

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第3期

Vol.34 No.3

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

BP网络框架下MODIS气溶胶光学厚度产品估算中国东部PM _{2.5}	郭建平, 吴业荣, 张小曳, 李小文(817)
北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究	林海峰, 辛金元, 张文煜, 王跃思, 刘子锐, 陈传雷(826)
气象因素对长三角背景地区甲烷浓度的影响分析	浦静姣, 徐宏辉, 顾骏强, 马千里, 方双喜, 周凌晔(835)
密闭化填埋作业条件下的场内恶臭污染分布情况与分析	路鹏, 吴世新, 戴志锋, 张晓辉, 苏昭辉, 周小飞, 代占国, 卢旭飞, 郑斌, 沈凯, 卫潘明(842)
冬季中国东海海水中挥发性卤代烃的分布特征和海-气通量	何真, 陆小兰, 杨桂朋(849)
2000~2010年大鹏湾颗粒有机物的年变化和年际变化	李绪录, 周毅频, 夏华永(857)
渤海湾浮游植物与环境因子关系的多元分析	周然, 彭士涛, 覃雪波, 石洪华, 丁德文(864)
青藏高原淡水湖泊水化学组成特征及其演化	王鹏, 尚英男, 沈立成, 伍坤宇, 肖琼(874)
漳卫南运河流域非点源污染负荷估算及最佳管理措施优选	徐华山, 徐宗学, 刘品(882)
面向对象的湖泊污染控制智能工程设计方法	邹锐, 周璟, 刘永, 朱翔, 赵磊, 阳平坚, 郭怀成(892)
九龙江口湿地植物凋落物对沉积物有机质赋存的贡献	罗专溪, 邱昭政, 王振红, 颜昌宙(900)
修复达标土壤回填对地下水环境影响的层次化评估方法应用研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 樊艳玲, 夏天翔, 李婷婷, 田美影(907)
去除地下水中硝酸盐的渗透性反应墙研究	李秀利, 杨君君, 卢晓霞, 张姝, 侯珍(914)
北京城区雨水管道沉积物污染负荷研究	李海燕, 徐波平, 徐尚玲, 崔爽(919)
城市污水处理厂及其受纳水体中5种典型PPCPs的赋存特征和生态风险	温智皓, 段艳平, 孟祥周, 陈玲(927)
城市景观娱乐水体微生物风险评价	孙傅, 沙婧, 张一帆, 刘彦华(933)
模拟曝气生物滤池去除邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯试验研究	李伟, 赵晶, 余健, 任文辉(943)
膜生物反应器处理工业废水中膜污染及膜过滤特性研究	范举红, 余素林, 张培帅, 兰亚琼, 刘锐, 陈吕军(950)
γ -Al ₂ O ₃ 负载磷钨酸催化强化电化学法处理水中酸性大红3R的研究	岳琳, 王开红, 郭建博, 杨景亮, 刘宝友, 廉静, 王涛(955)
活性炭催化过硫酸钠降解金橙G动力学	杨梅梅, 周少奇, 刘琳, 郑可(962)
ABR反应器处理碱减量印染废水的启动研究	杨波, 钟启俊, 李方, 田晴(968)
O ₃ -BAF深度处理制革废水中沿程污染物降解规律	余彬, 刘锐, 程家迪, 范举红, 李昌湖, 冉坤, 曹国华, 陈吕军(974)
规模化猪场养殖废水UASB-SFSBR-MAP处理工艺中试研究	王亮, 陈重军, 陈英旭, 吴伟祥(979)
连续流态下以城市污水培养好氧颗粒污泥及颗粒特性研究	牛姝, 段百川, 张祚薰, 刘士峰, 张家铭, 王聪, 周丹丹(986)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅰ)——模型的建立	张超, 陈银广(993)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅱ)——动力学模拟	张超, 陈银广(998)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅲ)——模型的应用	张超, 陈银广(1004)
三峡水库两条支流水-气界面CO ₂ 、CH ₄ 通量比较初探	李哲, 白镭, 郭劲松, 方芳, 蒋滔(1008)
不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素	陈书涛, 刘巧辉, 胡正华, 刘艳, 任景全, 谢薇(1017)
黄土区农田和草地生态系统土壤呼吸差异及其影响因素	周小刚, 张彦军, 南雅芳, 刘庆芳, 郭胜利(1026)
层次化健康风险评估方法在苯污染场地的应用及效益评估	姜林, 钟茂生, 梁竞, 姚珏君, 夏天翔, 樊艳玲, 李敬东, 唐振强(1034)
海州湾滩涂重金属污染的历史记录	张瑞, 张帆, 刘付程, 尹福军, 丁迎军, 高金荣, 陈晶, 邵威(1044)
草海典型高原湿地表层沉积物重金属的积累、分布与污染评价	张清海, 林昌虎, 谭红, 林绍霞, 杨鸿波(1055)
大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析	程芳, 程金平, 桑恒春, 于金莲, 席磊, 皮帅帅(1062)
典型有色金属矿山城市小河流沉积物重金属形态分布及风险评估	李如忠, 姜艳敏, 潘成荣, 陈婧, 徐晶晶(1067)
典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估	李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 陈婧, 姜艳敏(1076)
城市表层土壤磁化率与重金属含量分布的相关性研究	陈秀端, 卢新卫, 杨光(1086)
典型热带林地土壤团聚体颗粒中重金属的分布特征及其环境意义	龚仓, 徐殿斗, 成杭新, 任雅阁, 刘志明, 刘应汉, 刘飞, 聂海峰, 郑祥, 马玲玲(1094)
生态沟渠底泥属性与磷吸附特性研究	张树楠, 贾兆月, 肖润林, 杨凤飞, 余红兵, 刘锋, 吴金水(1101)
三峡库区澎溪河底泥及消落区土壤磷的形态及吸附特性研究	孙文彬, 杜斌, 赵秀兰, 何丙辉(1107)
Triton X-100在黄土上的吸附行为及影响因素	钟金魁, 赵保卫, 朱琨, 钱小龙, 张杰西(1114)
新疆哈密地区有机氯农药大气、土壤残留特征、气-土交换及潜在生态风险	马子龙, 毛蒲萱, 丁中原, 高宏, 黄韬, 田慧, 郭强(1120)
青海省西宁市与天峻县大气中得克隆与十溴联苯醚的水平与来源	何畅, 金军, 马召辉, 王英, 扎西卓玛, 马丽花(1129)
太湖沉积物中多溴联苯醚和类二噁英多氯联苯的水平垂直分布	马召辉, 金军, 元学奎, 王英, 姜霞, 何松洁, 李明圆(1136)
典型电器工业区河涌沉积物中有机污染物特征分析	刘近, 邓代永, 许玫英, 孙国萍(1142)
柴油轿车颗粒多环芳烃的排放特性	谭丕强, 周舟, 胡志远, 楼狄明(1150)
机械炼焦过程生成飞灰中多环芳烃分布特征研究	牟玲, 彭林, 刘效峰, 白慧玲, 张建强(1156)
污泥干化床与芦苇床稳定化污泥中多环芳烃的含量比较	崔玉波, 孙红杰, 冉春秋, 李金凤, 谢瑶(1161)
固体添加剂对污泥焚烧过程中重金属迁移行为的影响	刘敬勇, 孙水裕, 陈涛(1166)
铸造废砂的环境毒性研究	张海凤, 王玉珏, 王劲磷, 黄天佑, 熊鹰(1174)
Cr ⁶⁺ 生物可利用度检测的微生物全细胞传感器CB10的构建及其响应特征	侯启会, 马安周, 庄绪亮, 庄国强(1181)
反硝化脱硫工艺中微生物群落结构及动态分析	于皓, 王爱杰, 陈川(1190)
农业废物好氧堆肥中环境因子对nirK、nirS和nosZ数量的影响	胡春晓, 陈耀宁, 张嘉超, 唐聪, 曾光明(1196)
蚯蚓体内过氧化物还原蛋白PRDX基因对土壤PAHs污染胁迫的转录响应	林康丽, 郑森林, 宋玉芳, 邱晓燕, 薛文玲(1204)
有序介孔碳载金/L-赖氨酸/纳米金修饰电极的制备及其对邻苯二酚、对苯二酚的检测响应研究	周耀渝, 汤琳, 李贞, 刘媛媛, 杨贵德, 伍梦诗, 雷晓霞, 曾光明(1211)
新建核电站风险信息沟通实证研究	贺桂珍, 吕永龙(1218)
《环境科学》征订启事(942) 《环境科学》征稿简则(992) 信息(932, 949, 1061, 1210) 专辑征稿通知(1173)	

