

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第7期

Vol.39 No.7

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

近20年来中国典型区域PM _{2.5} 时空演变过程	罗毅,邓琼飞,杨昆,杨扬,商春雪,喻臻钰 (3003)
西安市PM _{2.5} 健康损害价值评估	魏国茹,史兴民 (3014)
河北香河亚微米气溶胶组分特性、来源及其演变规律分析	江琪,王飞,孙业乐 (3022)
南京北郊秋季PM _{2.5} 碳质组分污染特征及来源分析	徐足飞,曹芳,高嵩,鲍孟盈,石一凡,章炎麟,刘晓妍,范美益,张雯淇,卞航,刘寿东 (3033)
临安夏季霾和清洁天气PM _{2.5} 化学组成特征比较	梁林林,孙俊英,张养梅,刘畅,徐婉筠,张根,刘旭艳,马千里 (3042)
盘锦市秋冬季节PM _{2.5} 中碳组分特征及来源解析	张蕾,姬亚芹,张军,王士宝,李越洋,赵静琦,张伟 (3051)
南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应	黄聪聪,马嫣,郑军 (3057)
夏季青岛大气粗细粒子中微量元素的浓度、溶解度及干沉降通量	李鹏志,李茜,石金辉,高会旺,姚小红 (3067)
太原市夏季降水中溶解态重金属特征及来源	叶艾玲,程明超,张璐,何秋生,郭利利,王新明 (3075)
杭州地区大气CO ₂ 体积分数变化特征及影响因素	浦静姣,徐宏辉,姜瑜君,杜荣光,齐冰 (3082)
典型工业源VOCs治理现状及排放组成特征	景盛翱,王红丽,朱海林,杨强,卢滨,夏阳,余传冠,陶士康,李莉,楼晟荣,黄成,唐伟,井宝莉 (3090)
地级市域工业VOCs排放源产排特性及其控制技术应用现状:以秦皇岛市为例	胡旭睿,虎啸宇,王灿 (3096)
青霉素发酵尾气VOCs污染特征及健康风险评价	郭斌,么瑞静,张硕,马磊,康江,王姗姗 (3102)
轻型汽油车尾气OC和EC排放因子实测研究	黄成,胡馨遥,鲁君 (3110)
南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价	田春晖,杨若杼,古丽扎尔·依力哈木,钱新,王金花,李慧明 (3118)
西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析	石栋奇,卢新卫 (3126)
三峡库区主要河流秋季pCO ₂ 及其影响因素	罗佳宸,毛蓉,李思悦 (3134)
泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素	寇永朝,华琨,李洲,李志 (3142)
生物滞留对城市地表径流磷的去除途径	李立青,刘雨倩,杨佳敏,王娟 (3150)
淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系	杨丽,张玮,尚光霞,张军毅,王丽卿,魏华 (3158)
抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系	李蕊,陈光杰,康文刚,陈丽,王教元,陈小林,刘园园,冯钟,张涛 (3168)
蓝藻水华及其降解对沉积物-水微界面的影响	王永平,谢瑞,晁建颖,姬昌辉,于剑 (3179)
生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响	徐德福,潘潜澄,李映雪,陈晓艺,王佳俊,周磊 (3187)
Mn-Co/蜂窝陶瓷催化剂制备及催化臭氧化对苯二酚效能	张兰河,高伟国,陈子成,张海丰,王旭明 (3194)
Fe/Cu双金属活化过一硫酸盐降解四环素的机制	李晶,鲍建国,杜江坤,冷一非,孔淑琼 (3203)
铈酸盐改性钛酸纳米片对水中Cd(II)的吸附行为及机制	康丽,刘文,刘晓娜,刘宏芳,李一菲 (3212)
铁锰原位氧化产物吸附微量磷的实验	蔡言安,毕学军,张嘉凝,董杨,刘文哲 (3222)
制备方法对铁钛复合氧化物磷吸附性能的影响:共沉淀法与机械物理混合法	仲艳,王建燕,陈静,张高生 (3230)
电导率对厌氧产酸、正渗透与微生物燃料电池耦合工艺运行性能的影响	陆宇琴,刘金梦,王新华,李秀芬,李晔 (3240)
不同磷浓度下生物除磷颗粒系统的COD需求	李冬,曹美忠,郭跃洲,梅宁,李帅,张杰 (3247)
基质浓度对ABR反应器SAD协同脱氮除碳效能影响	张敏,姜滢,汪瑶琪,韦佳敏,陈重军,沈耀良 (3254)
采用含硫铁化学污泥作为反硝化电子供体进行焦化废水中总氮深度去除	付炳炳,潘建新,马景德,王丰,吴海珍,韦朝海 (3262)
间歇曝气下短程硝化耦合污泥微膨胀稳定性	高春娣,孙大阳,安冉,赵楠,焦二龙,祝海兵 (3271)
基于高通量测序的SBR反应器丝状膨胀污泥菌群分析	洪颖,姚俊芹,马斌,徐双,张彦江 (3279)
纳米零价铁(NZVI)对厌氧产甲烷活性、污泥特性和微生物群落结构的影响	苏润华,丁丽雨,任洪强 (3286)
气水比对后置固相反硝化滤池工艺脱氮及微生物群落影响	张千,吉芳英,付旭芳,陈晴空 (3297)
活性污泥胞外多聚物提取方法的比较	孙秀玥,唐珠,杨新萍 (3306)
耐冷嗜碱蒙氏假单胞菌H97的鉴定及其好氧反硝化特性	蔡茜,何腾霞,冶青,李振轮 (3314)
PFOS前体物质(PreFOSs)降解菌的分离鉴定及其降解特性	赵淑艳,周涛,王博慧,梁田坤,柳丽芬 (3321)
采油井场土壤微生物群落结构分布	蔡萍萍,宁卓,何泽,张敏,石建省 (3329)
铜尾矿坝不同恢复年限土壤理化性质和酶活性的特征	王瑞宏,贾彤,曹苗文,柴宝峰 (3339)
广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险	郭颖,李玉冰,薛生国,廖嘉欣,王琼丽,吴川 (3349)
邻苯二甲酸酯在重庆市城市土壤中的污染分布特征及来源分析	杨志豪,何明靖,杨婷,卢俊峰,魏世强 (3358)
成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素	李珊,李启权,王昌全,张浩,肖怡,唐嘉玲,代天飞,李一丁 (3365)
塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的相关性	赵晶晶,贡璐,安申群,李杨梅,陈新 (3373)
塔里木盆地北缘绿洲4种土地利用方式土壤有机碳组分分布特征及其与土壤环境因子的关系	安申群,贡璐,李杨梅,陈新,孙力 (3382)
高原喀斯特土壤有机碳短期稳定的温度作用机制	唐国勇,张春华,刘方炎,马艳 (3391)
施硼对水稻幼苗吸收和分泌砷的影响	朱毅,孙国新,陈正,胡莹,郑瑞伦 (3400)
不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析	胡雪芳,田志清,梁亮,陈俊德,张志民,朱祥民,王士奎 (3409)
南京大气臭氧浓度的季节变化及其对主要作物影响的评估	赵辉,郑有飞,魏莉,关清 (3418)
三峡库区涪陵和忠县两地居民发汞含量水平及影响因素分析	程楠,谢青,樊宇飞,王永敏,张成,王定勇 (3426)
人粪便好氧堆肥过程中典型抗生素的消减特性	时红蕾,王文昌,李倩 (3434)
COD/SO ₄ ²⁻ 对青霉素菌渣厌氧消化影响	强虹,李玉友,裴梦富 (3443)
果蔬类垃圾主发酵堆肥产物储放和利用的恶臭释放特征	何品晶,蒋宁玲,徐贤,韦顺艳,邵立明,吕凡 (3452)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田NH ₃ 挥发的影响	庞炳坤,张敬沙,吴杰,李志琳,蒋静艳 (3460)
《环境科学》征订启事(3141)	
《环境科学》征稿简则(3202)	
信息(3229, 3433, 3451)	

