

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第5期

Vol.34 No.5

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

基于过氧化物的消毒技术研究进展	习海玲,赵三平,周文	(1645)
环境损害评估:国际制度及对中国的启示	张红振,曹东,於方,王金南,齐霖,贾倩,张天柱,骆永明	(1653)
不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示	徐猛,颜增光,贺萌萌,张超艳,侯红,李发生	(1667)
蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展	张志剑,刘萌,朱军	(1679)
基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究	刁晓君,席北斗,何连生,邓祥征,吴锋,王鹏腾	(1687)
我国东北地区地表水酸化现状	徐光仪,康荣华,罗遥,段雷	(1695)
西安市对渭河水质的影响分析	于婕,李怀恩	(1700)
极端干旱水文年(2011年)夏季珠江口溶解氧的分布特征及影响因素研究	叶丰,黄小平,施震,刘庆霞	(1707)
应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准	韩超南,秦延文,郑丙辉,张雷,曹伟	(1715)
长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI和M-AMBI法	蔡文倩,孟伟,刘录三,朱延忠,周娟	(1725)
温州城市降雨径流中BOD ₅ 和COD污染特征及其初始冲刷效应	王骏,毕春娟,陈振楼,周栋	(1735)
影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究	余小龙,沈芳,张晋芳	(1745)
香溪河库湾春季pCO ₂ 与浮游植物生物量的关系	袁希功,黄文敏,毕永红,胡征宇,赵玮,朱孔贤	(1754)
紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响研究	雷雨,龙天渝,伞磊,安强,黄允秋	(1761)
高铁酸钾对水中藻类及其次生臭味污染物二甲基三硫醚同步去除研究	马晓雁,张泽华,王红宇,胡仕斐,李青松	(1767)
纳米Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ 非均相Fenton反应催化氧化邻苯二酚	何洁,杨晓芳,张伟军,王东升	(1773)
水中茶普生的紫外光降解机制及其产物毒性研究	马杜娟,刘国光,吕文英,姚锐,周丽华,谢成屏	(1782)
酸活化赤泥催化臭氧氧化降解水中硝基苯的效能研究	康雅凝,李华楠,徐冰冰,齐飞,赵伦	(1790)
镉污染应急处置含镉絮体稳定性实验研究	柳王荣,魏清伟,杨仁斌,许振成,曾东	(1797)
基于光学在线监测及形态学研究的絮凝体强度分析方法	金鹏康,冯永宁,王宝宝,王晓昌	(1802)
不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究	万金泉,胡梦蝶,马邕文,黄明智	(1808)
壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果	张聪璐,胡筱敏,英诗颖,王芳	(1815)
城市污水二级出水超滤膜污染与膜特性的研究	孟晓荣,张海珍,王磊,王旭东,赵亮	(1822)
倒置A ² /O-MBR处理城市污水的中试研究	张健君,邹高龙,杨淑芳,丁星,王莉,毛乾庄,杨丹	(1828)
不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究	袁莹,周伟丽,王晖,何圣兵	(1835)
短程同步硝化反硝化过程的脱氮与N ₂ O释放特性	梁小玲,李平,吴锦华,王向德	(1845)
基于固相萃取的水中多种有毒有害有机污染物富集方法优化	张明全,李锋民,吴乾元,胡洪营	(1851)
多环麝香污染胁迫对蚯蚓特异性蛋白基因表达的影响	陈春,刘潇威,郑顺安,周启星,李松	(1857)
浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评价	徐志荣,王浙明,许明珠,何华飞	(1864)
苯系物光催化开环降解产物低级醛类的健康效应	赵伟荣,廖求文,杨亚楠,戴九松	(1871)
四川妇女血清中多溴联苯醚的浓度水平与组成特征	邵敏,陈永亨,李晓宇	(1877)
咪唑类离子液体毒性的QSAR/QSPR研究	赵继红,赵永升,张宏忠,张香平	(1882)
宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征	樊新刚,米文宝,马振宁,王婷玉	(1887)
内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征	郭伟,付瑞英,赵仁鑫,赵文静,郭江源,张君	(1895)
福建省重点城市路面尘负荷及化学组成研究	郑桢,杨冰玉,吴水平,王新红,陈晓秋	(1901)
重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究	王玉玲,能昌信,王彦文,董路	(1908)
丛枝菌根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响	郭伟,赵仁鑫,赵文静,付瑞英,郭江源,张君	(1915)
海洋细菌N3对几种赤潮藻的溶藻效应	史荣君,黄洪辉,齐占会,胡维安,田梓杨,戴明	(1922)
1株分离自煤矿废水的铁硫氧化细菌LY01的鉴定及其氧化特性研究	刘玉娇,杨新萍,王世梅,梁银	(1930)
1株苯并[a]芘高效降解菌的筛选与降解特性	蔡瀚,尹华,叶锦韶,常晶晶,彭辉,张娜,何宝燕	(1937)
2,2',4,4'-四溴联苯醚的好氧微生物降解	张姝,Giulio Franco,李晓豹,卢晓霞,侯珍,杨君君	(1945)
养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群B-737及发酵特性	裴瑞林,信欣,张雪乔,周迎芹,姚力,羊依金	(1951)
1997~2011年北京市空气中酸性物质与降水组分变化趋势的相关性分析	陈圆圆,田贺忠,杨懂艳,邹本东,鹿海峰,林安国	(1958)
黄山降水酸度及电导率特征分析	石春娥,邓学良,吴必文,洪杰,张苏,杨元建	(1964)
夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析	文彬,银燕,秦彦硕,陈魁	(1973)
广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征	谭吉华,赵金平,段菁春,马永亮,贺克斌,杨复沫	(1982)
福建省三大城市冬季PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	陈衍婷,陈进生,胡恭任,徐玲玲,尹丽倩,张福旺	(1988)
上海市含碳大气颗粒物的粒径分布	袁宁,刘卫,赵修良,王广华,姚剑,曾友石,刘遂庆	(1995)
上海市浦东城区二次气溶胶生成的估算	崔虎雄,吴迺名,段玉森,伏晴艳,张懿华,王东方,王茜	(2003)
沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义	钱鹏,郑祥民,周立旻	(2010)
厦门秋季近郊地面CO ₂ 浓度变化特征研究	李燕丽,穆超,邓君俊,赵淑惠,杜可	(2018)
GC-MS和GC-ECD同时在线观测本底大气中的HCFC-142b	郭立峰,姚波,周凌晔,李培昌,许林	(2025)
城市居家环境空气真菌群落结构特征研究	方治国,欧阳志云,刘芃,孙力,王小勇	(2031)
城市污水处理厂挥发性芳香烃的气味指纹及定量评价研究	郭薇,王伯光,唐小东,刘舒乐,何洁,张春林	(2038)
内河多点分散码头大气污染叠加影响特征	刘建昌,李兴华,徐洪磊,程金香,王忠岱,肖杨	(2044)
义马煤中铅的热稳定性及转化行为研究	刘瑞卿,王钧伟	(2051)
基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究	谢元博,李巍	(2057)
《环境科学》征订启事(1652)	《环境科学》征稿简则(1789)	信息(1807,1821,1881,1987)
编辑征稿通知(1863)		

