

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第11期

Vol.39 No.11

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

2010~2015年我国水泥工业 NO _x 排放清单及排放特征	蒋春来, 宋晓晖, 钟悦之, 孙亚梅, 雷宇 (4841)
兰州市煅烧污染物排放清单及其对 PM _{2.5} 浓度贡献	郭文凯, 刘晓, 朱玉凡, 陈强, 杜永刚 (4849)
北京地区气溶胶水溶性组分粒径分布特征	杜翔, 赵普生, 苏捷, 董群 (4858)
郑州市夏、秋季大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征	赵庆炎, 姜楠, 燕启社, 王申博, 韩世杰, 杨留明, 张瑞芹 (4866)
菏泽市冬季 PM _{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的昼夜变化特征	孟静静, 刘晓迪, 侯战方, 李静, 魏本杰, 邢继钊 (4876)
我国典型钢铁行业主要工艺环节排放颗粒物源成分谱特征	温杰, 杨佳美, 李蒲, 郁佳, 吴建会, 田瑛泽, 张进生, 史国良, 冯银厂 (4885)
嘉兴市 2015 年人为源 VOCs 排放清单	郝欢, 万梅, 戎宇, 兰亚琼, 熊传芳, 晁娜 (4892)
上海某石化园区周边区域 VOCs 污染特征及健康风险	盛涛, 陈筱佳, 高松, 刘启贞, 李学峰, 伏晴艳 (4901)
SBR 工艺城市污水处理厂微生物气溶胶逸散特征	杨凯雄, 侯红勋, 王颖哲, 史昊然, 许光素, 韩云平, 刘俊新, 李琳 (4909)
太湖有色可溶性有机物组成结构对不同水文情景的响应	石玉, 周永强, 张运林, 姚晓龙, 黄昌春 (4915)
巢湖 2016 年蓝藻水华时空分布及环境驱动力分析	胡旻琪, 张玉超, 马荣华, 张壹萱 (4925)
蓝藻水华形成过程对氮磷转化功能细菌群的影响	彭宇科, 路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (4938)
三峡水库低水位运行时干流回水对支流水环境的影响	陈紫娟, 宋献方, 张应华, 魏潇, 唐瑜, 秦文婧 (4946)
纳米银对胶州湾西北部海区及河口区沉积物反硝化能力和功能基因丰度的影响	白洁, 田延昭, 孙鹏飞, 白晓岩, 李岩然, 赵阳国 (4956)
澜沧江流域水体悬浮颗粒物 δ ¹⁵ N 空间差异及成因分析	唐咏春, 徐飘, 杨正健, 张思思, 刘德富, 纪道斌 (4964)
潮白河冲洪积扇典型包气带剖面反硝化强度垂向空间分布规律	耿宏志, 邹环, 李鸣晓, 张莹, 从辉, 席北斗 (4972)
蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素	张涛, 何锦, 李敬杰, 曹月婷, 龚磊, 刘金巍, 边超, 蔡月梅 (4981)
典型岩溶地区岩溶泉溶解性碳浓度变化及其通量估算	熊佰炼, 张进忠, 彭韬, 郝卓, 高扬 (4991)
农村多水塘系统景观结构对非点源污染中氮截留效应的影响	李玉凤, 刘红玉, 刘军志, 娄彩荣, 王娟 (4999)
城市典型不透水下垫面径流中邻苯二甲酸酯的污染特征	刘雨童, 李田, 彭航宇 (5007)
不同降雨条件下植被对绿色屋顶径流调控效益影响	葛德, 张守红 (5015)
四氧化三铁改性沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附作用	王丹赫, 张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 梁舒静, 汲雨, 奚秀清 (5024)
厌氧条件下可溶性有机质对汞的还原与氧化作用	卞永荣, 顾宝华, 朱波, 程虎, 谷成刚, 杨兴伦, 宋洋, 王芳, 叶茂, 蒋新 (5036)
光助-二茂铁/H ₂ O ₂ 非均相体系降解磺胺二甲基嘧啶	张彪军, 赵姚云川, 房岐, 石凤丽, 张月起, 赵群, 田森林, 李英杰 (5043)
基于同位素技术的短程硝化过程 N ₂ O 产生途径	杨玉兵, 杨庆, 李洋, 周薛扬, 李健敏, 刘秀红 (5051)
基质比对厌氧氨氧化耦合反硝化脱氮除碳的影响	安芳娇, 黄剑明, 黄利, 乔瑞, 王瑾, 陈永志 (5058)
厌氧/好氧 SPNDPR 系统实现低 C/N 城市污水同步脱氮除磷的优化运行	于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 甄建园, 杜世明, 张帆 (5065)
污水处理厂 SNAD 工艺小试	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰 (5074)
盐度对中试厌氧氨氧化脱氮特性的影响及其恢复动力学	唐佳佳, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 张军, 赵红, 韩长民 (5081)
中试 ANAMMOX-ASBR 处理火电厂脱硫脱硝尾液的抑制及恢复特性	张军, 于德爽, 王晓霞, 唐佳佳, 赵红, 韩长民, 应凌俏 (5090)
碳氮比对颗粒污泥 CANON 反应器脱氮性能和 N ₂ O 释放的冲击影响	付昆明, 姜娜, 苏雪莹, 廖敏辉, 仇付国, 曹秀芹 (5101)
污泥性质对微波预处理-厌氧消化的影响及古菌群落结构分析	房平, 唐安平, 付兴民, 李伟, 文洋, 佟娟, 魏源送 (5108)
重庆市农地重金属基线值的厘定及其积累特征分析	伍福琳, 陈丽, 易廷辉, 杨志敏, 陈玉成 (5116)
韩江流域土壤中有有机氯农药的特征分布	刘佳, 丁洋, 祁士华, 瞿程凯 (5127)
有机磷酸酯在重庆不同城市功能区土壤的分布特征及来源	杨志豪, 何明靖, 杨婷, 卢俊峰, 魏世强 (5135)
纳米零价铁和过氧化钙联合降解土壤淋洗废液的 α-HCH	姚静波, 周杰, 王明新, 苟志祥, 薛金娟 (5142)
株洲清水塘工业区周边土壤微生物群落特征	申丽, 李振桦, 曾伟民, 余润兰, 吴学玲, 李交昆, 王烁琨 (5151)
生物炭对施粪肥土壤中根际真菌群落多样性及相互作用的影响	王丹丹, 杨泽平, 赵远, 梁玉婷 (5163)
生物炭负载氮还田对水稻生长、根系形态及氮素利用的影响	俞映惊, 王悦满, 侯朋福, 杨林章, Alfred Oduor Odindo, 薛利红 (5170)
颗粒有机质对水稻镉吸收及转运的影响	郭毅轩, 赵秀兰 (5180)
施肥对向日葵吸收积累 Cd 的影响	曹柳, 杨俊兴, 郭劲君, 郭俊梅, 郑国砥, 卢一富 (5189)
不同水稻品种对重金属的积累特性	林小兵, 周利军, 王惠明, 刘晖, 武琳, 俞莹, 胡敏, 何波, 周青辉, 黄欠如 (5198)
芦竹和木本植物间种修复重金属污染土壤	曾鹏, 郭朝晖, 肖细元, 彭驰, 黄博 (5207)
三峡库区典型河流水-气界面 CO ₂ 通量日变化观测及其影响因素分析	罗佳宸, 李思悦 (5217)
富营养化湖区 CH ₄ 排放特征及其影响因素	商东耀, 肖启涛, 胡正华, 谢燕红, 黄文晶, 张弥 (5227)
短期放牧对半干旱草地生态系统 CO ₂ 和 N ₂ O 排放的影响	申颜, 孙建平, 罗玉坤, 刁华杰, 闫卫东, 王常慧, 董宽虎 (5237)
覆膜方式和灌溉对夏玉米产量及农田碳排放强度的影响	罗晓琦, 张阿凤, 陈海心, 冯浩 (5246)
臭氧浓度升高对植物源挥发性有机化合物 (BVOCs) 影响的研究进展	冯兆忠, 袁相洋 (5257)
地下水“三氮”污染来源及其识别方法研究进展	杜新强, 方敏, 冶雪艳 (5266)
污水生物处理中抗生素的去除机制及影响因素	张翔宇, 李茹莹, 季民 (5276)
《环境科学》征订启事 (4848) 《环境科学》征稿简则 (4990) 信息 (5188, 5216, 5236)	

