

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

区域空气质量模拟中查表法的应用研究 谢旻,王体健,江飞,李树,蔡彦枫,庄炳亮(1409)

长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用 苏继峰,朱彬,康汉青,王红磊,王体健(1418)

北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究 徐小娟,李杏茹,王跃思,刘晨书,潘月鹏,王英锋(1425)

上海大气超细颗粒物和工业纳米颗粒的表征及细胞毒性的比较研究 张睿,吕森林,尚羽,易飞,任晶晶,郝晓洁,安静,吴明红(1431)

青岛市大气PM_{2.5}元素组成及来源研究 李秀镇,盛立芳,徐华,屈文军(1438)

冬季天津家庭室内空气颗粒物中邻苯二甲酸酯污染研究 王夫美,陈丽,焦姣,张雷波,姬亚芹,白志鹏,张利文,孙增荣,张星梅(1446)

再悬浮装置在大气PM_{2.5}源谱分析中的应用 段恒轶,钱冉冉,吴水平,印红玲(1452)

黔西南煤燃烧产物微量元素分布特征及富集规律研究 魏晓飞,张国平,李玲,项萌,蔡永兵(1457)

三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探 蒋滔,郭劲松,李哲,方芳,白镭,刘静(1463)

香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析 王亮,肖尚斌,刘德富,陈文重,王雨春,陈小燕,段玉杰(1471)

臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响 陈书涛,张勇,胡正华,史艳妹,沈小帅(1476)

托木尔峰青冰滩72号冰川径流水化学特征初步研究 赵爱芳,张明军,李忠勤,王飞腾,王圣杰(1484)

五大连池水溶性有机磷矿化特性的研究 张斌,席北斗,赵越,魏自民,白雪,王曼林(1491)

7条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律 卢少勇,远野,金相灿,焦伟,吴瑶洁,任德有,周羽化,陈雷(1497)

巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性 李如忠,李峰,周爱佳,童芳,钱家忠(1503)

北运河系地表水近10年来水质变化及影响因素分析 郭婧,荆红卫,李金香,李令军(1511)

东莞运河排涝对东江河水水质影响分析 孙磊,毛献忠,黄旻旻(1519)

北京平原区地下水污染源识别与危害性分级 陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮(1526)

地下水曝气修复过程的三维数值模拟 李恒震,胡黎明,王建,武晓峰,刘培斌(1532)

垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究 邹锐,周璟,孙永健,嵇晓燕,岳佳,刘永(1540)

新型生物岛栅中污染物去除的微生物机制研究 高明瑜,谢慧君,王文兴(1550)

营养盐水平对念珠藻胞外有机物产生的影响 齐飞,刘晓媛,徐冰冰,黄岳,封莉,张立秋(1556)

水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究 傅海燕,柴天,赵坤,刘智峰,张明真,侯明,许鹏成(1564)

酞酸酯在模拟海河菹草微宇宙中的消减和分布特征 迟杰,杨青(1570)

电子束辐射对铜绿微囊藻毒素产生和释放的抑制作用研究 刘书宇,吴明红,姜钦鹏(1575)

青铜峡灌区典型排水沟水污特征解析 李强坤,胡亚伟,罗良国(1579)

四溴双酚A的辐照降解研究 李杰,徐殿斗,马玲玲,吴明红(1587)

污泥基活性炭催化臭氧氧化降解水中微量布洛芬的效能研究 王红娟,齐飞,封莉,张立秋(1591)

高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响 李怀正,章星异,陈卫兵,叶剑峰(1597)

城市污水生物脱氮系统出水经氯胺消毒形成NDMA的影响因素研究 尚晓玲,李咏梅(1604)

利用淀粉基共混物作为反硝化固体碳源的研究 沈志强,吴为中,杨春平,陈佳利,王建龙(1609)

好氧污泥颗粒化过程中Zeta电位与EPS的变化特性 王浩宇,苏本生,黄丹,崔晓娟,竺建荣(1614)

活性污泥对病毒的生物吸附特性 周玉芬,郑祥,雷洋,陈迪(1621)

阴离子型聚丙烯酰胺在离子交换膜上的吸附规律 邓梦洁,于水利,时文歆,衣雪松(1625)

两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征 李婷,孟昭福,张斌(1632)

表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响 张景环,陈春溶,张玮航,栗桂州(1639)

南京市4个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析 葛峰,郭坤,周广灿,张会娟,刘济宁,戴亦军(1646)

焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能 陈春,李文英,吴静文,李静(1652)

Xanthobacter flavus DT8降解二噁英的特性研究 金小君,陈东之,朱润晔,陈静,陈建孟(1657)

未开发油气田地表烃氧化菌空间定量分布 满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(1663)

矿化垃圾中氧化甲烷兼性营养菌的筛选与生物特性研究 赵天涛,项锦欣,张丽杰,全学军,赵由才(1670)

长江中游干流及22条支流表层水中多氯联苯的分布特征及其潜在风险 李昆,赵高峰,周怀东,曾敏,廖柏寒,吴正勇,张盼伟,郝红(1676)

典型血吸虫病区表层水中酚类化合物的污染特征及潜在风险 吴正勇,赵高峰,周怀东,李科林,曾敏,李昆,张盼伟,郝红(1682)

闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究 陈卫锋,倪进治,杨红玉,魏然,杨玉盛(1687)

三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价 王健康,高博,周怀东,陆瑾,王雨春,殷淑华,郝红,袁浩(1693)

典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险 邓代永,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许玫英(1700)

密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价 高彦鑫,冯金国,唐磊,朱先芳,刘文清,季宏兵(1707)

湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性 杨胜香,袁志忠,李朝阳,龙华,唐文杰(1718)

基于GIS的某训练场土壤重金属污染评价 刘玉通,方振东,杨琴,谢朝新,王大勇,毛华军(1725)

土壤质地和湿度对SVE技术修复苯污染土壤的影响 刘少卿,姜林,姚玉君,李艳霞,刘希涛,林春野(1731)

蒙脱土、高岭土和针铁矿对DNA吸附与解吸特征 王慎阳,饶伟,王代长,张亚楠,李腾,唐冰培,杨世杰(1736)

LNAPL在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究 潘玉英,贾永刚,郭磊,李进军,单红仙(1744)

亚临界水解预处理稻草秸秆制备活性炭及表征 董宇,申哲民,雷阳明,王茜,刘婷婷(1753)

蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究 任云,崔春红,刘奋武,占新华,周立祥(1760)

固定化微生物技术修复PAHs污染土壤的研究进展 钱林波,元妙新,陈宝梁(1767)

《环境科学》征订启事(1483) 《环境科学》征稿简则(1620) 信息(1490,1496,1586,1743)

三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探

蒋滔, 郭劲松, 李哲*, 方芳, 白镭, 刘静

(重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 水电是具有显著减排效益的清洁能源形式,但水库潜在的温室气体效应近年来备受关切,在一定程度上影响了人们对水库清洁能源属性的认识. 本研究分别于2010年8月水库低水位运行期及12月高水位运行期,对三峡库区典型支流——澎溪河上游温泉至下游双江6个沿程断面进行水样的采集及温室气体通量的监测研究. 结果表明,在河流纵向上,表层水体水温、pH逐渐沿程增加,而CO₂分压(*p*CO₂)和碱度(TA)则有相反趋势. 在低水位的8月,开县以下断面CO₂通量为负,且浮游植物可能是控制水体CO₂通量及营养盐的关键因素之一. 澎溪河回水区CO₂通量相对天然河道背景断面(温泉)平均降低了3.26 mmol·(m²·h)⁻¹,而CH₄通量却大幅度增加了. 在高水位运行的12月,澎溪河各断面均为CO₂释放通量,CH₄通量相比低水位则明显降低. 相比较天然河道的温泉断面,澎溪河回水区在高水位运行状态下CO₂与CH₄通量分别增加了4.16 mmol·(m²·h)⁻¹和0.007 mmol·(m²·h)⁻¹. 初步的净通量分析发现,该水域较加拿大实验水库的净通量特征低.