香溪河库湾春季 $p\text{CO}_2$ 与浮游植物生物量的关系

袁希功^{1,2}, 黄文敏¹, 毕永红^{1*}, 胡征宇¹, 赵玮^{1,2}, 朱孔贤^{1,2}

(1. 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 测定了春季香溪河库湾的水温(WT)、pH、 HCO_3^- 浓度、溶氧(DO)及叶绿素a(Chl-a)浓度等参数. 根据化学平衡和亨利定律计算二氧化碳分压($p\text{CO}_2$), 以薄层扩散模型计算碳通量. 结果表明, 香溪河库湾春季表层水体 $p\text{CO}_2$ 在 8.34 ~ 168.70 μatm 间波动, 平均为 49.01 μatm . 空间上, $p\text{CO}_2$ 自上游到河口呈明显上升趋势, Chl-a浓度则逐渐下降. 时间上, 昼夜 $p\text{CO}_2$ 在 74.43 ~ 168.70 μatm 间波动, 平均为 117.92 μatm , Chl-a浓度在 2.22 ~ 4.55 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 平均为 3.04 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 香溪河库湾春季表层水体 $p\text{CO}_2$ 与 Chl-a浓度之间存在极显著的负相关关系($r = -0.844$, $P < 0.01$), 浮游植物光合作用是 $p\text{CO}_2$ 的主要影响因素. 香溪河库湾春季是 CO_2 的汇, CO_2 吸收速率为 $-35.17 \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$.

关键词: 三峡水库; 香溪河库湾; 二氧化碳分压; 叶绿素 a; 碳通量

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)05-1754-07

Relationship Between $p\text{CO}_2$ and Algal Biomass in Xiangxi Bay in Spring

YUAN Xi-gong^{1,2}, HUANG Wen-min¹, BI Yong-hong¹, HU Zheng-yu¹, ZHAO Wei^{1,2}, ZHU Kong-xian^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Water temperature (WT), pH, HCO_3^- , dissolved oxygen and the concentration of Chl-a in Xiangxi Bay were measured in spring. The partial pressure of carbon dioxide was calculated by the chemical balance and Henry's Law while CO_2 flux by the thin-layer diffusion model. Results showed that $p\text{CO}_2$ of surface water in Xiangxi Bay varied from 8.34 μatm to 168.70 μatm with a mean of 49.01 μatm . $p\text{CO}_2$ increased along the stream with Chl-a decreased from upstream to the estuary. The mean of $p\text{CO}_2$ was 117.92 μatm on the diurnal scale, ranging from 74.43 μatm to 168.70 μatm , and the mean concentration of Chl-a was 3.04 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ with the range from 2.22 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ to 4.55 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$. There were statistically significant negative correlations between values for $p\text{CO}_2$ and Chl-a ($r = -0.844$, $P < 0.01$). Phytoplankton photosynthesis in Xiangxi Bay played a crucial role in the spatial and temporal distribution of $p\text{CO}_2$. The undersaturation observed suggests that surface waters in Xiangxi Bay represented a sink for atmospheric CO_2 in spring, and the exchange rate of CO_2 was estimated to be $-35.17 \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$.

Key words: Three Gorges Reservoir; Xiangxi Bay; $p\text{CO}_2$; Chl-a; CO_2 flux

温室气体引起的全球变暖问题正吸引着越来越多的关注. 二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)、氧化亚氮(N_2O)和臭氧(O_3)是地球大气中主要的温室气体. 河流湖泊等淡水生态系统作为陆地和海洋碳循环的中转站, 在全球碳循环中起着不可忽视的作用^[1~3]. 直接影响碳通量的是水体和大气之间的二氧化碳分压差^[3] ($\Delta p\text{CO}_2$, 为便于与大气比较, 分压单位采用 μatm). 水体 $p\text{CO}_2$ 受多种因素的影响, 其中水温和叶绿素的作用尤为重要^[4]. 浮游植物的光合作用吸收二氧化碳早已为人们所认识, 在海洋中, 叶绿素含量作为估算二氧化碳通量的参数也有了一定的应用, 但这类应用主要基于遥感研究生产力较低的海洋中^[4~6], 对河流水库叶绿素与 $p\text{CO}_2$ 关系的研究目前还不充分^[6]. 近年来对三峡水库温室气体的争论日甚^[7]. 迄今为止, 对于三峡水库温室气体排放的研究多存在片面性, 大多数对于“源汇”命

的判断都只基于白天的碳通量^[8~11], 忽略了昼夜变化; 或者只关注某一天的昼夜通量变化^[12, 13], 缺乏同期较大时空尺度的观测数据. 因此有必要深入研究三峡水体叶绿素与 $p\text{CO}_2$ 的关系及其时空动态, 确定水库在温室气体排放的源汇地位.

1 材料与方法

1.1 采样点与采样方法

香溪河是三峡水库湖北库区最大的一级支流, 位于湖北省西北部, 河流全长 94 km, 流域范围 $110^\circ25' \sim 111^\circ06' \text{E}$ 、 $30^\circ57' \sim 31^\circ34' \text{N}$, 流域总面积 3 099 km^2 , 为峡谷型河流^[14, 15]. 三峡水库蓄水后,

收稿日期: 2012-08-13; 修订日期: 2012-10-15

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2010CB955904); 国家自然科学基金项目(31100340)

作者简介: 袁希功(1987~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为淡水生态学, E-mail: yxg1987@126.com

* 通讯联系人, E-mail: biyh@ihb.ac.cn

秭归县香溪镇至兴山县高阳镇(现更名昭君镇)河道水位抬升,变为库湾。由于水体动力学和营养程度的变化,香溪河库湾多次发生藻类水华,水华期间藻类生物量显著上升^[16]。

2011 年春季在香溪河库湾及其支流高岚河共设置了 7 个采样点,分别位于香溪河口(xx01)、官庄坪(xx02)、盐关(xx03)、峡口(xx04)、高岚河吴家湾(xx05)、平邑口(xx06)和昭君(xx07),其中昼夜变化采样在峡口进行。具体位置如图 1 所示。

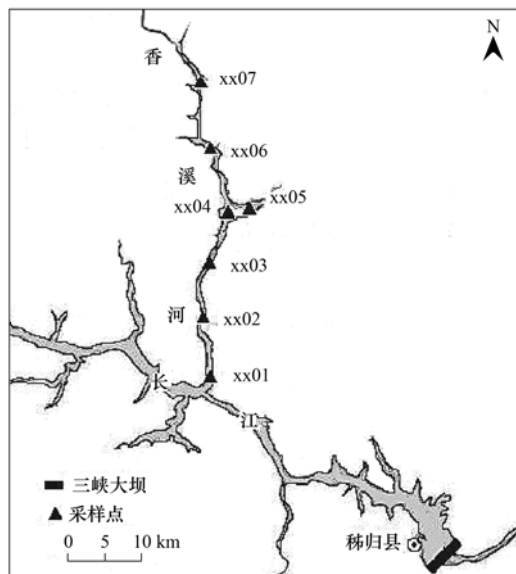


图 1 采样点设置示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites

实验期间进行的 6 次采样中,4 月 1 日、4 月 14 日、4 月 18 日均为晴天,4 月 5 日为阴雨天,4 月 9 日为雨后初晴第一天。5 月 13~14 日昼夜采样为晴天。采样期间气温变化在 10.8~27.9℃ 之间。样品采集时间每次都在 10:00~12:00 间进行,分成 4 个采样小组同时开展样品采集工作,尽量在较短的时间完成样品采集以确保数据的可比性。