三峡库区主要河流秋季 $p\text{CO}_2$ 及其影响因素

罗佳宸^{1,2}, 毛蓉¹, 李思悦^{1*}

(1. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 于2015年10月对三峡库区主要河流表层水体中的溶解性碳组成进行了测定, 结合水文地质条件和水化学关键指标, 对河流表层水体二氧化碳分压($p\text{CO}_2$)的空间变化及影响因素进行了研究, 并利用模型法分析了水-气界面 CO_2 通量特征. 结果表明, 三峡库区主要河流秋季 $p\text{CO}_2$ 介于 18.75 ~ 296.31 Pa 之间, 均值为 (141.06 ± 77.51) Pa; 河流 CO_2 脱气通量平均值为 $(101.1 \pm 78.0) \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 其中 86% 的采样点位表现为大气 CO_2 源的特征. $p\text{CO}_2$ 与 DO 和 pH 显著负相关, 与 HCO_3^- 显著正相关. 由于山区河流流速快和水力停留时间短等特征, 河流有机碳原位呼吸是导致 $p\text{CO}_2$ 与 DO 和 pH 很强的负相关关系的主要原因. 研究结果为准确估算三峡库区河流 CO_2 逸出量提供了重要的数据支撑.

关键词: CO_2 通量; 河流 CO_2 分压; 水-气界面通量; 碳循环; 三峡库区

中图分类号: X14 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)07-3134-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201711098

$p\text{CO}_2$ in the Main Rivers of the Three Gorges Reservoir and Its Influencing Factors

LUO Jia-chen^{1,2}, MAO Rong¹, LI Si-yue^{1*}

(1. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: An extensive investigation on the main tributaries of the Three Gorges Reservoir (TGR) region was conducted in autumn (Oct. 2015), with focuses on riverine CO_2 partial pressure ($p\text{CO}_2$) and its associated controls. Our results indicated that $p\text{CO}_2$ in the main rivers of the TGR region ranged from 18.75 to 296.31 Pa, with a mean value of (141.06 ± 77.51) Pa in the autumn, which was much higher than the atmospheric CO_2 concentration. Therefore, the studied rivers acted as an atmospheric CO_2 source, and the mean CO_2 emission rate to the atmosphere was estimated at $(101.1 \pm 78.0) \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. The highest and lowest values were (131.9 ± 101.8) and $(70.3 \pm 54.3) \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, respectively. $p\text{CO}_2$ in the main rivers of the TGR area was significantly related to DO, pH, and bicarbonate. Furthermore, the biogeochemical process of within-river respiration of organic carbon rather than photosynthesis resulted in negative relationships between $p\text{CO}_2$ and DO or pH because of the high velocities and short residence time in these mountainous rivers and streams. Our results will help to accurately develop the carbon budget for the rivers of the Three Gorges Region.

Key words: CO_2 flux; CO_2 partial pressure of river; water-gas interface flux; carbon cycle; Three Gorges Reservoir

河流连接着陆地和海洋, 在全球碳循环中发挥极为重要的作用^[1]; 不仅体现在纵向的向海洋的直接碳输运, 还体现在垂向的与大气 CO_2 的交换. 据估算, 经陆地侵蚀由河流向海洋输送的碳约 $1 \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$, 其中有机碳约占 40%, 无机碳为 60%^[2]; 同时, 全球河流向大气中排放 CO_2 大约为 $1.8 \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$, 是大气 CO_2 的重要来源^[3,4]. 此外, 大尺度河流 CO_2 释放评估存在很大的不确定性. 因此, 开展典型河流二氧化碳分压($p\text{CO}_2$)的影响因素及水-气界面 CO_2 通量对于认知内陆水体区域和全球碳收支状况具有重要意义.

目前, 关于河流水体 $p\text{CO}_2$ 及水-气界面 CO_2 通量的研究主要集中在国际主要河流上, 研究表明大部分的河流水体处于 CO_2 过饱和状态^[3,5]. Sawakuchi 等^[6] 对亚马逊河下游进行了观测, 其

$p\text{CO}_2$ 平均值为 $(295.19 \pm 179.19) \text{ Pa}$, 河流侵蚀带来的有机碳的呼吸作用是造成水体高 $p\text{CO}_2$ 的主要原因. Neal 等^[7] 估算英国泰晤士河段水体 $p\text{CO}_2$ 值, 约为空气中 CO_2 浓度的 0.3 ~ 11.5 倍, 水体 $p\text{CO}_2$ 受生物呼吸作用和光合作用控制; Li 等^[8] 分析了湄公河下游 46 个水文站的数据, 结果表明表层水体 $p\text{CO}_2$ 均值为 110.42 Pa. 河流 $p\text{CO}_2$ 和 CO_2 通量通常呈现出明显的时空差异, 导致差异的主要原因是河流水体溶解性 CO_2 的来源不同以及受到降水、温度、水文条件等环境因素的相互作用^[9~12]. 即使在相同河流系统的不同的河段, 其 $p\text{CO}_2$ 的控制与维

收稿日期: 2017-11-10; 修订日期: 2018-01-15

基金项目: 中国科学院百人计划项目; 国家自然科学基金项目 (31670473)

作者简介: 罗佳宸(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为流域生态学, E-mail: 18696798071@163.com

* 通信作者, E-mail: syli2006@163.com

持因素也存在巨大的差异^[12, 13]。

三峡水库东起湖北省宜昌市,西迄重庆巴南区,水域面积约为1 084 km²,控制流域面积 38 万 km²。作为世界著名的水电工程,三峡库区流域生态系统碳循环过程特别是河流界面碳交换引起了广泛的关注。吴学谦等^[14]对三峡库区草堂河的 $p\text{CO}_2$ 进行了观测,其值为 198.69 ~ 260.97 Pa; 张军伟等^[15]揭示了三峡库区香溪河库湾秋末至冬季表层水体 CO_2 的分压特征,发现表层水体 $p\text{CO}_2$ 为 $(328.32 \pm 251.51) \text{ Pa}$ 。以上研究表明目前对于三峡库区河流碳逸出主要集中在某条河流上,有关三峡库区主要河流水-气界面 CO_2 脱气的数据仍很缺乏,系统的三峡库区主要河流界面碳交换通量特征研究未见报道。由于影响河流 $p\text{CO}_2$ 的因素复杂,为了准确评估该区域河流碳排放通量,需要进一步研究库区河流 CO_2 脱气的空间差异及其影响因素。因此,本研究选择在 2015 年三峡工程蓄水初期(10 月中旬到 11 月上旬),通过对三峡库区主要河流的连续观测,分析其表层水体 $p\text{CO}_2$ 特征,探讨了河流 $p\text{CO}_2$ 空间变化及其影响因素,以期全面准确估算三峡库区主要河流温室气体总释放量提供重要数据支撑。

