物的输入能够促进 CH<sub>4</sub> 的排放, 由此看来, 以上因素共同造成了 175 m 高程和 180 m 高程 CH<sub>4</sub> 年累积排放量表现出第二年大于第一年的趋势.

### 3.3 温度及碳组分对 CH<sub>4</sub> 排放通量的影响

温度是影响湿地 CH<sub>4</sub> 排放的主要因素之一<sup>[34]</sup>. 土壤温度会影响土壤和沉积物中产 CH<sub>4</sub> 菌的数量和活性<sup>[35]</sup>. 丁维新等<sup>[36]</sup>认为较高温下产甲烷菌以乙酸和 H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 都能利用的甲烷八叠球菌为主, 土壤处于较高的产甲烷状态, 而在较低温度下产甲烷均以只能利用乙酸的甲烷毛菌为主, 因此土壤形成 CH<sub>4</sub> 的能力相对较弱. 而本研究中, CH<sub>4</sub> 排放通量与地下 5 cm 温度相关性不显著, 说明在本研究区域内地下 5 cm 温度不是调控 CH<sub>4</sub> 排放的主要因

素, 而且温度与 CH<sub>4</sub> 产量有线性关系是以水分和底物为前提, 并且这种关系没有在产 CH<sub>4</sub> 能力弱的土壤中发现<sup>[37]</sup>.

在厌氧条件下, 有机底物被认为是 CH<sub>4</sub> 生成最主要的限制因子. 有研究表明, 水库与大气间气体交换与沉积物之间有紧密联系<sup>[38]</sup>. 文献<sup>[39]</sup>认为 CH<sub>4</sub> 的排放与底物的输入呈正相关关系, 然而在 Yavitt 等<sup>[40]</sup>的研究中, 没有发现底物对 CH<sub>4</sub> 生成的限制作用. 本研究中, CH<sub>4</sub> 排放通量与 DOC、SMBC 和 SOC 均无显著相关性, 这可能与新鲜的有机合成物有关. 消落带淹水后一段时期内的土壤环境最有利于 CH<sub>4</sub> 的产生, 但在该时段内土壤地上植被并未复苏, 不足以提供充足、新鲜的有机合成物而导致 CH<sub>4</sub> 产生受限; 当植被复苏后, 土壤环境已不利于 CH<sub>4</sub> 的产生, 或者再次进入淹水环境. 因此, 三峡库区消落带落干时期 CH<sub>4</sub> 排放受诸多环境因子的影响, 而在本研究中以土壤含水率为主要控制因子.

### 3.4 水深对 CH<sub>4</sub> 排放通量的影响

在 2011 年 9 月~2012 年 8 月淹水期间, 消落带 140、155、165 以及 175 m 处 CH<sub>4</sub> 的总排放量呈现出随淹水时间减少而明显降低的趋势(表 2). 水体中 CH<sub>4</sub> 的排放主要来源于水库底部厌氧状态下的产甲烷过程. 140 m 高程由于长期淹水, 厌氧条件下更有利于 CH<sub>4</sub> 的产生. 除此之外, 水体中 CH<sub>4</sub> 分压受到 3 方面因素的影响: ①持续稳定的底部厌氧区; ②相对较优的温度条件; ③水库底部有足够的有机质<sup>[41]</sup>. 本研究发现, 同一高程下, CH<sub>4</sub> 排放通量随水深的增大而降低, 并且 140 m 高程在 2011 年 5~7 月间水深不超过 5 m, CH<sub>4</sub> 排放通量较大. 水深主要通过影响气泡排放及扩散排放从而影响 CH<sub>4</sub> 排放通量<sup>[42]</sup>, 而气泡排放通常只发生在水深小于 10 m 的浅水域<sup>[43]</sup>. 除此之外, 水体深度可以通过压力影响 CH<sub>4</sub> 在水体中的溶解度, 压力越大, 溶解度越高, 水体中能够封存的 CH<sub>4</sub> 量越大<sup>[44]</sup>, 越不容易饱和和形成气泡. 此外, 在水体垂直方向上, 氧化还原电位存在梯度变化, 越靠近水面氧化还原电位越高, 在 CH<sub>4</sub> 自下而上的移动过程中, 水深越深, 路程越长, 被氧化的机会越大<sup>[45]</sup>, 因此浅水区域有助于 CH<sub>4</sub> 的生成和排放.