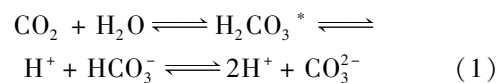
样品采集参照文献[17]。水样用改良式北原采水器取自 0.5 m 水层。pH、DO ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、WT ($^{\circ}\text{C}$)、电导率 ($\text{EC}/\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)、氧化还原电位 (ORP/mV) 用 YSI ProPlus 多参数水质测定仪 (USA) 现场测得。水体透明度 (Trans/cm) 用萨氏透明度盘测定。浊度 (Turb/NTU) 以浊度计测定。气温 ($^{\circ}\text{C}$)、风速 ($\text{U}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 采用 Kestrel 4200 手持式风速仪 (USA) 测定。化学需氧量 (高锰酸盐指数/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、总氮 ($\text{TN}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、总磷 ($\text{TP}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、硝态氮 ($\text{NO}_3^-/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、氨氮 ($\text{NH}_4^+/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、正磷酸盐 ($\text{PO}_4^{3-}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 的测定参照文献[18]。

HCO_3^- 浓度现场采集水样后 12 h 内用 $0.02 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐酸滴定测得。水样采集后以 Whatman $0.45 \mu\text{m}$ 玻璃纤维滤膜过滤后冰冻保存,采用丙酮萃取分光光度法测定 Chl-a 的含量^[19]。昼夜采样只测定 WT、AT、U、pH、Chl-a 和 HCO_3^- 浓度。

1.2 水体 $p\text{CO}_2$ 的计算

据 pH、 HCO_3^- 及亨利常数 K_h 进行换算,并用 T 进行校正^[20~22]。

水体中溶解无机碳 (DIC) 由 CO_2 、 H_2CO_3^* 、 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 组成,平衡时各组份在水溶液中的浓度主要与 pH、水温和水溶液中离子强度有关。由于 HCO_3^- 、pH、水温和阴阳离子均已测出,根据 CO_2 在水溶液中的碳酸平衡原理[式(1)~(4)],计算水溶液中二氧化碳分压^[21,23]。



$$K_{\text{CO}_2} = [\text{H}_2\text{CO}_3^*]/[p\text{CO}_2] \quad (2)$$

$$K_1 = [\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]/[\text{H}_2\text{CO}_3^*] \quad (3)$$

$$K_2 = [\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}]/[\text{HCO}_3^-] \quad (4)$$

上述各式中 K_i 为平衡常数,其值主要通过以下几个方程计算:

$$pK_{\text{CO}_2} = -7 \times 10^{-5}T^2 + 0.016T + 1.11 \quad (5)$$

$$pK_1 = 1.1 \times 10^{-4}T^2 - 0.012T + 6.58 \quad (6)$$

$$pK_2 = 9 \times 10^{-5}T^2 - 0.0137T + 10.62 \quad (7)$$

根据亨利定律, $p\text{CO}_2$ 可采用根据以下方程计算。

$$p\text{CO}_2 = \frac{[\text{H}_2\text{CO}_3^*]}{K_{\text{CO}_2}} = \frac{[\text{H}^+] \cdot [\text{HCO}_3^-]}{K_{\text{CO}_2} \times K_1} \quad (8)$$

1.3 气体通量估算的薄层扩散模型计算

单位面积、单位时间的水气界面 CO_2 的交换通量一般按如下通式进行计算:

$$F = K \times \Delta p\text{CO}_2 \quad (9)$$

式中, K 代表气体交换输运速率; $K = k \times a$, k 是水-气间气体交换系数; a 是某温盐条件下的 CO_2 溶解度。采用 Wanninkhof^[24] 提出的计算淡水的水-气交换系数模式计算 k 值,估算 CO_2 的水-气界面交换通量:

$$k = 0.39 \times U_{10}^2 \times (600/S_{\text{ct}})^{1/2} (\text{平均风速}) \quad (10)$$

式中, U_{10} 为距水面 10 m 处的风速大小,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; S_{ct} 是 $t^{\circ}\text{C}$ 下 CO_2 的 Schmidt 常数,对淡水而言:

$$S_{\text{ct}} = 1911.1 - 118.11t + 3.4527t^2 - 0.04132t^3 \quad (11)$$

a 的计算式如下:

$$\ln a = A_1 + A_2(100/T) + A_3 \ln(T/100) + S\% \times [B_1 + B_2(T/100) + B_3(T/100)^2] \quad (12)$$

当 a 的单位为 $\text{mmol} \cdot (\text{L} \cdot \text{atm})^{-1}$ 时, 常数 $A_1 = -58.0931$, $A_2 = 90.5069$, $A_3 = 22.2940$, $B_1 = 0.027766$, $B_2 = -0.025888$, $B_3 = 0.0050578$; T 是热力学温度.

1.4 数据处理

图表制作采用 OriginPro 8.5, 数据分析采用 SPSS 13.0 完成.

2 结果与分析

2.1 香溪河库湾 $p\text{CO}_2$ 变化

香溪河库湾春季表层水体 $p\text{CO}_2$ 在 $8.34 \sim 166.23 \mu\text{atm}$ 之间, 平均值为 $49.01 \mu\text{atm}$ (图 2). 从空间上看, 沿河流流向, 即从 xx07 ~ xx01 总体呈上升趋势. 下游的 xx01 在各次采样中, $p\text{CO}_2$ 基本都是最高的, 平均值为 $95.63 \mu\text{atm}$; 而上游的 xx06 和 xx07 都保持在极低的水平, 平均值为 $21.67 \mu\text{atm}$. 从时间上看, $p\text{CO}_2$ 大致有一个上升的趋势. 在 4 月 1 日的平均值最低, 为 $24.81 \mu\text{atm}$; 4 月 5 日持续阴雨天时出现了较大幅度的上升后 (上升 $27.12 \mu\text{atm}$), 4 月 9 日天晴时降低至 $30.63 \mu\text{atm}$; 尤其在晴天时 $p\text{CO}_2$ 极为稳定的上游的 xx06 和 xx07 样点

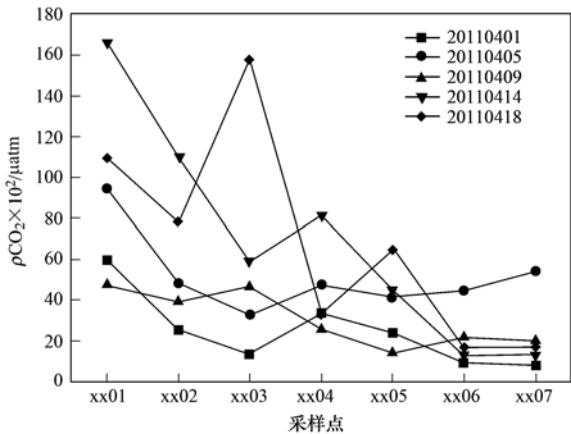


图 2 香溪河库湾采样期间 $p\text{CO}_2$ 分布
Fig. 2 Fluctuation of $p\text{CO}_2$ along Xiangxi Bay during sampling period

μatm), 阴雨天的分压值平均比晴天要高 $34.70 \mu\text{atm}$.