1 材料与方法

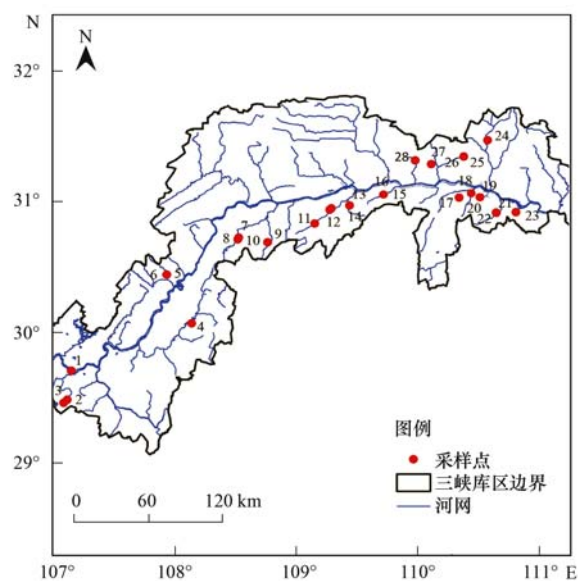
1.1 研究区概况

本研究在三峡库区主要河流上选取 28 个位点进行采样监测,主要有梨香溪、龙潭河、龙河、磨刀溪、九盘河、抱龙河、青干河、九畹溪、神龙溪等。研究区域地理位置为 $29^\circ 26' 46'' \sim 31^\circ 20' 26'' \text{ N}$, $107^\circ 06' 12'' \sim 110^\circ 39' 58'' \text{ E}$, 采样点分布见图 1。该区域属于亚热带季风气候,雨热同期,多年平均气温为 17°C , 年平均降水量为 1 250 mm。

1.2 研究方法

野外采样: 于 2015 年 10 月 20 日至 11 月 5 日期间对三峡库区主要河流进行常规采样,共设置 28 个样点; 使用 5L 高密度聚乙烯瓶在每个采样点采集 10 cm 水深的水样。同步使用现场携带的 HQ40d (HACH, 美国) 多参数水质分析仪测定水质基础指标: pH、水温 (T)、溶解氧 (DO)、电导率 (EC) 和氧化还原电位 (ORP)。

水样预处理: 于采样当天将采集的水样用 0.70 μm Whatman GF/F 玻璃纤维膜过滤,取 100 mL 过滤水样装于经过滤水样润洗的聚乙烯瓶中,用于测定其溶解性总氮 (TDN) 和溶解性总磷 (TDP); 另取 50 mL 过滤水样装于经过滤水样润洗的聚乙烯瓶



1. 梨香溪; 2. 龙潭河; 3. 龙河下; 4. 龙河上; 5. 黄金河; 6. 汝溪河; 7. 磨刀溪; 8. 四步河; 9. 大溪河; 10. 长滩河; 11. 磨溪河上; 12. 磨溪河下; 13. 九盘河; 14. 官渡河; 15. 抱龙河; 16. 万福河; 17. 锣鼓洞河; 18. 青干河; 19. 童庄河; 20. 九畹溪; 21. 九畹溪支流; 22. 茅坪河; 23. 高岚河; 24. 香溪河; 25. 凉台河; 26. 神龙溪; 27. 罗溪坝河; 28. 边城溪

图 1 三峡库区主要河流采样点分布

Fig. 1 Distribution of the main rivers in the Three Gorges Reservoir area

中,并滴入 2 滴饱和 HgCl_2 溶液,用于溶解性有机碳 (DOC) 测定。取 25 mL 过滤水样 (0.45 μm Millipore 硝酸纤维滤膜过滤的水样),以甲基橙作为指示剂,立即用 $0.0200 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐酸滴定碱度; 通过测定过滤水样中碱度、pH 及水温计算表层水体 CO_2 分压。采集的原水样中滴加 1 ~ 2 滴浓硫酸,抑制微生物活性。采集后,运至实验室 48 h 内完成测试分析工作。

室内实验分析: 溶解性总氮 (TDN)、溶解性总磷 (TDP) 采用连续流量自动分析仪测定 (AA3, Seal Analytical, Germany), 溶解性有机碳 (DOC) 采用总有机碳分析仪测定 (TOC-5000, Shimadzu, Japan)。所有监测点位水-气界面 CO_2 通量都使用模型法进行计算。本文涉及的参数包括各监测点水体物理化学参数、河流水文条件、 CO_2 分压及其 CO_2 通量。

1.3 模型估算法的通量计算

水中 $p\text{CO}_2$ 分压通过亨利常数^[16, 17]计算:

$$p\text{CO}_2 = [\text{H}_2\text{CO}_3^*] / [\text{H}^+] \\ = [\text{HCO}_3^-] / K_0 \times K_1 \quad (1)$$

$$pK_0 = -7 \times 10^{-5} T^2 + 0.016T + 1.11 \quad (2)$$

$$pK_1 = 1.1 \times 10^{-4} T^2 - 0.012T + 6.58 \quad (3)$$

$$pK_2 = 9 \times 10^{-5} T^2 - 0.0137T + 10.62 \quad (4)$$

式中, K_1 和 K_2 为平衡常数. 在本研究中, 由于水体的 pH 均大于 7.7, HCO_3^- 视为与碱度相当^[17], 在计算河流 $p\text{CO}_2$ 时忽略非碳酸盐碱度.

根据 Fick 定律^[18], 水气界面 CO_2 交换通量主要受以下 2 个因素的影响: ①水体 $p\text{CO}_2$ 与大气中 $p\text{CO}_2$ 的差, ②气体交换系数, 而气体交换系数受流速、风速、温度等因素影响. CO_2 水气界面交换通量(正为释放、负为吸收)可以用下述公式计算^[19]:

$$\text{Flux} = k \times K_h \times (p_{\text{water}} - p_{\text{air}}) \quad (5)$$

$$\ln K_h = -58.0931 + 90.5069(100/T_k) + 22.294 \ln(T_k/100) \quad (6)$$

式中, Flux 为水-气界面 CO_2 交换通量 [$\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], k 为气体扩散系数 ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$), p_{water} 为 CO_2 在水中分压 (0.1 Pa), p_{air} 为现场温度及压力下 CO_2 气体在空气中分压 (0.1 Pa), K_h 为亨利常数, 即气体溶解度 [$\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot (0.1 \text{ MPa})^{-1}$], T_k 为水体绝对温度 (K).

由于水气界面交换系数受到流量、流速、风速等因素影响, 一般在 $4 \sim 115 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 波动, 但是大多数河流的 k 值取 $8 \sim 15 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间^[12], 考虑到三峡库区年平均风速和水文状况, k 值分别取 $8 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $15 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ (平均值 $11.5 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$) 计算其 CO_2 水气界面交换通量^[33]. 由于各地在大气中二氧化碳平衡浓度差异不大, 分压都预设为 40 Pa.

1.4 分析与统计

本研究的实验分析及计算使用 SPSS 18.0 和 Excel 2013 进行数据处理和统计分析, 包括 Pearson 相关分析、主成分分析和多元线性回归分析; 利用 SigmaPlot 13.0 软件作图.

