

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期
Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM_{2.5}污染防治的健康效益评估 张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震(513)

区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估 武文琪, 张凯山(523)

2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估 姚森, 张晗宇, 王晓琦, 杨书申(534)

广州市2020年春节烟花爆竹燃放对空气质量的影响 裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅(546)

长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性 夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青(556)

南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析 张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗(564)

天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征 丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂(574)

输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析 张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖(584)

洛阳市秋冬季PM_{2.5}中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价 齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青(595)

郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析 王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩(604)

基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案 李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦(616)

汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析 叶露, 邵菁菁, 俞华明(624)

兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估 郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强(634)

2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析 李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政(643)

珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价 王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩(653)

乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险 史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新(663)

乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系 王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴(673)

张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响 王维, 李叙勇(681)

三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因 杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷(688)

巢湖沉积物氮磷分布及污染评价 王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平(699)

巢湖南淝河口底泥污染特征及疏浚决策 杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌(712)

氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响 徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇(723)

降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响 陈敏, 许浩霆, 王雪竹, 肖尚斌(732)

典型喀斯特河流气-水界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素 刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂飞, 刘文胜(740)

江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状 王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶(749)

尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征 黄福义, 朱永官, 苏建强(761)

涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析 郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生(766)

天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析 何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良(776)

秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响 张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏(786)

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性 张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟(796)

浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响 黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强(808)

松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应 于宗良, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟(819)

汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测 韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅(831)

两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物 李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢惠君, 胡振, 张建(842)

人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除 周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕(850)

紫外氯胺组合消毒供水系统中病毒微生物的分布特征 韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧(860)

高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除 孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江(867)

胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性 汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靓, 祝建中(874)

电凝聚臭氧氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析 谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康(883)

微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制 陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒(891)

河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌(900)

南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价 陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗(909)

复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果 丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江(917)

石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田 李光辉, 成晴, 陈宏(925)

叶面喷施纳米MnO₂对水稻富集镉的影响机制 周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣(932)

典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价 王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞(941)

辣椒果实高中低镉积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较 邵晓庆, 贺章味, 徐卫红(952)

4种草本植物对镉的富集特征 陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄(960)

不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征 熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王莹燕, 王子芳, 高明(967)

降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响 高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎(977)

水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征 林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水(988)

铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响 葛艺, 徐国民, 徐绍辉, 徐艳(996)

臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响 李品, 周慧敏, 冯兆忠(1004)

颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述 李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷(1013)

《环境科学》征订启事(522) 《环境科学》征稿简则(722) 信息(748, 899, 924)

典型喀斯特河流水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素

刘睿^{1,2}, 张静¹, 陈祖胜³, 倪茂飞^{3*}, 刘文胜⁴

(1. 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331; 2. 重庆师范大学重庆市地理信息系统应用研究重庆市高校重点实验室, 重庆 401331; 3. 贵州民族大学生态环境工程学院, 贵阳 550025; 4. 毕节市环境监测中心站, 毕节 551700)

摘要: 为探索喀斯特河流水-气界面二氧化碳(CO₂)交换特性及其营养控制因素, 以我国典型喀斯特河流——芙蓉江为研究对象, 探索了区域气象水文参数、碳酸盐平衡参数、营养元素及总有机碳(TOC)的空间变化特征, 同时分析了CO₂分压(*p*CO₂)的空间变化调控因素, *p*CO₂与总氮(TN)、总磷(TP)和TOC及其化学计量比的耦合关系, 对比了该研究河流与世界河流的CO₂排放情况。结果表明, 芙蓉江水-气界面CO₂交换速率(*k*)在2.71~13.0 m·d⁻¹范围内, *p*CO₂在78.5~21 491.2 Pa范围内, 且支流高于干流; 河流表层水体TOC、TN和TP分别为(302.8±50.1)、(128.9±67.9)和(0.65±0.98) μmol·L⁻¹, 整体表现为磷限制营养状态; 河流*p*CO₂与磷及其相关的化学计量比显著耦合, 说明微生物新陈代谢是河流CO₂饱和的主要原因; 芙蓉江水-气界面CO₂排放通量(*F*)为(534.5±801.4) mmol·(m²·d)⁻¹, 高于一些世界河流, 具有巨大的CO₂排放潜力。