2.2 香溪河库湾 Chl-a 浓度变化

表层水体 Chl-a 浓度可以定量表征表层水体中浮游植物的生物量. 如图 3 所示, 香溪河库湾春季调查期间 Chl-a 浓度在 $2.19 \sim 132.64 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间, 平均值为 $31.92 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 从空间上看, Chl-a 浓度从 xx01 ~ xx07 总体呈增长趋势, 全河以 xx04 为分界, 下游总体水平较低 (平均值为 $18.25 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 包括 xx04), 上游相对较高 (平均值 $50.15 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 包括 xx05). 从时间上看, 除 xx05 外, 4 月 1 日的 Chl-a 浓度是整个采样期间最高的. 4 月 5 日整条河流表层 Chl-a 浓度降低并趋向一致, 维持在一个较低的水平 (平均值 $20.06 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$). 直到 4 月 9 日天气转晴后, 香溪河库湾干流表层水体的 Chl-a 水平仍然在低位徘徊, 支流 xx05 的 Chl-a 却迅速上升, 并达到采样期间的最大值. 4 月 14 日上游 xx06 和 xx07 的 Chl-a 浓度大幅回升到接近 4 月 1 日的水平, 中下游波动很小. 4 月 18 日, 全河较 14 日水体表层 Chl-a 浓度都有所降低.

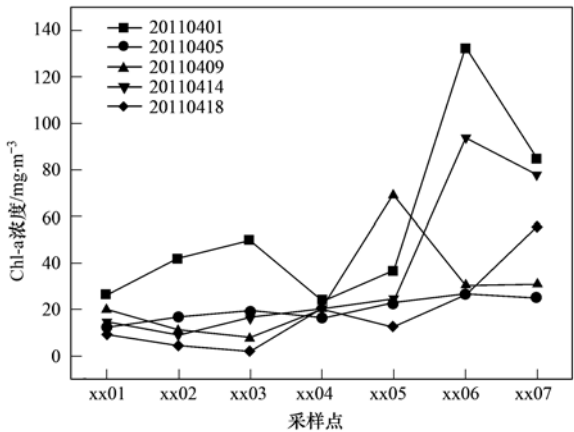


图 3 香溪河库湾采样期间 Chl-a 浓度分布
Fig. 3 Fluctuation of Chl-a along Xiangxi Bay during sampling period

2.3 香溪河库湾 $p\text{CO}_2$ 、Chl-a 浓度及环境因子之间的相关分析

香溪河库湾春季 $p\text{CO}_2$ 和 Chl-a 浓度及各理化参数测定平均值结果如表 1.

表 1 香溪河库湾春季水体理化参数平均值 (算术平均值 $\pm$ 标准差, $n = 35$)

Table 1 Means of water physical and chemical indices from Xiangxi Bay in spring (Mean $\pm$ Standard Deviation, $n = 35$)										
指标	$p\text{CO}_2/\mu\text{atm}$	Chl-a/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	WT/ $^{\circ}\text{C}$	pH	EC/ $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	DO/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	ORP/mV	Turb/NTU	$U_{10}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	
均值 $\pm$ 标准差	49.01 ± 39.21	31.92 ± 28.60	15.15 ± 2.16	8.97 ± 0.33	336.77 ± 34.18	13.75 ± 3.40	64.33 ± 17.08	4.24 ± 1.64	2.00 ± 1.16	
指标	SD/cm	AT/ $^{\circ}\text{C}$	COD/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TP/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{PO}_4^{3-}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{NH}_4^{+}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{NO}_3^{-}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TN/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{HCO}_3^{-}/\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	
均值 $\pm$ 标准差	186.71 ± 82.78	19.17 ± 5.54	2.26 ± 0.79	0.26 ± 0.15	0.21 ± 0.15	0.07 ± 0.03	0.84 ± 0.44	1.21 ± 0.34	2.40 ± 0.20	

将数据进行相关性分析,由于数据并不全都具有正态性,故采用非参数检验的方法. 检验结果如表 2.

表 2 香溪河春季 $p\text{CO}_2$ 和 Chl-a 及水体理化参数 Spearman 相关分析¹⁾ ($n = 35$)

Table 2 Spearman's correlation coefficients of $p\text{CO}_2$, Chl-a and water physicochemical indices from Xiangxi Bay in spring ($n = 35$)															
	$p\text{CO}_2$	Chl-a	pH	DO	Turb	Trans	EC	ORP	WT	COD	TP	PO_4^{3-}	NH_4^+	NO_3^-	TN
$p\text{CO}_2$	1.000														
Chl-a	-0.844 **	1.000													
pH	-0.968 **	0.800 **	1.000												
DO	-0.918 **	0.888 **	0.906 **	1.000											
Turb	-0.607 **	0.670 **	0.501 **	0.535 **	1.000										
Trans	0.735 **	-0.810 **	-0.724 **	-0.721 **	-0.825 **	1.000									
EC	0.750 **	-0.665 **	-0.825 **	-0.657 **	-0.445 *	0.619 **	1.000								
ORP	0.247	-0.108	-0.207	-0.085	-0.034	0.150	0.113	1.000							
WT	-0.293	0.204	0.471 **	0.319	0.062	-0.188	-0.628 **	0.053	1.000						
COD	-0.639 **	0.777 **	0.596 **	0.717 **	0.756 **	-0.746 **	-0.467 **	0.091	0.219	1.000					
TP	-0.326	0.335 *	0.265	0.223	0.419 *	-0.339 *	-0.353 *	-0.137	0.174	0.467 **	1.000				
PO_4^{3-}	-0.211	0.178	0.177	0.111	0.291	-0.210	-0.317	-0.160	0.203	0.310	0.917 **	1.000			
NH_4^+	0.326	-0.421 *	-0.375 *	-0.428 *	-0.151	0.279	0.341 *	0.092	-0.318	-0.241	-0.145	-0.031	1.000		
NO_3^-	0.797 **	-0.775 **	-0.828 **	-0.702 **	-0.507 **	0.674 **	0.917 **	0.173	-0.492 **	-0.557 **	-0.491 **	-0.446 **	0.254	1.000	
TN	0.585 **	-0.541 **	-0.608 **	-0.457 **	-0.475 *	0.532 **	0.815 **	0.138	-0.370 *	-0.405 *	-0.457 **	-0.466 **	0.186	0.861 **	1.000

1) * 表示双尾检验在 0.05 水平上显著相关, ** 表示双尾检验在 0.01 水平上显著相关

对香溪河库湾水体 Chl-a 和 $p\text{CO}_2$ 进行曲线拟合,幂函数的决定系数 R^2 达到 0.734,是曲线拟合中最高的,说明拟合出的最好的曲线方程应该是幂函数 $y = 444.912 \cdot x^{-0.796}$ ($n = 35, P < 0.01$). 由此函数可以推算,晴朗天气下 Chl-a 浓度若低于 $0.69 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,水体 $p\text{CO}_2$ 总会高于大气 $p\text{CO}_2$,导致水体向大气排放 CO_2 .