三峡库区典型河流水-气界面 CO_2 通量日变化观测及其影响因素分析

罗佳宸^{1,2}, 李思悦^{1*}

(1. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400074; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为研究河流水-气界面 CO_2 通量的季节和日变化特征; 于 2016 年 7 月 15 ~ 17 日以及 2017 年 11 月 4 ~ 6 日对三峡库区嘉陵江支流竹溪河进行定点定时采集表层水样, 并同步监测关键环境因子, 采用亨利定律结合薄边界层模型计算其水-气界面 CO_2 通量 $F(\text{CO}_2)$ 。结果表明, 竹溪河表层水 CO_2 分压 $p(\text{CO}_2)$ 及界面 CO_2 脱气通量呈现出显著的日间和季节变化, 以及明显的日内变化特征; 在上午 09:00 前后达到释放高峰, 随后波动下降; 水-气界面 CO_2 通量日间均值分别为 (100.9 ± 31.6) 、 (78.6 ± 12.1) 、 (83.9 ± 29.7) 、 (137.5 ± 42.1) 、 (147.6 ± 34.0) 、 (132.4 ± 21.7) $\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; 并表现出夏季表层水体 CO_2 释放通量明显低于秋季, 其均值分别为 (87.8 ± 27.5) $\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 (139.2 ± 34.0) $\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; 总体表现出大气 CO_2 源的特征。竹溪河 $p(\text{CO}_2)$ 和 $F(\text{CO}_2)$ 受到诸多环境因子的影响, 相关分析表明, pH、碱度、水温 and 气温是主要环境影响因子, CO_2 释放通量可以用 pH 和碱度预测。

关键词: CO_2 释放; 水-气界面; 日变化; 季节变化; 环境因子

中图分类号: X14 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)11-5217-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201803059

Daily Variation of CO_2 Flux at Water-Air Interface and Analysis of Its Affecting Factors in a Typical River of the Three Gorges Reservoir

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

(1. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400074, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Diurnal and seasonal characterization of CO_2 partial pressure $p(\text{CO}_2)$ and CO_2 areal flux $F(\text{CO}_2)$ at the water-air interface in an anthropogenic river in the Three Gorges Reservoir area was studied. A tributary of the Jialing River in Chongqing Municipality was chosen, and daily and seasonal samples were taken in summer and autumn, focusing on riverine $p(\text{CO}_2)$, $F(\text{CO}_2)$, and their associated controls. Henry's law combined with the thin boundary layer model was adopted to estimate the CO_2 flux via the water-air interface. The results indicated that $F(\text{CO}_2)$ was not high on average, namely (87.8 ± 27.5) $\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ and (139.2 ± 34.0) $\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ in summer and autumn, respectively. The water-air interface $F(\text{CO}_2)$ showed significant hourly, daily, and seasonal variations. CO_2 release peaked around 09:00 and then slightly decreased. We also found that pH, alkalinity, water, and temperature were significantly related to $p(\text{CO}_2)$ and $F(\text{CO}_2)$, whereas pH and alkalinity were the best predictors of $F(\text{CO}_2)$. This study aids understanding of the impacts of urbanization on CO_2 emissions in the rivers and helps to re-evaluate local riverine CO_2 budgets.

Key words: CO_2 emission; water-air interface; daily change; seasonal change; environmental factors

河流、湖泊、水库等陆地地表水域生态系统是大气 CO_2 的重要来源^[1~5]; Cole 等^[6]发表评论称, 全球河流对大气 CO_2 的贡献量(以 C 计)约为 0.35 $\text{Gt} \cdot \text{a}^{-1}$; 2013 年, Raymond 等^[7]重新估算全球内陆水体 CO_2 释放通量, 发现河流水-气界面 CO_2 通量(以 C 计)为 1.80 $\text{Gt} \cdot \text{a}^{-1}$ 。如此大的评估差异主要来自野外特别是小河流观察数据的缺乏; 因此, 开展典型河流的水-气界面碳释放研究, 量化河流水-气界面 CO_2 脱气通量, 对评估河流碳循环过程及在区域碳循环中的作用具有重要的科学意义。

目前, 国外关于内陆水体水-气界面 CO_2 通量的研究主要在南美的亚马逊河和北美的密西西比河

等大江大河开展的定量工作^[8~11]; 研究表明大多数河流溶解性 CO_2 呈饱和状态; 并发现世界范围内河流在水体有机质浓度、pH、营养状况、水温和风速等方面存在很大的差别, 因此不同河流水-气界面 CO_2 脱气通量 $F(\text{CO}_2)$ 差异较大。我国相比国外, 对水-气界面 CO_2 通量的研究主要集中在长江、黄河等^[12~15]。例如, Li 等^[12]对长江上游龙川江观测, 结果表明水体 $p(\text{CO}_2)$ 为 23.2 ~ 838.3 Pa, 平均值

收稿日期: 2018-03-11; 修订日期: 2018-04-19

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

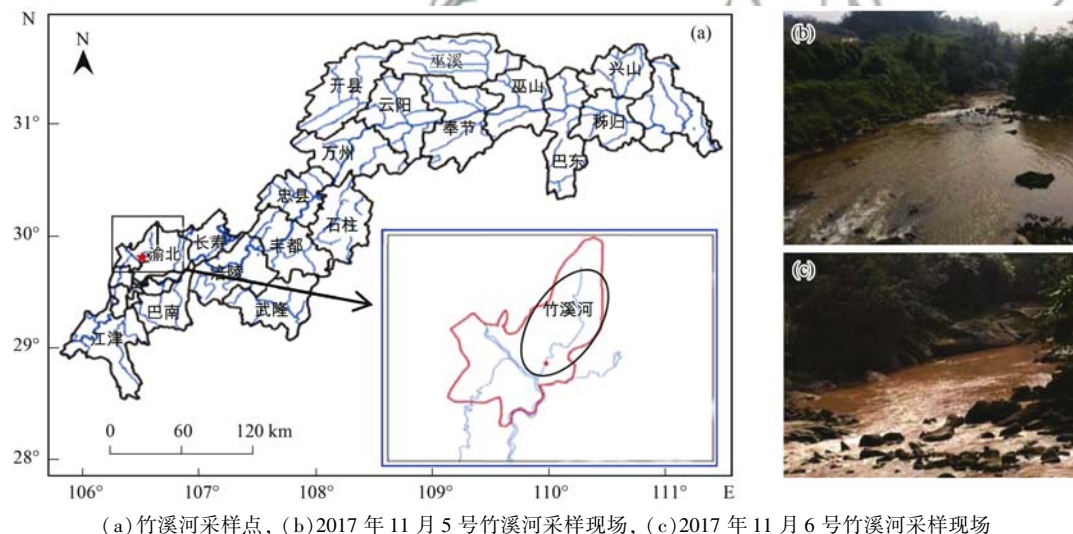
为 124.2 Pa, 是大气 CO_2 浓度的 3 ~ 4 倍. Ran 等^[13]报道了黄河上游水体的 CO_2 分压, 介于 20.2 ~ 3 030.0 Pa, 均值为 283.8 Pa, 为大气 CO_2 浓度的 7 倍.

以上研究表明, 虽然我国学者在河流水-气界面碳交换通量的观测上取得较大进展; 但碳循环伴生的水-气界面 CO_2 通量研究主要建立在年或季这样大时间尺度上, 以日变化的小时间尺度上的定量观测十分有限. 由于河流受人类活动例如城镇化影响扰动大, 相对于自然河流其温室气体排放更显著; 昼间尺度上的环境因子与水-气界面 CO_2 通量可能会有不同的表现形式, 同时昼间通量观测可以辅助对河流的碳源/汇作用的评估. 通过定量观测河流 CO_2 释放通量, 以期评价人类活动对河流温室气体的影响^[16]. 本研究于 2016 年 7 月 15 ~ 17 日以及 2017 年 11 月 4 ~ 6 日, 定点定时对位于重庆主城区段的嘉陵江支流竹溪河水-气界面 CO_2 通量连续日间变化观测, 以及关键水化学和水质指标的监

测; 分析 $p\text{CO}_2$ 和 $F(\text{CO}_2)$ 的季节和日变化特征及其影响因素, 以期今后深入认识小时间尺度河流水-气界面碳交换对大气 CO_2 贡献的精确估算提供重要的数据支撑, 同时为河流界面 CO_2 通量对该区域城镇化进程的响应提供基础数据.

1 研究地区

本研究根据前期考察, 观测点位设在嘉陵江支流竹溪河下游龙门大桥附近 (106° 32' 19" E, 29° 48' 24" N, 图 1), 离汇入嘉陵江河口距离 4 km. 竹溪河源于重庆渝北区华泰乡境内, 全长 65.05 km, 流经两江新区复兴片区全境, 最后汇入嘉陵江. 目前, 竹溪河正面临城镇化进程, 加剧流域土地利用方式的转变, 引起诸如植被毁损和水土流失等生态环境问题. 研究点位地处亚热带大陆性季风气候, 雨量充沛, 多年平均降水量为 1071.5 mm; 年平均气温为 18℃ 左右, 最热月多为 8 ~ 9 月, 最冷月多为 12 月 ~ 次年 2 月.