## 4 结论

(1) 三峡库区消落带 165 m 以及 155 m 处 CH<sub>4</sub>

排放均在冬季淹水期最高; 175 m 处 CH<sub>4</sub> 排放基本表现为落干时期为 CH<sub>4</sub> 源-汇交替, 淹水时期为 CH<sub>4</sub> 排放源; 180 m 处表现为 CH<sub>4</sub> 源-汇交替, 而 140 m 为 CH<sub>4</sub> 的重要排放源。

(2) 140 m、155 m、165 m、175 m、180 m 高程 CH<sub>4</sub> 年累积排放总量表现为随高程增加而降低的趋势(175 m 除外)。

(3) 土-气界面上, 175、165 和 155 m 各高程 CH<sub>4</sub> 排放通量随土壤含水率变化的速率显著高于 180 m; 而水-气界面上, 140 m 处 CH<sub>4</sub> 排放通量随水深增加而降低, 表明土壤含水率及水深能够在一定程度上影响 CH<sub>4</sub> 的排放。

#### 参考文献:

- [1] Wuebbles D J, Hayhoe K. Atmospheric methane and global change[J]. *Earth-Science Reviews*, 2002, **57**(3-4): 177-210.
- [2] Myhre G, Shindell D, Bréon F M, *et al.* Anthropogenic and Natural Radiative Forcing[A]. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, *et al.* *Climate Change 2013: The Physical Science Basis* [C]. Cambridge: Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [3] Soumis N, Duchemin E, Canuel R, *et al.* Greenhouse gas emissions from reservoirs of the western United States[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, **18**(3): GB3022, doi: 10.1029/2003GB002197.
- [4] Abril G, Guérin F, Richard S, *et al.* Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year old tropical reservoir (Petit Saut, French Guiana) [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, **19**(4): GB4007, doi: 10.1029/2005GB002457.
- [5] Barros N, Cole J J, Tranvik L J, *et al.* Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude[J]. *Nature Geoscience*, 2011, **4**(9): 593-596.
- [6] Xie P, Wu J G, Huang J H, *et al.* Three-gorges dam: risk to ancient fish[J]. *Science*, 2003, **302**(5648): 1149-1151.
- [7] Dalton R. Floods fail to save canyon beaches[J]. *Nature*, 2005, **438**(7064): 10.
- [8] Nilsson C, Reidy C A, Dynesius M, *et al.* Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems[J]. *Science*, 2005, **308**(5720): 405-408.
- [9] Tremblay A, Varfalvy L, Roehm C, *et al.* Greenhouse gas emissions-fluxes and processes: hydroelectric reservoirs and natural environments[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2005. 111-127.
- [10] Rudd J M W, Harris R, Kelly C A. Are hydroelectric reservoirs significant sources of greenhouse gases? [J]. *AMBIO*, 1993, **22**(4): 246-248.
- [11] Weir G J, White S P, Kissling W M. Reservoir storage and containment of greenhouse gases [J]. *Energy Conversion and Management*, 1995, **36**(6-9): 531-534.
- [12] Galy L C, Delmas R, Jambert C, *et al.* Gaseous emissions and oxygen consumption in hydroelectric dams: a case study in French Guyana[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1997, **11**(4): 471-483.