关键词: 三峡水库; 澎溪河; GHG通量; 水库运行状态; 沿程变化

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)05-1463-08

Air-Water Surface Greenhouse Gas Flux in Pengxi River at Different Operational Stages of the Three Gorges Reservoir

JIANG Tao, GUO Jing-song, LI Zhe, FANG Fang, BAI Lei, LIU Jing

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Impoundment of the Three Gorges Reservoir has not only changed the ecosystem structure and biogeochemical processes of the major elements, but also affected the GHG flux intensity in air-water interface of Pengxi River. In this study, six water samples were collected and GHG fluxes were monitored from upstream of Wenquan spot to downstream of Shuangjiang spot in low water level period in August and high water level period in December, respectively. The results show the surface water temperature, pH and DO gradually increase along the river, but was opposite for *p*CO₂ and TA. Downstream of Kaixian spot, the water was a sink of CO₂. Regression analysis showed that for the surface water, phytoplankton growth and metabolism were key factors in controlling CO₂ flux. Preliminary analysis of net flux shows that in August the average of CO₂ flux reduced 3.26 mmol·(m²·h)⁻¹ in backwater area, however, CH₄ flux significantly increased. In high water level operational modes, only surface water temperature and pH gradually increased along the river, *p*CO₂, TA and DO were opposite. The entire river as a source of CO₂ and CH₄ fluxes was significantly lower compared to the low water level. Characteristics of net flux shows that during high water level period in December, CO₂ and CH₄ flux increased 4.16 mmol·(m²·h)⁻¹ and 0.007 mmol·(m²·h)⁻¹, respectively.

Key words: the Three Gorges Reservoir; Pengxi River; greenhouse gas flux; reservoir operation; longitudinal variation

水电是具有显著减排效应的清洁能源形式. 但近年来在热带、温带等水库的研究结果表明筑坝蓄水过程将产生一定量的温室气体(GHG)^[1-3],甚至个别热带水库温室气体释放通量强于同等电能输出的火电站^[4]. 这在一定程度上改变了人们对水电清洁能源属性的基本认识,甚至成为了部分“反坝人士”诟病水电工程的论据. 但必须认识到,水库温室气体释放过程同区域气候条件、库龄、水库物理边界、淹没地区土壤基质、植被覆盖情况、调度运行方式等密切相关^[2,5,6],其温室气体释放通量强度具有复杂性,已有在热带等区域的研究成果尚无法全面概括全球其他水库温室气体释放的情况,对水库温

室气体效应研究仍有待更广泛、深入的证据.

自2003年蓄水且并网发电以来,截止2009年9月三峡工程已累计发电3500亿kW·h. 在产生巨大经济、社会效益的同时,其温室气体效应近年来亦备受关切. 目前的监测结果虽然初步揭示了三峡水库温室气体的总通量特征,对其净通量特点仍并不明晰,这不仅有赖于对成库前本底状态的系统反演评

收稿日期: 2011-07-27; 修订日期: 2011-09-05

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2010CB955904-04); 国家自然科学基金青年基金项目(51009155); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07104)

作者简介: 蒋滔(1983~),男,博士研究生,主要研究方向为三峡水库水环境与水生态.

* 通讯联系人, E-mail: ZheLi81@sina.com

估,也必须充分考虑天然河道碳输送入库对水库温室气体通量的影响^[6].另一方面,在“蓄清排浑”的调度运行方案下,三峡水库在每年6~9月的低水位运行期间接近于天然河道,而在10月~次年2月的高水位运行期间具有深水湖泊的湖沼学特征^[7].这一反季节性的水位涨落过程不仅改变了水库水域生态系统结构与各主要元素生物地球化学过程,也在很大程度上影响了水库水-气界面的温室气体通量强度.

本研究尝试选取三峡水库低水位运行和高水位运行的典型时段,对其典型支流澎溪河温室气体通量的沿程变化特征进行比较分析,结合天然河道入库背景断面温室气体通量的监测结果,初步探讨水库调度运行条件下澎溪河回水区温室气体净通量特

点,以期为进一步对三峡水库调度运行下的温室气体净通量科学合理估算提供数据积累与研究参考.

1 材料与方法

1.1 采样点概述

澎溪河(又名“小江”),地处四川盆地东部边缘,流域面积5 173 km²,干流全长182.4 km,是三峡库区北岸中段流域面积最大的支流(见图1),流域下伏基岩以侏罗系中统沙溪庙组泥质粉砂岩和粉砂质泥岩为主.三峡水库蓄水后,澎溪河流域包含了峡谷、消落区以及湖库等各种特征的水域,其在三峡水库具有代表性.根据澎溪河流域自然地理特征,本研究在澎溪河自上游温泉(天然河道背景)以下至双江共布设6个采样断面(见图1),其特征如下.

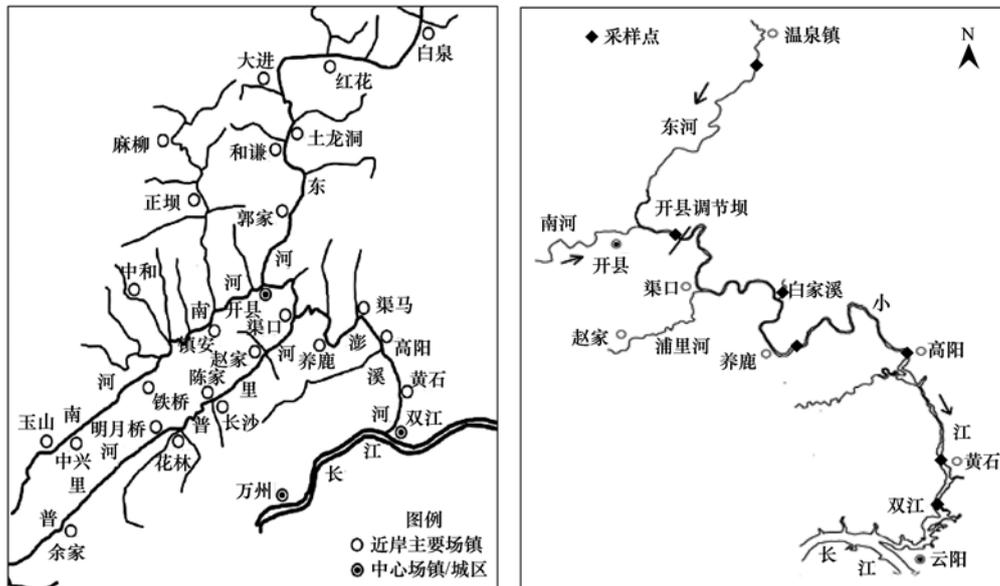


图1 澎溪河流域水系及采样点示意

Fig. 1 Sketch map of backwater area and sampling spots in the Pengxi River

(1) 上游温泉—开县段 温泉断面(N 31°20′1.3″, E 108°30′48.8″)为澎溪河原始河道,控制24%的澎溪河流域面积,水面高程190 m以上,不受三峡蓄水影响,水深常年保持在1~2 m之间.开县断面(N 31°11′12.9″, E 108°26′34.2″)位于开县城下游,是澎溪河支流(南河)与干流(东河)的汇合处,该断面低水位运行期间为河道特征,水流速较高,最大水深不足5 m;高水位运行期,大面积河岸滩地被淹没,形成开阔的水域,水域面积大约6 km²以上,最大水深10 m.