(a) 竹溪河采样点, (b) 2017 年 11 月 5 号竹溪河采样现场, (c) 2017 年 11 月 6 号竹溪河采样现场

图 1 三峡库区竹溪河采样点示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites of the Zhuxi River in the Three Gorges area

2 材料与方法

2.1 样品采集与分析方法

样品采集于 2016 年 7 月 15 ~ 17 日 (夏季) 和 2017 年 11 月 4 ~ 6 日 (秋季), 采样期间天气晴好, 避免了降雨造成水面波动的影响. 具体的采样时间分为 2 个时段包括 08:00 ~ 12:00 和 14:00 ~ 18:00; 每间隔 10 min 使用 CyberScan PCD 650 多参数水质分析仪 (Eutech, 美国) 测定 pH 值、水温、溶解氧 (DO) 和电导率 (EC); 并同步使用 Testo 410-1 便携式叶轮风速仪 (德图, 德国) 测定气温和风速. 每间

隔 10 min 用 200 mL 聚乙烯瓶采集 10 cm 表层水样运回实验室进行化学分析.

于采样当天用 0.70 μm Whatman GF/F 玻璃纤维膜过滤水样, 将滤液分装于去离子水润洗的聚乙烯瓶中, 不留空隙, 用于溶解性总氮 (TDN)、溶解性总磷 (TDP) 测定和溶解性有机碳 (DOC) 测定. 立即取 25.00 mL 过滤水样用 0.020 0 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐酸滴定碱度; 表层水体中 $p(\text{CO}_2)$ 根据碱度、pH 及水温求得.

TDN 和 TDP 采用国标法测定; TDN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 (GB 11894-89) 测定, TDP 采用钼酸铵分光光度法 (GB 11893-89) 测

定^[17]。DOC 采用 multi N/C 2100S 总有机碳分析仪(德国耶拿,德国)测定。

2.2 二氧化碳分压计算

由测得的 pH、碱度和水温,计算出水溶液中的 CO₂ 分压 $p(\text{CO}_2)$ ^[12]:

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

$$\text{p}K_0 = -7 \times 10^{-5} T^2 + 0.016 T + 1.11 \tag{2}$$

$$\text{p}K_1 = 1.1 \times 10^{-4} T^2 - 0.012 T + 6.58 \tag{3}$$

$$\text{p}K_2 = 9 \times 10^{-5} T^2 - 0.0137 T + 10.62 \tag{4}$$

式中, K_0 、 K_1 和 K_2 为平衡常数。由于水体的 pH 均大于 7.7, HCO_3^- 视为与碱度相当^[12]。

水-气界面的 CO₂ 脱气通量主要受大气和水体中二氧化碳分压差和风速等因素影响。根据 Fick^[18] 定律, CO₂ 界面通量可以用以下公式^[18,19]:

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

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

$$K = K_{600} \times (\text{Sc}/600)^{-x} \tag{7}$$

$$K_{600} = 13.82 + 0.35w \tag{8}$$

$$\text{Sc} = 1911.1 - 118.11t + 3.4527t^2 - 0.04132t^3 \tag{9}$$

式中, Flux 为水-气界面 CO₂ 交换通量 [$\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$], K 为气体扩散系数 ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$), K_h 为亨利常数,即气体溶解度 ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1}$), p_{water} 为 CO₂ 在水中分压 (μatm), p_{air} 为现场温度及

压力下 CO₂ 气体在空气中分压 (μatm), T_k 为水体绝对温度 (K), K_{600} 是在 20℃ 下 CO₂ 调节至 Schmidt 常数等于 600 的气体传输速度 ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$), Sc 为 $t^\circ\text{C}$ 下 CO₂ 的 Schmidt 常数, w 为流速 ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)^[19]。

2.3 数据处理方案

使用 SPSS 18.0 进行配对 T 检验、Spearman 非参数相关性分析和多元回归分析;并利用 SigmaPlot 13.0 作图。

3 结果与分析

3.1 水体 $p(\text{CO}_2)$ 和 CO₂ 通量

本研究表明竹溪河表层水体 $p(\text{CO}_2)$ 和水-气界面 CO₂ 通量在小时(日内)、日间和季节尺度上均具有显著性差异 ($P < 0.01$),见表 1。

监测期间,竹溪河表层水 CO₂ 分压均大于大气 CO₂ 分压,表现出在上午 09:00 左右达最大值,随后波动下降至下午 18:00 左右达到最小的日内变化规律(图 2)。2016 年 07 月 15~17 日以及 2017 年 11 月 4~6 日河流表层水日间均值分别为 (88.0 ± 11.4) 、 (80.7 ± 4.5) 、 (83.8 ± 11.9) 、 (93.5 ± 13.1) 、 (96.9 ± 10.5) 和 (91.8 ± 6.3) Pa。夏季表层水 $p(\text{CO}_2)$ 介于 54.7~115.1 Pa 之间,平均值为 (86.2 ± 7.7) Pa;秋季表层水体 $p(\text{CO}_2)$ 介于 60.4~130.0 Pa 之间,平均值为 (93.4 ± 8.9) Pa;总体来看,秋季表层水体 $p(\text{CO}_2)$ 明显高于夏季,在统计学上具有显著性差异 ($P < 0.01$)。

表 1 日内、日间和季节各指标配对 T 检验¹⁾

Table 1 Intra-day, daytime, and seasonal pair T -tests for each indicator

项目	水温	气温	风速	pH	EC	$p(\text{CO}_2)$	$F(\text{CO}_2)$
日内	0.000 **	0.000 **	0.160	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.000 **
日间	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.000 **
季节	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.000 **

1) * 表示 $P < 0.01$, 极显著差异; * 表示 $P < 0.05$, 显著差异

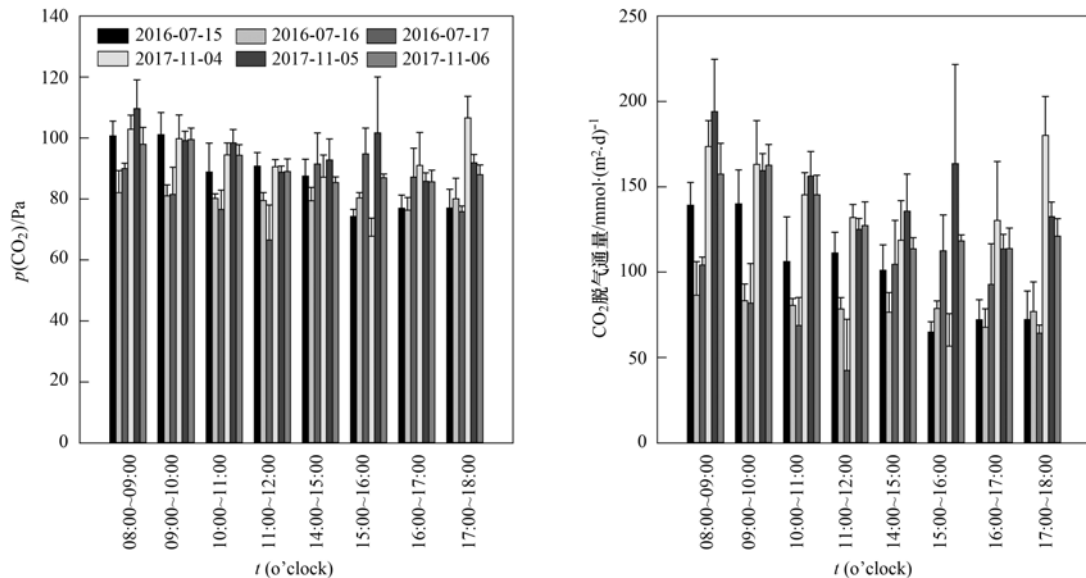
监测期间,竹溪河水-气界面 CO₂ 脱气通量均为正值,表现出上午 09:00 左右达最大值,随后波动下降至下午 18:00 左右达到最小释放量的日内变化规律(图 2)。2016 年 7 月 15~17 日以及 2017 年 11 月 4~6 日水-气界面 CO₂ 通量日间均值分别为 (100.9 ± 31.6) 、 (78.6 ± 12.1) 、 (83.9 ± 29.7) 、 (137.5 ± 42.1) 、 (147.6 ± 34.0) 、 (132.4 ± 21.7) $\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。夏季 CO₂ 释放通量在 10.6~175.5 $\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 范围间波动,平均值为 (87.8 ± 27.5) $\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$;秋季水-气界面 CO₂ 通量

在 31.3~247.5 $\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 范围间波动,平均值为 (139.2 ± 34.0) $\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。总体来看,秋季表层水体 CO₂ 脱气通量明显高于夏季 ($P < 0.01$);可能是由于秋季表层水体温度相对较低,太阳辐射较弱,水体浮游植物光合作用减弱导致的。