三峡水库两条支流水-气界面 CO₂、CH₄ 通量比较初探

李哲¹, 白镭^{1,2}, 郭劲松¹, 方芳¹, 蒋滔¹

(1. 重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400045; 2. 四川省建筑设计院, 成都 610017)

摘要: 三峡水库是亚热带气候背景下的超大型水库, 其水生生态系统碳循环过程存在显著的时空异质性. 本研究于2010年6月~2011年5月对三峡水库两条支流(龙溪河、澎溪河)水-气界面 CO₂、CH₄ 通量特征进行了1 a的定位跟踪观测与比较分析. 研究发现, 位于三峡水库库尾变动回水区的龙溪河 CO₂、CH₄ 通量年均值分别为 $(7.30 \pm 1.89) \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 、 $(0.11 \pm 0.095) \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 而位于三峡水库库中常年回水区的澎溪河 CO₂、CH₄ 通量年均值分别为 $(0.71 \pm 0.46) \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 、 $(0.0074 \pm 0.0017) \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 龙溪河的温室气体通量水平显著高于澎溪河, 季节性变化剧烈, 幅度也显著大于澎溪河. 相比澎溪河, 龙溪河回水区极不稳定的水力、生境条件让浮游植物难以稳定生长, 其水体固碳能力显著受限; 加之龙溪河受淹区域土壤有机质、全氮含量以及单位流域面积内污染负荷程度均显著高于澎溪河, 共同导致了龙溪河温室气体通量水平普遍高于澎溪河流域. 两条支流 CH₄ 通量的主要影响因素仍需进一步研究.

关键词: 三峡水库; 龙溪河; 澎溪河; CO₂; CH₄; 水-气界面通量; 影响因素

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)03-1008-09

Comparative Study on Water-air CO₂, CH₄ Flux in Two Tributaries in the Three Gorges Reservoir, China

LI Zhe¹, BAI Lei^{1,2}, GUO Jin-song¹, FANG Fang¹, JIANG Tao¹

(1. College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Sichuan Provincial Architecture Design Institute, Chengdu 610017, China)

Abstract: The Three Gorges Reservoir (TGR) is a huge reservoir under the subtropical climate condition. It shows great spatio-temporal heterogeneity on biogeochemical cycling of carbon in the TGR's aquatic ecosystem. 1 a field monitoring on water-air CO₂ and CH₄ fluxes was conducted from June, 2010 to May, 2011 in Longxi River and Pengxi River, the 2 typical tributaries in the Three Gorges Reservoir. Comparative study showed that annual CO₂ diffusive fluxes in the Longxi River and Pengxi River were $(7.30 \pm 1.89) \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ and $(0.71 \pm 0.46) \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, respectively, and the CH₄ diffusive fluxes were $(0.11 \pm 0.095) \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ and $(0.0074 \pm 0.0017) \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. Higher intensities and seasonal variance of CO₂ and CH₄ fluxes were observed in Longxi River compared to those in Pengxi River. Through a comparative analysis of the environmental and watershed parameters in both rivers, it was found that the unstable hydraulic conditions and habitat of Longxi River prohibited the growth of phytoplankton, reducing its capability of carbon assimilation. The higher pollution load in the basin and the higher organic matters and total nitrogen in the impounding soil of Longxi River also resulted in the higher level of greenhouse gas fluxes compared to those in the Pengxi River. More studies shall be conducted to elucidate the variance of CH₄ flux and its controlling factors in both rivers.

Key words: Three Gorges Reservoir; Longxi River; Pengxi River; CO₂; CH₄; water-air flux; impact factors

全球内陆水域面积约仅为陆地总面积的2%, 但由于受到高强度的人类活动胁迫, 其在全球碳循环中所占的比重不可忽略^[1]. 作为连接大陆和海洋物质循环的桥梁, 河流输送的溶解态物质和颗粒态物质占陆地向边缘海洋传输量的90%, 在全球碳循环中的作用举足轻重^[2~4]. 筑坝蓄水是影响河流生态环境最显著的事件^[5]. 这将显著改变河流生态系统的结构和功能^[6], 所形成的水库成为内陆重要的水域生态系统, 备受关注.

目前世界水库总面积约为50万 km², 相当于地球天然湖面的1/3^[7]. 对于各种水库水-气界面温室气体通量的研究一直是过去十几年该领域的研究热

点. Barros等^[8]认为气候带与库龄是影响全球水库温室气体通量水平的关键. 文献[9~11]分别对全球不同气候带(北美寒温带、南美热带雨林区)的水库进行了比较分析, 形成的共同观点是水库气候气象条件、地球化学背景、淹没区特征、流域人为影响等, 都将对水库温室气体通量产生显著影响. 水库温室气体通量水平及其影响机制仍存在较大科学分歧. 而在亚热带气候背景下开展水库温室气体通

收稿日期: 2012-05-28; 修订日期: 2012-08-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51009155, 51179215); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2010CB955904-04)

作者简介: 李哲(1981~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为水库生态学, E-mail: ZheLi81@sina.com

量研究仍相对匮乏。

三峡水库是在亚热带气候条件下的超大型水库,其生境特征、生态结构与功能、关键生源要素生物地球化学循环等均呈现出极为显著的时空异质性,其水库生态系统碳循环过程亦在不同的时空区段内呈现明显差别^[12,13]。在三峡水库遴选典型水域开展比较研究,是揭示其空间异质特征的重要途径,对于完善对水库生态系统碳循环过程的认识,其重要性不言而喻,但目前相关研究鲜有报道。

笔者所在研究团队在三峡水库中段常年回水区、尾段变动回水区分别遴选了两条具有代表性的支流(龙溪河、澎溪河),开展了为期 1 a 的定位跟踪观测。本研究将分析 2 条支流回水区 CO_2 、 CH_4 的水-气界面通量特征,并结合气候气象条件、生源要素特征、受淹区域土壤背景与污染负荷等因素探讨影响三峡典型支流回水区水域碳通量的主要过程,以期揭示三峡水库支流水域碳通量特征与循环机制提供更丰富科学信息。

1 材料与方法

1.1 研究区域

三峡水库东起湖北宜昌三斗坪三峡大坝坝址,西至重庆市江津朱沱红花堡,全长 663 km,干流库段平均水面宽度 1 100 m,淹没陆域面积约为 600 km²。根据三峡工程“蓄清排浑”的运行方案,水库将在每年 5 月底汛期来临之前将库区水位降至 145

m;而在 9 月末汛期结束后逐渐将水库水位蓄至 175 m。当水库水位为 145 m 时,干流回水至重庆长寿区下游,距大坝前缘为 524 km,称为“常年回水区”;而受水库 145 ~ 175 m 调蓄影响的干流重庆长寿段至重庆江津朱沱河段,干流长度约为 140 km,称为“变动回水区”。受水库调度运行的影响,常年回水区和变动回水区的水动力背景差异明显,其水域生态系统特征亦存在明显差别。

为对三峡水库空间区段支流的碳通量特征进行比较,本研究在前述的“常年回水区”和“变动回水区”内分别以澎溪河和龙溪河作为研究区域,开展 1 a 的定位观测。两条支流的空间位置见图 1,其流域基本特征比较见表 1。澎溪河(亦称:小江)流域地处四川盆地东南边缘,大巴山南麓,介于 107°56'E ~ 108°54'E, 30°50'N ~ 31°42'N 之间,干流全长约 182.4 km,流域面积 5 173 km²,河口距三峡大坝约 247 km,河道平均坡降 1.25‰,是三峡库区中段、北岸流域面积最大的支流。龙溪河流域位于重庆市主城区的东北部,位于三峡水库 145 m 回水区末端,长江左岸。流域介于 29°56'N ~ 30°12'N, 107°12'E ~ 107°24'E 之间,河流全长 229.8 km,流域面积 3 280 km²,河口多年平均流量 54 m³·s⁻¹。