(2) 中上游白家溪—养鹿段 白家溪断面(N31°6′48.5″, E108°32′56.5″)布置于白家溪与澎溪河干流交汇处下游500 m,断面呈峡谷型地貌特

征;养鹿断面(N31°5′7.7″, E108°33′47.6″)位于养鹿镇下游约1 km处,与开县断面类似,坝前160 m以上水位时,该断面具有明显的平湖特征.白家溪—养鹿段高水位期最大水深15~20 m,夏季低水位期最大水深不足10 m.

(3) 下游高阳—双江段 高阳断面(N31°5′48.2″, E108°40′20.1″)蓄水前为大面积平坝或台地,蓄水后成为水域面积在5~6 km²的平湖水域,当水库在145 m水位下运行时,这里的平均水深甚至不足10 m,在物理特征上可近似于浅水湖泊;而在冬季蓄水期其最大水深增加至30 m,接近于深水湖泊.双江断面(N30°56′51.1″, E108°41′37.5″)位于云阳城区双江大桥上游,该

断面河道较宽(约 300 m),高水位运行期最大水深 >70 m,夏季低水位运行期最大水深约 40 m.

1.2 样品采集与分析方法

根据三峡水库调度运行方式,坝前水位在 145 ~ 175 m 之间调节,其中每年 6 ~ 9 月为低水位运行期,水位在汛前下降至 145 m; 每年 10 月 ~ 次年 2 月为高水位运行期,坝前水位保持在 170 m 以上. 为充分反映低水位与高水位状态下的水环境特征与水-气界面温室气体通量特点,本研究选择三峡水库 2010 年 8 月低水位及 12 月高水位运行期作为典型时段,分别对上述 6 断面 0.5 m 表层水体进行一次采集,同步监测相关水环境指标和水-气界面的温室气体通量特征. 为了避免天气差异造成的影响,采样期间天气晴好,整个断面样品的采集工作至上游而下在 3 d 内完成,各断面采样点位于河道深泓线处.

现场采用 YSI® ProODO 溶解氧仪测定水温及溶解氧(DO)(精度分别为 0.1°C, 0.01 mg·L⁻¹); YSI® 63 型 pH 测量仪测定水体 pH 值(精度 0.01 个 pH); 碱度(TA)采用 HACH® 公司的微量滴定器及标准硫酸溶液现场滴定(精度为 1.25 μL),水体中 pCO₂ 根据 pH、碱度及亨利常数计算而得^[8-10]. 野外测量仪器在采样工作前都已经过标准校正程序. 现场测试结束后,将各段面水样带回实验室于 48 h 内完成其它指标的分析测试工作,包括叶绿素 a(Chl-a)、溶解性有机碳(DOC),溶解性总氮(DTN)及溶解性总磷(DTP). 其中 Chl-a 的测定采用丙酮萃取分光光度法; DOC 采用水样过 450°C 烘干 4 h 的 Whatman® GF/F 玻璃纤维滤膜,用 Shimazu® TOC-V 总碳分析仪分析过滤液测定^[11]; DTN 及 DTP 采用过硫酸钾氧化-分光光度计测定.

1.3 pCO₂ 以及通量的监测

水体中溶解性无机碳主要由 CO₂、H₂CO₃、HCO₃⁻ 以及 CO₃²⁻ 构成. 通常 pH、水温和水溶液中离子强度是控制这 4 种无机碳形态浓度分布的主要因素,因淡水系统中离子强度可忽略不计,那么根据 CO₂ 在水溶液中的碳酸平衡原理,可通过式(1)计算出水体 pCO₂^[9].

$$p\text{CO}_2^{\text{water}} = \frac{[\text{H}_2\text{CO}_3]}{K_{\text{CO}_2}} = \frac{[\text{H}^+] \cdot [\text{HCO}_3^-]}{K_{\text{CO}_2} \cdot K_1} \quad (1)$$

式中, pCO₂^{water} 为水中 CO₂ 分压(Pa); K_{CO₂} 和 K₁ 为平衡常数; [H⁺] 和 [HCO₃⁻] 为水中 H⁺ 以及 HCO₃⁻ 浓度(mol·L⁻¹).

水-气界面 CO₂ 及 CH₄ 的扩散通量采用静态箱法测量^[12,13]. 采样箱的主体设备主要由塑料材质构成(430 mm × 330 mm × 140 mm; 专利已授权: 201120159151.3),箱内四周贴有塑料泡沫,增加箱体的稳定性及增大浮力. 采样前先使采样箱内充满空气,然后倒置并固定在水面上,前 10 s 开启箱内混合设备. 每隔 2 min 用针筒抽取采样箱内气体 100 mL,并注入铝箔采气袋后保存. 每个采样点共取 6 次,整个采气过程为 10 min. 集气袋取回实验室后 48 h 内完成 CH₄ 和 CO₂ 的分析. 气体采用六通阀进样,CH₄ 经 TDX-01 色谱柱分离后直接用 FID 检测器检测,而 CO₂ 先经 TDX-01 柱分离后再通过甲烷转化器转化,最后用 FID 检测器检验. 通过测定气样浓度变化率计算水-气界面的 CO₂ 交换通量,计算公式为^[12]:

$$\text{通量} = \frac{\text{斜率} \times \text{压力} \times F_1 \times F_2 \times \text{体积}}{\text{SP} \times R \times (273.15 + T) \times \text{表面积}} \quad (2)$$

式中,斜率为时间-浓度关系图中的斜率(Pa·s⁻¹); 压力为测量的环境压力(Pa); F₁ 为分子摩尔质量(CO₂, 44 g·mol⁻¹; CH₄, 16 g·mol⁻¹); F₂ 为分钟与小时的转换系数(60); 体积为浮箱内套入的空气体积(m³); SP 为标准压力(101 325 Pa); R 为常量(0.082 07); T 为箱内温度(°C); 表面积为水面上浮箱的表面积(m²); 通量单位[mg·(m²·h)⁻¹].

交换通量为正值时表示水体向大气排放 CO₂ 或 CH₄, 为负值时表示吸收.

1.4 数据分析方法

本研究采用偏最小二乘法(PLS)对 CO₂ 通量及各理化指标(pH、TA、DO、水温、Chl-a、DOC 等)进行回归分析^[14]. 偏最小二乘法被称为第二代回归方法,该方法易于辨识系统信息与噪声,甚至是一些非随机性的噪声,并且本研究自变量存在严重多重相关性,因此采用这一方法十分合理,而且与主成分分析以及逐步回归分析相比,该方法得出的每一个自变量的回归系数更容易解释. 另外,回归分析得出的 VIP(variable influence on projection parameter) 参数可以反映自变量对应变量的相关性大小, VIP > 1 表明自变量对 pCO₂ 的贡献很大,当 VIP < 0.5 时则无影响^[15]. 所有 PLS 分析均在 SIMCA-P 12.0 上完成.