- [13] 吕迎春, 刘丛强, 王仕禄, 等. 贵州喀斯特水库红枫湖、百花湖 p(CO<sub>2</sub>) 季节变化研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(12): 2674-2681.
- Lv Y C, Liu C Q, Wang S L, *et al.* Seasonal Variability of p(CO<sub>2</sub>) in the Two Karst Reservoirs, Hongfeng and Baihua Lakes in Guizhou Province, China[J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(12): 2674-2681.
- [14] Zheng H, Zhao X J, Zhao T Q, *et al.* Spatial-temporal variations of methane emissions from the Ertan hydroelectric reservoir in southwest China [J]. *Hydrological Processes*, 2011, **25**(9): 1391-1396.
- [15] 杨萌, 李红丽, 雷霆, 等. 北京密云水库甲烷排放通量时空特征及其影响因素研究[J]. *湿地科学*, 2011, **9**(2): 191-197.
- Yang M, Li H L, Lei T, *et al.* Spatial-temporal characteristics of methane emission flux and its influence factors at Miyun reservoir in Beijing[J]. *Wetland Science*, 2011, **9**(2): 191-197.
- [16] Chen H, Wu Y Y, Yuan X Z, *et al.* Methane emissions from newly created marshes in the drawdown area of the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, **114**(D18): D18301, doi: 10.1029/2009JD012410.
- [17] Lu F, Yang L, Wang X K, *et al.* Preliminary report on methane emissions from the Three Gorges Reservoir in the summer drainage period[J]. *Journal of Environment Sciences*, 2011, **23**(12): 2029-2033.
- [18] Chen H, Yuan X Z, Chen Z L, *et al.* Methane emissions from the surface of the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, **116**(D21): D21306, doi: 10.1029/2011JD016244.
- [19] Yang L, Lu F, Wang X K, *et al.* Surface methane emissions from different land use types during various water levels in three major drawdown areas of the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, **117**(D10): D10109, doi: 10.1029/2011JD017362.
- [20] 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.
- [21] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emission from a short-plant ecosystem [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20**(5): 842-844.
- [22] Huang Y, Jiang J Y, Zong L G, *et al.* Comparison of field measurements of CH<sub>4</sub> emission from rice cultivation in Nanjing, China and in Texas, USA [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, **18**(6): 1121-1130.
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 228-233.
- [24] 段晓男, 王效科, 陈琳, 等. 乌梁素海湖泊湿地植物区甲烷排放规律[J]. *环境科学*, 2007, **28**(3): 455-459.
- Duan X N, Wang X K, Chen L, *et al.* Methane emission from aquatic vegetation zones of Wuliangsu Lake, Inner Mongolia[J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(3): 455-459.
- [25] 李哲, 白镭, 郭劲松, 等. 三峡水库两条支流水-气界面 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 通量比较初探[J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 1008-1016.