两条支流均位于大巴山脉以西的川东丘陵区,代表了三峡水库奉节以西绝大多数支流流域的地貌特征与植被、土壤特点,同三峡库区奉节以东的峡谷区段的支流(大宁河、香溪河等)具有显著区别。其中澎溪河因其具有最大面积的支流消落带和淹没



图 1 龙溪河流域、澎溪河(小江)流域在三峡库区中的位置示意

Fig. 1 Location of the Pengxi River and Longxi River in the Three Gorges reservoir area

表 1 龙溪河、澎溪河流域基本特征比较

Table 1 Comparison of the feature of Longxi River and Pengxi River

特征	龙溪河	澎溪河
地理位置	三峡水库库尾; 流经梁平县、垫江县、长寿区	三峡水库中段; 流经开县、云阳县
地形地貌	四川平行岭谷地带, 地属深丘和浅丘区, 山谷纵横, 地势东北高西南低	上游为大巴山南麓中石灰岩山区深丘溶蚀地貌为主, 中下游为川东平行岭谷低山丘陵
土壤类型	主要是砂岩、页岩及石灰岩多年风化形成的水稻土、冲积土、紫色土、黄壤土; 耕地土壤主要为水稻土和紫色土, 在溪河沿岸有少量的冲积土存在	土壤质地组成以壤土为主, 其次为砾石和黏土, 沙土面积较少; 耕地土壤以紫色土为主, 林地以石灰岩土、山地黄棕壤和棕壤为主
植被情况	属常绿阔叶林植被带, 原生植被少而不完整; 森林覆盖率仅 19.6%	属亚热带阔叶林区, 原生植被已被破坏殆尽, 主要为次生林; 开县、云阳县的森林覆盖率分别达到 40%、43%
水土流失情况	以水力侵蚀为主; 年输沙量 23.57 万 t 流域年均输沙模数达 2 939.0 t·km ⁻²	以水力侵蚀为主; 年均输沙量约 822 万 t, 流域年均输沙模数达 1 812.2 t·km ⁻²

1) 表中信息分别来自《龙溪河流域污染综合整治规划》(机械工业部第三设计院编, 2004)、《澎溪河流域污染综合整治可行性研究》(长江水利委员会规划设计院编, 2004)

区而典型; 龙溪河则因其流域内污染负荷绝大部分来自农业面源而具有代表性。

1.2 采样方案

本研究在前述两条支流回水区内各选取一个采样点开展定位采样工作。为使采样点具有良好的空间可比性, 本研究中两采样点都选择在支流下游回水区空间上相近的区域: 龙溪河采样点距离长江交汇处大约 1.5 ~ 2 km (N29°48'45.33", E 107°5'34.64", 图 2), 此处位于长寿化工厂排放口上游 1 ~ 1.5 km, 不易受化工厂影响, 夏季为天然河道, 冬季为回水区。澎溪河采样点为双江大桥下, 距离长江主河道约 2.5 km (N30°56'51.1", E108°41'37.5", 图

2), 该采样点处于永久回水区, 水位处于 145 m 时的断面深泓线处水深约为 46 m。

采样时间为 2010 年 6 月 ~ 2011 年 5 月的一个完整水文周年 (2010 年 6 月因采样仪器例行校正致龙溪河缺测)。采样频次为每月一次。澎溪河采样时间为每月 10 日、龙溪河采样时间为每月 13 日。根据前期对温室气体通量 24 h 昼夜连续监测结果, 现场采样时间控制在 12:00 ~ 15:00。采样点均位于河道深泓线处, 使用 5 L 采样器采集 0.5 m 水深的水样, 除现场测试分析指标外, 其余水样带回实验室后于 48 h 内完成所有测试分析工作。

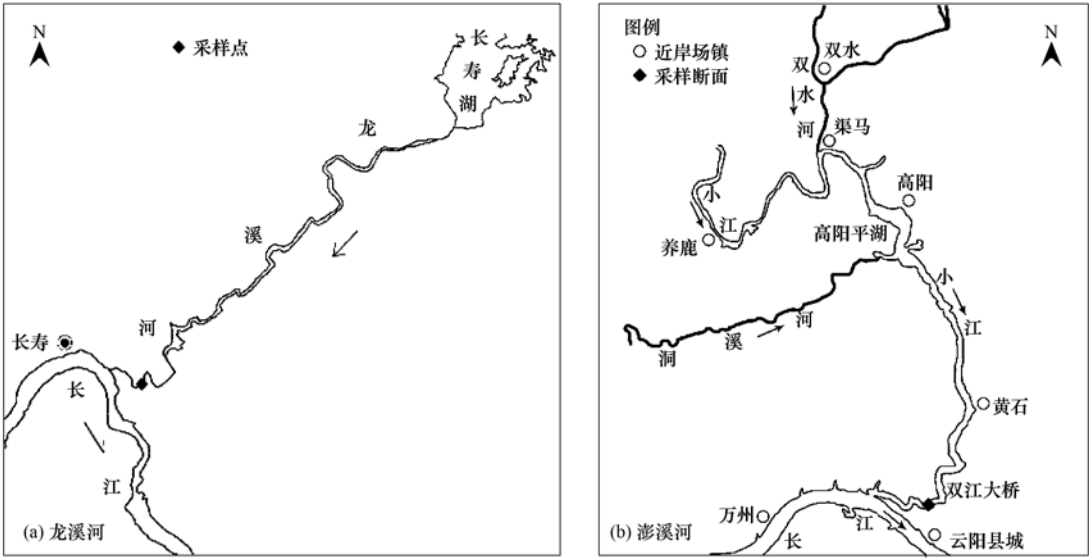


图 2 龙溪河、澎溪河回水区示意及采样点设置

Fig. 2 Location of sampling spot at the backwater of Longxi River and Pengxi River

1.3 实验分析方法

现场测试分析指标包括: pH 值、溶解氧 (DO)、水温、气温、大气压等。其中, pH 值、电导率采用

多参数水质分析仪 (HACH® MS5) 现场测定, 其测试精度分别为 pH ± 0.01、EC ± 0.1 mS·cm⁻¹。水温、DO 采用 (YSI® Pro ODO) 现场测定, 测试精度

分别为水温 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 、DO $\pm 0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 现场气温、大气压采用手持式数字大气压计测得.

水-气界面 CO₂、CH₄ 扩散通量采用静态箱法^[15,16]测量. 本研究采用改良型静态箱^[17]. 通过前期预实验研究^[17], 确定整个采气过程为 10 min, 每个采样点共取气 6 次, 采样间隔 2 min, 每个采样点共取气 6 次. 采样时用针筒抽取采样箱内气体 100 mL, 注入铝箔采气袋后保存. 集气袋取回实验室后 48 h 内完成气体分析. 气样分析采用安捷伦 7820 型气相色谱仪. 气体采用十通阀进样, 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炉转化, 最后用 FID 检测器检测. 通过测定气样浓度变化率计算水-气界面的气体交换通量. 气体浓度变化的线性相关性系数 R^2 均大于 0.95, 满足采样实验要求. 气体交换通量计算公式^[15] 见式(1).

$$\text{通量} = \frac{\text{斜率} \times \text{压力} \times F1 \times F2 \times \text{体积}}{\text{SP} \times R \times (273.15 + T) \times \text{表面积}} \quad (1)$$

式中, 斜率为时间-浓度关系图中的斜率 ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$); 压力为测量的环境压力 (Pa); $F1$ 为分子摩尔质量 (CO₂, $44 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$; CH₄, $16 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$); $F2$ 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 (m^3); SP 为标准压力 ($101\,325 \text{ Pa}$); R 为常量 ($0.082\,07$); T 为箱内温度 ($^\circ\text{C}$); 表面积为水面上浮箱的表面积 (m^2); 通量单位 [$\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$].

氮、磷、硅等营养盐以及叶绿素 a (Chl-a) 等生境关键指标测定方法参照文献^[18] 进行. 土壤有机质 (SOM)、土壤全氮 (STN)、全磷 (STP) 等土壤指标的采样测试方法参照文献^[19] 进行, 土壤样品采样时间为 2010 年 4 月、7 月、9 月.