2 结果与分析

2.1 水温、DO 及 pH

2010 年 8 月,澎溪河表层 0.5 m 水体温度沿程呈逐渐升高趋势,由上游温泉断面的 24.4°C 上升至

下游双江断面的 34.1℃ (图 2). 表层水体 DO 及 pH 的沿程分布特征与水温基本一致, 分别由温泉断面的 8.85 mg·L⁻¹ 和 8.85 上升至双江断面的 15.7 mg·L⁻¹ 和 9.3. 高水位的 12 月, 表层水温及 pH 沿程变化与低水位一致, 但上升幅度明显降低. 其中水温

由上游温泉断面的 15.8℃ 上升至下游双江断面的 17.3℃; pH 由上游的 7.75 上升至下游的 7.93; 而 DO 的沿程分布则没有明显规律, 研究期间开县及高阳断面 DO 较低分别为 5.97 mg·L⁻¹ 和 7.57 mg·L⁻¹, 而其它点则基本相近.

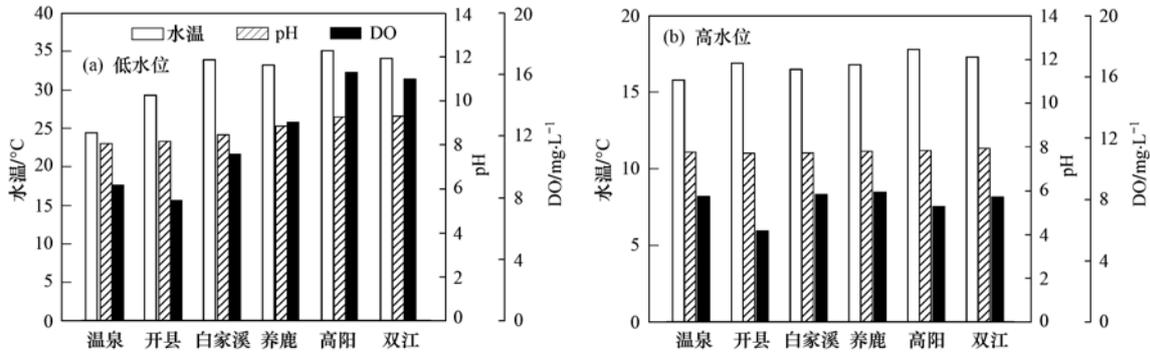


图 2 不同水位运行期间水体温度、DO 及 pH 的沿程分布特征

Fig. 2 Variation of streamwise of water temperature, DO and pH in the water in different operational modes

2.2 pCO₂、TA 及 Chl-a

2010 年 8 月, 澎溪河表层水体 pCO₂ 及 TA 沿程逐渐降低, pCO₂ 由温泉断面的 132.8 Pa 下降到双江断面的 2.6 Pa, TA 也由 63.6 mg·L⁻¹ (CaO) 下降到 21.8 mg·L⁻¹ (CaO), 见图 3. 除温泉和开县断面外, 其余 4 断面表层水体 pCO₂ 均低于大气平均水平 (38.4 Pa)^[16]. Chl-a 的观测数据表明, 除温泉断面外, 其余 5 断面均较高, 高阳和双江断面分别达到了

44.2 μg·L⁻¹ 和 31.7 μg·L⁻¹, 白家溪和养鹿断面更是高达 75 μg·L⁻¹ 以上. 高水位运行期, 表层水体 pCO₂ 及 TA 的沿程变化特征与低水位相似, 但均高于大气平均 CO₂ 分压, 其中温泉最高为 304.9 Pa, 双江最低为 140.3 Pa (图 3), 各断面 TA 也均高于低水位运行期对应值. Chl-a 沿程分布较均匀, 平均为 (2.31 ± 0.16) μg·L⁻¹, 高阳平湖 Chl-a 略高于其余 5 断面.

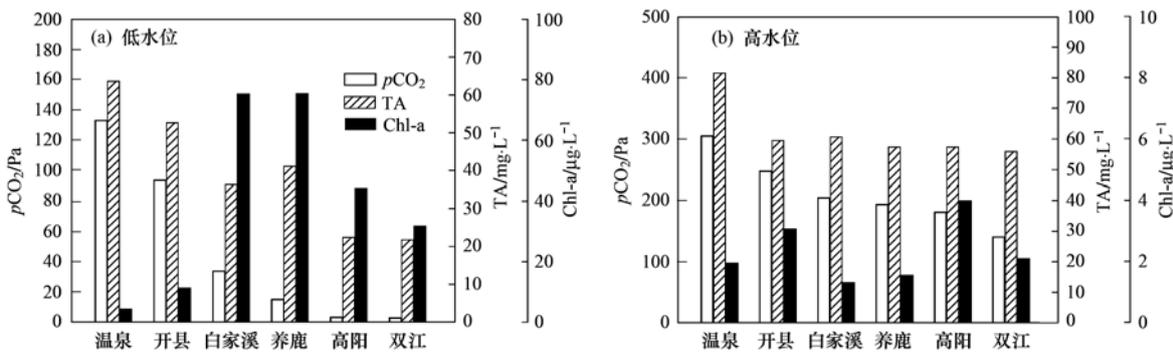


图 3 不同水位运行期间水体 pCO₂、TA 及 Chl-a 的沿程分布特征

Fig. 3 Variation of streamwise of pCO₂, TA and Chl-a in the water in different operational modes

2.3 DTN、DTP 及 DOC

低水位运行期间, 表层水体沿程 DTN 从上游至下游有先升高后降低的趋势, DOC 则与浮游植物生物量同步, 而 DTP 则没有明显的分布特征, 除开县和高阳断面外, 其余 4 断面均低于分光光度法的检出限下限 (见图 4). 由于开县断面在低水位运行期间水力特征类似于天然河道, 水流流速较快, 不适合浮游植物生长, 故对 N 和 P 的吸收不够充分, 又因

为该断面地处开县县城下游, 受人为活动干扰较大, 两者共同作用导致该断面水体 DTN (0.74 mg·L⁻¹)、DTP (0.02 mg·L⁻¹) 及 DOC (2.76 mg·L⁻¹) 均高于温泉原始河道 (DTN, 0.51 mg·L⁻¹; DTP < 0.01 mg·L⁻¹; DOC, 2.29 mg·L⁻¹). 中下游地段水流流速降低, 浮游植物生长旺盛 (见 Chl-a), 各断面 DTN 及 DTP 较低, 而浮游植物量与 DOC 含量则相对较高. 高水位运行期间, 表层水体 DTN 及

DTP 有沿程增加的趋势(图 4), 其中 DTN 由原始河道的 $0.83 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到双江断面的 $1.21 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, DTP 由 $0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 $0.08 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 而 DOC 则相反, 沿程水体 DOC 自上而下逐渐降低, 其中开

县断面最高. 据分析可能是因为高水位运行期间浮游植物生长受限, 细菌分解表层水体有机碳占主导, 使得澎溪河水体溶解态 C、N、P 沿程分布呈上述规律.