2.4 香溪河库湾 $p\text{CO}_2$ 和 Chl-a 浓度的昼夜变化

如图 4 所示,香溪河库湾表层水体 $p\text{CO}_2$ 昼夜变化在 $74.43 \sim 168.70 \text{ } \mu\text{atm}$ 之间,平均值为 $117.92 \text{ } \mu\text{atm}$. 采样自上午 08:00 开始,总体上 $p\text{CO}_2$ 缓慢下降,到下午 14:00 左右到 16:00 左右之间有一次大幅降低的过程,到 18:00 左右降到最低. 从下午 18:00 左右开始小幅回升,20:00 后上升幅度较大,到凌晨 05:00 左右达到最高后大幅降低.

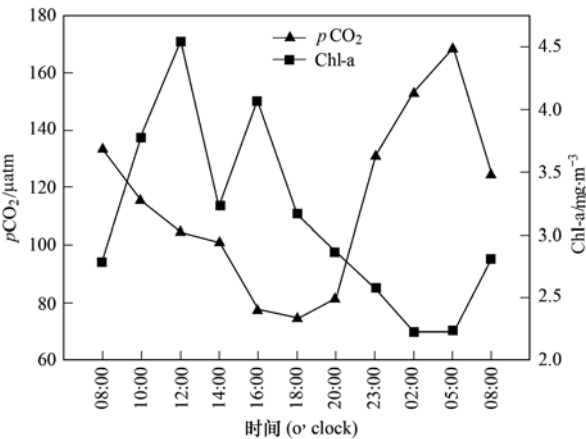


图 4 香溪河库湾 $p\text{CO}_2$ 和 Chl-a 浓度昼夜变化

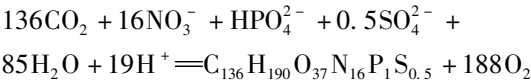
Fig. 4 Diurnal variation of $p\text{CO}_2$ and Chl-a in Xiangxi Bay

表层水体 Chl-a 浓度昼夜变化在 $2.22 \sim 4.55 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,平均值为 $3.04 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,与 $p\text{CO}_2$ 的变化基本上是一个相反的过程,但略有滞后. Chl-a 浓度自早上 08:00 左右起快速上升,到 12:00 左右达到最大值 $4.55 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,其后 14:00 左右有一次下降过程,16:00 左右光照强度降低后藻类重新上浮,此后 Chl-a 浓度逐步降低,到凌晨 02:00 左右达到最小值 $2.22 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 并一直保持到凌晨 05:00 左右. 日出后 Chl-a 浓度重新上升.

3 讨论

3.1 香溪河库湾春季 $p\text{CO}_2$ 、Chl-a 浓度及环境因子之间的关系

表 2 显示,香溪河库湾水体 $p\text{CO}_2$ 与 Chl-a 浓度之间存在极显著的负相关关系 ($r = -0.844, P < 0.01$),即香溪河库湾春季表层水体 $p\text{CO}_2$ 随藻类生物量的增长而显著降低,这与郭劲松等^[8]春季在小江的研究结果一致. 浮游植物的光合作用可用下式表示^[25]:



河流 $p\text{CO}_2$ 受水体内部碳动态和上游陆地生态系统的生物地球化学过程所控制,作为水体内部碳动态的一个方面,藻类的光合作用将水中溶解的无机碳转化为有机碳,使水中 $p\text{CO}_2$ 降低,而且还从水体中吸收溶解的营养盐,如硝酸盐和磷酸盐,使得表层水的碱度和 pH 升高,也进一步降低水中

$p\text{CO}_2$ [1], 本研究中 Chl-a 与硝酸盐的显著负相关 ($r = -0.775, P < 0.01$) 以及与 pH 的显著正相关关系 ($r = 0.800, P < 0.01$) 也可以佐证这一点。

另一方面, 藻类光合作用释放大量的氧气, 水体溶氧显著增加 (与 Chl-a 正相关系数达到 0.888, 与 $p\text{CO}_2$ 负相关系数 $-0.918, P$ 值皆小于 0.01)。4 月 1 日在 xx06 样点和 xx07 样点, Chl-a 含量在 $80 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上, 溶氧过饱和, 分别高达 $20.78 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $22.79 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 这与采样期间 $p\text{CO}_2$ 最低值的出现时间相同。

$p\text{CO}_2$ 与 EC 之间显著正相关 ($r = 0.750, P < 0.01$), 原因在于: 水体中 EC 主要由离子强度决定, 而淡水湖泊中的离子以 HCO_3^- 为主 [26], 所以淡水湖泊中 EC 主要受 HCO_3^- 浓度的影响, 而本研究中 $p\text{CO}_2$ 是以 HCO_3^- (见式 8) 计算得到。

研究期间天气以晴为主, 4 月 5 日左右的降雨雨量也不大, 水体中陆源性的有机和无机颗粒很少, 颗粒物以自养型的浮游植物为主, Turb 与 Chl-a 显著正相关 ($r = 0.670, P < 0.01$), Trans 与 Chl-a 显著负相关 ($r = 0.810, P < 0.01$), COD 与 Chl-a 显著正相关 ($r = 0.777, P < 0.01$)。Chl-a 可能是这些指标与 $p\text{CO}_2$ 之间显著相关关系的纽带。

在大多数低生产力的海洋水体中, 水温都是一个影响 $p\text{CO}_2$ 分布的重要因素, 在估计 $p\text{CO}_2$ 的经验性公式时, 一般都是把水温作为第一影响因子 [4, 6]。本实验所持续的时间较短, 期间水温波动很小, 数据分析显示本实验期间香溪河库湾春季水温与 $p\text{CO}_2$ 相关关系不显著 ($P > 0.05$), 从同一地区的研究来看, 赵炎等 [9]、赵玮 [10] 在香溪河库湾全年的研究中也并没有观测到它们之间的显著相关性。

阴雨天的 $p\text{CO}_2$ 比晴天的高, Morotta 等 [27] 在巴西 12 个湖泊的研究也得到了类似的结果, 他们认为降雨所带来的陆源高 $p\text{CO}_2$ 地下水输入造成了湖泊水体 $p\text{CO}_2$ 的大幅上升。但本研究的阴雨天降雨量很小, 地下水输入是否能够作为 $p\text{CO}_2$ 上升的主要影响因子还有待进一步研究。Morotta 等 [27] 也观测到强降雨后湖泊中有水生植物覆盖的水体 $p\text{CO}_2$ 的上升幅度要大于开阔水体, 原因可能在于低光照下浮游植物的低光合作用吸收的 CO_2 无法抵消水生生物呼吸作用释放的 CO_2 , 从而导致水体 $p\text{CO}_2$ 上升。降雨也可以通过化学稀释、湿沉降、增大水气界面的气体交换速率等方式, 使低 $p\text{CO}_2$ 水体的 $p\text{CO}_2$ 升高, 更接近于大气的水平 [28]。此外, 阴雨天