2 结果与讨论

2.1 三峡库区主要河流水体物理化学特征

三峡库区主要河流表层水体理化性质如表 1 所示. 三峡库区主要河流水温为 $(20.5 \pm 2.4)^\circ\text{C}$, pH 值介于 7.66 ~ 9.03 之间, 水体呈碱性. 不同河流 DOC 浓度差异较大, 范围在 $6.02 \sim 41.55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $(12.84 \pm 7.61) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 显著高于世界河流 DOC 的平均值 $5.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[22], 这可能是由于土壤、人为活动、水文等多种因素的差异造成的. 从 TDN、TDP 等营养物质浓度判断, 监测期间表层水体 TDN 均值为 $(3.56 \pm 1.09) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 超出了地表水环境质量 V 类总氮低于 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的标准限值; 三峡库区主要河流 TDP 分布范围为 0.01

$\sim 0.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 低于地表水环境质量 III 类提出总磷低于 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的标准^[20, 21].

pH 值是反映水环境整体概况和物质组成的主要参数指标. 流域内土壤、岩石性质及水体中碱度含量共同影响河流水体中溶解性 CO_2 ^[21]. 如图 2 所示, 2015 年秋季 28 个监测点位水体均呈碱性, pH 值范围在 7.66 ~ 9.03 之间, 平均为 8.21 ± 0.31 . 河流的碱度通常以 HCO_3^- 为主, 观测期间河流碱度范围在 $1920.0 \sim 4160.0 \text{ } \mu\text{eq} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $(3057.89 \pm 603.99) \text{ } \mu\text{eq} \cdot \text{L}^{-1}$.

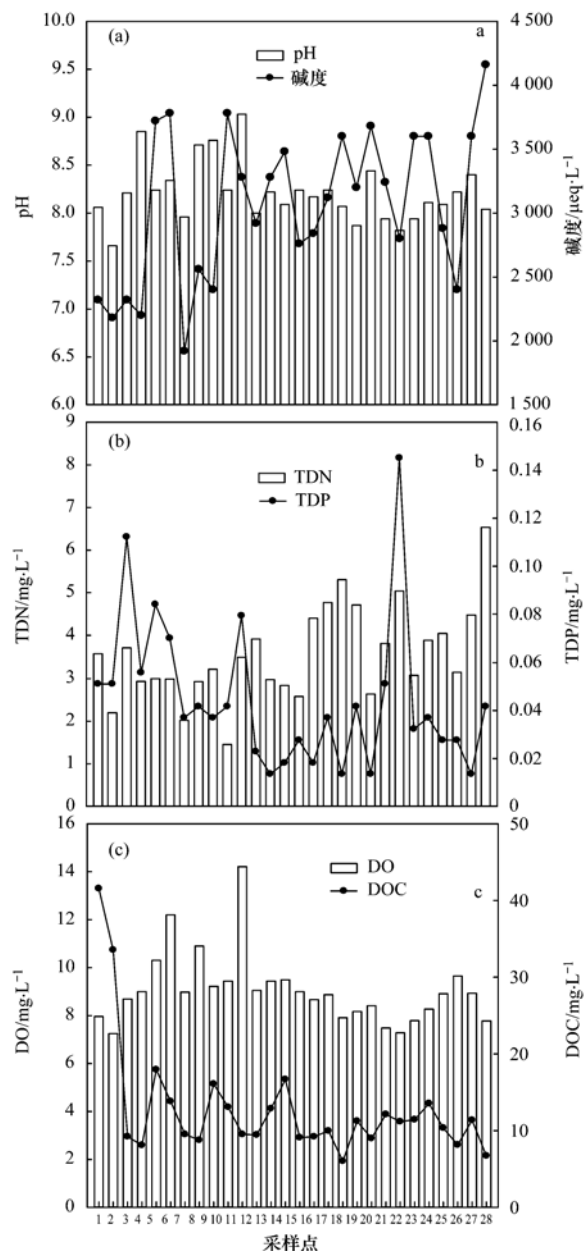


图2 三峡库区主要河流表层水体环境因子分布特征

Fig. 2 Distribution of environmental factors of surface water in the main rivers of the Three Gorges Reservoir area

表 1 三峡库区秋季主要河流水体物理化学参数
Table 1 Physical and chemical parameters of the main rivers
in the Three Gorges Reservoir area in autumn

参数	变化范围	平均值(均值 $\pm$ 标准差)
水温/ $^{\circ}\text{C}$	15.1 ~ 24.3	20.5 $\pm$ 2.4
碱度/ $\mu\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$	1 920.0 ~ 4 160.0	3 057.85 $\pm$ 603.99
pH	7.66 ~ 9.03	8.21 $\pm$ 0.31
$p\text{CO}_2/\text{Pa}$	18.75 ~ 296.31	141.06 $\pm$ 77.51
$\text{CO}_3^{2-}/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	28.60 ~ 617.90	161.44 $\pm$ 124.17
$\text{EC}/\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	208.9 ~ 628.0	348.1 $\pm$ 90.9
$\text{DO}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	7.25 ~ 14.21	9.07 $\pm$ 1.50
$\text{DOC}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	6.02 ~ 41.55	12.84 $\pm$ 7.61
$\text{TDN}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.46 ~ 5.30	3.56 $\pm$ 1.09
$\text{TDP}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.01 ~ 0.14	0.04 $\pm$ 0.03

水体中含氮(N)、磷(P)元素存在形式以及分布特征受到人为活动及生物因素的制约,是引起溶解性 CO_2 浓度变化的关键因素之一^[10]. 由图 2 可知,2015 年 10 月三峡库区主要河流表层水体 TDN 浓度范围在 1.46 ~ 5.30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间;水体 TDP 浓度范围为 0.01 ~ 0.14 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 (0.04 $\pm$ 0.03) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. TN: TP 的质量比均值为 89,表明库区河流生产力主要受溶解性磷的限制. 由于三峡库区主要河流有较高的流速及极低的叶绿素含量(0 ~ 5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),因此水体新陈代谢对营养元素的影响可以忽略.

O_2 是 CO_2 产生过程中参与物质转化的重要物质,影响氧化还原的敏感元素及其化合物在水体中的分布. DO 浓度与水温、水体交换、浮游植物光合作用等因素有关^[22, 23]. 图 2 表明三峡库区主要河流 DO 均值为 (9.07 $\pm$ 1.50) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. DOC 主要是土壤有机质的降解产物及人类生产生活的有机废弃

物,还有部分为河流自生浮游植物的代谢产物. 监测期间,三峡库区主要河流的 DOC 浓度为 (12.83 $\pm$ 6.73) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. DOC 浓度的最大值出现在梨香溪,为 41.55 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最小值出现在边城溪,为 6.02 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

2.2 三峡库区主要河流 $p\text{CO}_2$ 分压的控制因素
三峡库区主要河流秋季表层水体 $p\text{CO}_2$ 介于 18.75 ~ 296.31 Pa 之间,均值为 (141.06 $\pm$ 77.51) Pa(表 1). 水体 $p\text{CO}_2$ 的变化反映了河流体系中无机碳和有机碳之间的转化规律,是指示流域碳循环过程的重要指标. 研究认为水体 $p\text{CO}_2$ 是流域侵蚀、有机物的降解及从水体到大气的 CO_2 的脱气等过程平衡的结果^[9]. pH、DO、水温、风速等因素共同影响水体 $p\text{CO}_2$ 分布. 本研究通过 $p\text{CO}_2$ 与环境因子的 Pearson 相关性分析表明(表 2),表层水体 $p\text{CO}_2$ 与水中溶解性 CO_2 存在极显著正相关,并表现出水体溶解性 CO_2 与 pH 和 DO 呈显著负相关关系;造成这种现象可能是由于水体溶解性有机碳原位呼吸过程消耗氧气,产生 CO_2 ,进而降低 pH,这一现象与 Cole 等^[24] 的研究结果相似. 同时,水体光合作用消耗河流溶解性 CO_2 ,同时产生 O_2 ,平衡反应($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$)向左移动^[24], H^+ 浓度降低,引起 pH 升高. 根据以往在三峡库区主要河流的监测结果,表明水体叶绿素含量极低(0 ~ 5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)^[25],且库区的山区控制型河流有较高的流速及很短的水力停留时间,因此河流有机碳的原位呼吸作用是引起 $p\text{CO}_2$ 与 pH 和 DO 的显著负相关关系的关键驱动因素,同时也是维持河流过饱和 $p\text{CO}_2$ 的主要因素^[8, 12].