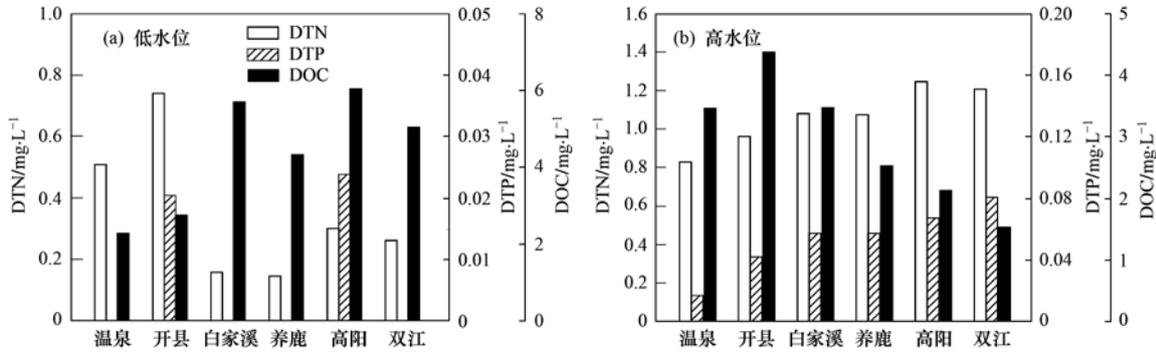


图 4 不同水位运行期间水体 DTN、DTP 及 DOC 的沿程分布特征

Fig. 4 Variation of streamwise of DTN, DTP and DOC in the water in different operational modes

2.4 水-气界面温室气体通量

利用静态箱, 观测得到的高低水位运行期间澎溪河水-气界面温室气体扩散通量结果如图 5 所示. 低水位运行期, 温泉原始河道水-气界面 CO_2 通量高于其余 5 断面, 为 $2.68 \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 且开县以下通量均为负, 即水体吸收大气中 CO_2 , 其中吸收通量最大值出现在白家溪断面, 为 $-1.67 \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$. 而 CH_4 通量则相反, 温泉断面的

CH_4 排放量最低, 仅为 $0.018 \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 高阳最高, 为 $0.24 \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$. 高水位运行期, 温泉断面 CO_2 通量与低水位相比变化不大, 为 $3.28 \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 而其余各断面通量均明显增大, 开县由 $2.13 \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 增加到 $10.57 \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 其余断面也由吸收通量转为排放. 各断面 CH_4 通量下降明显, 但平均值仍高于同时期的温泉原始河道排放量.

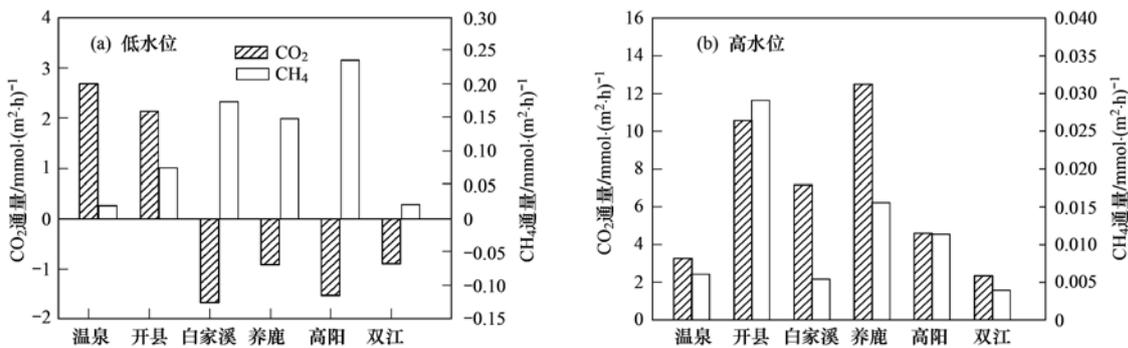


图 5 不同水位运行期间水气界面温室气体通量

Fig. 5 Exchange flux of CO_2 and CH_4 between water and air in different operational modes

3 讨论

3.1 CO_2 通量的影响因素分析

采用偏最小二乘法对 CO_2 通量及各理化指标 (DO、水温、Chl-a、DOC 等) 进行回归分析, 由于温泉自然河道与蓄水后的澎溪河从水流状态、水体理化因子等方面具有本质差别, 因此在进行相应分析时仅分析受到回水影响的 5 断面, 而不将温泉原始河道观测数据列入, 以便更深入地认识不同水库运行

状态下温室气体通量的差异性及其原因. 得出的 PLS 回归结果如图 6 所示. 回归模型将自变量分成了二个主成分, 第一主成分 ($w^*c[1]$) 包含了 84.2% 的数据, 并解释了 67.1% 的 CO_2 通量变化. 第二主成分 ($w^*c[2]$) 包含了 5.5% 的自变量数据, 并与第一主成分一起解释了 82.5% 的 CO_2 通量变化. 研究结果显示, 澎溪河水-气界面 CO_2 通量与表层水体 $p\text{CO}_2$ 、TA 呈显著正相关 (见表 1), 其 VIP 值分别高达 1.29 和 0.93. 根据传质定律, 水-气界面气体通量

与浓度差成正比. 通常大气 $p\text{CO}_2$ 变化较小, 一般保持在 38.4 Pa 左右, 因此表层水体 $p\text{CO}_2$ 越高, 其释放通量就越大; 反之若水体 $p\text{CO}_2$ 越低, 其吸收也越强. 另外, 浮游植物光合作用在吸收水中溶解性 C、N、P 等营养物质的同时, 会降低表层水体碱度^[17], 故本研究用静态箱观测得到的 CO_2 扩散通量与表层水体 $p\text{CO}_2$ 及 TA 成显著正相关. 澎溪河水-气界面 CO_2 通量与水温、pH、Chl-a 及 DO 有显著负相关, 其 VIP 值分别高达 1.07、0.96、0.91 和 0.87. 这 4 个环境参数都与浮游植物生长代谢密切联系, 首先, 水体 pH 直接影响水中碳酸盐 (CO_2 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^-) 的分布, 从而直接控制着水体 CO_2 的浓度. 低水位运行期水温较高, 浮游植物生长旺盛, 其强烈的光合作用会大量吸收水体中溶解性 CO_2 , 提高水体 pH, 从而使表层 $p\text{CO}_2$ 低于大气平均水平; 其次, 光合作用释放的 O_2 通常会导致表层水体 DO 呈过饱和状态, 且浮游植物生物量越高 (Chl-a 是浮游植物生物量的直接表征) 光合作用越剧烈, pH 及 DO 就越大. 而在高水位运行期, 较低的水温限制了浮游植物的生长, 其低生物量及活性是导致表层水体 $p\text{CO}_2$ 高于大气平均值的重要因素之一, 并与低水位运行期成显著差异. 可见对于小江回水区来说, 浮游植物生长是控制表层水体 $p\text{CO}_2$ 的关键因子之一, 并与水温、pH、DO 及 Chl-a 呈极显著负相关. 从图 6 可以看出由于第一主成分包括了绝大部分自变量数

据, 因此澎溪河表层水体 CO_2 通量总体上与 DOC 呈负相关, 而与 DTN 及 DTP 呈正相关. 进一步分析表明, 这是藻类光合作用及细菌呼吸作用的共同影响所致. 在低水位观测期间, 浮游植物光合作用大于呼吸作用, 在吸收水体溶解性 N、P 的同时会分泌 DOC; 而在高水位运行期, 呼吸作用占主导, 细菌在分解水体有机碳的同时会释放无机态的 C、N、P 等营养物质, 从而增加了表层水体 DTN 及 DTP 的浓度. 本研究并没有得出 CO_2 通量与 DOC 正相关性的结果, 这与 Sobek 等^[14,18] 的研究结果存在差别, 但同 Soumis 等^[19] 的研究结果一致. 这可能是因为 Sobek 等与其它研究者得出的 $p\text{CO}_2$ 与 DOC 正相关的结论是基于对湖泊水体的研究, 对于水库而言纵向输移与垂向混合的生境特征迫使其水生生态系统具有开放性特点, 同湖泊有较大差异.