- Li Z, Bai L, Guo J S, *et al.* Comparative study on water-air CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> flux in two tributaries in the three gorges reservoir, China [J]. *Environmental Science*, 2013, **34** (3): 1008-1016.
- [26] 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, **32**(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, **32**(5): 1471-1475.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] St. Louis V L, Kelly C A, Duchemin E, *et al.* Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate [J]. *Bioscience*, 2000, **50**(9): 766-775.
- [30] 胡启武, 朱丽丽, 幸瑞新, 等. 鄱阳湖苔草湿地甲烷释放特征[J]. *生态学报*, 2011, **31**(7): 4851-4857.  
Hu Q W, Zhu L L, Xin R X, *et al.* Methane emission from a Carex-dominated wetland in Poyang Lake [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(7): 4851-4857.
- [31] 杨文燕, 宋长春, 张金波. 沼泽湿地孔隙水中溶解有机碳、氮浓度季节动态及与甲烷排放的关系[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(10): 1745-1750.  
Yang W Y, Song C C, Zhang J B. Seasonal dynamics of dissolved organic carbon and nitrogen and correlativity between their concentrations and methane flux in the freshwater marsh [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(10): 1745-1750.
- [32] 徐华, 蔡祖聪, 李小平. 烤田对种稻土壤甲烷排放的影响[J]. *土壤学报*, 2000, **37**(1): 69-76.  
Xu H, Cai Z C, Li X P. Effect of soil drying on CH<sub>4</sub> flux from rice paddy soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, **37**(1): 69-76.
- [33] Fearnside P M. Hydroelectric dams in the Brazilian Amazon as sources of 'Greenhouse' gases [J]. *Environmental Conservation*, 1995, **22**(1): 7-19.
- [34] 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.
- [35] Faußer A C, Hoppert M, Walther P, *et al.* Roots of the wetland plants *Typha latifolia* and *Phragmites australis* are inhabited by methanotrophic bacteria in biofilms [J]. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 2012, **207**(11): 775-782.
- [36] 丁维新, 蔡祖聪. 温度对甲烷产生和氧化的影响[J]. *应用生态学报*, 2003, **14**(4): 604-608.  
Ding W X, Cai Z C. Effect of temperature on methane production and oxidation in soils [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, **14**(4): 604-608.
- [37] Wassmann R, Neue H U, Bueno C, *et al.* Methane production capacities of different rice soils derived from inherent and exogenous substrates [J]. *Plant and Soil*, 1998, **203**(2): 227-237.
- [38] Abe D S, Adams D, Galli C V S, *et al.* Sediment greenhouse gases (methane and carbon dioxide) in the Lobo-Broa Reservoir, São Paulo State, Brazil: concentrations and diffuse emission fluxes for carbon budget considerations [J]. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 2005, **10**(4): 201-209.
- [39] van der Gon H A C, Neue H U. Influence of organic matter incorporation on the methane emission from a wetland rice field [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, **9**(1): 11-22.
- [40] Yavitt J B, Lang G E. Methane production in contrasting wetland sites: response to organic-chemical components of peat and to sulfate reduction [J]. *Geomicrobiology Journal*, 1990, **8**(1): 27-46.
- [41] Goldenfum J A. Challenges and solutions for assessing the impact of freshwater reservoirs on natural GHG emissions [J]. *Ecology & Hydrobiology*, 2012, **12**(2): 115-122.
- [42] Gunkel G. Hydropower-a green energy? Tropical reservoirs and greenhouse gas emissions [J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2009, **37**(9): 726-734.
- [43] 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.
- [44] Dinsmore K J, Billett M F, Moore T R. Transfer of carbon dioxide and methane through the soil-water-atmosphere system at Mer Bleue Peatland, Canada [J]. *Hydrological Processes*, 2009, **23**(2): 330-341.
- [45] Huttunen J T, Väisänen T S, Hellsen S K, *et al.* Methane fluxes at the sediment-water interface in some boreal lakes and reservoirs [J]. *Boreal Environment Research*, 2006, **11**: 27-34.