表 2 三峡库区主要河流 $p\text{CO}_2$ 影响因素(Pearson)相关系数¹⁾
Table 2 Pearson correlation coefficients between key parameters and $p\text{CO}_2$ of the major rivers in the Three Gorges Reservoir area

	$p\text{CO}_2$	DOC	HCO_3^-	CO_3^{2-}	CO_2	pH	T	DO	EC	ORP	流量	TDN	TDP
$p\text{CO}_2$	1												
DOC	0.22	1											
HCO_3^-	0.46 **	-0.15	1										
CO_3^{2-}	-0.72 **	-0.20	-0.23	1									
CO_2	0.99 **	0.19	0.48 **	-0.73 **	1								
pH	-0.89 **	-0.27	-0.34 *	0.93 **	-0.89 **	1							
T	-0.16	0.31	-0.20	0.20	-0.26	0.16	1						
DO	-0.64 *	-0.18	-0.20	0.78 **	-0.65 **	0.70 **	0.17	1					
EC	0.19	-0.28	0.51 **	0.12	0.18	-0.05	0.05	0.21	1				
ORP	-0.26	0.08	-0.07	0.11	-0.27	0.15	0.16	0.22	0.26	1			
流量	-0.18	-0.03	-0.23	-0.10	-0.18	-0.01	-0.10	0.00	-0.29	-0.29	1		
TDN	0.30	-0.27	0.32	-0.15	0.31	-0.19	-0.12	-0.29	0.37	-0.17	-0.13	1	
TDP	0.10	0.11	-0.27	0.10	0.06	-0.01	0.32	0.11	-0.11	-0.24	-0.19	0.09	1

1) * * 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

运用 SPSS 18.0 统计软件对影响 $p\text{CO}_2$ 的 12 个因素进行主成分分析(表 3). 经最大方差旋转后, 提取特征值大于 1 的 4 个主成分, 累积贡献率达 73.87%; PC1、PC2、PC3 和 PC4 的方差贡献率分别为 29.43%、18.98%、13.42% 和 12.04%.

与 PC1 密切相关的是 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、溶解性 CO_2 、pH 和 DO, 与 PC2 密切相关的是 HCO_3^- 和 EC. 总体而言, PC1 和 PC2 反映水体中 CO_2 - HCO_3^- - H_2CO_3 碳酸盐平衡对 $p\text{CO}_2$ 的影响, H_2CO_3 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 和 H^+ 共同参与了碳酸盐的平衡反应. 主成分和相关分析的结果一致, 从 PC1 和 PC2 可以看出 $p\text{CO}_2$ 与 pH、DO 和 CO_3^{2-} 显著正相关, 这是因为在弱碱环境下, HCO_3^- 增加促使平衡向右移动, 增加水-气界面的 CO_2 分压差, 促进水体中 CO_2 逸出, 这一结果与张陶等^[12] 关于夏季桂江流域河流 CO_2 脱气的研究结果一致. 而当河流 pH 较高时, 水体中游离 CO_2 就会转变为碳酸盐, 使得水体中 CO_2 分压降低, 导致溶解的 CO_2 处于不饱和状态促进大气中 CO_2 进入水体中^[26, 27].

与 PC3 密切相关的是水温和 TDP. PC3 反映了温度和营养物质对 $p\text{CO}_2$ 的影响. 水温通过影响气体溶解度、微生物活性及氧化还原环境间接影响河流溶解性 CO_2 ^[28]. 本研究结果表明, 水温与 $p\text{CO}_2$ 没有显著的相关关系($r = -0.16$), 可能是由于水体比热较大, 水温的变化波动较小, 以及水体中进行光合作用的生物及植物生物量都很小(水体叶绿素极低), 故对水体溶解性 CO_2 浓度影响较小. 营养物质(TDN、TDP)为水体生物提供必须的营养物质^[10], 可影响生态系统初级生产和呼吸作用平衡, 进而影响河流 CO_2 的产生和消耗. 相关分析结果表明, TDN 与 $p\text{CO}_2$ 通量没有显著相关关系($r = 0.30$), 主要是由于三峡库区山区型河流水体中进行光合作用的生物量很小, 以及人为活动的扰动弱化了 $p\text{CO}_2$ 和氮磷的相关性.

与 PC4 密切相关的是 ORP, 是水体氧化、还原物质相对重要性的综合反映. 本研究结果表明, $p\text{CO}_2$ 与 ORP 相关性关系较弱($r = -0.26$), 与王亮等^[29] 在夏季香溪河库湾温室气体的研究结果一致. 虽然 DO 可以增加河流的 ORP, 且与 $p\text{CO}_2$ 有显著的相关性($P < 0.05$), 但是流域内物质输入的多样性及复杂的生物地球化学过程使得氧化还原电位对水-气界面 CO_2 通量的影响具有不确定性.

综上所述, 三峡库区河流表层水体 $p\text{CO}_2$ 主要

受到碳酸盐体系控制和生物地球化学过程(原位碳呼吸)的共同影响, 是维持河流过饱和 $p\text{CO}_2$ 的重要机制^[6].

表 3 影响因素的载荷及方差贡献率¹⁾

Table 3 Load and variance contribution rate of the

influencing factors by PCA

指标	PC1	PC2	PC3	PC4
DOC	-0.34	-0.40	0.50	0.35
HCO_3^-	0.02	0.79	-0.16	0.01
CO_3^{2-}	0.93	0.11	0.12	-0.02
CO_2	-0.89	0.27	0.03	-0.16
pH	0.96	-0.05	-0.01	0.02
T	0.20	-0.07	0.73	0.16
DO	0.85	0.11	0.10	0.12
EC	0.05	0.86	-0.01	0.16
ORP	0.15	0.18	0.09	0.84
流量	0.05	-0.53	-0.46	-0.23
TDN	-0.23	0.57	-0.04	-0.46
TDP	0.05	-0.03	0.74	-0.51
方差贡献率/%	29.43	18.98	13.42	12.04
累积方差贡献率/%	29.43	48.41	61.83	73.87

1) 黑体字代表绝对的负荷值大于 0.75

通过多元线性回归分析河流 $p\text{CO}_2$ 的生物地球化学影响因素, 可以预测河流表层水体的 $p\text{CO}_2$, 结果表明 pH、DO 能很好地预测表层水体 $p\text{CO}_2$:

$$p\text{CO}_2 = 19\,269.92 - 2\,176.83\text{pH} + 0.07\text{DO}$$

$$(R^2 = 0.80, P < 0.05)$$

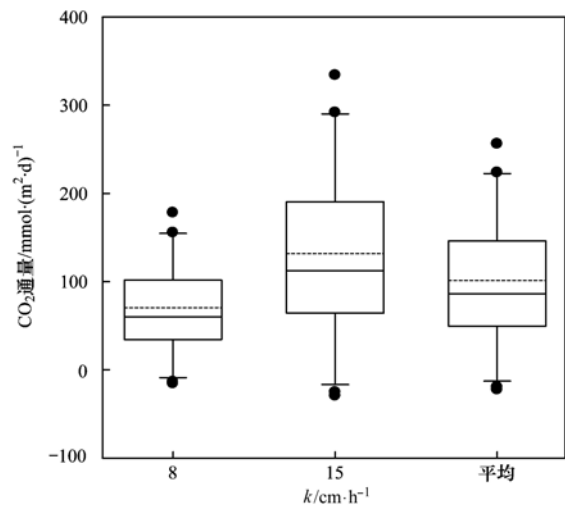
2.3 河流界面 CO_2 通量

世界上主要河流的水-气界面 CO_2 通量见表 4 所示, 表明大部分的河流水体 CO_2 处于过饱和状态, 表现为大气 CO_2 源的特征. 如亚马逊河的 CO_2 通量为 $559.3 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 长江上游龙川江的为 $131.5 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 黄河的为 $456.0 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 总体而言处于温带地区的河流释放量最低, 亚热带河流次之, 热带河流在三者中最高. 由图 3 可知, 本研究中的三峡库区主要河流秋季 CO_2 脱气通量的平均值为 $(101.1 \pm 78.0) \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 其上下限分别为 $(131.9 \pm 101.8) \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $(70.3 \pm 54.3) \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; 最高值为龙潭河的 $334.2 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 远小于热带河流水-气界面 CO_2 通量. 其中有 86% 的采样点(24 个点)表现出大气 CO_2 的源; 但在龙河下游、四步河、磨溪河上游表现出大气 CO_2 的汇现象, 最小值出现在磨溪河上游, 为 $-29.3 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$.

本研究表明三峡库区主要河流为大气 CO_2 源, 且水-气界面 CO_2 通量的空间差异性明显, 这主要归

表 4 世界河流 CO_2 通量
Table 4 CO_2 areal flux in various rivers of the world

河流	位置	气候	$k/\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$	CO_2 通量/ $\text{mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$	文献
长江上游支流龙川江	中国	亚热带	8	131.5	[10]
黄河	中国	亚热带		456.0	[26]
广西柳州融安县官村地下河出口	中国	亚热带		87.2 ~ 243.1	[30]
Amazonian rivers(河流)	巴西	热带		559.3	[24]
Hudson River(河流)	美国	温带		16.1 ~ 36.0	[31]
Samuel	巴西	亚热带	15	361.8	[32]
Eastmainopomoca	加拿大	温带		78.4	[33]
三峡库区主要河流	中国	亚热带	8 ~ 15	70.3 ~ 131.9	本研究



$k = 8 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$ 表示根据世界大河的经验常用最小 k 值得到的三峡库区主要支流 CO_2 通量; $k = 15 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$ 表示根据世界大河的经验常用最大 k 值得到的三峡库区主要支流 CO_2 通量; $k = \text{平均}$ 表示根据世界大河的经验常用平均 $k = 11.5 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$ 得到的三峡库区主要支流 CO_2 通量(箱图中的虚线代表平均值, 黑色线代表中值)

图 3 三峡库区主要河流不同 k 值计算的二氧化碳通量
Fig. 3 Carbon dioxide flux calculated using different k values in the main rivers of the Three Gorges Reservoir area

功于三峡库区不同河流所在的流域内土地利用和人为活动的高的异质性. 因为三峡库区河流 CO_2 主要受有机质的原位呼吸控制, 而河流中有机质主要来源于径流输入过程中携带的有机质及系统内生物残体, 因此不同河流所在的流域的物理特征及人为活动引起河流有机质组分和结构的不同, 进而影响河流溶解性 CO_2 浓度格局. 水体中 pH、DO 含量等其他环境指标的差异直接影响河流原位呼吸作用以及河流光合作用的强弱, 导致有机质降解的途径、产物不同. 三峡库区主要河流流量、流速、降雨等水文条件不同, 使得外源 CO_2 输入不同, 水面扰动的差异导致水-气界面气体传输速率差异等使得三峡库区主要河流水-气界面 CO_2 脱气通量表现出极大

的空间差异. 因此开展河流 $p\text{CO}_2$ 及水-气界面 CO_2 通量研究对了解河流碳循环以及区域乃至全球碳循环过程, 准确评估河流的碳收支状况具有重要意义.

3 结论

(1) 三峡库区主要河流秋季表层水体 $p\text{CO}_2$ 介于 $18.75 \sim 296.31 \text{ Pa}$ 之间, 均值为 $(141.06 \pm 77.51) \text{ Pa}$, 表现出较明显的空间异质性. 其中 86% 的采样点位表现为 CO_2 源的特征, 模型法估算水-气界面 CO_2 通量平均值为 $(101.1 \pm 78.0) \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$, 其上下限分别为 $(131.9 \pm 101.8) \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $(70.3 \pm 54.3) \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$.

(2) 河流表层水体 $p\text{CO}_2$ 与 DO、pH 和溶解性无机碳组成表现出显著的相关性, 表明碳酸盐岩系统和水体碳呼吸的共同作用是维持其高 $p\text{CO}_2$ 的主要因素, 并且 pH 和 DO 可以很好地预测 $p\text{CO}_2$.

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): 401-450.
[3] Dyer K R. Biogeochemistry of major world river[J]. *Aquatic Conservation Marine & Freshwater Ecosystems*, 1991, **1**(2): 189-190.
[4] Raymond P A, Hartmann J, Lauerwald R, *et al.* Global carbon dioxide emissions from inland waters[J]. *Nature*, 2013, **503**(7476): 355-359.
[5] Huang W M, Bi Y H, Hu Z Y, *et al.* Spatio-temporal variations of GHG emissions from surface water of Xiangxi River in Three Gorges Reservoir region, China[J]. *Ecological Engineering*, 2015, **83**: 28-32.
[6] Sawakuchi H O, Neu V, Ward N D, *et al.* Carbon dioxide emissions along the lower Amazon river[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2017, **4**: 76.
[7] Neal C, Harrow M, Williams R J. Dissolved carbon dioxide and oxygen in the river Thames: spring-summer 1997[J]. *Science of the Total Environment*, 1998, **210-211**: 205-217.