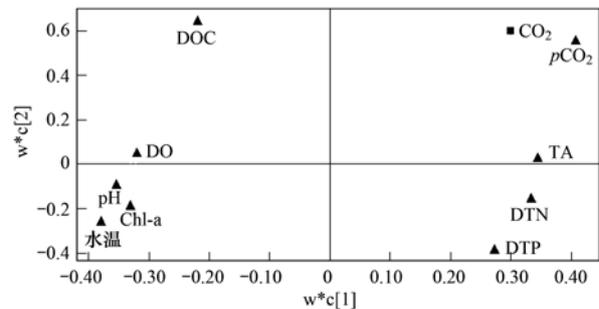


图 6 偏最小二乘法相关性分析图

Fig. 6 Loadings plot of the PLS regression analysis

表 1 CO_2 通量与环境因子的 PLS 回归分析

Table 1 PLS analysis between $p\text{CO}_2$ and environment factors

变量	$p\text{CO}_2$	水温	DOC	pH	DTN	TN	Chl-a	DTP	DO
VIP	1.29	1.07	1.07	0.96	0.94	0.93	0.91	0.91	0.87

3.2 CH_4 通量影响因素的初步分析

对前述研究结果的初步分析表明, 水-气界面 CH_4 通量与水温、Chl-a、DTN 及 DOC 都呈极显著相关 (结果未列出). 众多研究表明水温是影响 CH_4 通量的一个至关重要因素^[20,21], CH_4 主要是底部产 CH_4 菌分解有机物产生, 低水位运行期间高阳水体底部水温为 25.9℃, 并且处于缺氧状态 (监测数据另文详述), 为产 CH_4 菌的代谢提供了很好的生长环境, 有利于 CH_4 的产生和排放, CH_4 的释放通量也比高水位运行期间要高很多. 而水温控制着浮游植物的生长, 从而间接影响了 DTN 和 DOC 的吸收和排放, 故相关性分析才得出 CH_4 通量与 Chl-a、DTN 及 DOC 相关的结果. 水深是影响 CH_4 通量的另一关键因素, 沉积物产生的 CH_4 在上升的过程中

随水中 DO 的增加而逐渐氧化, 因此, 浅水区 CH_4 扩散通量比深水处要高^[20,22]. 本研究也得出了同样的结果, 低水位运行期间白家溪、养鹿及高阳断面 CH_4 的扩散通量比水深较大的双江要高一个数量级. 关于水库调度运行状态下澎溪河 CH_4 水-气界面通量特征及其产汇机制, 将另文详述.

3.3 澎溪河回水区温室气体净通量特征初探

水库温室气体释放的净通量特征是评估水电工程温室气体效应的基础. 而评估筑坝蓄水温室气体效应的核心则是掌握水库淹没后受淹区域底质 (土壤有机质、植被等) 降解与温室气体的释放强度^[2]. 理论上, 通过对蓄水前水库淹没区域本底状态调查与建库后温室气体释放过程的长期跟踪可获得较明晰的水库温室气体净通量特征^[1,2]. 在

建库后多重环境要素协同影响下, 监测获得的水库温室气体总通量序列通常需要扣除相应时间状态下的计量基准值以获取水库温室气体净通量强度. 而明确计量基准值则是科学估算水库温室气体净通量的难点, 具有复杂性. 以河道型水库为例, 相比较与大面积淹没的湖盆型水库, 河道型水库在蓄水后依然保持较强烈的纵向输移特征, 主要元素(碳、氮、磷等)纵向输送对水-气界面温室气体通量的贡献可能远强于淹没区域底质降解对水库温室气体通量的影响^[23]; 另一方面, 高强度的流域开发活动将导致水库陆源输入的有机污染负荷增加, 陆源有机污染物在水库内的运移归趋将对水库温室气体通量问题产生显著影响^[24]. 第三, 水库成库后自身水域生态系统的演化与光合固碳能力(初级生产力水平)的改变将极大影响水库温室气体界面通量过程^[25]. 同时, 上述 3 方面因素均是时间的因变量, 并在水库调度运行下表现出波动性. 因此, 明确水库温室气体净通量的计量基准值, 需充分考虑上述 3 个方面的贡献.

本研究在澎溪河上游干流(东河)布设了入库断面(温泉断面), 以反映天然河道状态下温室气体通量特征. 根据前述学术观点, 本研究尝试将同期跟踪观测的温泉断面水-气界面温室气体通量值作为当前水库运行状态下澎溪河回水区温室气体通量的背景情况, 并通过比对回水区水-气界面温室气体通量的差异, 初步分析净通量特征. 在低水位的 8 月, 开县至双江 5 断面 CO_2 的平均通量为 $-0.58 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, CH_4 为 $0.13 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ (表 2). 与温泉天然河道相比, 蓄水后澎溪河回水区 CO_2

通量平均降低了 $3.26 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, CH_4 通量平均增加了 $0.11 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 高水位运行期, 澎溪河回水区 CO_2 通量平均值为 $7.44 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, CH_4 为 $0.013 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 与温泉相比分别增加了 $4.16 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $0.007 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 同加拿大实验型水库(ELARP)的成果相比, 澎溪河回水区 CH_4 通量较低, 而 CO_2 通量在低水位状态显著低于 ELARP 案例, 在高水位运行状态则偏高^[1]. 一方面, 在不同水位状态下, 温泉断面天然河道温室气体通量强度差异并不显著, 而在澎溪河回水区内则变化明显. 低水位状态下浮游植物生长可能贡献了较大的吸收通量, 而低水位状态适逢高温季节, 高温有助于 CH_4 释放. 高水位运行期, 随水位的上升(坝前水位从 145 m 上升至 175 m)大量陆生植物重新被淹没, 并且低水位运行期积累在沉积物附近高浓度的 CO_2 由于水温分层现象的消失也均匀扩散到整个水体, 因此高水位运行期回水区水-气界面 CO_2 通量也高于温泉原始河道, 而 CH_4 通量则相差不大.

水库温室气体净通量的科学估算是复杂的科学问题, 不仅需要建立严格的计量理论基础, 也需要长时期的监测序列. 本研究基于三峡水库不同运行状态下澎溪河支流的监测结果, 对三峡水库澎溪河回水区温室气体净通量特征进行了初步的比较分析, 而限于监测数据缺失, 本研究暂未能够考虑澎溪河全流域点面源污染负荷输入对净通量造成的影响. 关于初级生产力对温室气体通量的贡献, 将另文详述. 更系统的澎溪河回水区 GHG 净通量分析, 有待于后续更深入的研究.

表 2 澎溪河蓄水前后 GHG 通量对比/ $\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$

Table 2 Comparison of carbon flux of Pengxi River before and after flooding/ $\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$

河流	水位	温泉		回水区		净通量	
		CO_2 通量	CH_4 通量	CO_2 通量	CH_4 通量	CO_2	CH_4
澎溪河(三峡)	低水位	2.68	0.018	-0.58	0.13	-3.26	0.11
	高水位	3.28	0.006	7.44	0.013	4.16	0.007
ELARP	蓄水前		蓄水后		净通量		
	CO_2 通量	CH_4 通量	CO_2 通量	CH_4 通量	CO_2	CH_4	
数值		1.52	0.016	3.41	0.218	1.89	0.202

4 结论

(1) 低水位运行期, 表层水体水温、pH 及 DO 沿程逐渐增加, 而 $p\text{CO}_2$ 和 TA 则相反, 且浮游植物生长控制着水体 CO_2 及营养盐浓度. 高水位运行期, 水温、pH 沿程逐渐增加, 而 $p\text{CO}_2$ 及 TA 则相反; 由于浮游植物生长受限, N、P 等营养盐不能被很好地

吸收利用, 故 DTN、DTP 沿程也呈逐渐增加趋势.