气压的变化可能一定程度上加剧了水体 $p\text{CO}_2$ 上升, 阴雨天的低气压导致水气界面的 $\Delta p\text{CO}_2$ 减小, 引起 CO_2 扩散速度慢, 这种情况影响了浮游植物的生命活动过程, 也在客观上造成了水体的 $p\text{CO}_2$ 上升。

经 Spearman 相关检验, 昼夜 $p\text{CO}_2$ 与 Chl-a 之间也具有显著的负相关关系 ($r = -0.761, P < 0.01$)。 $p\text{CO}_2$ 的日变化也表明, 夜间浮游植物的光合作用停止后 $p\text{CO}_2$ 稳步上升。光合作用与光照强度是单峰曲线的关系, 过高的光照会产生光抑制, 这可能是昼夜实验时正午 Chl-a 含量较前后两时间段低的原因。

综上所述, $p\text{CO}_2$ 与 Chl-a、pH、DO、Turb、Trans、COD、 NO_3^- 以及 Chl-a 与这些指标之间的显著相关关系说明浮游植物的光合作用是香溪河库湾春季表层水体 $p\text{CO}_2$ 分布的控制因子。

3.2 基于 Chl-a 的 $p\text{CO}_2$ 曲线回归模型

在 Chl-a 浓度很低时, $p\text{CO}_2$ 主要受水体理化因子的影响而表现出不同的波动状态, 但当叶绿素含量升高, 达到一定水平, 二氧化碳就会被光合作用持续大量消耗, 导致水体 $p\text{CO}_2$ 停留在的低于大气 $p\text{CO}_2$ 的水平。Rangama 等 [5] 在南大洋的研究表明, 在叶绿素水平低的区域, $p\text{CO}_2$ 和海表层水温呈负相关关系, 表明 $p\text{CO}_2$ 主要受水文混合过程影响。在叶绿素水平大于 $0.37 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的区域, $p\text{CO}_2$ 与叶绿素呈负相关关系, 表明 $p\text{CO}_2$ 的变化主要受生物活动对碳固定的影响。朱钰等 [4] 在南海的研究表明, 在 Chl-a 浓度为 $0.4 \sim 1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的海水中, 以温度和 Chl-a 双参数推算 $p\text{CO}_2$ 比只以单参数温度推算具有更高的精度。而在富营养化的香溪河库湾水体中, 本研究及相关研究都证明水温与碳循环过程的相关性不显著, 浮游植物光合作用在 $p\text{CO}_2$ 变化过程中起控制作用, 可以 Chl-a 作为单参数推算水体 $p\text{CO}_2$ 。

通过本研究所拟合的函数曲线可以估算一定范围内的 Chl-a 含量所对应的 $p\text{CO}_2$, 但由于样本采集自水华期, Chl-a 含量偏高, 而且样本量过小, 要想获得更精确的估算函数, 需要更大规模的样本采集工作。

3.3 基于薄层扩散模型的 CO_2 通量估算

单位面积、单位时间水气界面 CO_2 的交换通量根据薄层扩散模型估算, 其中淡水的水气交换系数根据 Wanninkhof [24] 提出的方法计算, 通量值参考张龙军等 [25] 的方法, 大气二氧化碳分压取 $380 \mu\text{atm}$ 。如表 3 所示, 香溪河库湾春季平均 CO_2 交换速率为 $-35.17 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 昼夜平均 CO_2 交换速率

为 $-19.92 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$.

表 3 三峡水库各库湾 CO_2 通量比较

Table 3 Comparison of CO_2 outgassing fluxes in bays of TGR

库湾	研究周期	CO_2 通量/ $\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$		文献
		平均值	变动范围	
香溪河	夏季一昼夜	0.18	-29.48 ~ 22.76	[12]
	春季一昼夜	-19.92	-23.06 ~ -16.82	本研究
	春季	-35.17	-42.69 ~ -21.75	本研究
	秋季	-4.74	— ¹⁾	[11]
	周年	41.74	< -49 ~ 114.83	[9]
	周年	8.73	-36.11 ~ 49.25	[10]
小江	春季	—	-6.72 ~ 56.64	[8]
	夏季一昼夜	—	-7.92 ~ -4.08	[13]

1) “—”表示文献中没有相关数据

王亮等^[12]通过对香溪河库湾温室气体在夏季昼夜变化的研究认为,夏季香溪河库湾全天整体为大气 CO_2 的源,根据不同时段又分为吸收和释放两个过程,其中下午 13:30 ~ 19:30 以及晚间 22:00 ~ 02:30 表现为吸收,其他时段表现为释放,随着叶绿素的上升而上升. 而本研究监测的春季 CO_2 通量全天皆为吸收过程,其中夜间 20:00 至次日凌晨 05:00 的 CO_2 通量值有降低的趋势, CO_2 通量随着叶绿素的上升而降低. 原因可能在于王亮等监测期间天气为阴天,且夏季水温较高,水生生物呼吸作用较强,而本研究为晴天,叶绿素含量和水温更低,光合作用和呼吸作用相对较弱. 郭劲松等^[13]在小江的研究显示,夏季高阳回水区全天皆表现为大气的汇, CO_2 吸收速率在下午 15:00 左右达到最大,在次日日出之前最小,与本研究结果相似.

赵玮^[10]在同一研究地区的周年结果显示,水体向大气净排放 CO_2 ,但春季的香溪河库湾水体也是从大气中吸收 CO_2 的,其中 3、5 月全河皆为碳汇,4 月只有 xx07 样点为碳汇,最大 CO_2 吸收速率为 $-36.11 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 赵炎等^[9]在香溪河的研究认为在年度尺度上,香溪河库湾是 CO_2 的源,但在 3 月仍然是汇,4、5 月虽是碳源,但也低于全年平均水平. 本研究认为,在春季的晴朗天气时,香溪河库湾是大气 CO_2 的汇,浮游植物的光合作用是表层水体 $p\text{CO}_2$ 的主控因素. 阴雨天浮游植物的呼吸作用强于光合作用,但是否会导致表层水体 $p\text{CO}_2$ 高于大气至今并没有确定的数据支持,因此在阴雨天的源汇地位待定. 总体上,阴雨仍然是春季的少数天气,因此,春季的香溪河库湾是大气 CO_2 的汇.

4 结论

(1) 香溪河库湾春季表层水体 $p\text{CO}_2$ 在 8.34 ~

168.70 μatm 之间,平均值为 49.01 μatm ; 表层水体的浮游植物生物量会因天气情况发生较大的变化,Chl-a 在 2.19 ~ 132.64 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,平均值为 39.70 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$. $p\text{CO}_2$ 与浮游植物生物量之间存在极显著的负相关关系,相关系数达 -0.841 , $p\text{CO}_2$ 主要受浮游植物光合作用控制. 香溪河库湾表层水体 $p\text{CO}_2$ 与生物量之间回归方程为 $y = 444.912 \cdot x^{-0.796}$.

(2) 研究期间香溪河库湾春季表层水体 $p\text{CO}_2$ 昼夜变化在 74.43 ~ 168.70 μatm 之间,平均值为 117.92 μatm ,其动态过程与浮游植物生物量具有相反的趋势.

(3) 从昼夜变化和日变化来看,香溪河库湾春季表层水体对大气 CO_2 都是吸收的过程,春季的香溪河库湾是大气 CO_2 的汇.