关键词: 喀斯特河流; 二氧化碳排放; 营养元素; 耦合关系; 碳循环

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0740-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202006173

Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River

LIU Rui^{1,2}, ZHANG Jin¹, CHEN Zu-sheng³, NI Mao-fei^{3*}, LIU Wen-sheng⁴

(1. College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 2. Key Laboratory of GIS Application, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 3. College of Eco-Environmental Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China; 4. Environmental Monitoring Center Station of Bijie City, Bijie 551700, China)

Abstract: To explore water-air carbon dioxide (CO₂) exchange and its nutritional controls in karst rivers, water sampling and analyses were conducted in the Furong River as a representative karst river system. Regional hydrometeorological characteristics, carbonate system parameters, total organic carbon (TOC), nutrients and their stoichiometric ratios, and the riverine pressure of aqueous CO₂ (*p*CO₂) and its couplings to trophic status were analyzed. The results showed that gas transfer velocity of CO₂ (*k*) varied between 2.71 and 13.0 m·d⁻¹. Riverine *p*CO₂ varied from 78.5 Pa to 21 491.2 Pa and was significantly higher in the tributaries than the main stem. Riverine TOC, total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) concentrations were (302.8±50.1), (128.9±67.9), and (0.65±0.98) μmol·L⁻¹, respectively, demonstrating the trophic status of P-limitation. Riverine *p*CO₂ was tightly linked to P-related parameters, suggesting that in-situ metabolism triggered aquatic CO₂ supersaturation. Water-air CO₂ flux (*F*) averaged (534.5±801.4) mmol·(m²·d)⁻¹ in the Furong River, which is higher than most of the world's rivers, and thus indicates high potential CO₂ emissions.

Key words: karst rivers; carbon dioxide emissions; nutrients; environmental coupling; carbon cycle

河流是链接陆地和海洋的重要纽带,它在物质运输、储存和转化等众多生物地球化学过程扮演着至关重要的作用^[1]。有研究显示^[2,3],世界众多河流处于二氧化碳(CO₂)饱和状态,易向大气中排放CO₂。普遍认为,微生物呼吸作用和陆源输入是导致自然水体CO₂饱和的主要原因,而光合作用及水体CO₂排放可以消耗水体中的溶解性CO₂^[4]。除此之外,人为活动和区域岩性等因素对水-气界面CO₂交换过程也具有显著的影响^[5]。然而,不同区域水体及大气中的CO₂浓度具有高度可变性,其交换趋势及潜力也不尽相同,因此需要相关参数的规范。

为进一步研究自然水体CO₂交换机制,学者引

入CO₂分压(*p*CO₂)概念来形容水-气界面CO₂的交换方向及量级^[6]。即当水体*p*CO₂高于大气CO₂平衡值则表现为向大气中排放CO₂,反之则吸收大气中CO₂。全球评估显示^[7],世界河流*p*CO₂平均值为2 300 Pa,普遍高于大气平衡值,且每年向大气中的CO₂排放量为(1.8±0.25) Pg·a⁻¹。目前河流作为大气CO₂重要碳源已被广泛认知,但不同河流水-气界面CO₂排放潜力,特别是特殊河流CO₂饱和的控制

收稿日期: 2020-06-16; 修订日期: 2020-08-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41801063); 教育部人文社会科学基金项目(16YJZCH061)

作者简介: 刘睿(1983~),男,博士后,教授,主要研究方向为资源环境评价, E-mail: liur@cqnu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: nimaofei000@163.com