(2) 低水位运行期, 温泉原始河道水-气界面 CO_2 通量高于其它 5 断面, 且开县以下均为负; CH_4 通量则相反, 高阳断面 CH_4 扩散通量为流域最大. 高水位运行期, 温泉断面 CO_2 通量与低水位相比变化不大, 而其余 5 断面均大幅度上升; CH_4 通量下降明显, 但平均值仍高于同期的温泉断面.

(3)初步净通量特征分析表明,在蓄水后低水位的 8 月,回水区 CO_2 通量平均降低了 $3.26 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,而 CH_4 通量却大幅度增加了;在高水位的 12 月,与温泉原始河道相比 CO_2 与 CH_4 通量分别增加了 $4.16 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $0.007 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$.

参考文献:

- [1] Kelly C A, Rudd J W M, Bodaly R A, *et al.* Increases in fluxes of greenhouse gases and methyl mercury following flooding of an experimental reservoir [J]. *Environmental Science and Technology*, 1997, **31**(5): 1334-1344.
- [2] Louis V L S, 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.
- [3] Demarty M, Bastien J, Tremblay A, *et al.* Greenhouse gas emissions from boreal reservoirs in Manitoba and Québec, Canada, measured with automated systems[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(23): 8908-8915.
- [4] dos Santos M A, Rosa L P, Sikar B, *et al.* Gross greenhouse gas fluxes from hydro-power reservoir compared to thermo-power plants[J]. *Energy Policy*, 2006, **34**(4): 481-488.
- [5] Roland F, Vidal L O, Pacheco F S, *et al.* Variability of carbon dioxide flux from tropical (Cerrado) hydroelectric reservoirs[J]. *Aquatic Sciences-Research Across Boundaries*, 2010, **72**(3): 283-293.
- [6] 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.
- [7] 李哲. 三峡水库运行初期小江回水区藻类生境变化与群落演替特征研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [8] 吕迎春, 刘丛强, 王仕禄, 等. 红枫湖夏季分层期间 $p\text{CO}_2$ 分布规律的研究[J]. *水科学进展*, 2008, **19**(1): 106-110.
- [9] 喻元秀, 刘丛强, 汪福顺, 等. 洪家渡水库溶解二氧化碳分压的时空分布特征及其扩散通量[J]. *生态学杂志*, 2008, **27**(7): 1193-1199.
- [10] Webster K E, Soranno P A, Cheruvilil K S, *et al.* An empirical evaluation of the nutrient-color paradigm for lakes [J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, **53**(3): 1137-1148
- [11] Cole J J, Prairie Y T, Caraco N F, *et al.* Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget[J]. *Ecosystems*, 2007, **10**(1): 172-185.
- [12] Lambert M, Fréchet J L. Analytical techniques for measuring fluxes of CO_2 and CH_4 from hydroelectric reservoirs and natural water bodies[A]. In: Therrien A J, ed. GHG emissions from boreal reservoirs and natural aquatic ecosystems, in greenhouse gas emissions-fluxes and processes [C]. Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2005. 37-60.
- [13] Bellido J L, Tulonen T, Kankaala P, *et al.* CO_2 and CH_4 fluxes during spring and autumn mixing periods in a boreal lake (Pääjärvi, southern Finland) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, **114**(4): G04007, doi: 10.1029/2009JG000923.
- [14] Sobek S, Tranvik L J, Cole J J. Temperature independence of carbon dioxide supersaturation in global lakes [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, **19**(2): GB2003, doi: 10.1029/2004GB002264.
- [15] Åberg J, Jansson M, Jonsson A. Importance of water temperature and thermal stratification dynamics for temporal variation of surface water CO_2 in a boreal lake[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, **115**(2): G02024, doi: 10.1029/2009JG001085.
- [16] Solomon S, Qin D, Manning M, *et al.* Historical overview of climate change science [R]. Cambridge, U. K and USA: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007. 95-127.
- [17] Davies J M, Hesslein R H, Kelly C A, *et al.* PCO_2 method for measuring photosynthesis and respiration in freshwater lakes[J]. *Journal of Plankton Research*, 2003, **25**(4): 385-395.
- [18] Sobek S, Algesten G, Bergström A K, *et al.* The catchment and climate regulation of $p\text{CO}_2$ in boreal lakes[J]. *Global Change Biology*, 2003, **9**(4): 630-641.
- [19] 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): GB3022, doi: 10.1029/2003GB002197.
- [20] dos Santos M A, Matvienko B, Rosa L P, *et al.* Gross greenhouse gas emissions from Brazilian hydro reservoirs [A]. In: Therrien A J, ed. GHG emissions from boreal reservoirs and natural aquatic ecosystems, in greenhouse gas emissions-fluxes and processes[C]. Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2005. 267-292.
- [21] Zhu R B, Liu Y S, Xu H, *et al.* Carbon dioxide and methane fluxes in the littoral zones of two lakes, east Antarctica [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(3): 304-311.
- [22] Lima I B T. Biogeochemical distinction of methane releases from two Amazon hydro- reservoirs [J]. *Chemosphere*, 2005, **59**(11): 1697-1702.
- [23] Algesten G, Sobek S, Bergström A K, *et al.* Contribution of sediment respiration to summer CO_2 emission from low productive boreal and subarctic lakes[J]. *Microbial Ecology*, 2005, **50**(4): 529-535.
- [24] Richey J E, Melack J M, Aufdenkampe A K, *et al.* Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO_2 [J]. *Nature*, 2002, **416**(6881): 617-620.
- [25] Planas D, Paquet S, Saint-Pierre A. Production-consumption of CO_2 in reservoirs and lakes in relation to plankton metabolism [A]. In: Therrien A J, ed. GHG emissions from boreal reservoirs and natural aquatic ecosystems, in greenhouse gas emissions-fluxes and processes [C]. Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2005. 483-507.