3.2 主要环境因子

3.2.1 气象因子

监测期间的水温、气温和风速均具有明显的日内变化特征(图 3),在小时、日间和季节尺度上均

图2 $p(\text{CO}_2)$ 和 CO_2 脱气通量日变化Fig. 2 Daily changes in $p(\text{CO}_2)$ and CO_2 flux

具有显著性差异 ($P < 0.01$)。竹溪河表层水温在持续 12 h 的监测中日内变化规律很一致, 总体表现出下午水温高于上午, 具有显著性差异 ($P < 0.01$)。2016 年 7 月 15 ~ 17 日以及 2017 年 11 月 4 ~ 6 日其表层水温日间平均值分别为 (25.0 ± 0.4) 、 (26.2 ± 0.8) 、 (27.4 ± 0.7) 、 (18.7 ± 0.5) 、 (19.0 ± 0.4) 、 $(18.6 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 。夏季表层水温介于 $24.4 \sim 28.4^\circ\text{C}$ 之间, 均值为 $(26.2 \pm 1.1)^\circ\text{C}$; 秋季表层水温明显低于夏季, 具有显著性差异 ($P < 0.01$), 变化范围为 $18.0 \sim 19.5^\circ\text{C}$, 平均值为 $(18.7 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 。

受太阳辐射的影响, 气温波动较大, 是一天中变化最明显的环境因子; 日内变化规律一致, 表现出先上升至下午 15:00 左右达最大值后波动下降的趋势。2016 年 07 月 15 ~ 17 日以及 2017 年 11 月 4 ~ 6 日其日间平均气温分别为 (28.7 ± 2.2) 、 (30.2 ± 3.1) 、 (33.2 ± 2.0) 、 (21.3 ± 2.3) 、 (21.4 ± 3.7) 、 $(20.3 \pm 2.6)^\circ\text{C}$ 。夏季气温在 $24.9 \sim 35.8^\circ\text{C}$ 范围内波动, 平均为 $(30.7 \pm 3.1)^\circ\text{C}$, 秋季气温显著低于夏季 ($P < 0.01$), 变化范围在 $15.6 \sim 28.6^\circ\text{C}$ 之间, 平均为 $(21.0 \pm 3.0)^\circ\text{C}$ 。

风速波动性较大, 夏季和秋季风速分别在 $0 \sim 2.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0 \sim 1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内变化, 其中受盛行季风影响夏季风速明显高于秋季, 具有显著性差异 ($P < 0.01$)。

3.2.2 水化学参数

监测期间的 pH、EC 在小时、日间和季节尺度上均具有显著性差异 ($P < 0.01$, 图 3)。竹溪河表

层水体的 pH 均呈碱性, 在持续 12 h 的监测中上午表层水体 pH 明显低于下午, 具有显著性差异 ($P < 0.01$)。2016 年 7 月 15 ~ 17 日以及 2017 年 11 月 4 ~ 6 日竹溪河表层水体 pH 日间值分别在 $8.09 \sim 8.32$ 、 $8.30 \sim 8.38$ 、 $8.28 \sim 8.58$ 、 $8.25 \sim 8.56$ 、 $8.22 \sim 8.39$ 和 $8.28 \sim 8.39$ 范围内波动。夏季和秋季其 pH 分别在 $8.09 \sim 8.58$ 和 $8.22 \sim 8.56$ 范围内波动。EC 表明了水体中的离子强度, 在持续 12 h 的监测中上午表层水体 EC 明显低于下午, 具有显著性差异 ($P < 0.01$)。2016 年 7 月 15 ~ 17 日以及 2017 年 11 月 4 ~ 6 日其表层水体 EC 日间值分别在 $354.0 \sim 376.0$ 、 $411.0 \sim 442.0$ 、 $494.0 \sim 519.0$ 、 $660.90 \sim 669.9$ 、 $667.4 \sim 688.8$ 和 $667.5 \sim 677.4 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 范围内波动。夏季和秋季 EC 分别在 $354.0 \sim 519.0$ 和 $660.9 \sim 688.8 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 范围内波动, 秋季表层水体 EC 远高于夏季, 具有显著性差异 ($P < 0.01$); 可能是由于夏季雨水充沛导致对河流的稀释作用造成的。

由图 4 可知, 竹溪河秋季表层水体 TDN、TDP 和 DOC 浓度分别在 $0.61 \sim 1.89$ 、 $0.10 \sim 0.20$ 和 $3.30 \sim 4.55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内波动; 其中营养物质波动性较大, 可能是由于微生物的代谢及外界营养盐物质的输入不同造成的; 从 TDN、TDP 和 DOC 营养物质来判断, 监测期间营养水平较低。