1.4 其他数据来源与数据处理方案

本研究中流域气象数据来自于中国气象科学数据共享服务网 (<http://www.cma.gov.cn>). 所有数据均录入 SPSS® 或 Origin® 进行统计分析, 采用 Oneway ANOVA 来判别不同数据组的差异性, 采用变异系数 CV 值来反映数据的变化程度, 采用 Spearman 非参数相关性分析方法阐释数据间变化的统计相关性.

2 结果与分析

2.1 两条支流温室气体通量水平

澎溪河和龙溪河采样点的水-气界面 CO₂ 年平均通量值分别为 $(0.71 \pm 0.46) \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $(7.30 \pm 1.89) \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$. CH₄ 通量年平均

值分别为 $(0.0074 \pm 0.0017) \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $(0.11 \pm 0.095) \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ (图 3). 龙溪河采样点的年平均 CO₂ 通量比澎溪河双江大桥处高出一个数量级, 而 CH₄ 则更是高出两个数量级. 同时, 龙溪河的年内变化幅度 CV 值显著大于澎溪河.

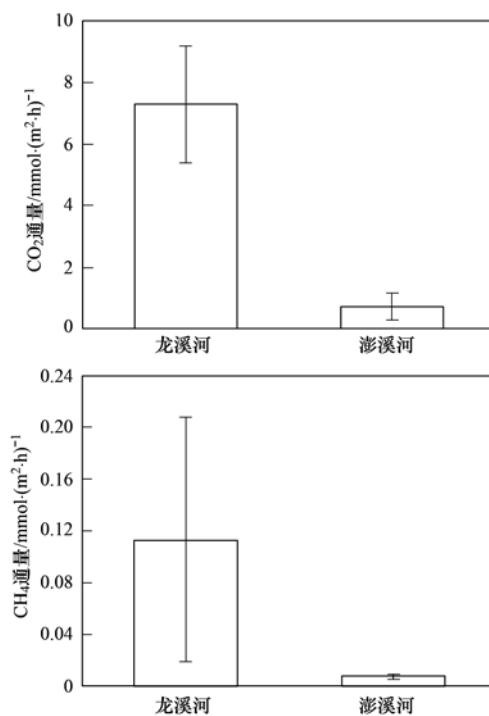


图3 龙溪河、澎溪河采样点 CO₂、CH₄ 通量年平均值

Fig. 3 Annual average values of CO₂ and CH₄ flux in each sampling spot of the Longxi River and Pengxi River

对二者的逐月变化过程 (图 4) 比较可以发现, 龙溪河采样点全年的 CO₂ 通量都为正值, 其在 2010 年 7、8、10 和 12 月的通量值都超过了年平均值, 且变化剧烈. 低水位运行期 (6~9 月) 的 8 月, CO₂ 通量达到年内最大值 $20.31 \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$; 而在 9 月, CO₂ 通量值显著降低到 $5.01 \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$. 澎溪河采样点在低水位同期数月的 CO₂ 通量都一直处在较低的水平, 在发生夏季水华的 8 月甚至为负值, 10 月份 (秋季水华) 的 CO₂ 通量值相对前月也明显降低. 这些和龙溪河同期剧烈变化的特征存在较大不同.

高水位运行期间 (10 月~次年 1 月), 澎溪河采样点 CO₂ 通量平缓上升, 龙溪河采样点水-气界面 CO₂ 逐月通量水平仍较为剧烈: 10 月和 12 月 CO₂ 通量值都在 $10 \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 以上, 但 11 月仅为 $2.76 \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$. 泄水期 (2~5 月), 龙溪河通量值逐渐降低, 在次年春季水华发生的 3 月达到最小值 $0.33 \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 而此月澎溪河出现的水

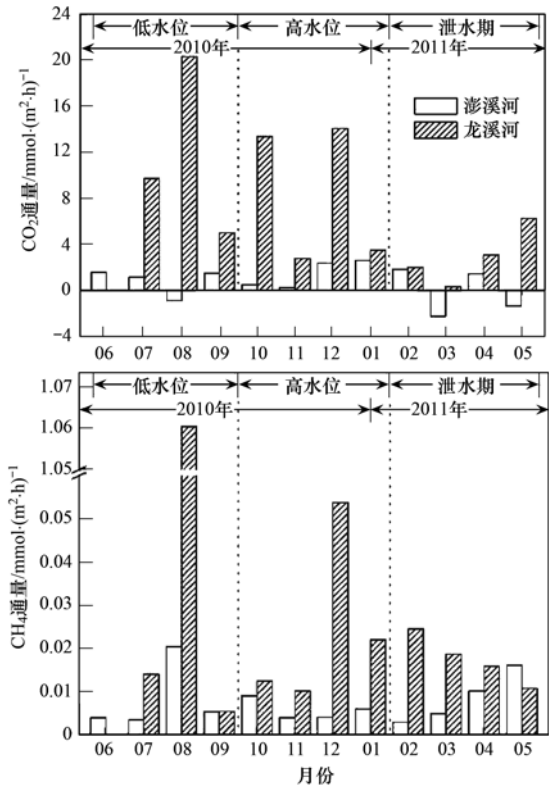


图4 龙溪河、澎溪河采样点 CO₂、CH₄ 通量逐月变化图
Fig. 4 Monthly variations of CO₂ and CH₄ flux in each sampling spot of the Longxi River and Pengxi River

华[图5(d)]也使 CO₂ 通量骤降为负值,成为大气 CO₂ 的“汇”。

对两条支流 CH₄ 通量的比较可以发现,CH₄ 通量的季节变化趋势有相似之处,在夏季均达到全年峰值,而在冬季高水位运行期均处于相对较低的水平(除了12月)。但在泄水期龙溪河采样点 CH₄ 通量呈下降趋势,而澎溪河采样点 CH₄ 通量则呈逐渐升高。

2.2 龙溪河、澎溪河气象特征

龙溪河与澎溪河流域虽位于三峡水库不同的空间区位(库中、库尾),但两流域同属亚热带湿润性季风气候,总体都表现为气候温和、热量丰富、雨量充沛、四季分明、冬暖春早的特点。龙溪河全年降雨量为1020.33 mm,略高于澎溪河的1016.3 mm,在多年(52 a)的降雨序列中,研究期间两个流域均为平水年。两流域在6~9月的总降水都占到全年的60%以上。

尽管方差分析显示两流域的日照、气温指标没有显著差异性(Sig. >0.05),但从全年看,龙溪河年光照时间为1169.8 h,较澎溪河流域的1325.2 h少了255.4 h;同时龙溪河年平均气温亦较澎溪河略

低0.4℃。另外,龙溪河的风速、气压均显著低于澎溪河(Sig. <0.01),见表2。

表2 澎溪河、龙溪河流域气象数据统计表

Table 2 Weather data of Longxi River and Pengxi River			
气象参数	项目	龙溪河	澎溪河
降水/mm	均值	2.8 ± 0.38	2.78 ± 0.41
	范围	0 ~ 52.1	0 ~ 79.78
	CV 值	2.577	2.814
湿度/%	均值	73.9 ± 0.57	72.5 ± 0.54
	范围	45.33 ~ 94.33	46.0 ~ 94.5
	CV 值	0.147	0.143
日照/h	均值	3.2 ± 0.20	3.63 ± 0.20
	范围	0 ~ 11.57	0 ~ 11.43
	CV 值	1.184	1.036
气温/℃	均值	17.33 ± 0.45	17.69 ± 0.44
	范围	1.37 ~ 33.93	2.05 ~ 33.60
	CV 值	0.501	0.479
风速/m·s ⁻¹	均值	1.08 ± 0.02	1.20 ± 0.02
	范围	0.40 ~ 3.67	0.43 ~ 3.68
	CV 值	0.380	0.366
气压/kPa	均值	97.19 ± 0.04	97.72 ± 0.04
	范围	95.08 ~ 99.0	95.81 ~ 99.59
	CV 值	0.008	0.008