## CONTENTS

Correlation Analysis of the Urban Heat Island Effect and Its Impact Factors in China .....	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3987)
Application of Satellite Remote Sensing in NO <sub>x</sub> Emission Control .....	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (3998)
Control Models and Effect Evaluation of Air Pollution in Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration .....	WANG Zhen-bo, LIANG Long-wu, LIN Xiong-bin, <i>et al.</i> (4005)
Pollution Characteristics of Aerosol Number Concentration in Winter and Spring in a Northern Suburb of Nanjing .....	WU Dan, ZHANG Fan, LIU Gang, <i>et al.</i> (4015)
Source Apportionment and Size Distribution of Aerosols at Lin'an Atmosphere Regional Background Station During Winter .....	SHI Shuang-shuang, WANG Hong-lei, ZHU Bin, <i>et al.</i> (4024)
Seasonal Variations in Particle Size Distribution and Water-soluble Ion Composition of Atmospheric Particles in Chengdu .....	TAO Yue-le, LI Qin-kai, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4034)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> in Quanzhou City .....	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4044)
Chemical Characteristics and Sources of Heavy Metals in Fine Particles in Beijing in 2011-2012 .....	ZHOU Xue-ming, ZHENG Nai-jia, LI Ying-hong, <i>et al.</i> (4054)
Pollution Assessment and Source Analysis of Metals in PM <sub>2.5</sub> in Haicang District, Xiamen City, China .....	ZHAO Li-si, YU Rui-lian, XU Ling-ling, <i>et al.</i> (4061)
Characteristics and Health Risk Assessment of Metallic Elements in PM <sub>2.5</sub> Fraction of Road Dust .....	ZHANG Jing, ZHANG Yan-jie, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4071)
Seasonal Variations in PM <sub>10</sub> and Associated Chemical Species in Jiuxian Mountain in Fujian Province .....	WEI Ya, LIN Chang-cheng, HU Qiong-hua, <i>et al.</i> (4077)
Characteristics of C2-C6 Hydrocarbons During the Winter Air Pollution Period in Beijing Urban Area .....	LI Yue, WEI Wei, YANG Gan, <i>et al.</i> (4084)
Analysis of Atmospheric Particulate Matter Pollution Characteristics by LIDAR in Beijing During Spring Festival, 2016 .....	SHI Lin-lin, LI Ling-jun, LI Qian, <i>et al.</i> (4092)
Influence Factors and Sensitivity of Ozone Formation in Langfang in the Summer .....	LI Lei, ZHAO Yu-mei, WANG Xu-guang, <i>et al.</i> (4100)
Impact of Human Activities on Water-Rock Interactions in Surface Water of Lijiang River .....	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (4108)
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 .....	LU Xiao-xuan, PENG Wen-jie, LI Qiang, <i>et al.</i> (4120)
Analysis of Temporal and Spatial Variations in Trace Element Migration in Karst Critical Zone: An Example of Jiguan Cave, Henan .....	LIANG Sha, YANG Yan, ZHANG Na, <i>et al.</i> (4130)
Eutrophication and Characteristics of Cyanobacteria Bloom in the Summer in Guishi Reservoir .....	GOU Ting, MA Qian-li, WANG Zhen-xing, <i>et al.</i> (4141)
Spatial and Temporal Distribution of Chlorophyll a and Its Relationship to Algae and Environmental Factors in Aha Reservoir .....	LUO Yi-fu, LI Lei, LI Qiu-hua, <i>et al.</i> (4151)
Spatio-temporal Variations in Phytoplankton Community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China .....	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4160)
Spatio-temporal Variations, Contamination and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in the Sediments of Chenghai Lake .....	YU Zhen-zhen, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (4169)
Characteristics of Phosphorus Output Through Runoff on a Red Soil Slope Under Natural Rainfall Conditions .....	ZUO Ji-chao, ZHENG Hai-jin, XI Tong-hang, <i>et al.</i> (4178)
Occurrence, Distribution and Health Risk of the Phthalate Esters in Riparian Soil in the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir .....	YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (4187)
Seasonal Distribution, Composition, and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in the Main Stream of the Luanhe River .....	WANG Yi-zhen, ZHANG Shi-lu, KONG Fan-qing, <i>et al.</i> (4194)
Occurrence and Human Exposure Risk Assessment of Organophosphate Esters in Drinking Water in the Weifang Binhai Economic-Technological Development Area .....	DONG Zheng, MA Yu-long, LI Jun-qi, <i>et al.</i> (4212)
Contamination Characteristics and Human Exposure to Organophosphate Flame Retardants in Road Dust from Suzhou City .....	LI Jing, WANG Jun-xia, XU Wan-ting, <i>et al.</i> (4220)