CONTENTS

Using Look-up Table Method in the Simulation of Regional Atmospheric Environment	XIE Min, WANG Ti-jian, JIANG Fei, <i>et al.</i> (1409)
Applications of Pollutants Released from Crop Residues at Open Burning in Yangtze River Delta Region in Air Quality Model	SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (1418)
Atmospheric Dry Deposition Flux and Sources of Monocarboxylic Acids in Beijing and Surrounding Cities	XU Xiao-juan, LI Xing-ru, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (1425)
Comparison of Physicochemical Characterization of Shanghai Ambient Ultrafine Particles and Engineered Nano Particles and Their Cytotoxicity	ZHANG Rui, LÜ Sen-lin, SHANG Yu, <i>et al.</i> (1431)
Element Compositions and Source of PM _{2.5} Aerosols in Qingdao	LI Xiu-zhen, SHENG Li-fang, XU Hua, <i>et al.</i> (1438)
Phthalate Esters Pollution in Household Indoor Air Particles of Tianjin in Winter	WANG Fu-mei, CHEN Li, JIAO Jiao, <i>et al.</i> (1446)
Application of a Resuspension Test Chamber in PM _{2.5} Source Profile Analysis	DUAN Heng-yi, QIAN Ran-ran, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1452)
Distribution and Enrichment of Trace Elements in Coal Combustion Products from Southwestern Guizhou	WEI Xiao-fei, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (1457)
Air-Water Surface Greenhouse Gas Flux in Pengxi River at Different Operational Stages of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, GUO Jing-song, LI Zhe, <i>et al.</i> (1463)
Fluxes of Greenhouse Gases from Xiangxi River in Summer and Their Influencing Factors	WANG Liang, XIAO Shang-bin, LIU De-fu, <i>et al.</i> (1471)
Effects of Elevated Ozone Concentration and Soil Moisture on Temperature Sensitivity of Soil Microbial Respiration in a Cropland	CHEN Shu-tao, ZHANG Yong, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1476)
Hydrochemical Characteristics in the Glacier No. 72 of Qingbingtan, Tomur Peak	ZHAO Ai-fang, ZHANG Ming-jun, LI Zhong-qin, <i>et al.</i> (1484)
Mineralization Characteristics of Dissolved Organic Phosphorous in Wudalianchi Lake, China	ZHANG Bin, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (1491)
Speciation Distribution of Nitrogen in Sediments of 7 Rivers around Taihu Lake	LU Shao-yong, YUAN Ye, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (1497)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Sediments from Shiwuli Stream in Lake Chaohu	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia, <i>et al.</i> (1503)
Surface Water Quality of Beiyun Rivers Basin and the Analysis of Acting Factors for the Recent Ten Years	GUO Jing, JING Hong-wei, LI Jin-xiang, <i>et al.</i> (1511)
Water Quality Impact of Dongjiang River Network Caused by Dongguan Canal Drainage	SUN Lei, MAO Xian-zhong, HUANG Min-min (1519)
Groundwater Pollution Sources Identification and Grading in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (1526)
3D Numerical Simulation of Air Sparging Remediation Process	LI Heng-zhen, HU Li-ming, WANG Jian, <i>et al.</i> (1532)
Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers	ZOU Rui, ZHOU Jing, SUN Yong-jian, <i>et al.</i> (1540)
Microbial Mechanism of Pollutants Removal in New Biological Island Grid	GAO Ming-yu, XIE Hui-jun, WANG Wen-xing (1550)
Effect of Nutrition Level of Phosphorus and Nitrogen on the Metabolism of the Extracellular Organic Matter of <i>Nostoc flagelliforme</i>	QI Fei, LIU Xiao-yuan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1556)
Inhibitory Effects of Liquor Cultured with <i>Hydrodictyon reticulatum</i> on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i>	FU Hai-yan, CHAI Tian, ZHAO Kun, <i>et al.</i> (1564)
Removal and Distribution of Phthalate Acid Esters in <i>Potamogeton crispus</i> L. Microcosm of Haihe River	CHI Jie, YANG Qing (1570)
Control and Removal of Microcystin Production of <i>Microcystis aeruginosa</i> by Irradiation of Electron Beam	LIU Shu-yu, WU Ming-hong, JIANG Qin-peng (1575)
Source Characteristics Analysis of Discharge and Pollutants in Typical Drainage Ditch of Qingtongxia Irrigation District	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, LUO Liang-guo (1579)
Degradation of TBBPA by Electron Beam Radiolysis	LI Jie, XU Dian-dou, XU Gang, <i>et al.</i> (1587)
Catalytic Ozonation of Ibuprofen in Aqueous Solution by Activated Carbon Made from Sludge and Corn Cob	WANG Hong-juan, QI Fei, FENG Li, <i>et al.</i> (1591)
Effect of High Hydraulic Loading on Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Performance in Constructed Wetland	LI Huai-zheng, ZHANG Xing-yi, CHEN Wei-bing, <i>et al.</i> (1597)
Factors Influencing the Formation of NDMA During Chloramination Disinfection of Effluent from Biological Nitrogen Removal System for the Treatment of Municipal Sewage	SHANG Xiao-ling, LI Yong-mei (1604)
Denitrification Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source	SHEN Zhi-qiang, WU Wei-zhong, YANG Chun-ping, <i>et al.</i> (1609)
Profiles of Zeta Potential and EPS in Granulation Process of Aerobic Sludge	WANG Hao-yu, SU Ben-sheng, HUANG Dan, <i>et al.</i> (1614)
Biosorption Characteristics of f2 Bacteriophage onto Activated Sludge	ZHOU Yu-fen, ZHENG Xiang, LEI Yang, <i>et al.</i> (1621)
Adsorption of Anionic Polyacrylamide on the Surface of Ion Exchange Membranes	DENG Meng-jie, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1625)
Adsorption of Amphoteric Modified Bentonites to Phenol and Its Thermodynamics	LI Ting, MENG Zhao-fu, ZHANG Bin (1632)
Effect of Surfactants on Sorption and Desorption of Benzo[a]pyrene onto Black Carbon	ZHANG Jing-huan, CHEN Chun-rong, ZHANG Wei-hang, <i>et al.</i> (1639)
Isolation and Identification of Bacteria in the Activated Sludge from Four Sewage Treatment Plants in Nanjing City and Its Antibiotic Resistance Analysis	GE Feng, GUO Kun, ZHOU Guang-can, <i>et al.</i> (1646)
Screening and Characterization of Phenol Degrading Bacteria for the Coking Wastewater Treatment	CHEN Chun, LI Wen-ying, WU Jing-wen, <i>et al.</i> (1652)
Characteristics of 1,4-Dioxane Degradation by <i>Xanthobacter flavus</i> DTS	JIN Xiao-jun, CHEN Dong-zhi, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (1657)
Spatial Quantitative Distribution of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria of Unexploited Oil and Gas Fields	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (1663)
Screening and Biological Characteristics of Amphitrophic Methane-Oxidizing Bacteria from Aged-Refuse	ZHAO Tian-tao, XIANG Jin-xin, ZHANG Li-jie, <i>et al.</i> (1670)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from 22 Tributaries and Mainstream in Middle Reaches of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1676)
Pollution Characteristics and Potential Risks of Phenolic Compounds in Schistosomiasis Epidemic Areas	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1682)
Spatial Heterogeneity and Autocorrelation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediment of Minjiang River in Fuzhou City	CHEN Wei-feng, NI Jin-zhi, YANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1687)
Heavy Metals Pollution and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Three Gorges Reservoir During Its Impounding Period	WANG Jian-kang, GAO Bo, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1693)
Investigation on the Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in the Sediments from Typical Electrical Industrial Zone	DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, GUO Ju, <i>et al.</i> (1700)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Iron and Gold Mine Soil of Miyun Reservoir Upstream	GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, <i>et al.</i> (1707)
Heavy Metal Contamination and Bioavailability in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, YUAN Zhi-zhong, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (1718)
Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Training Ground Based on GIS	LIU Yu-tong, FANG Zhen-dong, YANG Qin, <i>et al.</i> (1725)
Effects of Soil Texture and Water Content on Remediation of SVE on Soils Contaminated by Benzene	LIU Shao-qing, JIANG Lin, YAO Yu-jun, <i>et al.</i> (1731)
Characteristics of DNA Adsorption and Desorption in Montmorillonite, Kaoline and Goethite	WANG Shen-yang, RAO Wei, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (1736)
LNAPL Migration Monitoring in Simulated Sand Aquifer Using Resistivity Method	PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (1744)
Preparation and Characterization of Activated Carbon from Rice Straw Pre-treated by the Subcritical Hydrolysis	DONG Yu, SHEN Zhe-min, LEI Yang-ming, <i>et al.</i> (1753)
Study on Composting of Cyanobacteria Amended with Different N Loss Inhibitor	REN Yun, CUI Chun-hong, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (1760)
Research Progress About Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contaminated Soil with Immobilized Microorganism Technique	QIAN Lin-bo, YUAN Miao-xin, CHEN Bao-liang (1767)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 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)

2012年5月15日 33卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 5 May 15, 2012

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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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	中国国际图书贸易总公司 (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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行