- [8] Li S Y, Lu X X, Bush R T. CO₂ partial pressure and CO₂ emission in the Lower Mekong River[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, **504**: 40-56.
- [9] Abril G, Martinez J M, Artigas L F, *et al.* Amazon River carbon dioxide outgassing fuelled by wetlands[J]. *Nature*, 2014, **505** (7483): 395-398.
- [10] Li S Y, Lu X X, He M, *et al.* Daily CO₂ partial pressure and CO₂ outgassing in the upper Yangtze River basin: a case study of the Longchuan River, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, **466-467**: 141-150.
- [11] Van Geldern R, Schulte P, Mader M, *et al.* Spatial and temporal variations of pCO₂, dissolved inorganic carbon and stable isotopes along a temperate karstic watercourse [J]. *Hydrological Processes*, 2015, **29**(15): 3423-3440.
- [12] 张陶, 李建鸿, 蒲俊兵, 等. 桂江流域夏季水-气界面 CO₂ 脱气的空间变化及其影响因素[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2773-2783.
- Zhang T, Li J H, Pu J B, *et al.* Spatial variations of CO₂ degassing across water-air interface and its impact factors in summer in Guijiang river, China[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2773-2783.
- [13] Dai M H, Yin Z Q, Meng F F, *et al.* Spatial distribution of riverine DOC inputs to the ocean: an updated global synthesis [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2012, **4** (2): 170-178.
- [14] 吴学谦, 操满, 傅家楠, 等. 三峡水库夏季干流、支流(草堂河)水体的二氧化碳分压及扩散通量[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2015, **21**(3): 311-318.
- Wu X Q, Cao M, Fu J N, *et al.* Partial pressure and diffusion flux of dissolved carbon dioxide in the main stream of the Three Gorge Reservoir and the Caotang River in summer[J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science)*, 2015, **21**(3): 311-318.
- [15] 张军伟, 雷丹, 肖尚斌, 等. 三峡库区香溪河秋末至中冬 CO₂ 和 CH₄ 分压特征分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(8): 2924-2931.
- Zhang J W, Lei D, Xiao S B, *et al.* Partial pressure of carbon dioxide and methane from autumn to winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2016, **37** (8): 2924-2931.
- [16] Hunt C W, Salisbury J E, Vandemark D. Contribution of non-carbonate anions to total alkalinity and overestimation of pCO₂ in New England and New Brunswick rivers [J]. *Biogeosciences*, 2011, **8**(10): 3069-3076.
- [17] Soumis N, Canuel R, Lucotte M. Evaluation of two current approaches for the measurement of carbon dioxide diffusive fluxes from lentic ecosystems [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(8): 2964-2969.
- [18] UNESCO/IHA GHG. Greenhouse gas emissions related to freshwater reservoirs [R]. World Bank Report. Washington, DC: The World Bank, 2010. 64-127.
- [19] Cole J J, Caraco N F. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF₆[J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, **43**(4): 647-656.
- [20] 奚姗姗, 周春财, 刘桂建, 等. 巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(2): 542-547.
- Xi S S, Zhou C C, Liu G J, *et al.* Spatial and temporal distributions of nitrogen and phosphate in the Chaohu Lake[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 542-547.
- [21] 鲍林林, 李叙勇. 河流沉积物磷的吸附释放特征及其影响因素[J]. *生态环境学报*, 2017, **26**(2): 350-356.
- Bao L L, Li X Y. Release and absorption characteristics of phosphorus in river sediment and their influential factors [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(2): 350-356.
- [22] 杨平, 全川. 淡水水生生态系统温室气体排放的主要途径及影响因素研究进展[J]. *生态学报*, 2015, **35**(20): 6868-6880.
- Yang P, Tong C. Emission paths and measurement methods for greenhouse gas fluxes from freshwater ecosystems: a review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(20): 6868-6880.
- [23] Finlay K, Vogt R J, Bogard M J, *et al.* Decrease in CO₂ efflux from northern hardwater lakes with increasing atmospheric warming[J]. *Nature*, 2015, **519**(7542): 215-218.
- [24] Cole J J, Caraco N F. Carbon in catchments: connecting terrestrial carbon losses with aquatic metabolism[J]. *Marine and Freshwater Research*, 2001, **52**(1): 101-110.
- [25] 彭昱. 重庆三峡库区支流河口回水区富营养化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005. 2-52.
- Peng Y. Eutrophication investigation on the backwater reach of the branch river of the Three Gorges Reservoir[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005. 2-52.
- [26] 刘文, 蒲俊兵, 于爽, 等. 广西五里峡水库夏季溶解无机碳行为的初步研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 2959-2966.
- Liu W, Pu J B, Yu S, *et al.* Preliminary research on the feature of dissolved inorganic carbon in Wulixia reservoir in summer, Guangxi, China [J]. *Environmental Science*, 2014, **35** (8): 2959-2966.
- [27] 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 等. 亚热带典型岩溶溪流气界面 CO₂ 交换通量变化过程及其环境影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2487-2495.
- Li L, Pu J B, Li J H, *et al.* Variations of CO₂ exchange fluxes across water-air interface and environmental meaning in a surface stream in subtropical karst area, SW China [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2487-2495.
- [28] 蒋滔, 郭劲松, 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.
- Jiang T, Guo J S, Li Z, *et al.* Air-water surface greenhouse gas flux in Pengxi river at different operational stages of the Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2012, **33** (5): 1463-1470.
- [29] 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.
- Wang L, Xiao S B, Liu F D, *et al.* Fluxes of greenhouse gases from Xiangxi river in summer and their influencing factors [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(5): 1471-1475.
- [30] 李凌宇, 于瑞宏, 田明扬, 等. 黄河二氧化碳逸出时空变化及其影响因素——以头道拐水文站为例[J]. *生态学报*, 2017, **37**(22): 7636-7646.
- Li L Y, Yu R H, Tian M Y, *et al.* Spatial-temporal variations and influencing factors of carbon dioxide evasion from the Yellow river: an example of the Toudaoguai Gauging Station [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(22): 7636-7646.
- [31] 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.
- [32] St Louis V L, Kelly C A, Duchemin é, *et al.* Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate: reservoirs are sources of greenhouse gases to the atmosphere, and their surface areas have increased to the point where they should be included in global inventories of anthropogenic emissions of greenhouse gases [J]. *BioScience*, 2000, **50**(9): 766-775.
- [33] 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.