2.3 龙溪河、澎溪河主要水质理化指标

龙溪河采样点年平均水温(18.39 ± 1.85)℃低于澎溪河采样点的(21.45 ± 1.97)℃,两采样点水温存在显著的统计差异。龙溪河最高、低水温分别为8月和次年1月的27.3℃和11.3℃,而澎溪河采样点则分别在8月、次年2月达到34.1℃、12.6℃(图5)。两支流采样点的水温季节变化一致,但从标准差SD的比较上可以看出,龙溪河水温的季节变幅大于澎溪河。

龙溪河采样点Chl-a年均值为(13.97 ± 5.6) μg·L⁻¹;澎溪河采样点为(44.22 ± 24.46) μg·L⁻¹,是龙溪河采样点的3.17倍。澎溪河的DO、pH年均值均显著高于龙溪河(Sig. <0.01)。澎溪河在2010年8月、10月以及次年的3月、5月发生了水华,也造成了上述4个月的Chl-a明显较高(尤其是3月Chl-a超过了100 μg·L⁻¹,5月将近300 μg·L⁻¹),相应当月表层水体的DO及pH显著升高。龙溪河也在春、夏季发生水华,Chl-a极高值出现在2010年9月、2011年3月,同期pH、DO亦处于较高水平。但总体上龙溪河水华期间生物量水平显著低于澎溪河(Sig. <0.01)。同时,龙溪河Chl-a、DO、pH等相关理化指标的年内变幅(CV值)均低于澎溪河。

2.4 污染负荷水平、采样点营养盐浓度特征

对龙溪河、澎溪河在2003~2004年间的污染负荷水平进行了统计,并以单位流域面积污染负荷

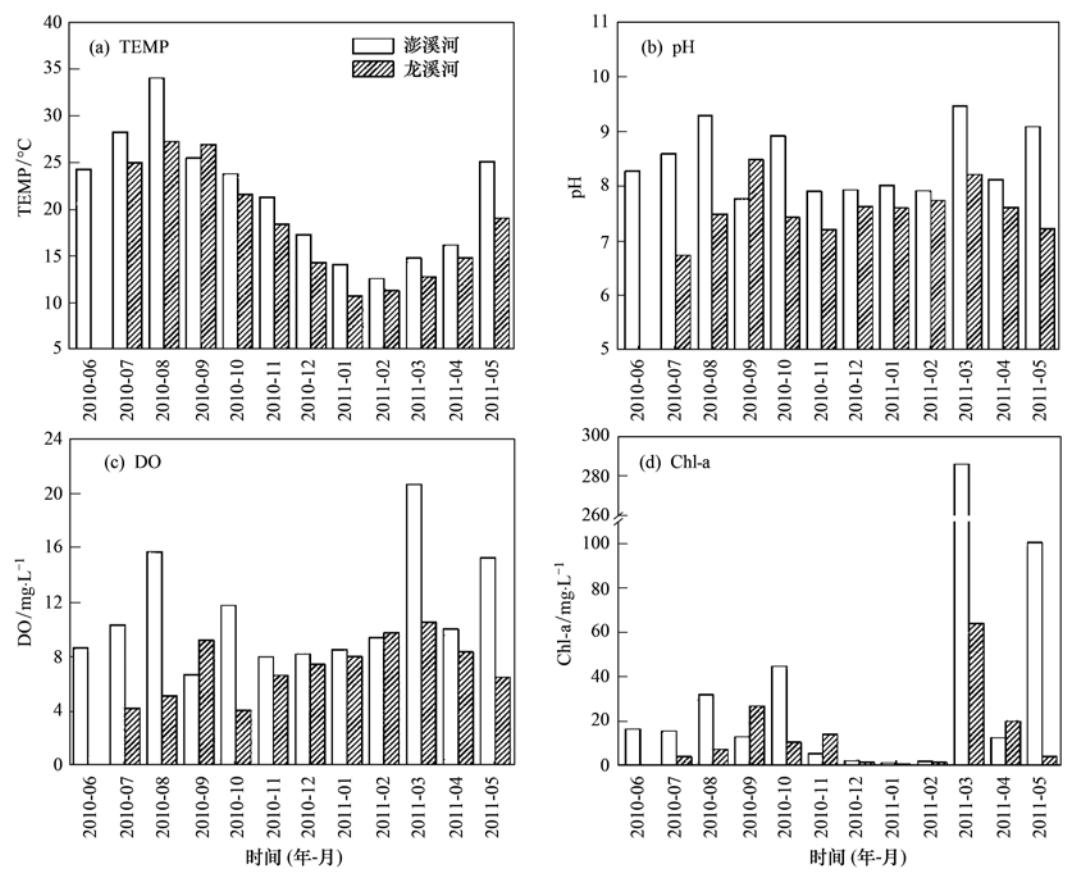


图5 澎溪河、龙溪河水质理化指标逐月变化

Fig. 5 Monthly variations of the physical and chemical properties of Longxi River and Pengxi River

值作为指标衡量两条流域污染负荷水平,结果见图6. 可以看出,除 TP 外,龙溪河单位流域面积内 COD、NH₄⁺-N、TN 的污染负荷显著高于澎溪河.

于2010年4月、7月、9月对两流域内受淹区域土壤进行了测试分析(图7). 两流域采样点附近土壤 SOM 都较高,均超过了 10 mg·g⁻¹,龙溪河为 (12.67 ± 3.78) mg·g⁻¹,澎溪河为 (11.84 ± 2.16) mg·g⁻¹. 数据显示龙溪河土壤 SOM、STN 略高于澎溪河.

溪河,STP 则略小于澎溪河.

通过对两条河流采样点氮、磷、硅营养盐的比较结果(图8)可以看出,除了 PO₄³⁻-P 浓度均比较低外,龙溪河的 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TN、TP、DSi 浓度年均值都高于澎溪河,龙溪河采样点的 NH₄⁺-N、TN、TP 年均值浓度分别比澎溪河高出的 290%、30%、60%. 而这同前述龙溪河 Chl-a 浓度显著低于澎溪河形成了明显的对比.

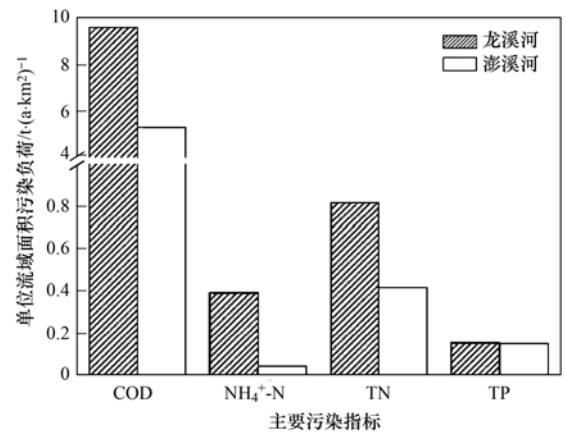


图6 龙溪河、澎溪河单位流域面积污染负荷强度比较
Fig. 6 Pollution load per unit area of Longxi and Pengxi Basin

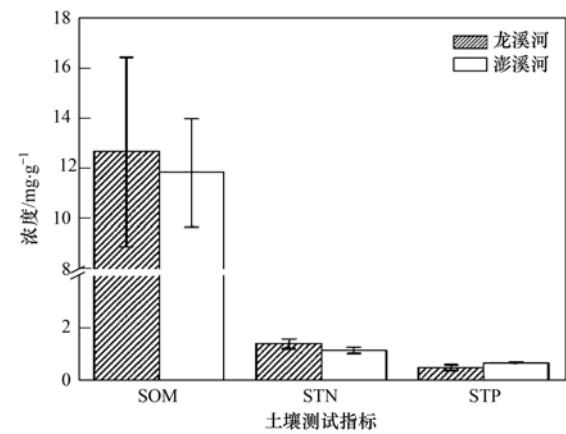


图7 龙溪河、澎溪河土壤主要指标比较
Fig. 7 Soil properties of Longxi and Pengxi Basin

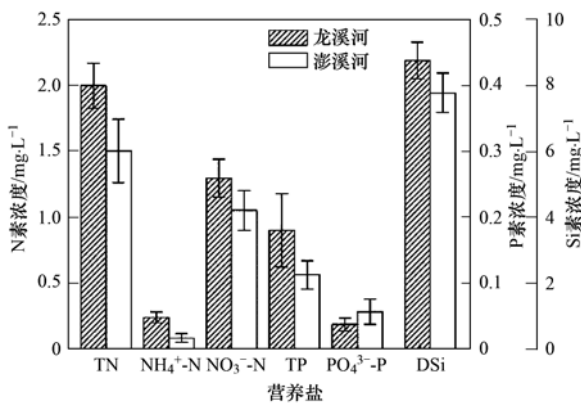


图 8 龙溪河、澎溪河采样点主要生源要素及其赋存形态的对比
Fig. 8 Comparison of nutrients concentration in each sampling spot of the Longxi and Pengxi River