因素研究仍然不足,急需相关内容的补充。

当前国内外关于河流水-气界面 CO_2 交换的研究主要集中在一些大江大河^[8,9],而对于特殊区域典型河流的研究相对较少。Ran 等^[10]对我国黄河表层水体 CO_2 排放特性进行研究,结果表明其 CO_2 年排放量为 $(7.9 \pm 1.2) \text{Tg} \cdot \text{a}^{-1}$,且人为活动如土地利用改变、大坝修筑、水土流失及植被恢复等均对排放量级造成显著影响。Reiman 等^[11]对 Mississippi River 进行研究,结果显示其表层水体 $p\text{CO}_2$ 在 526 ~ 3 961 Pa 范围内,其 CO_2 年排放量为 $654 \text{g} \cdot \text{a}^{-1}$ 。然而,当前对全球河流 CO_2 排放量的评估仍在不断更新,其主要原因是某些特殊河流的调研缺失所造成的,因此急需对其准确性进行评估。

喀斯特区域碳酸盐岩(石灰岩、白云岩和泥灰岩等)分布广泛,且岩石水溶性强,易造成溶解性碳大量累积^[12,13]。因此,区域岩性与河流水体相互作用显著,其水-气界面 CO_2 交换具有强烈的区域特征。先前已有部分学者对喀斯特河流进行研究^[14,15],结果显示该区域 CO_2 释放具有明显的时空格局,且受区域碳酸盐溶解和沉淀过程影响。另一方面,已有证据显示水生微生物新陈代谢过程也是喀斯特河流水体 CO_2 饱和的重要原因^[16]。其中营养物质如氮(N)和(P)主要控制着水体的营养状态,它们是微生物新陈代谢的主要基质,对水-气界面 CO_2 交换的生物因素具有一定调控作用。然而,喀斯特河流水-气界面 CO_2 交换的营养元素调控特性却鲜见报道。

因此本文以我国典型喀斯特河流作为研究对象,评估了表层水体 $p\text{CO}_2$ 及 CO_2 交换特征,探索了喀斯特河流营养元素与水体 $p\text{CO}_2$ 的相关关系,同时分析了河流营养状态对水-气界面 CO_2 交换特性的影响,通过突出特殊区域河流在全球碳循环中的重要作用,以期为我国环境气候问题的调控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

该研究选择喀斯特区域河流——芙蓉江为野外调研及样品采集对象。该河流源于贵州省遵义市,流经绥阳、正安和道真等多个县市,最终于重庆市武隆县汇入乌江,流域为典型的喀斯特地形地貌特征。

芙蓉江地理位置为 $28^{\circ}00'57'' \sim 29^{\circ}14'23''\text{N}$, $107^{\circ}10'03'' \sim 107^{\circ}52'42''\text{E}$,具体采样点分布如图 1 所示。该河流全长 231 km,流域面积为 $7\,406 \text{km}^2$ 。研究区域亚热带季风性气候特征显著,年平均降雨量在 900 ~ 1 300 mm 范围,且 86% 的降雨集中于雨

季(5 ~ 9 月)。芙蓉江多年径流量在 $15 \sim 58 \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,其平均值为 $34 \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