4 讨论

4.1 竹溪河表层水体 $p(\text{CO}_2)$ 格局的影响因子分析
单因素方差分析表明, 在小时、日间和季节

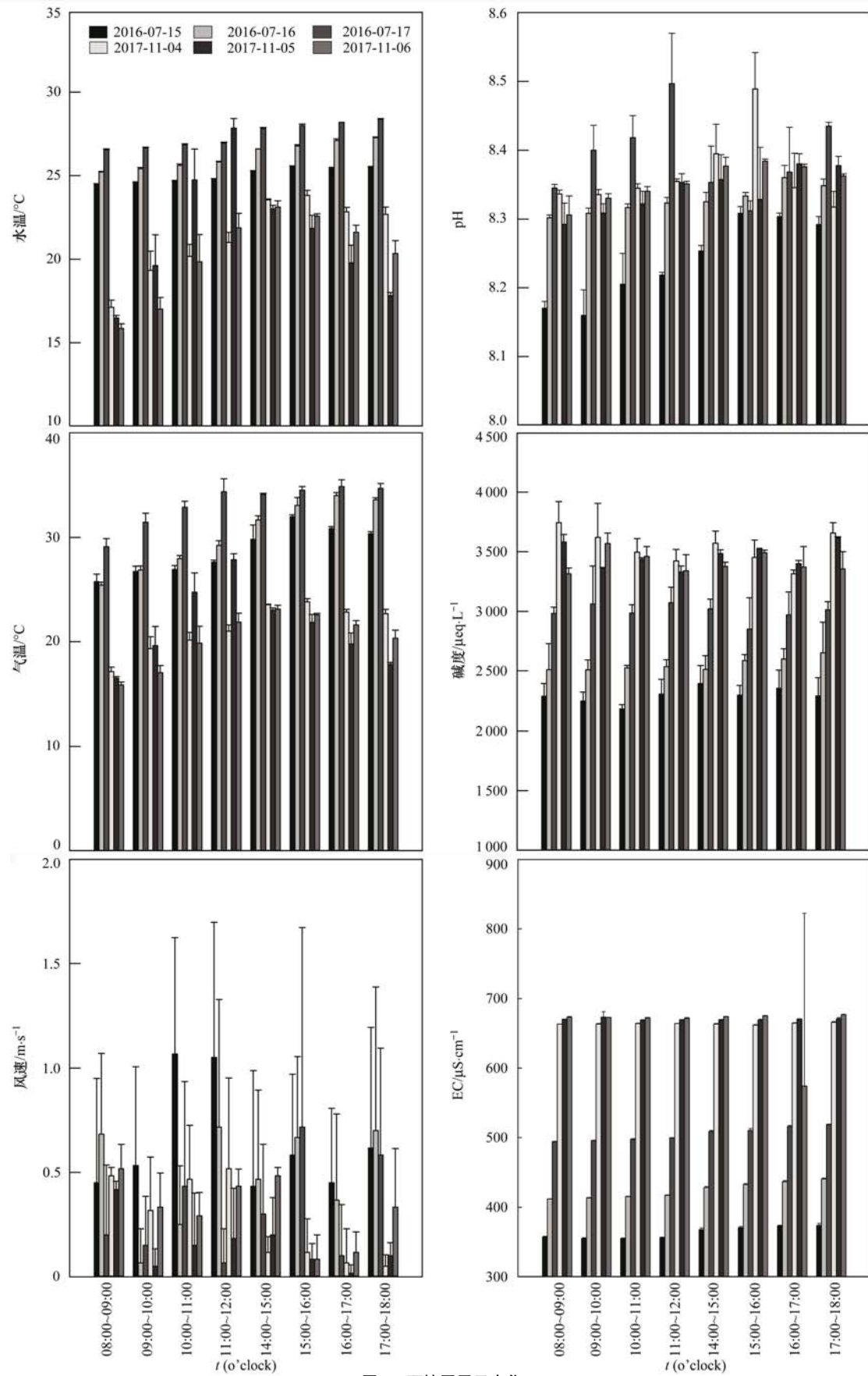


图3 环境因子日变化

Fig. 3 Daily changes in main environmental factors

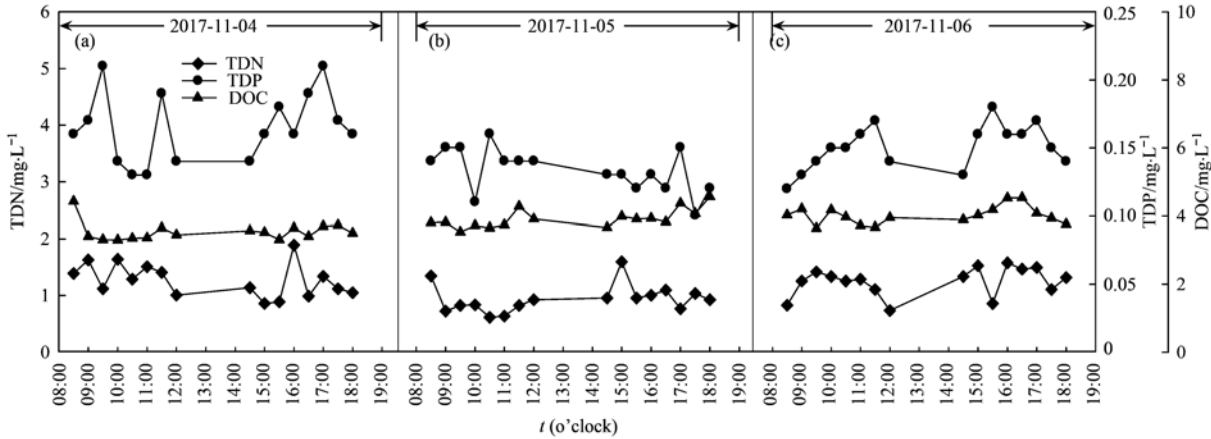


图 4 营养物质日变化

Fig. 4 Daily changes in riverine nutrients

尺度下竹溪河表层水体 $p(\text{CO}_2)$ 均具有显著性差异 ($P < 0.01$)。本研究定点定时对位于重庆主城区段的嘉陵江支流竹溪河表层水体连续日间变化观测, 所处环境的风速、气压等都大致相同; 竹溪河正面临城镇化进程, 人为活动引起水体有机质浓度、水体营养状况、pH 和水温等其他因素的差异可能是造成表层水在小时、日间和季节尺度下表层水体 $p(\text{CO}_2)$ 具有显著性差异的最重要原因。

有研究认为河流 $p(\text{CO}_2)$ 是流域侵蚀、有机物的降解及从水体到大气的 CO_2 脱气等过程平衡的结果^[8~11]。水温、pH 和溶解性 CO_2 等因素共同影响水体 $p(\text{CO}_2)$ 分布, 一般河流水体中 $p(\text{CO}_2)$ 主要受到水中碳酸盐平衡及浮游植物的生化作用控制。在已有的河流水体 CO_2 影响因素的研究中, 河流侵蚀带来的有机碳的呼吸作用是维持亚马逊河 $p(\text{CO}_2)$ 的主要机制^[8], 英国泰晤士河表层水体

$p(\text{CO}_2)$ 受生物呼吸作用和光合作用控制^[20]。

本研究通过 $p(\text{CO}_2)$ 与环境因子的 Spearman 相关性分析(表 2), 探讨其主要环境因子, 研究表明其表层水 $p(\text{CO}_2)$ 与 pH、水温和气温呈显著负相关关系。造成这种现象可能是监测期间 pH 的变化范围比较小, 且绝大部分时间在弱碱环境下, 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; 同时, 水体中进行光合作用的生物及植物吸收 CO_2 , pH 上升。由于水体叶绿素含量极低, 光合作用消耗的 CO_2 低于浮游生物呼吸作用产生的 CO_2 量; 因此河流有机碳的原位呼吸作用是维持河流过饱和 $p(\text{CO}_2)$ 的主要因素^[8~11]。竹溪河表层水 $p(\text{CO}_2)$ 与水温呈明显的负相关, 夏秋两季相关系数分别为 -0.312 和 -0.301 , 这与许多学者的研究结果是一致的^[21~23]。水温升高, CO_2 在水体中的溶解度降低, 另外水温升高是光照强度增强的结果, 最终导致 $p(\text{CO}_2)$ 降低。

表 2 $p(\text{CO}_2)$ 与环境变量的 Spearman 相关分析¹⁾

Table 2 Spearman correlation analysis between $p(\text{CO}_2)$ and key environmental variables

年份	项目	pH	DO	EC	水温	气温	风速	TDN	TDP	DOC	碱度
2016	$p(\text{CO}_2)$	-0.504 **	—	-0.252	-0.312 **	-0.365 **	0.100	—	—	—	-0.053
	P	0.000	—	0.084	0.031	0.011	0.498	—	—	—	0.720
2017	$p(\text{CO}_2)$	-0.904 *	0.178	-0.126	-0.301 *	-0.415 **	0.107	-0.070	-0.023	-0.178	0.424 **
	P	0.000	0.225	0.394	0.038	0.003	0.468	0.636	0.875	0.225	0.003

1) “—”表示未测得的数据; ** 表示 $P < 0.01$, 极显著相关, * 表示 $P < 0.05$, 显著相关

4.2 与其他水体 CO_2 脱气通量的比较

众多研究表明世界范围内的水体主要表现出溶解性 CO_2 过饱和现象, 总体表现出 CO_2 “源”的特征(表 3)^[1~5]。如亚马逊河、Tay River、长江上游龙川江、黄河、三峡库区干流和重庆城市河流的研究表明其 CO_2 脱气通量分别为 559.3、31.7、131.5、

33.0、126.0 和 446.5 $\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 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^[28~35]。

本研究结果表明竹溪河 CO_2 释放量均值为 $(113.5 \pm 40.2) \text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 表现出向大气释放 CO_2 ; 这与以往研究认为水生生态系统是大气的排放源的结论

一致^[1~5]. 对比三峡库区香溪河库湾^[16]和闽江口养殖塘^[35]日内水-气界面 CO₂ 通量观测,表明 CO₂ 日内释放通量分别在 10.9 ~ 52.7 mmol·(m²·d)⁻¹和 -11.6 ~ 40.4 mmol·(m²·d)⁻¹范围内波动;可知近年来,包括城市化在内的人类活动影响下的河流 CO₂ 释放较明显,可能是人为输入的有机质为原位呼吸创造了条件,

整体表现出向大气释放大量的 CO₂. 本研究中,其水-气界面 CO₂ 通量呈现出上午释放量大于下午的特征,这与中午后光照强度增加,有利于水生生物的光合作用密切相关. 本研究与王亮等^[27]人在三峡水库香溪河库湾夏季水-气界面温室气体通量 24 h 的连续观测的结果一致.

表 3 世界河流 CO₂ 通量
Table 3 CO₂ area flux in world rivers

序号	名称	国家	气候	CO ₂ 通量 /mmol·(m ² ·d) ⁻¹	文献
1	亚马逊河	巴西	热带	559.3	[24]
2	St. Lawrence	加拿大	温带	118.3	[25]
3	Burr Oak Lake	美国	温带	11.6	[2]
4	Tay River	英国	温带	31.7	[3]
5	龙川江(长江)	中国	亚热带	131.5	[12]
6	黄河	中国	亚热带	33.0	[13]
7	三峡库区干流	中国	亚热带	41.2	[26]
8	三峡香溪河库区	中国	亚热带	-13.9	[27]
9	三峡澎溪河库区	中国	亚热带	8.1	[28]
10	三峡香溪河库区	中国	亚热带	8.7	[29]
11	三峡库区干流	中国	亚热带	126.0	[30]
12	重庆城市河流	中国	亚热带	446.5	[31]
13	亚龙河	中国	亚热带	246.5	[32]

4.3 嘉陵江支流竹溪河水-气界面 CO₂ 通量变化的影响因子分析

受到人类活动的高度干扰,竹溪河表层水水化学参数、营养盐和溶解碳的特征在不同时间尺度下有着显著的差异,一般水体向大气中吸收或释放

CO₂, 主要是其内部新陈代谢的结果,水体中生化作用对水-气界面 CO₂ 交换通量起着重要影响. 本研究通过 $F(\text{CO}_2)$ 与关键环境因子的 Spearman 相关性(表 4)分析,探讨其主要环境驱动因子,研究表明 $F(\text{CO}_2)$ 与 pH、水温 and 气温呈极显著负相关关系.