参考文献:

[1] 严国安,刘永定. 水生生态系统的碳循环及对大气 CO_2 的汇[J]. 生态学报, 2001, **21**(5): 827-833.

[2] Cole J J, Caraco F N. Carbon in catchments: connecting terrestrial carbon losses with aquatic metabolism[J]. Marine and Freshwater Research, 2001, **52**(1): 101-110.

[3] 李宁,李学刚,宋金明,等. 海洋碳循环研究的关键生物地球化学过程[J]. 海洋环境科学, 2005, **24**(2): 75-80.

[4] 朱钰,商少凌,翟惟东,等. 南海北部夏季海表二氧化碳分压及其海气通量的遥感算法初探[J]. 自然科学进展, 2008, **18**(8): 951-955.

[5] Rangama Y, Boutin J, Etcheto J, et al. Variability of the net air-sea CO_2 flux inferred from shipboard and satellite measurements in the Southern Ocean south of Tasmania and New Zealand[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, **110**: C09005, doi: 10.1029/2004JC002619.

[6] 许苏清,陈立奇. 利用卫星数据估算南大洋海-气 CO_2 通量的展望[J]. 极地研究, 2007, **19**(2): 152-157.

[7] 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**: D18301, doi: 10.1029/2009JD012410.

[8] 郭劲松,蒋滔,李哲,等. 三峡水库澎溪河春季水华期 $p(\text{CO}_2)$ 及影响因素分析[J]. 水科学进展, 2011, **22**(6): 829-838.

[9] 赵炎,曾源,吴炳方,等. 三峡水库香溪河支流水域温室气体排放通量观测[J]. 水科学进展, 2011, **22**(4): 546-553.

[10] 赵玮. 三峡水库湖北段温室气体排放通量时空特征及其影响因素分析[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2012.

[11] 姚臣湛,张靖,吴以赢,等. 三峡坝区干流及香溪河库湾水体秋季二氧化碳分压[J]. 生态杂志, 2012, **31**(1): 152-157.

[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] 郭劲松, 蒋滔, 李哲, 等. 三峡水库澎溪河流域高阳回水区夏季水体 CO_2 分压日变化特性[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(2): 190-196.
- [14] 况琪军, 胡征宇, 周广杰, 等. 香溪河流域浮游植物调查与水质评价[J]. 武汉植物学研究, 2004, **22**(6): 507-513.
- [15] 叶麟, 黎道丰, 唐涛, 等. 香溪河水质空间分布特性研究[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(11): 1959-1962.
- [16] 叶绿. 三峡库区香溪河水华现象发生规律与对策研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [17] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [18] 黄祥飞, 陈伟民, 蔡启铭. 湖泊生态调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准化出版社, 2000.
- [19] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [20] Cole J J, Caraco F N, Kling W G, *et al.* Carbon dioxide supersaturation in the surface waters of lakes[J]. Science, 1994, **265**(5178): 1568-1570.
- [21] 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.
- [22] 王仕禄, 万国江, 刘丛强, 等. 云贵高原湖泊 CO_2 的地球化学变化及其大气 CO_2 源汇效应[J]. 第四纪研究, 2003, **23**(5): 581.
- [23] Yao G R, Gao Q Z, Wang Z G, *et al.* Dynamics of CO_2 partial pressure and CO_2 outgassing in the lower reaches of the Xijiang River, a subtropical monsoon river in China[J]. Science of the Total Environment, 2007, **376**(1-3): 255-266.
- [24] Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, **97**(C5): 7373-7382.
- [25] 张龙军, 徐雪梅, 温志超. 秋季黄河 $p\text{CO}_2$ 控制因素及水-气界面通量[J]. 水科学进展, 2009, **20**(2): 227-235.
- [26] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [27] Morotta H, Duarte C M, Pinho L, *et al.* Rainfall leads to increased $p\text{CO}_2$ in Brazilian coastal lakes[J]. Biogeosciences, 2010, **7**(5): 1607-1614.
- [28] Turk D, Zappa J C, Meinen S C, *et al.* Rain impacts on CO_2 exchange in the western equatorial Pacific Ocean [J]. Geophysical Research Letters, 2010, **37**: L23610, doi: 10.1029/2010GL045520.