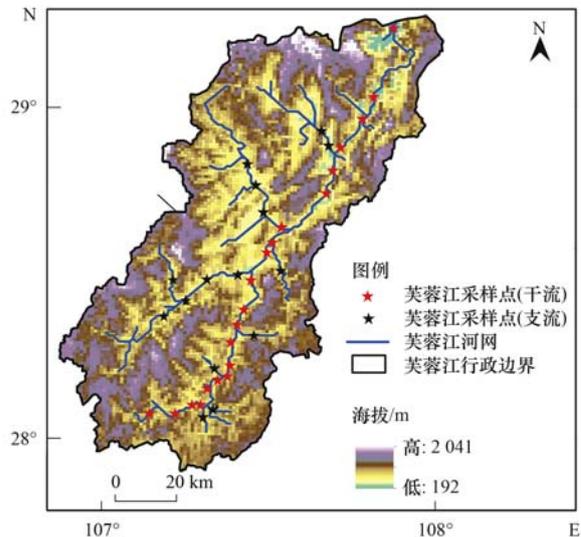


图 1 研究区域及采样点示意

Fig. 1 Map of the study site location of the Furong River, China

1.2 野外工作及样品分析

野外工作:于 2019 年 12 月对芙蓉江干流(21 个样点)和支流(12 个样点)进行样品采集工作。为限制日变化(光照及温度)对样品采集的影响,野外工作于每日上午(09:00 ~ 12:00)及下午(14:00 ~ 18:00)开展。表层水体于距离河流表面以下 10 cm 左右采取,并保存于 50 mL 或 100 mL 高密度聚乙烯塑料瓶中。瓶盖仔细检查盖严以避免出现顶空空气。采样现场使用 CyberScan PCD 650 多参数水质分析仪(Eutech,美国)对原位水温和 pH 进行测定。利用浮标法测定实时水流速度(w)。同时,原位流速(U_z)及气温(T_{air})利用 Testo 410-1 测定(Testo,德国)。用于总有机碳(TOC)测定的样品事先用 $2 \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐酸酸化,用于总氮(TN)和总磷(TP)测定的样品事先用浓硫酸进行酸化。由于采样周期较短(一周以内)且样品在运输过程中置于 4°C 冰柜冷藏,并未对待测样品进行毒化处理。

样品预处理:当天利用抽滤装置和玻璃纤维膜(GF/F 47 mm, $0.45 \mu\text{m}$, Whatman)对原水样进行过滤处理,并将滤液置于超纯水润洗过的 50 mL 或 100 mL 高密度聚乙烯塑料瓶中,盖紧瓶盖并仔细检查防止顶空出现空气。另取 25 mL 滤液置于锥形瓶中,利用 MColorTest™ 碱度测定盒(Merck,德国)进行碱度(Alk)滴定。

实验室分析:样品 TOC 浓度利用 varioTOC cube select 总碳分析仪(Elementar,德国)进行测定;TN 浓度通过碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法进行测定(GB 11894-1989);TP 浓度通过过硫酸钾消

解-钼酸铵分光光度法进行测定(GB 11893-1989)。

1.3 数据分析

该研究溶解性无机碳(DIC)、重碳酸盐(HCO_3^-)和水体 $p\text{CO}_2$ 均采用CO2SYS软件进行计算. 该软件基于水体中的碳酸盐平衡系统(Alk、DIC、 $p\text{CO}_2$ 和pH),并通过输入上述4种参数的其中两项来求解出另外两项. 该方法当前已被广泛使用,并具有显著的精确性和可靠性^[17].

水-气界面 CO_2 排放通量(F)由薄边界层模型[式(1)]进行计算:

$$F = k \times K_h \times (p\text{CO}_{2\text{water}} - p\text{CO}_{2\text{air}}) \quad (1)$$

$$K_h = 10^{-(1.11+0.0167-0.000077T^2)} \quad (2)$$

式中, k 为水-气界面 CO_2 交换速率, $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$; $p\text{CO}_{2\text{water}}$ 为水体中的 CO_2 分压(本文若无特殊提示,写为 $p\text{CO}_2$),Pa; $p\text{CO}_{2\text{air}}$ 为大气中的 CO_2 分压,本文该值取410 Pa. K_h 为 CO_2 的亨利常数,其值可以通过原位水温进行校正[式(2)], $\text{mmol}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{Pa})^{-1}$.

自然水体 k 值与众多水文条件(流速、水深和坡度等)密切相关,且具有较高的可变性. 先前的研究探索了河流 k 值的调控因素,并总结出了一系列经验模型^[18,19]. 其中Alin等^[20]的经验模型[式(3)、(4)和(5)]主要适用于中小型河流,因此本研究选取该模型来进行河流表层水体 k 值的估算.