Cancer Risk of Human Intake of PAH-Contaminated Particles Based on Hand-to-Mouth Activities .....	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (4228)
Spatio-temporal Evolution of Groundwater Vulnerability Based on Spatial Autocorrelation .....	LIU Yu, LAN Shuang-shuang, ZHANG Yong-xiang, <i>et al.</i> (4236)
Preparation of Ag-AgI/CN/MA Composites and Their Visible-light Photocatalytic Performance .....	ZHANG Sai, ZHANG Li-li, HU Chun (4245)
Effect of <i>Eichhornia crassipes</i> on Ammonification and Denitrification Microorganisms in Eutrophic Freshwaters .....	LI Jie, JIANG Li-juan, WANG Xiao-lin, <i>et al.</i> (4253)
Utilization of Copper ( II ) Wastewater for Enhancing the Treatment of Chromium ( VI ) Wastewater in Microbial Fuel Cells .....	XIONG Xiao-min, WU Xia-yuan, JIA Hong-hua, <i>et al.</i> (4262)
Efficiency and Microecology of a Soil Infiltration System with High Hydraulic Loading for the Treatment of Swine Wastewater .....	SU Cheng-yuan, LIU Fan-fan, ZHONG Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effects of Bacteria on the Growth of and Lipid Accumulation in <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivated in Municipal Wastewater .....	TU Ren-jie, JIN Wen-biao, HAN Song-fang, <i>et al.</i> (4279)
Enhanced Antibiotic Resistant Bacteria Removal from Wastewater Treatment Plant by Different Disinfection Technologies .....	LIU Ya-lan, MA Cen-xin, DING He-zhou, <i>et al.</i> (4286)
Coking Wastewater Treatment Efficiency and Comparison of Acute Toxicity Characteristics of the AnMBR-A-MBR and A <sup>2</sup> -MBR Processes .....	ZHU Jia-di, LI Fei-fei, CHEN Li-jun (4293)
Stability of the CANON Process Based on Real-Time Control Technologies .....	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (4302)
Improving Nitrogen and Phosphorus Removal from Reclaimed Water Using a Novel Sulfur/Iron Composite Filler .....	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (4309)
Start-up and Capacity Enhancement of a Partial Nitrification Pilot Reactor in Continuous Flow .....	ZHU Qiang, LIU Kai, DONG Shi-yu, <i>et al.</i> (4316)
Quick Start-up Performance of Combined ANAMMOX Reactor Based on Different Inoculated Sludge Types .....	LÜ Gang, LI Tian, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (4324)
Effect of Two-Stage Aeration on Nitrogen Removal Performance of Aerobic Granular Sludge .....	WANG Wen-xiao, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (4332)
Construction of a High Efficiency Anaerobic Digestion System for Vinegar Residue .....	ZHOU Yun-long, XU Zhi-yang, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (4340)
Comparison of Ecological Risk Assessment Based on the Total Amount and Speciation Distribution of Heavy Metals in Soil: A Case Study for Longyan City, Fujian Province .....	WANG Rui, CHEN Ming, CHEN Nan, <i>et al.</i> (4348)
Heavy Metal Contamination of Soils and Crops near a Zinc Smelter .....	CHEN Feng, DONG Ze-qin, WANG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4360)
Characteristics and Influencing Factors of CH <sub>4</sub> Emissions from the Drawdown Area of the Three Gorges Reservoir .....	CHAI Xue-si, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (4370)
Effects of Plastic Film Mulching on Nitrous Oxide Emissions from a Vegetable Field .....	FENG Di, HAO Qing-ju, ZHANG Kai-li, <i>et al.</i> (4380)
Effects of Bamboo Biochar on Greenhouse Gas Emissions During the Municipal Sludge Composting Process .....	XIANG Qiu-jie, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4390)
Removal of Cd from Soil by <i>Aspergillus fumigatus</i> in a Semi-solid Culture .....	CHEN Yao-ning, WANG Yuan-nan, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4398)
Removal of Chlortetracycline and Morphological Changes in Heavy Metals in Swine Manure Using the Composting Process .....	WEN Qin-xue, CAO Yong-sen, CHEN Zhi-qiang (4405)
Remediation of Petroleum-Contaminated Soil Using a Bioaugmented Compost Technique .....	WU Man-li, CHEN Kai-li, YE Xi-qiong, <i>et al.</i> (4412)
Effects of Microbial Diversity on Soil Carbon Mineralization .....	AN Li-yun, LI Jun-jian, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4420)
Ozone Deposition and Risk Assessment for a Winter Wheat Field; Partitioning Between Stomatal and Non-stomatal Pathways .....	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (4427)
Progress in the Studies of Precipitation Chemistry in Acid Rain Areas of Southwest China .....	ZHOU Xiao-de, XU Zhi-fang, LIU Wen-jing, <i>et al.</i> (4438)