表 4 水-气界面 CO₂ 通量与环境变量的 Spearman 相关分析¹⁾
Table 4 Spearman correlation analysis between CO₂ flux and key environmental variables

年份	项目	pH	DO	EC	水温	气温	风速	TDN	TDP	DOC	碱度
2016	$F(\text{CO}_2)$	-0.564 **	—	-0.328 *	-0.408 **	-0.466 **	0.132	—	—	—	-0.115
	P	0.000	—	0.023	0.004	0.001	0.370	—	—	—	0.438
2017	$F(\text{CO}_2)$	-0.900 *	0.200	-0.130	-0.340 *	-0.420 **	0.130	-0.070	-0.020	-0.190	0.420 **
	P	0.000	0.170	0.390	0.020	0.003	0.370	0.650	0.870	0.190	0.003

1) “—”表示未测得的数据; ** 表示 $P < 0.01$, 极显著相关, * 表示 $P < 0.05$, 显著相关

4.3.1 气象因子

水-气界面 CO₂ 通量在季节变化、年变化等长时间尺度上的变异性与温度存在很大关系^[21];但在以日变化的短时间尺度上与温度的依存关系较为复杂,主要表现为:正相关性^[23]、负相关性^[27]或无相关性^[22]. 通常情况下,水温通过影响气体分子在水中的溶解度、微生物活性、水生植物光合、呼吸作用和气泡的形成影响 CO₂ 的产生过程^[21~23].

本研究表明,水温和气温与水-气界面 CO₂ 脱气通量均为极显著负相关,其相关性分别可用回归方程 $F(\text{CO}_2) = -7.639X_{\text{水温}} + 288.147$ ($R^2 =$

0.152 , $P = 0.06$) 和 $F(\text{CO}_2) = -3.870X_{\text{气温}} + 206.753$ ($R^2 = 0.152$, $P < 0.01$)来表示. 受太阳辐射等因素的影响,气温是日变化中最明显的环境因子;其日内波动较大. 通过相关性分析表明,夏、秋季水-气界面 CO₂ 通量与气温相关系数分别为 -0.466 和 -0.420,有明显的相关性,CO₂ 通量对气温具有响应. 气温变化可直接引起水温升高或降低,相关性分析表明,气温和水温呈明显的正相关,相关系数为 0.894,这与许多学者的研究结果是一致的^[21,23].

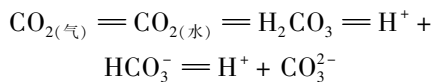
监测期间,随着水温升高,二氧化碳在水体中

的溶解度降低;另外水温升高主要是由于光照强度增强导致的,以及该区域水流比较缓,适合营养盐聚集,利于水生生物的光合作用,使得大气中的 CO_2 进入水体.

风速是影响水-气界面 CO_2 通量的重要因素,通过影响气体交换速率以及水-气接触面积等多种途径,进而影响水中碳物质的分解和二氧化碳的产生^[33]. 本研究中,水-气界面 CO_2 通量与风速呈正相关关系,这与文献^[33]的研究结果是一致的. 监测期间,竹溪河表层水体上方风速在 $0 \sim 2.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内波动,小于 $3.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,低风速环境下对气体扩散强度、水体气泡释放及浮游植物进行光合作用等扰动较小,使得水-气界面 CO_2 与风速没有明显的相关关系.

4.3.2 水化学参数

pH 能直接影响水体中碳酸盐体系(CO_2 、 CO_3^{2-} 和 HCO_3^-),和水中溶存 CO_2 的浓度密切相关,进而影响 CO_2 的吸收或排放^[21~22,28]. 当 pH 较高时,水中游离的 CO_2 易形成碳酸盐,水体 $p(\text{CO}_2)$ 降低,从而减少 CO_2 的产生,有利于大气环境中 CO_2 进入水体;反之,较低的 pH 值会促进水体 CO_2 释放到大气中^[12]. 本研究表明,夏、秋季竹溪河水-气界面 CO_2 通量与 pH 呈极显著负相关,相关系数分别为 -0.564 和 -0.900 ;其相关性分别可用 $F(\text{CO}_2) = -232.762X_{\text{pH}} + 20\,024.118$ ($R^2 = 0.627$, $P < 0.01$) 和 $F(\text{CO}_2) = -674.848X_{\text{pH}} + 5\,775.944$ ($R^2 = 0.853$, $P < 0.01$) 来表示. 进一步通过逐步回归分析,发现 pH 是影响竹溪河水-气界面 CO_2 通量的最主要的环境因子. 造成这种现象可能是由于水体进行光合作用的浮游植物较低,河流有机碳的原位呼吸占主导地位,使得:



平衡向左移动,促进水体 CO_2 释放,进而降低 pH. 这与 Li 等^[12]在长江上游龙川江的研究结果类似.

水体溶解氧含量决定了水体中有机物降解的途径和产物,对水体生源要素循环有重要影响^[34]. 在有氧情况下,有机物主要转换为 CO_2 ,反之在缺氧环境下主要生成 CH_4 ^[34]. 本研究结果表明,秋季竹溪河表层水 DO 浓度与水-气界面 CO_2 通量为不明显正相关($r = 0.02$);其相关性可用 $F(\text{CO}_2) = 15.104X_{\text{DO}} + 68.553$ ($R^2 = 0.037$, $P = 0.382$) 来表示. 这主要是水体中 DO 浓度升高促进水体中有机

物快速有氧分解,释放出 CO_2 ;另外监测期间天气多为多云转晴,太阳辐射波动较大,水体中叶绿素含量较低,表层水中浮游植物进行光合作用强度较弱,进而弱化了溶解氧与河流 CO_2 释放的响应.

水生植物初级生产力及水生生物新陈代谢受到水体营养盐浓度的影响,进而间接影响水-气界面 CO_2 通量^[35]. 本研究中,秋季竹溪河水-气界面 CO_2 通量日变化在绝大多数情况下与 TDN 和 TDP 的日时间尺度上的变化存在负相关关系,分别为 -0.070 和 -0.020 . 原因在于水体中氮磷等营养元素可为水生植物及浮游藻类提供营养成分,使其活性增强,增加光合作用,但同时营养盐增加也促进细菌的活性. 但河流水体溶存性 CO_2 浓度是光合作用、呼吸作用综合作用的结果;由于在监测期间,竹溪河表层水营养盐及有机质含量较低,不利于 CO_2 产生及溶存;这种相关性与杨平等^[35]对闽江口养殖塘研究结果一致.

水体中有机质主要来源与系统内生物残体以及外源输入有关,其中 DOC 为水体中 CO_2 产生的直接碳源,对水体 CO_2 的产生与排放具有重要影响^[36]. 通常情况下,单位面积水体的 CO_2 通量与水体中 DOC 浓度表现出正相关关系^[36]. 本研究中,秋季竹溪河表层水体 DOC 浓度在 $3.30 \sim 4.55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内波动;通过相关性 $F(\text{CO}_2)$ 与 DOC 没有明显的相关性,可能是水体可生物降解的有机质含量较低,从而弱化了其对水-气界面 CO_2 气体释放的贡献.

利用多元回归中的逐步回归分析法建立夏、秋两季 $F(\text{CO}_2)$ 与各环境因子间的最优回归方程,分析各环境因子对 CO_2 通量影响的贡献大小:

$$F(\text{CO}_2) = 4\,064.75 - 504.96X_{\text{pH}} + 0.086X_{\text{碱度}} \quad (\text{夏季})$$

$$F(\text{CO}_2) = 5\,223.378 - 646.4495X_{\text{pH}} + 0.091X_{\text{碱度}} \quad (\text{秋季})$$

综上所述,表层水 pH 和碱度是影响竹溪河水-气界面 CO_2 通量的主要环境因子,它们之间的负相关系数均达到显著性水平(夏季 CO_2 : $R^2 = 0.996$, $P < 0.001$; 秋季 CO_2 : $R^2 = 0.993$, $P < 0.001$).