表1 芙蓉江冬季基础气象水文特征

Table 1 Summary of hydrometeorological characteristics in the Furong River, China

项目	最小值	最大值	中位值	平均值	标准偏差
$U_z/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.05	1.4	0.5	0.55	0.41
$T_{\text{air}}/^\circ\text{C}$	9.00	17.6	14.0	13.8	2.16
$w/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.01	1.6	0.1	0.35	0.48
$K_h/\text{mmol}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{Pa})^{-1}$	0.046	0.054	0.052	0.051	0.002
S_{CT}	764.3	1 015.7	935.7	924.8	63.3
$k/\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$	2.71	13.0	3.12	4.97	3.14

芙蓉江冬季 U_z 在 $0.05 \sim 1.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内变化,其平均值为 $(0.55 \pm 0.41) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 区域 T_{air} 在 $9.00 \sim 17.6^\circ\text{C}$ 范围,其平均值为 $(13.8 \pm 2.16)^\circ\text{C}$. 河流 w 变化区间较大($0.01 \sim 1.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),其中位值为 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 河流 K_h 和 S_{CT} 平均值分别为 $(0.051 \pm 0.002) \text{ mmol}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{Pa})^{-1}$ 和 924.8 ± 63.3 ,由此计算得表层水体 k 值在 $2.71 \sim 13.0 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ 范围内,其平均值为 $(4.97 \pm 3.14) \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$,高于世界河流均值^[21].

2.2 河流碳酸盐平衡参数

对典型喀斯特河流芙蓉江碳酸盐平衡参数(pH、水温、Alk、DIC、 HCO_3^- 和 $p\text{CO}_2$)进行计算,其结果如图2所示. 其中,河流 $p\text{CO}_2$ 具有显著的空间变化($P < 0.05$),而其余参数不具有显著的空间统

$$k_T = k_{600} \left(\frac{S_{\text{CT}}}{600} \right)^{-0.5} \quad (3)$$

$$S_{\text{CT}} = 1911.1 - 118.11T + 3.4527T^2 - 0.04132T^3 \quad (4)$$

$$k_{600} = 13.82 + 0.35w \quad (5)$$

式中, k_T 为原位水温($^\circ\text{C}$)为 T 时的 k 值, $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$; S_{CT} 为施密特常数,无量纲; k_{600} 是 20°C 时标准化的 k_T 值, $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$.

1.4 统计方法

数据正态分布和连续性分别利用Kolmogorov-Smirnov和Levene's test进行验证,并将不符合正态分布的数据进行自然对数转换. 碳酸盐平衡参数(pH、水温、Alk、DIC、 HCO_3^- 和 $p\text{CO}_2$)、营养物质(TN和TP)和TOC的显著性差异分析利用独立样本 t 检验(t -test). 线性回归分析用以探索河流表层水体 $p\text{CO}_2$ 与营养状态潜在的联系. 统计基于SPSS 19.0及OriginLab OriginPro (2017),所有图形绘制利用SigmaPlot 12.5和Origin 2017完成.