2.5 温室气体通量水平影响因素分析

龙溪河、澎溪河的 CO₂、CH₄ 扩散通量同各主要环境因素间的相关性分析结果见表 3。

龙溪河 CO₂ 通量同水温呈显著正相关,而与 DO 呈显著负相关,但与 Chl-a 却没有显示明显的相关性。澎溪河的 CO₂ 通量与水质理化指标呈现出较强的相关性,其与 pH、DO、Chl-a 的相关性系数分别

表 3 澎溪河、龙溪河 CO₂、CH₄ 通量与环境要素的相关性分析¹⁾

Table 3 Correlations between CO ₂ , CH ₄ flux and the environment factors in the Longxi River and Pengxi River					
指标类型	参数	龙溪河		澎溪河	
		CO ₂ 通量	CH ₄ 通量	CO ₂ 通量	CH ₄ 通量
理化指标	水温	0.618 *	—	—	—
	pH	—	—	-0.657 *	—
	DO	-0.673 *	—	-0.685 *	—
	Chl-a	—	—	-0.825 **	—
生源要素	TN	—	—	—	—
	TP	—	—	—	—
	NO ₃ ⁻	—	0.745 *	0.601 *	—
	SiO ₂	—	—	0.727 **	—

1) * 表示 $P \leq 0.01$, 表示极显著相关; * 表示 $P \leq 0.05$, 表示显著相关

表 4 水库各纵向分区特点

Table 4 Characteristics of longitudinal zonation in the reservoir							
区域	形态结构	流量	流速	沉积物	营养盐含量	藻类生物量及生长率	透明度
河流区	既浅又窄	高	最快	大粒径泥沙	最高	较低	最低
过渡区	较宽深	较高	减缓	小粒径淤泥、黏土和细颗粒有机物	较高	最高	较高
湖泊区	最宽最深	低	最慢	粒径更小的颗粒物	最低	受限于营养盐	最高

本研究中所选取的 2 条支流,分别位于三峡水库中常年回水区(澎溪河)与库尾变动回水区(龙溪河),虽然它们的气候气象条件差异并不显著,但其主要水库湖沼学变量差异明显,符合三峡水库河流区(龙溪河)与过渡区(澎溪河)的总体特征。结

为 -0.657、-0.685、-0.825; CO₂ 扩散通量与主要的生源要素 NO₃⁻、DSi 都呈极显著正相关。相比较,澎溪河,龙溪河 CO₂ 通量与各环境要素的相关系数偏低。两流域采样点的 CH₄ 扩散通量与各因素的相关性都较差,龙溪河仅与 NO₃⁻ 显著正相关,澎溪河 CH₄ 扩散通量与主要理化指标及生源要素则都没有明显相关性。

3 讨论

作为处于高强度人类干扰下的水域生态系统,水库兼有河流与湖泊的特征,又具有其独特的水动力学特征和调度方式。通常,水库由库尾到库首的水平方向上可依次分为河流区(riverine zone)、过渡区(transition zone) 和湖泊区(lacustrine zone) ^[20], 如图 9 所示。但这 3 个区域的范围受出入库流量的调节而呈时空上动态变化的特点。由于各区的物理背景、水动力条件不完全相同,其化学组分和生物学指标方面存在连续的梯度变化特征(表 4 和图 10) ^[21~23]。

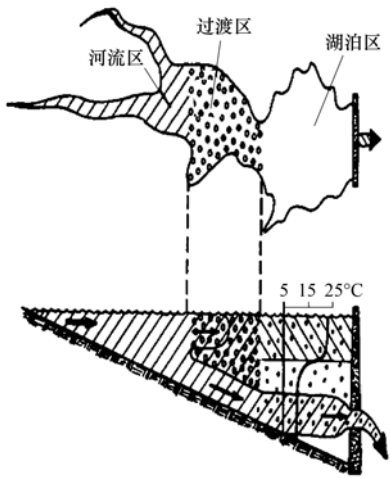


图 9 水库纵向分区图(河流区、过渡区和湖泊区) ^[20]
Fig. 9 Longitudinal zonation in the reservoir

合两条典型支流温室气体通量特征与主要环境因素的特点,研究认为三峡库区库中、库尾支流温室气体通量差异的原因可归纳为以下 2 个方面。

(1) 流域在三峡库区内的空间差异造成了不同流域回水区水域生态系统存在较大差别。龙溪河位

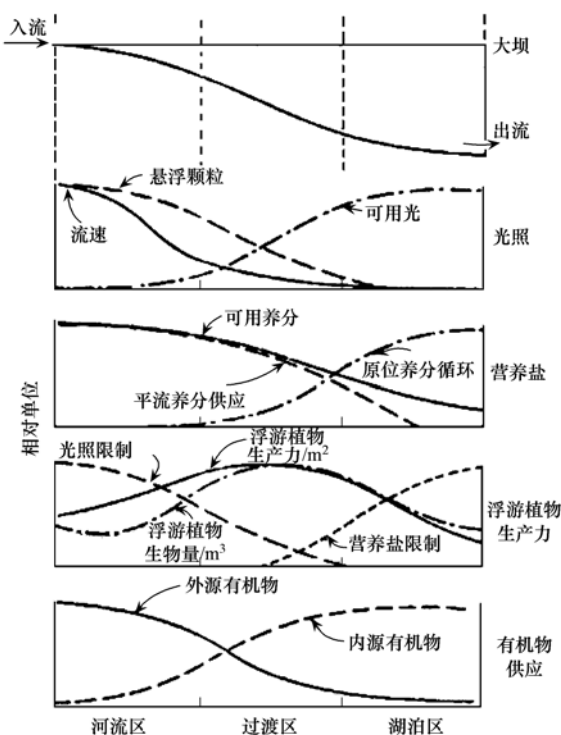


图 10 水库中各环境变量的纵向梯度分布及对藻类生长率和生物量的影响外源和内源有机物相对重要性的纵向变化^[24]

Fig. 10 A cross-sectional view of gradients in environmental factors along the longitudinal axis of an idealized reservoir

于三峡库尾,支流回水区长度较短,受回水顶托的影响较处于常年回水区的澎溪河弱,其回水区水体滞留时间短于澎溪河(HRT在夏季大部分小于2 d,冬季最长不超过20 d),夏季低水位运行时期龙溪河呈现天然河流而在冬季高水位则呈现过流型湖泊的水域生态特征。在水库调度运行下,龙溪河水体滞留时间呈现不稳定、剧烈变化的特点。物理背景的剧烈变动特性不仅使的龙溪河各主要环境参量,如DO、pH、各形态营养物等均呈现显著的季节波动变化过程,而且水域生境的不稳定性也难以满足浮游植物稳定生长的要求。上述推论揭示了本研究前述关于龙溪河氮磷等营养物浓度偏高,但浮游植物总体水平较澎溪河明显偏低的主要原因,这使得龙溪河浮游植物固碳能力显著受限。位于三峡库区中段的澎溪河回水区云阳段位于145 m以下永久淹没区内。经过了4 a水库初期运行阶段的季节性调蓄,水域生态系统呈现相对稳定的季节性、周期性变化过程。水体滞留时间的显著延长(水体滞留时间冬季最高可达160 d以上)^[25]为浮游植物生长创造了相对于龙溪河回水区更为适宜的生境条件,而澎溪河相对较优的光热条件在一定程度上也刺激了浮游