CONTENTS

Advances in Peroxide-Based Decontaminating Technologies	XI Hai-ling, ZHAO San-ping, ZHOU Wen (1645)
Environmental Damage Assessment; International Regulations and Revelation to China	ZHANG Hong-zhen, CAO Dong, YU Fang, <i>et al.</i> (1653)
Human Health Risk-Based Environmental Criteria for Soil: A Comparative Study Between Countries and Implication for China	XU Meng, YAN Zeng-guang, HE Meng-meng, <i>et al.</i> (1667)
Organic Waste Treatment by Earthworm Vermicomposting and Larvae Bioconversion: Review and Perspective	ZHANG Zhi-jian, LIU Meng, ZHU Jun (1679)
Strategies of Nutrients Control in Lakes Based on Ecoregions of Lakes in China	DIAO Xiao-jun, XI Bei-dou, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (1687)
Current Status of Surface Water Acidification in Northeast China	XU Guang-yi, KANG Rong-hua, LUO Yao, <i>et al.</i> (1695)
Impact Analysis of Xi'an to the Water Quality of Weihe River	YU Jie, LI Huai-en (1700)
Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Pearl River Estuary During the Summer of the Extremely Drought Hydrological Year 2011	YE Feng, HUANG Xiao-ping, SHI Zhen, <i>et al.</i> (1707)
Application of Equilibrium Partitioning Approach to Establish Sediment Quality Criteria for Heavy Metals in Hengyang Section of Xiangjiang River	HAN Chao-nan, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (1715)
Assessing the Benthic Ecological Status in Yangtze River Estuary Using AMBI and M-AMBI	CAI Wen-qian, MENG Wei, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (1725)
Pollution Load and the First Flush Effect of BOD ₅ and COD in Urban Runoff of Wenzhou City	WANG Jun, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1735)
Influencing Factors in Measuring Absorption Coefficient of Suspended Particulate Matters	YU Xiao-long, SHEN Fang, ZHANG Jin-fang (1745)
Relationship Between pCO ₂ and Algal Biomass in Xiangxi Bay in Spring	YUAN Xi-gong, HUANG Wen-min, BI Yong-hong, <i>et al.</i> (1754)
Effects of Turbulent Fluctuation Intensity on the Growth of Algae and Water Environment	LEI Yu, LONG Tian-yu, SAN Lei, <i>et al.</i> (1761)
Simultaneous Removal of Algae and Its Odorous Metabolite Dimethyl Trisulfide in Water by Potassium Ferrate	MA Xiao-yan, ZHANG Ze-hua, WANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1767)
Catalyzed Oxidation of Catechol by the Heterogeneous Fenton-like Reaction of Nano-Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ System	HE Jie, YANG Xiao-fang, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1773)
Photodegradation of Naproxen in Aqueous Systems by UV Irradiation: Mechanism and Toxicity of Photolysis Products	MA Du-juan, LIU Guo-guang, LÜ Wen-ying, <i>et al.</i> (1782)
Catalytic Ozonation of Nitrobenzene in Water by Acidification-activated Red Mud	KANG Ya-ning, LI Hua-nan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1790)
Experimental Studies on Stability of Floes from Cadmium Pollution Emergency Treatment	LIU Wang-rong, GUO Qing-wei, YANG Ren-bin, <i>et al.</i> (1797)
Evaluation of Floc Strength Based on Morphological Analysis and Optical Online Monitoring	JIN Peng-kang, FENG Yong-ning, WANG Bao-bao, <i>et al.</i> (1802)
Mechanism of Reductive Dechlorination of Trichlorophenol with Different Electron Donors	WAN Jin-quan, HU Meng-die, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (1808)
Preparation of Magnetic Quaternary Chitosan Salt and Its Adsorption of Methyl Orange from Water	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, YING Shi-ying, <i>et al.</i> (1815)
Membrane Fouling by Secondary Effluent of Urban Sewage and the Membrane Properties	MENG Xiao-rong, ZHANG Hai-zhen, WANG Lei, <i>et al.</i> (1822)
Treatment of Municipal Wastewater Using the Combined Reversed A ² /O-MBR Process	ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, YANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1828)
Study on Sulfur-based Autotrophic Denitrification with Different Electron Donors	YUAN Ying, ZHOU Wei-li, WANG Hui, <i>et al.</i> (1835)
Nitrogen Removal and N ₂ O Emission Characteristics During the Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification Process	LIANG Xiao-ling, LI Ping, WU Jin-hua, <i>et al.</i> (1845)
Optimization of Solid-Phase Extraction for Enrichment of Toxic Organic Compounds in Water Samples	ZHANG Ming-quan, LI Feng-min, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (1851)
Polycyclic Musks Exposure Affects Gene Expression of Specific Proteins in Earthworm <i>Eisenia fetida</i>	CHEN Chun, LIU Xiao-wei, ZHENG Shun-an, <i>et al.</i> (1857)
Health Risk Assessment and Ozone Formation Potentials of Volatile Organic Compounds from Pharmaceutical Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, WANG Zhe-ming, XU Ming-zhu, <i>et al.</i> (1864)
Health Effect of Volatile Aldehyde Compounds in Photocatalytic Oxidation of Aromatics Compounds	ZHAO Wei-rong, LIAO Qiu-wen, YANG Ya-nan, <i>et al.</i> (1871)
Compositions and Distribution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in Serum of Women from Sichuan Province	SHAO Min, CHEN Yong-heng, LI Xiao-yu (1877)
QSAR/QSPR for Predicting the Toxicity of Imidazolium Ionic Liquids	ZHAO Ji-hong, ZHAO Yong-sheng, ZHANG Hong-zhong, <i>et al.</i> (1882)
Spatial and Temporal Characteristics of Heavy Metal Concentration of Surface Soil in Hebin Industrial Park in Shizuishan Northwest China	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning, <i>et al.</i> (1887)
Distribution Characteristic and Current Situation of Soil Rare Earth Contamination in the Bayan Obo Mining Area and Baotou Tailing Reservoir in Inner Mongolia	GUO Wei, FU Rui-ying, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1895)
Road Dust Loading and Chemical Composition at Major Cities in Fujian Province	ZHENG An, YANG Bing-yu, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1901)
Numerical Simulation and Application of Electrical Resistivity Survey in Heavy Metal Contaminated Sites	WANG Yu-ling, NAI Chang-xin, WANG Yan-wen, <i>et al.</i> (1908)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Rare Earth Elements Uptake of Soybean Grown in Rare Earth Mine Tailings	GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHAO Wen-jing, <i>et al.</i> (1915)
Algicidal Activity Against Red-tide Algae by Marine Bacterial Strain N3 Isolated from a HABs Area, Southern China	SHI Rong-jun, HUANG Hong-hui, QI Zhan-hui, <i>et al.</i> (1922)
Isolation, Identification and Oxidizing Characterization of an Iron-Sulfur Oxidizing Bacterium LY01 from Acid Mine Drainage	LIU Yu-jiao, YANG Xin-ping, WANG Shi-mei, <i>et al.</i> (1930)
Isolation of an Effective Benzo[a]pyrene Degrading Strain and Its Degradation Characteristics	CAI Han, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1937)
Aerobic Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether	ZHANG Shu, Franco Giulio, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (1945)
Piggery Wastewater Cultivating Biofloculant-Producing Flora B-737 and the Fermentation Characteristics	PEI Rui-lin, XIN Xin, ZHANG Xue-qiao, <i>et al.</i> (1951)
Correlation Between Acidic Materials and Acid Deposition in Beijing During 1997-2011	CHEN Yuan-yuan, TIAN He-zhong, YANG Dong-yan, <i>et al.</i> (1958)
Characteristics of Precipitation pH and Conductivity at Mt. Huang	SHI Chun-e, DENG Xue-liang, WU Bi-wen, <i>et al.</i> (1964)
Chemical Characteristics of Water-Soluble Components of Aerosol Particles at Different Altitudes of the Mount Huang in the Summer	WEN Bin, YIN Yan, QING Yan-shuo, <i>et al.</i> (1973)
Pollution Characteristics of Organic Acids in Atmospheric Particles During Haze Periods in Autumn in Guangzhou	TAN Ji-hua, ZHAO Jing-ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (1982)
Characterization of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in Three Major Cities in Fujian Province, China	CHEN Yan-ting, CHEN Jin-sheng, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1988)
Size Distribution of Carbonaceous Particulate Matter in Atmosphere of Shanghai, China	YUAN Ning, LIU Wei, ZHAO Xiu-liang, <i>et al.</i> (1995)
Secondary Aerosol Formation Through Photochemical Reactions Estimated by Using Air Quality Monitoring Data in the Downtown of Pudong, Shanghai	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (2003)
Geochemical Characteristics and Sources of Atmospheric Particulates in Shanghai During Dust Storm Event	QIAN Peng, ZHENG Xiang-min, ZHOU Li-min (2010)
Near Surface Atmospheric CO ₂ Variations in Autumn at Suburban Xiamen, China	LI Yan-li, MU Chao, DENG Jun-jun, <i>et al.</i> (2018)
<i>In-situ</i> Measurement of Background Atmospheric HCFC-142b Using GC-MS and GC-ECD Method	GUO Li-feng, YAO Bo, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (2025)
Airborne Fungal Community Composition in Indoor Environments in Beijing	FANG Zhi-guo, OUYANG Zhi-yun, LIU Peng, <i>et al.</i> (2031)
Study on Quantification Assessment and Odor Fingerprint of Volatile Aromatic Hydrocarbons from Sewage Treatment Plant	GUO Wei, WANG Bo-guang, TANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2038)
Superposition Impact Character of Air Pollution from Decentralization Docks in a Freshwater Port	LIU Jian-chang, LI Xing-hua, XU Hong-lei, <i>et al.</i> (2044)
Thermal Stability and Transformation Behaviors of Pb in Yima Coal	LIU Rui-qing, WANG Jun-wei (2051)
Synergistic Emission Reduction of Chief Air Pollutants and Greenhouse Gases Based on Scenario Simulations of Energy Consumptions in Beijing	XIE Yuan-bo, LI Wei (2057)

《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5月15日 34卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 5 May 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