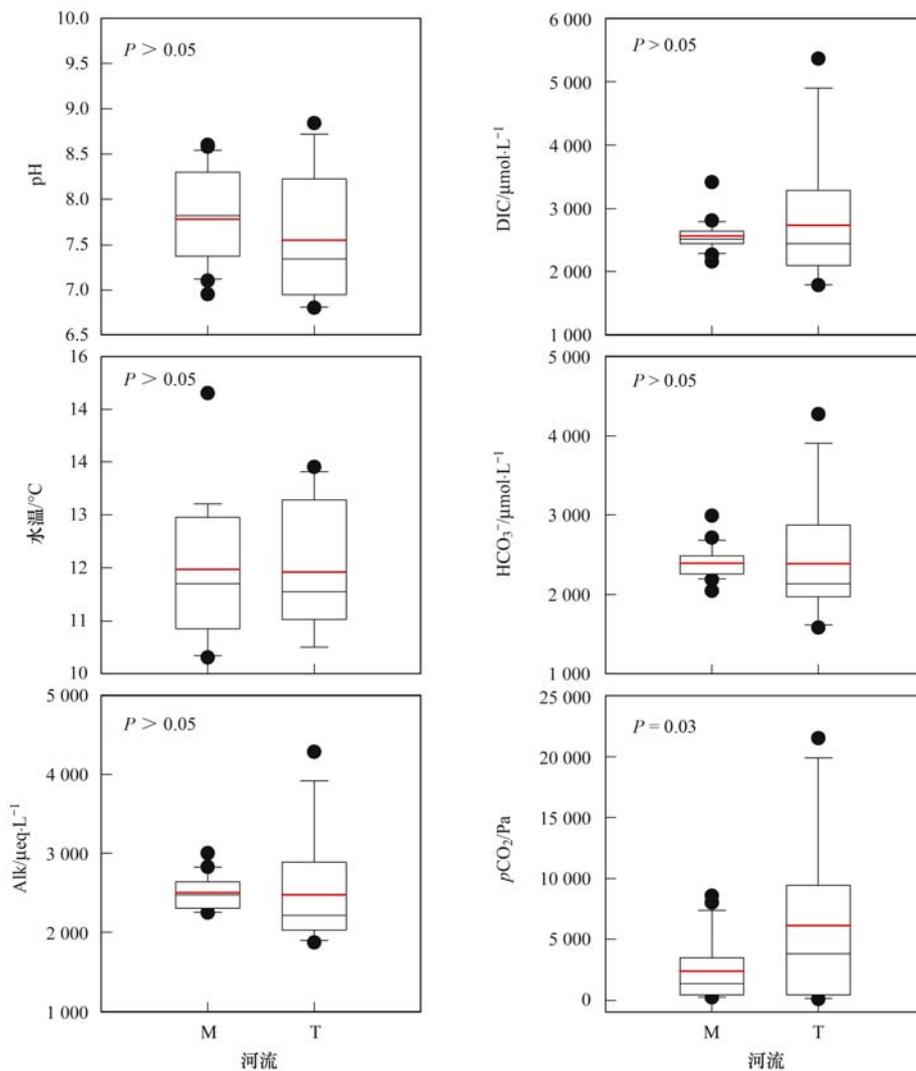
2 结果与分析

2.1 气象水文基础参数

对典型喀斯特河流芙蓉江 U_z 、 T_{air} 、 w 、 K_h 、 S_{CT} 和 k 等气象水文参数进行测定,其结果如表1所示.

计性差异($P > 0.05$).

芙蓉江表层水体pH在 $6.80 \sim 8.84$ 范围内变化,干流和支流的pH分别为 7.78 ± 0.50 和 7.55 ± 0.70 ,整体呈碱性. 河流水温变化范围较小,在 $10.3 \sim 15.3^\circ\text{C}$ 范围. 由于喀斯特区域快速的碳酸盐溶解和沉淀过程,河流水体Alk普遍高于其它亚热带长江中上游河流^[22,23],其均值为 $(2493.1 \pm 435.6) \mu\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$. 基于以上碳酸盐平衡参数,计算得河流DIC浓度在 $1790.4 \sim 5366.5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内,其干流和支流DIC浓度分别为 $(2567.2 \pm 245.8) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $(2738.9 \pm 1034.3) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$. 河流 HCO_3^- 浓度在 $1580.6 \sim 4268.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围,其平均值为 $(2390.7 \pm 464.2) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,占DIC总量的91%,这与其它长江上游河流所得结果相似^[24].



黑线、红线、箱体下沿、箱体上沿、上误差棒、下误差棒和散点分别表示中位数、平均值、25%分位、75%分位、5%分位、95%分位数和离群值; T和M分别表示支流和干流数据结果