欢迎订阅 2018 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2018 年为大 16 开本,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Spatial-Temporal Change Evolution of PM _{2.5} in Typical Regions of China in Recent 20 Years	LUO Yi, DENG Qiong-fei, YANG Kun, <i>et al.</i>	(3003)
Evaluation the Extent of Health Damage Caused by PM _{2.5} Particulate in Xi'an City	WEI Guo-ru, SHI Xing-min	(3014)
Analysis of Chemical Composition, Source and Evolution of Submicron Particles in Xianghe, Hebei Province	JIANG Qi, WANG Fei, SUN Ye-le	(3022)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Components of PM _{2.5} During Autumn in the Northern Suburb of Nanjing	XU Zu-fei, CAO Fang, GAO Song, <i>et al.</i>	(3033)
Comparison of Chemical Components Characteristics of PM _{2.5} Between Haze and Clean Periods During Summertime in Lin'an	LIANG Lin-lin, SUN Jun-ying, ZHANG Yang-mei, <i>et al.</i>	(3042)
Characteristics and Sources of Carbon Components in PM _{2.5} During Autumn and Winter in Panjin City	ZHANG Lei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i>	(3051)
Aerosol Optical Properties and Light Absorption Enhancement of EC During Wintertime in Nanjing	HUANG Cong-cong, MA Yan, ZHENG Jun	(3057)
Concentration, Solubility, and Dry Deposition Flux of Trace Elements in Fine and Coarse Particles in Qingdao During Summer	LI Peng-zhi, LI Qian, SHI Jin-hui, <i>et al.</i>	(3067)
Characteristics and Sources of Dissolved Heavy Metals in Summer Precipitation of Taiyuan City, China	YE Ai-ling, CHENG Ming-chao, ZHANG Lu, <i>et al.</i>	(3075)
Characteristics of and Factors Affecting Atmospheric CO ₂ Concentration in Hangzhou	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, JIANG Yu-jun, <i>et al.</i>	(3082)
Treatment Status and Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industrial Sources	JING Sheng-ao, WANG Hong-li, ZHU Hai-lin, <i>et al.</i>	(3090)
Characteristics of Industrial VOCs Emission Sources and Control Technology Application in a Prefecture-level City Region-Based on Qinhuangdao City	HU Xu-rui, HU Xiao-yu, WANG Can	(3096)
Pollution Condition and Health Risk Assessment of VOCs in Fermentation Exhaust from Penicillin Production	GUO Bin, YAO Rui-jing, ZHANG Shuo, <i>et al.</i>	(3102)
Measurements of OC and EC Emission Factors for Light-duty Gasoline Vehicles	HUANG Cheng, HU Qing-yao, LU Jun	(3110)
Pollution Levels and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Nanjing	TIAN Chun-hui, YANG Ruo-zhu, Gulizhaer Yilihamu, <i>et al.</i>	(3118)
Contamination Levels and Source Analysis of Heavy Metals in the Finer Particles of Urban Road Dust from Xi'an, China	SHI Dong-qi, LU Xin-wei	(3126)
pCO ₂ in the Main Rivers of the Three Gorges Reservoir and Its Influencing Factors	LUO Jia-chen, MAO Rong, LI Si-yue	(3134)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Surface Water and Groundwater of the Jinghe River	KOU Yong-chao, KUA Kun, LI Zhou, <i>et al.</i>	(3142)
Urban Runoff Phosphorus Removal Pathways in Bioretention Systems	LI Li-qing, LIU Yu-qing, YANG Jia-min, <i>et al.</i>	(3150)
Succession Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Relationships with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai	YANG Li, ZHANG Wei, SHANG Guang-xia, <i>et al.</i>	(3158)
Spatio-temporal Variations of Diatom Community and Their Relationship with Water Environment in Fuxian Lake	LI Rui, CHEN Guang-jie, KANG Wen-gang, <i>et al.</i>	(3168)
Effects of Algal Blooms and Their Degradation on the Sediment-water Micro-interface	WANG Yong-ping, XIE Rui, CHAO Jian-ying, <i>et al.</i>	(3179)
Effect of Biochar on Root Morphological Characteristics of Wetland Plants and Purification Capacity of Constructed Wetland	XU De-fu, PAN Qian-cheng, LI Ying-xue, <i>et al.</i>	(3187)
Preparation of Mn-Co/Ceramic Honeycomb Catalyst and Its Performance on Catalytic Ozonation of Hydroquinone	ZHANG Lan-he, GAO Wei-wei, CHEN Zi-cheng, <i>et al.</i>	(3194)
Degradation Mechanism of Tetracycline Using Fe/Cu Oxides as Heterogeneous Activators of Peroxymonosulfate	LI Jing, BAO Jian-guo, DU Jiang-kun, <i>et al.</i>	(3203)
Behavior and Mechanisms of Cd(II) Adsorption from Water by Niobate-Modified Titanate Nanosheets	KANG Li, LIU Wen, LIU Xiao-na, <i>et al.</i>	(3212)
Trace Amounts of Phosphorus Removal Based on the in-suit Oxidation Products of Iron or Manganese in a Biofilter	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i>	(3222)
Effect of Preparation Methods on Phosphate Adsorption by Iron-Titanium Binary Oxide: Coprecipitation and Physical Mixing	ZHONG Yan, WANG Jiang-yan, CHEN Jing, <i>et al.</i>	(3230)
Effects of Conductivity on Performance of a Combined System of Anaerobic Acidification, Forward Osmosis, and a Microbial Fuel Cell	LU Yu-qin, LIU Jin-meng, WANG Xin-hua, <i>et al.</i>	(3240)
COD Requirement for Biological Phosphorus Removal Granule System Under Different Phosphorus Concentrations	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>	(3247)
Effect of Substrate Concentration on SAD Collaborative Nitrogen and Carbon Removal Efficiency in an ABR Reactor	ZHANG Min, JIANG Ying, WANG Yao-qi, <i>et al.</i>	(3254)
Evaluation of Advanced Nitrogen Removal from Coking Wastewater Using Sulfide Iron-containing Sludge as a Denitrification Electron Donor	FU Bing-bing, PAN Jian-xin, MA Jing-de, <i>et al.</i>	(3262)
Stability of Nitrification Combined with Limited Filamentous Bulking Under Intermittent Aeration	GAO Chun-di, SUN Da-yang, AN Ran, <i>et al.</i>	(3271)
Filamentous Sludge Microbial Community of a SBR Reactor Based on High-throughput Sequencing	HONG Ying, YAO Jun-qin, MA Bin, <i>et al.</i>	(3279)
Impact of Nano Zero-Valent Iron (NZVI) on Methanogenic Activity, Physiological Traits, and Microbial Community Structure in Anaerobic Digestion	SU Run-hua, DING Li-li, REN Hong-qiang	(3286)
Effects of Gas/Water Ratio on the Characteristics of Nitrogen Removal and the Microbial Community in Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	ZHANG Qian, JI Fang-ying, FU Xu-fang, <i>et al.</i>	(3297)
Comparison of Extraction Methods of Extracellular Polymeric Substances from Activated Sludge	SUN Xiu-yue, TANG Zhu, YANG Xin-ping	(3306)
Identification and Characterization of a Hypothermic Alkaliphilic Aerobic Denitrifying Bacterium <i>Pseudomonas monteilii</i> Strain H97	CAI Xi, HE Teng-xia, YE Qing, <i>et al.</i>	(3314)
Isolation, Identification, and Biodegradation Behaviors of a Perfluorooctane Sulfonic Acid Precursor (PreFOSs) Degrading Bacterium from Contaminated Soil	ZHAO Shu-yan, ZHOU Tao, WANG Bo-hui, <i>et al.</i>	(3321)
Microbial Community Distributions in Soils of an Oil Exploitation Site	CAI Ping-ping, NING Zhuo, HE Ze, <i>et al.</i>	(3329)
Characteristics of Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities over Different Reclaimed Years in a Copper Tailings Dam	WANG Rui-hong, JIA Tong, CAO Miao-wen, <i>et al.</i>	(3339)
Risk Analysis of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil Around a Bauxite Residue Disposal Area in Guangxi	GUO Ying, LI Yu-bing, XUE Sheng-guo, <i>et al.</i>	(3349)
Occurrence and Distribution of Phthalate Esters in Urban Soils of Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i>	(3358)
Profile Distribution of Paddy Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Chengdu Plain	LI Shan, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i>	(3365)
Correlation Between Soil Organic and Inorganic Carbon and Environmental Factors in Cotton Fields in Different Continuous Cropping Years in the Oasis of the Northern Tarim Basin	ZHAO Jing-jing, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i>	(3373)
Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Soil Physicochemical Factors in Four Different Land Use Types of the Northern Tarim Basin	AN Shen-qun, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i>	(3382)
Short-term Mechanism of Warming-induced Stability for Organic Carbon in the Karst Plateau Soil	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i>	(3391)
Effects of Boron Treatment on Arsenic Uptake and Efflux in Rice Seedlings	ZHU Yi, SUN Guo-xin, CHEN Zheng, <i>et al.</i>	(3400)
Comparative Analysis of Different Soil Amendment Treatments on Rice Heavy Metal Accumulation and Yield Effect in Pb and Cd Contaminated Farmland	HU Xue-fang, TIAN Zhi-qing, LIANG liang, <i>et al.</i>	(3409)
Seasonal Variation in Surface Ozone and Its Effect on the Winter Wheat and Rice in Nanjing, China	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, WEI Li, <i>et al.</i>	(3418)
Hair Mercury Concentrations in Residents of Fuling and Zhongxian in the Three Gorges Reservoir Region and Their Influence Factors	CHENG Nan, XIE Qing, FAN Yu-fei, <i>et al.</i>	(3426)
Removal of Typical Antibiotics During Aerobic Composting of Human Feces	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian	(3434)
Effect of COD/SO ₄ ²⁻ Ratio on Anaerobic Digestion of Penicillin Bacterial Residues	QIANG Hong, LI Yu-you, PEI Meng-fu	(3443)
Characteristics of Odor Emissions from Fresh Compost During Storage and Application	HE Pin-jing, JIANG Ning-ling, XU Xian, <i>et al.</i>	(3452)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on Ammonia Volatilization from a Paddy Field Treated with Conventional Synthetic Fertilizer and Manure	PANG Bing-kun, ZHANG Jing-sha, WU Jie, <i>et al.</i>	(3460)