植物的生长,浮游植物生长过程对碳循环的影响显著较强,浮游植物固碳对澎溪河回水区 CO_2 通量变化的影响明显。

(2)流域污染负荷水平和受淹区域有机质含量差异是决定不同流域回水区温室气体通量水平的重要因素。龙溪河流域的污染负荷水平、淹没陆域SOM、STN等重要指标均显著高于澎溪河流域,使得在龙溪河回水区内主要生源要素浓度水平均显著高于澎溪河。在缺乏有效浮游植物光合固碳能力的前提下,进入水体的有机污染负荷增加势必提高水柱中细菌对有机质的降解,刺激龙溪河的温室气体通量水平总体上显著高于澎溪河。水温升高刺激细菌生长并强化了其对有机质的降解能力促使龙溪河温室气体通量水平显著增加,对水柱中DO的消耗亦明显增强。这使得龙溪河呈现出天然河流的生态特征。而澎溪河流域污染负荷水平较弱于龙溪河流域,陆源输入的有机质对其温室气体通量的贡献亦可能相对较弱,加之澎溪河流域浮游植物光合固碳季节过程对温室气体通量影响明显^[26],双重影响下使得澎溪河水域温室气体通量水平相对较低,且在浮游植物生长周期的作用下呈现剧烈季节变化的总体特征。固碳能力差别和污染负荷差别都是影响两条支流的温室气体通量的主要原因,但二者的定量贡献如何,需要更进一步的细致研究。

另外,本研究发现尽管流域污染负荷水平、营养盐等的比较能够用于解释龙溪河 CH_4 通量水平显著高于澎溪河,但相关性分析中 CH_4 的通量水平并未受到水质理化指标、营养物浓度等主要环境变量变化的显著影响,且澎溪河回水区双江大桥采样点处的水深远深于龙溪河的相应采样点,尚难以进一步理清在两条支流 CH_4 通量的主要影响因素并推测其主控生态过程。

4 结论

(1)龙溪河采样点水-气界面 CO_2 、 CH_4 年平均扩散通量为: $(7.30 \pm 1.89) \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 、 $(0.11 \pm 0.095) \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$;澎溪河采样点 CO_2 、 CH_4 年平均扩散通量为: $(0.71 \pm 0.46) \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 、 $(0.0074 \pm 0.0017) \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 。