5 结论

(1) 三峡库区嘉陵江支流竹溪河 $p(\text{CO}_2)$ 和水-气界面 CO_2 通量呈现显著的日内、日间及季节变化;夏季和秋季 $p(\text{CO}_2)$ 分别为 $(86.2 \pm 7.7) \text{ Pa}$ 和

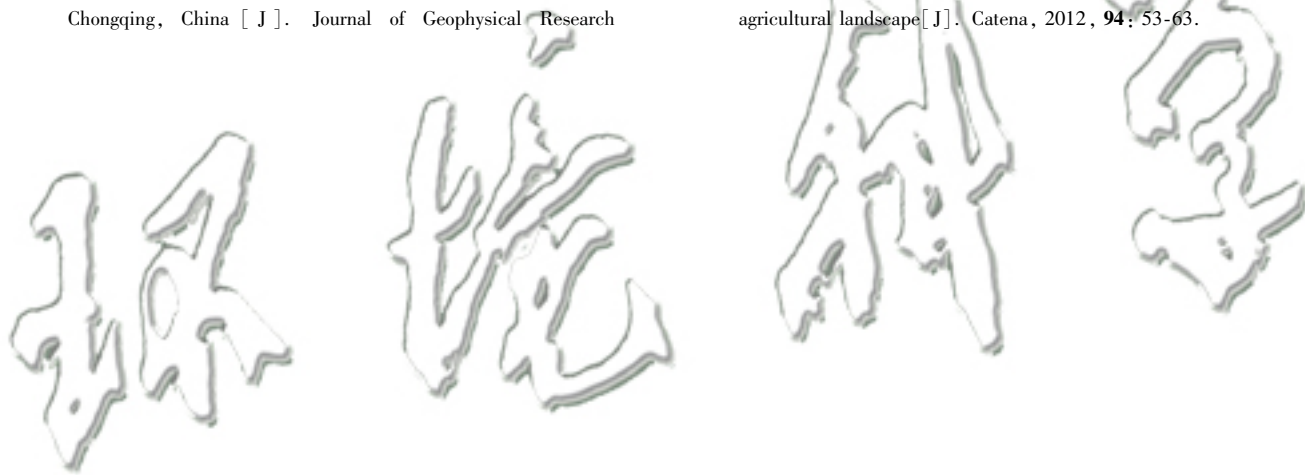
(93.4 ± 8.9) Pa, CO₂ 通量分别为 (87.8 ± 27.5) mmol·(m²·d)⁻¹ 和 (139.2 ± 34.0) mmol·(m²·d)⁻¹; 并表现出在上午 09:00 左右达最大值, 随后波动下降至下午 18:00 左右达到最小释放量的日内变化规律。

(2) 通过相关性分析, CO₂ 通量主要受到 pH、碱度和水温的影响; 以及通过逐步回归分析, 发现 pH 是影响 CO₂ 交换通量的最主要的环境因子。

参考文献:

- [1] 李哲, 白镭, 郭劲松, 等. 三峡水库两条支流水-气界面 CO₂、CH₄ 通量比较初探[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 1008-1016.
- Li Z, Bai L, Guo J S, *et al.* Comparative study on water-air CO₂, CH₄ flux in two tributaries in the Three Gorges Reservoir, China[J]. Environmental Science, 2013, **34**(3): 1008-1016.
- [2] Knoll L B, Vanni M J, Renwick W H, *et al.* Temperate reservoirs are large carbon sinks and small CO₂ sources: Results from high - resolution carbon budgets [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2013, **27**(1): 52-64.
- [3] Erkkilä K M, Ojala A, Bastviken D, *et al.* Methane and carbon dioxide fluxes over a lake: comparison between eddy covariance, floating chambers and boundary layer method [J]. Biogeosciences, 2018, **15**(2): 429-445.
- [4] Müller D, Warneke T, Rixen T, *et al.* Lateral carbon fluxes and CO₂ outgassing from a tropical peat-draining river [J]. Biogeosciences, 2015, **12**(20): 5967-5979.
- [5] Huang W J, Cai W J, Wang Y C, *et al.* The carbon dioxide system on the Mississippi river-dominated continental shelf in the northern Gulf of Mexico: 1. Distribution and air-sea CO₂ flux [J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2015, **120**(3): 1429-1445.
- [6] Gole 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.
- [7] Raymond P A, Hartmann J, Lauerwald R, *et al.* Global carbon dioxide emissions from inland waters[J]. Nature, 2013, **503**(7476): 355-359.
- [8] 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.
- [9] 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, **540**: 40-56.
- [10] Oliveira A P, Cabeçadas G, Mateus M D. Inorganic carbon distribution and CO₂ fluxes in a large European estuary (Tagus, Portugal)[J]. Scientific Reports, 2017, **7**(1): 7376.
- [11] Almeida R M, Pacheco F S, Barros N, *et al.* Extreme floods increase CO₂ outgassing from a large Amazonian river [J]. Limnology and Oceanography, 2017, **62**(3): 989-999.
- [12] 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.
- [13] Ran L, Lu X X, Richey J E, *et al.* Long-term spatial and temporal variation of CO₂ partial pressure in the Yellow River, China[J]. Biogeosciences, 2015, **12**(4): 921-932.
- [14] 翟惟东. 南海北部与珠江河口水域 CO₂ 通量及其调控因子 [D]. 厦门: 厦门大学, 2003. 5-6.
- Zhai W D. Air-sea fluxes of carbon dioxide and upper ocean biogeochemical processes in the Northern South China Sea and the Pearl river estuary[D]. Xiamen: Xiamen University, 2003. 5-6.
- [15] 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.
- [16] 黄文敏, 朱孔贤, 赵玮, 等. 香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(4): 1270-1276.
- Huang W M, Zhu K X, Zhao W, *et al.* Diurnal changes in greenhouse gases at water-air interface of Xiangxi river in Autumn and their influencing factors[J]. Environmental Science, 2013, **34**(4): 1270-1276.
- [17] 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. 239-284.
- [18] UNESCO/IHAGHG. Greenhouse gas emissions related to freshwater reservoirs[R]. The World Bank, 2010. 64-127.
- [19] Alin S R, de Fátima F L Rasera M, Salimon C I, *et al.* Physical controls on carbon dioxide transfer velocity and flux in low-gradient river systems and implications for regional carbon budgets [J]. Journal of Geophysical Research, 2011, **116**(G1): G01009.
- [20] 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.
- [21] Stadmark J, Leonardson L. Emissions of greenhouse gases from ponds constructed for nitrogen removal [J]. Ecological Engineering, 2005, **25**(5): 542-551.
- [22] Schrier-Uijl A P, Veraart A J, Leffelaar P A, *et al.* Release of CO₂ and CH₄ from lakes and drainage ditches in temperate wetlands[J]. Biogeochemistry, 2011, **102**(1-3): 265-279.
- [23] Natchimuthu S, Selvam B P, Bastviken D. Influence of weather variables on methane and carbon dioxide flux from a shallow pond [J]. Biogeochemistry, 2014, **119**(1-3): 403-413.
- [24] Richey J E, Melack J M, Aufdenkampe A K, *et al.* Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO₂[J]. Nature, 2002, **416**(6881): 617-620.
- [25] Hélie J F, Hillaire-Marcel C, Rondeau B. Seasonal changes in the sources and fluxes of dissolved inorganic carbon through the St. Lawrence River—Isotopic and chemical constraint [J]. Chemical Geology, 2002, **186**(1-2): 117-138.
- [26] 李双, 王雨春, 操满, 等. 三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 885-891.
- Li S, Wang Y C, Cao M, *et al.* Partial pressure and diffusion flux of dissolved carbon dioxide in the mainstream and tributary of the central Three Gorges Reservoir in Summer [J]. Environmental science, 2014, **35**(3): 885-891.

- [27] 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 D F, *et al.* Fluxes of greenhouse gases from Xiangxi River in summer and their influencing factors[J]. Environmental science, 2012, **33**(5): 1471-1475.
- [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] 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.
- [30] Zhao Y, Wu B F, Zeng Y. Spatial and temporal patterns of greenhouse gas emissions from Three Gorges Reservoir of China[J]. Biogeosciences, 2013, **10**(2): 1219-1230.
- [31] Wang X F, He Y X, Yuan X Z, *et al.* $p\text{CO}_2$ and CO_2 fluxes of the metropolitan river network in relation to the urbanization of Chongqing, China [J]. Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 2017, **122**(3): 470-486.
- [32] Li S L, Chetelat B, Yue F J, *et al.* Chemical weathering processes in the Yalong River draining the eastern Tibetan Plateau, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, **88**: 74-84.
- [33] Guérin F, Abril G, Serça D, *et al.* Gas transfer velocities of CO_2 and CH_4 in a tropical reservoir and its river downstream[J]. Journal of Marine Systems, 2007, **66**(1-4): 161-172.
- [34] 程炳红, 郝庆菊, 江长胜. 水库温室气体排放及其影响因素研究进展[J]. 湿地科学, 2012, **10**(1): 121-128.
Cheng B H, Hao Q J, Jiang C S. Research progress on the emission of greenhouse gases from reservoir and its influence factors[J]. Wetland Science, 2012, **10**(1): 121-128.
- [35] 杨平, 仝川, 何清华, 等. 闽江口鱼虾混养塘水-气界面温室气体通量及主要影响因子[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(5): 1493-1503.
Yang P, Tong C, He Q H, *et al.* Greenhouse gases fluxes at water-air interface of aquaculture ponds and influencing factors in the Min river estuary[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(5): 1493-1503.
- [36] Jacinthe P A, Filippelli G M, Tedesco L P, *et al.* Carbon storage and greenhouse gases emission from a fluvial reservoir in an agricultural landscape[J]. Catena, 2012, **94**: 53-63.