(2)龙溪河、澎溪河分别作为三峡水库的河流区与过渡区,水库湖沼学特征差异明显。浮游植物固碳能力和流域污染负荷的差异是龙溪河、澎溪河 CO_2 通量水平和季节变化过程呈现差异的主要因素,二者的定量贡献需进一步细致研究。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Meybeck M. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers[J]. *American Journal of Science*, 1982, **282**(4): 401-405.
- [3] Ittekkot V. Global trends in the nature of organic matter in river suspensions[J]. *Nature*, 1988, **332**(6163): 436-438.
- [4] Schlesinger W H, Melack J M. Transport of organic carbon in the world's rivers[J]. *Tellus*, 1981, **33**(2): 172-187.
- [5] Petis G E. Impounded rivers: perspectives for ecological management[M]. New York: John Wiley and Sons, 1984. 328.
- [6] Hart D D, Johnson T E, Bushaw-Newton K L, *et al.* Dam removal: challenges and opportunities for ecological research and river restoration[J]. *Bioscience*, 2002, **52**(8): 669-681.
- [7] 刘丛强, 汪福顺, 王雨春, 等. 河流筑坝拦截的水环境响应——来自地球化学的视角[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, **18**(4): 384-396.
- [8] 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.
- [9] Tremblay A, Lambert M, Gagnon L. Do hydroelectric reservoirs emit greenhouse gases? [J]. *Environmental Management*, 2004, **33**(S1): 509-517.
- [10] 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): 281-288.
- [11] Louis V L S, Kelly C A, Duchemin É, *et al.* Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate[J]. *Bioscience*, 2000, **50**(9): 766-775.
- [12] 王亮, 肖尚斌, 刘德富, 等. 香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1471-1475.
- [13] 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 Environmental Sciences*, 2011, **23**(12): 2029-2033.
- [14] 湛芸, 何丙辉, 赵秀兰, 等. 小江流域农地水土流失对水体富营养化的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, **24**(4): 31-34, 43.
- [15] Lambert M, Fréchet J L. Analytical techniques for measuring fluxes of CO₂ and CH₄ from hydroelectric reservoirs and natural water bodies [A]. In: Therrien A, Varfalvy L, Roehm C (Eds.). GHG emissions from boreal reservoirs and natural aquatic ecosystems, in greenhouse gas emissions-fluxes and processes[C]. Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2005. 37-60.
- [16] Bellido J L, Tulonen T, Kankaala P, *et al.* CO₂ and CH₄ fluxes during spring and autumn mixing periods in a boreal lake (Pääjärvi, southern Finland) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, **114**(4): G04007.
- [17] 郭劲松, 蒋滔, 李哲, 等. 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[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1463-1470.
- [18] 国家环境保护总局. 水与废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 243-285.
- [19] 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. 228-246.
- [20] Straskraba M, Tundisi J G. Guidelines of lake management, vol. 9: Reservoir water quality management [M]. Shiga Japan: International Lake Environment Committee Foundation, 1999. 1-60.
- [21] Kimmel B L, Groeger A W. Factors controlling primary production in lakes and reservoirs: a perspective[J]. *Lake and Reservoir Management*, 1984, **1**(1): 277-281.
- [22] Komarkova J, Hejzlar J. Summer maxima of phytoplankton in the Rimov reservoir in relation to hydrologic parameters and phosphorus loading[J]. *Archiv Für Hydrobiologie*, 1996, **136**(2): 217-236.
- [23] Armengol J, Garcia J C, Comerma M, *et al.* Longitudinal processes in canyon type reservoirs: the case of Sau (N. E. Spain) [A]. In: Tundisi J G, Straskraba M (Eds.). Theroretical ecology and its application[M]. Brazil: Brazilian Academy of Sciences and Backhuys Publishers, 1999. 313-345.
- [24] Thornton K W, Kimmel B L, Payn F E. Reservoir limnology: ecological perspectives[M]. New York: A Wiley-Interscience Publication, 1990. 133-160.
- [25] 李哲, 郭劲松, 方芳, 等. 三峡水库澎溪河(小江)回水区一维水动力特征分析[J]. *重庆大学学报*, 2012, **35**(5): 143-150.
- [26] 郭劲松, 蒋滔, 李哲, 等. 三峡水库澎溪河春季水华期 p(CO₂)及影响因素分析[J]. *水科学进展*, 2011, **22**(6): 829-838.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} over Eastern China from MODIS Aerosol Optical Depth Using the Back Propagation Neural Network	GUO Jian-ping, WU Ye-rong, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (817)
Comparison of Atmospheric Particulate Matter and Aerosol Optical Depth in Beijing City	LIN Hai-feng, XIN Jin-yuan, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i> (826)
Impacts of Meteorological Factors on Atmospheric Methane Mole Fractions in the Background Area of Yangtze River Delta	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, GU Jun-qiang, <i>et al.</i> (835)
Dispersion and Analysis of Odor Pollution in Landfill Area Under the Enclosed Operation Condition	LU Peng, WU Shi-xing, DAI Zhi-feng, <i>et al.</i> (842)
Distribution Characteristics and Sea-Air Fluxes of Volatile Halocarbons in the East China Sea in Winter	HE Zhen, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng (849)
Intra- and Inter-annual Variabilities of Particulate Organic Matter in the Mirs Bay from 2000 to 2010	LI Xu-lu, ZHOU Yi-pin, XIA Hua-yong (857)
Phytoplankton Assemblages and Their Relation to Environmental Factors by Multivariate Statistic Analysis in Bohai Bay	ZHOU Ran, PENG Shi-tao, QIN Xue-bo, <i>et al.</i> (864)
Characteristics and Evolution of Hydrochemical Compositions of Freshwater Lake in Tibetan Plateau	WANG Peng, SHANG Ying-nan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (874)
Estimation of Nonpoint Source Pollutant Loads and Optimization of the Best Management Practices (BMPs) in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, LIU Pin (882)
An Object-Oriented Intelligent Engineering Design Approach for Lake Pollution Control	ZOU Rui, ZHOU Jing, LIU Yong, <i>et al.</i> (892)
Contribution of Plant Litters to Sediments Organic Matter in Jiulong River Estuary Wetland	LUO Zhuang-xi, QIU Zhao-zheng, WANG Zhen-hong, <i>et al.</i> (900)
Application of Tiered Approach to Assess the Impact of Backfilling Remediated Soil on Groundwater	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> (907)
Removal of Nitrate from Groundwater Using Permeable Reactive Barrier	LI Xiu-li, YANG Jun-jun, LU Xiao-xia, <i>et al.</i> (914)
Research on Pollution Load of Sediments in Storm Sewer in Beijing District	LI Hai-yan, XU Bo-ping, XU Shang-ling, <i>et al.</i> (919)
Occurrence and Risk Assessment of Five Selected PPCPs in Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	WEN Zhi-hao, DUAN Yan-ping, MENG Xiang-zhou, <i>et al.</i> (927)
Microbial Risk Assessment of Urban Water Bodies for Aesthetical and Recreational Uses	SUN Fu, SHA Jing, ZHANG Yi-fan, <i>et al.</i> (933)
Study on Removal of Di-(2-Ethylhexyl) Phthalate by Using of Small-Scale Biological Aerated Filter	LI Wei, ZHAO Jing, YU Jian, <i>et al.</i> (943)
Mechanism of Membrane Fouling and Filtration Characteristics in a Membrane Bioreactor for Industrial Wastewater Treatment	FAN Ju-hong, YU Su-lin, ZHANG Pei-shuai, <i>et al.</i> (950)
Enhanced Electro-Chemical Oxidation of Acid Red 3R Solution with Phosphotungstic Acid Supported on γ -Al ₂ O ₃	YUE Lin, WANG Kai-hong, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (955)
Degradation Kinetics of Activated Carbon Catalyzed Persulfate Oxidation Orange G	YANG Mei-mei, ZHOU Shao-qi, LIU Dan, <i>et al.</i> (962)
Study on the Start-up of the Anaerobic Baffled Reactor for Treating Alkali-dewighting and Dyeing-printing Wastewater	YANG Bo, ZHONG Qi-jun, LI Fang, <i>et al.</i> (968)
Study on the Pollutants Removal Performance Along the Advanced Treatment in Tannery Wastewater by O ₃ -BAF	YU Bin, LIU Rui, CHENG Jia-di, <i>et al.</i> (974)
Effect of Pilot UASB-SFSBR-MAP Process for the Large Scale Swine Wastewater Treatment	WANG Liang, CHEN Chong-jun, CHEN Ying-xu, <i>et al.</i> (979)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Municipal Wastewater and Studies on Its Characteristics Under the Continuous Flow	NIU Shu, DUAN Bai-chuan, ZHANG Zuo-li, <i>et al.</i> (986)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (I) : Model Constitution	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (993)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (II) : Process Simulation	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (998)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (III) : Model Application	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (1004)
Comparative Study on Water-air CO ₂ , CH ₄ Flux in Two Tributaries in the Three Gorges Reservoir, China	LI Zhe, BAI Lei, GUO Jin-song, <i>et al.</i> (1008)
Factors Influencing the Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Regimes	CHEN Shu-tao, LIU Qiao-hui, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1017)
Differences in Soil Respiration Between Cropland and Grassland Ecosystems and Factors Influencing Soil Respiration on the Loess Plateau	ZHOU Xiao-gang, ZHANG Yan-jun, NAN Ya-fang, <i>et al.</i> (1026)
Application and Benefit Evaluation of Tiered Health Risk Assessment Approach on Site Contaminated by Benzene	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, LIANG Jin, <i>et al.</i> (1034)
History of Heavy Metal Pollution from Tidal Flat in Haizhou Bay	ZHANG Rui, ZHANG Fan, LIU Fu-cheng, <i>et al.</i> (1044)
Accumulation, Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Surface Sediment of Caohai Plateau Wetland, Guizhou Province	ZHANG Qing-hai, LIN Chang-hu, TAN Hong, <i>et al.</i> (1055)
Assessment and Correlation Analysis of Heavy Metals Pollution in Soil of Dajinshan Island	CHENG Fang, CHENG Jin-ping, SANG Heng-chun, <i>et al.</i> (1062)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Stream Sediments from a Typical Nonferrous Metals Mining City	LI Ru-zhong, JIANG Yan-min, PAN Cheng-rong, <i>et al.</i> (1067)
Contamination and Health Risk for Heavy Metals via Consumption of Vegetables Grown in Fragmentary Vegetable Plots from a Typical Nonferrous Metals Mine City	LI Ru-zhong, PAN Cheng-rong, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1076)
Correlativity Study of the Distribution of Soil Magnetic Susceptibility and the Heavy Metal Contents in Xi'an City	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei, YANG Guang (1086)
Distribution Characteristics and Environmental Significance of Heavy Metals in Soil Particle Size Fractions from Tropical Forests in China	GONG Cang, XU Dian-dou, CHENG Hang-xin, <i>et al.</i> (1094)
Study on Phosphorus Adsorption Characteristic of Sediments in an Ecological Ditch	ZHANG Shu-nan, JIA Zhao-yue, XIAO Run-lin, <i>et al.</i> (1101)
Fractions and Adsorption Characteristics of Phosphorus on Sediments and Soils in Water Level Fluctuating Zone of the Pengxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	SUN Wen-bin, DU Bin, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1107)
Sorption Behavior of Triton X-100 on Loess and Affecting Factors	ZHONG Jin-kui, ZHAO Bao-wei, ZHU Kun, <i>et al.</i> (1114)
Residual Levels in Air, Soil and Soil-Air Exchange of Organochlorine Pesticides in Hami Region of Xinjiang and Its Potential Ecological Risk	MA Zi-long, MAO Xiao-xuan, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (1120)
Levels and Sources of Decabromodiphenyl Ether and Dechlorane Plus in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	HE Chang, JIN Jun, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (1129)
Vertical Distribution of PBDEs and DL-PCBs in Sediments of Taihu Lake	MA Zhao-hui, JIN Jun, QI Xue-kui, <i>et al.</i> (1136)
Characteristics of Organic Pollutants in the Sediments from a Typical Electronics Industrial Zone	LIU Jin, DENG Dai-yong, XU Mei-ying, <i>et al.</i> (1142)
Emission Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Exhaust Particles from a Diesel Car	TAN Pi-qiang, ZHOU Zhou, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (1150)
Characterization of PAHs in Fly Ashes from Coke Production	MU Ling, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (1156)
Comparison of PAHs Distribution in Stabilized Sludge by Sludge Drying Bed and Reed Bed	CUI Yu-bo, SUN Hong-jie, RAN Chun-qiu, <i>et al.</i> (1161)
Effects of Adsorbents on Partitioning and Fixation of Heavy Metals in the Incineration Process of Sewage Sludge	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu, CHEN Tao (1166)
Environmental Toxicity of Waste Foundry Sand	ZHANG Hai-feng, WANG Yu-jue, WANG Jin-lin, <i>et al.</i> (1174)
Construction and Properties of a Microbial Whole-cell Sensor CB10 for the Bioavailability Detection of Cr ⁶⁺	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xu-liang, <i>et al.</i> (1181)
Structure and Dynamics of Microbial Community in the Denitrifying Sulfide Removal Process	YU Hao, WANG Ai-jie, CHEN Chuan (1190)
Effects of Physico-chemical Parameters on the Abundance of the Denitrification-associated Genes <i>nirK</i> , <i>nirS</i> and <i>nosZ</i> During Agricultural Waste Composting	HU Chun-xiao, CHEN Yao-ning, ZHANG Jia-chao, <i>et al.</i> (1196)
Impact of PAHs on the Expression of PRDX in Earthworm (<i>Eisenia fetida</i>)	LIN Kang-li, ZHENG Sen-lin, SONG Yu-fang, <i>et al.</i> (1204)
Preparation of OMC-Au/L-Lysine/Au Modified Glassy Carbon Electrode and the Study on Its Detection Response to Hydroquinone and Catechol	ZHOU Yao-yu, TANG Lin, LI Zhen, <i>et al.</i> (1211)
Risk Communication in Construction of New Nuclear Power Plant	HE Gui-zhen, LÜ Yong-long (1218)

《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)

2013年3月15日 34卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 3 Mar. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人