CONTENTS

Emissions Inventory and Characteristics of NO _x from Cement Industry	JIANG Chun-lai, SONG Xiao-hui, ZHONG Yue-zhi, <i>et al.</i> (4841)
Emissions Inventory of Smoldering Chinese Kangs and Their Contribution to PM _{2.5} Pollution in Lanzhou City	GUO Wen-kai, LIU Xiao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (4849)
Size Distributions of Water-soluble Components in Ambient Aerosol of Beijing	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, SU Jie, <i>et al.</i> (4858)
Size Distribution Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Autumn in Zhengzhou	ZHAO Qing-yan, JIANG Nan, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (4866)
Diurnal Variation of Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Heze City in Winter	MENG Jing-jing, LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4876)
Chemical Source Profiles of PM Emitted from the Main Processes of the Iron and Steel Industry in China	WEN Jie, YANG Jia-mei, LI Pu, <i>et al.</i> (4885)
VOCs Emission Inventory of Anthropogenic Sources in Jiaxing	HAO Huan, WAN Mei, RONG Yu, <i>et al.</i> (4892)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in Areas Surrounding a Petrochemical Park in Shanghai	SHENG Tao, CHEN Xiao-jia, GAO Song, <i>et al.</i> (4901)
Characteristics of Bioaerosols Emitted from WWTP with SBR Treatment Process	YANG Kai-xiong, HOU Hong-xun, WANG Ying-zhe, <i>et al.</i> (4909)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Composition to Different Hydrological Scenarios in Large Eutrophic Lake Taihu	SHI Yu, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4915)
Spatial and Temporal Dynamics of Floating Algal Blooms in Lake Chaohu in 2016 and Their Environmental Drivers	HU Min-qi, ZHANG Yu-chao, MA Rong-hua, <i>et al.</i> (4925)
Dynamic Changes of Nitrogen-Transforming and Phosphorus-Accumulating Bacteria Along with the Formation of Cyanobacterial Blooms	PENG Yu-ke, LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, <i>et al.</i> (4938)
Impact of Mainstream Backwater on the Water Environment of the Tributaries of the Three Gorges Reservoir at Low Water Level	CHEN Zi-juan, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (4946)
Effect of Silver Nanoparticles on Denitrification and Functional Gene Abundances of Sediment in Dagu River Estuary and Northwest of Jiaozhou Bay	BAI Jie, TIAN Yan-zhao, SUN Peng-fei, <i>et al.</i> (4956)
Spatial Difference and Causes Analysis of the δ ¹⁵ N of Suspended Particulate Matter in the Lancang River Basin	TANG Yong-chun, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (4964)
Vertical Spatial Distribution of Denitrification Intensity in the Vadose Zone of Typical Sections of Chaobai River Alluvial Fan	GENG Hong-zhi, HUAN Huan, LI Ming-xiao, <i>et al.</i> (4972)
Major Ionic Features and Possible Controls in the Groundwater in the Hamatong River Basin	ZHANG Tao, HE Jin, LI Jing-jie, <i>et al.</i> (4981)
Concentration Variations and Flux Estimation of Dissolved Carbon in Karst Spring of a Typical Karst Area	XIONG Bai-lian, ZHANG Jin-zhong, PENG Tao, <i>et al.</i> (4991)
Effect of Different Multi-pond Network Landscape Structures on Nitrogen Retention Over Agricultural Watersheds	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, LIU Jun-zhi, <i>et al.</i> (4999)
Characteristics of Phthalic Acid Esters Pollution in Urban Surface Runoff in Shanghai, China	LIU Yu-tong, LI Tian, PENG Hang-yu (5007)
Impacts of Vegetation on Hydrological Performances of Green Roofs Under Different Rainfall Conditions	GE De, ZHANG Shou-hong (5015)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solutions on Sediments Amended with Magnetite-Modified Zeolite	WANG Dan-he, ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5024)
Reduction and Oxidation of Mercury by Dissolved Organic Matter Under Anaerobic Conditions	BIAN Yong-rong, GU Bao-hua, ZHU Bo, <i>et al.</i> (5036)
Photo-assisted Degradation of Sulfamethazine by Ferrocene-catalyzed Heterogeneous Fenton-like System	ZHANG Biao-jun, ZHAO Yao-yun-chuan, FANG Qi, <i>et al.</i> (5043)
N ₂ O Production Pathways in Partial Nitrification Based on Isotope Technology	YANG Yu-bing, YANG Qing, LI Yang, <i>et al.</i> (5051)
Effect of Substrate Ratio on Removal of Nitrogen and Carbon Using Anaerobic Ammonium Oxidation and Denitrification	AN Fang-jiao, HUANG Jian-ming, HUANG Li, <i>et al.</i> (5058)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal Characteristics of An Anaerobic/Aerobic Operated SPNDPR System Treating Low C/N Urban Sewage	YU De-shuang, YUAN Meng-fei, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5065)
Lab-scale SNAD Process in Wastewater Treatment Plant	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (5074)
Effect of Salinity on Nitrogen Removal Performance of a Pilot-scale Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Recovery Kinetics	TANG Jia-jia, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5081)
Suppression and Recovery Characteristics of Pilot-scale ANAMMOX-ASBR System Treating Desulfurization and Denitrification Tailings from Thermal Power Plant	ZHANG Jun, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5090)
Impact of C/N Ratio on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Release of Granular Sludge CANON Reactor	FU Kun-ming, JIANG Shan, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (5101)
Impacts of Sludge Characteristics on Anaerobic Digestion with Microwave Pretreatment and Archaeal Community Structure Analysis	FANG Ping, TANG An-ping, FU Xing-min, <i>et al.</i> (5108)
Determination of Heavy Metal Baseline Values and Analysis of Its Accumulation Characteristics in Agricultural Land in Chongqing	WU Fu-lin, CHEN Li, YI Ting-hui, <i>et al.</i> (5116)
Characteristics of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soil Samples of Hanjiang River Basin, Southeast China	LIU Jia, DING Yang, QI Shi-hua, <i>et al.</i> (5127)
Occurrence and Distribution of the Organophosphate Esters in Soils of Mixed-land Use Area in Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (5135)
Degradation of α-HCH in Soil Washing Solutions with nZVI and CaO ₂	YAO Jing-bo, ZHOU Jie, WANG Ming-xin, <i>et al.</i> (5142)
Microbial Communities in Soils of Qingshitang Industrial District in Zhuzhou	SHEN Li, LI Zhen-hua, ZENG Wei-min, <i>et al.</i> (5151)
Effect of Biochar Addition on the Diversity and Interaction of Rhizosphere Fungi in Manure-fertilized Soil	WANG Dan-dan, YANG Ze-ping, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (5163)
Effects of Returning Nitrogen by Biochar Loading on Paddy Growth, Root Morphology, and Nitrogen Use Efficiency	YU Ying-liang, WANG Yue-man, HOU Peng-fu, <i>et al.</i> (5170)
Effect of Particulate Organic Matter on Cadmium Uptake and Transport in Rice	GUO Yi-xuan, ZHAO Xiu-lan (5180)
Effect of Fertilizers on Cadmium Uptake and Accumulation by Sunflowers	CAO Liu, YANG Jun-xing, GUO Jin-jun, <i>et al.</i> (5189)
Accumulation of Heavy Metals in Different Rice Varieties	LIN Xiao-bing, ZHOU Li-jun, WANG Hui-ming, <i>et al.</i> (5198)
Intercropping <i>Arundo donax</i> with Woody Plants to Remediate Heavy Metal-Contaminated Soil	ZENG Peng, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (5207)
Daily Variation of CO ₂ Flux at Water-Air Interface and Analysis of Its Affecting Factors in a Typical River of the Three Gorges Reservoir	LUO Jia-chen, LI Si-yue (5217)
CH ₄ Emissions Characteristics and Its Influencing Factors in an Eutrophic Lake	SHANG Dong-yao, XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (5227)
Short-term Effects of Different Grazing Intensities on Greenhouse Gas Fluxes in Semi-arid Grassland	SHEN Yan, SUN Jian-ping, LUO Yu-kun, <i>et al.</i> (5237)
Effects of Plastic Film Mulching Patterns and Irrigation on Yield of Summer Maize and Greenhouse Gas Emissions Intensity of Field	LUO Xiao-qi, ZHANG A-feng, CHEN Hai-xin, <i>et al.</i> (5246)
Effects of Elevated Ozone on Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) Emission: A Review	FENG Zhao-zhong, YUAN Xiang-yang (5257)
Research Progress on the Sources of Inorganic Nitrogen Pollution in Groundwater and Identification Methods	DU Xin-qiang, FANG Min, YE Xue-yan (5266)
Mechanisms and Influencing Factors of Antibiotic Removal in Sewage Biological Treatment	ZHANG Xiang-yu, LI Ru-ying, JI Min (5276)