图2 芙蓉江碳酸盐平衡参数空间格局

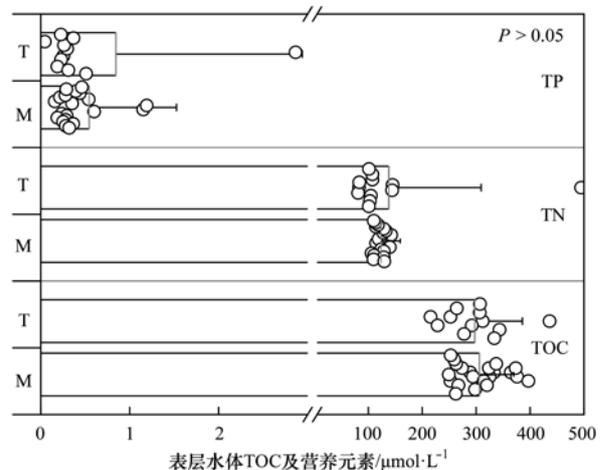
Fig. 2 Spatial patterns of carbonate system parameters in the Furong River, China

芙蓉江表层水体 $p\text{CO}_2$ 最小、最大值均出现在支流, 分别为 78.5 Pa 和 21 491.2 Pa. 支流 $p\text{CO}_2$ [(6 116.4 ± 6 882.5) Pa] 显著高于干流 [(2 371.7 ± 2 441.5) Pa, $P < 0.05$]. 总体来说, 芙蓉江 $p\text{CO}_2$ 均值为 (3 733.4 ± 4 832.7) Pa, 约 79% 的样品 $p\text{CO}_2$ 高于大气平衡值 (410 Pa) [17].

2.3 河流表层水体 TOC 与营养物质空间变化及其化学计量比

典型喀斯特河流芙蓉江 TOC 和营养物质 (TN 与 TP) 的空间变化如图 3 所示, 各参数均不具有显著的空间差异 ($P > 0.05$).

芙蓉江表层水体 TOC 浓度变化较小, 在 215.4 ~ 436.2 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内, 其平均值为 (302.8 ± 50.1) $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 这低于一些人为扰动频繁的喀斯特河流 [25]. 河流 TN 浓度在 81.8 ~ 497.7 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内, 其平均值为 (128.9 ± 67.9) $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$. 河



绿线、误差棒和散点分别表示平均值、标准偏差和各样点数据; T和M分别表示支流和干流数据结果

图3 芙蓉江表层水体 TOC 和营养物质 (TN 与 TP) 空间格局

Fig. 3 Spatial patterns of riverine TOC and nutrients (TN and TP) in the Furong River, China

流 TP 浓度在 $0.05 \sim 4.58 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内,其平均值为 $(0.65 \pm 0.98) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$. 与 TOC 和 TN 相似,高浓度 TP 出现在人为活动频繁的城市河流(如:正安县石梁河),说明人为扰动对河流 TOC 及营养元

素浓度具有重要影响.

河流 TOC、TN 和 TP 的化学计量比(摩尔分数)如表 2 所示,各参数均不具有显著的空间差异($P > 0.05$).

表 2 芙蓉江表层水体 TOC、TN 和 TP 化学计量比/ $\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$

Table 2 Summary of TOC, TN, and TP stoichiometric ratios (molar ratios) in the Furong River, China/ $\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$

位置	项目	最小值	最大值	中位值	平均值	标准偏差
干流	TOC: TN	1.80	3.59	2.52	2.49	0.44
	TOC: TP	92.0	2 304.7	856.5	936.9	539.2
	TN: TP	41.5	900.4	386.3	377.9	204.6
支流	TOC: TN	0.88	4.03	3.01	2.66	0.91
	TOC: TP	88.1	6 466.1	949.5	1 349.4	1 679.4
	TN: TP	50.6	2 278.7	360.7	487.3	587.0

河流 TOC: TN 反映了微生物群落生长速率^[26],该参数在 $0.88 \sim 4.03$ 范围内变化,干流与支流差异不大,其均值分别为 2.49 ± 0.44 和 2.66 ± 0.91 . 类似地,TOC: TP 揭示了微生物群落生长情况同时控制了水生生态系统的能量传输,与先前研究的结果一致^[27],该参数在不同样点具有 2 个数量级的变化($88.1 \sim 6 466.1$),其干流与支流均值分别为 936.9 ± 539.2 和 $1 349.4 \pm 1 679.4$. 河流 TN: TP 说明了水体的营养控制状态(N 限制或 P 限制). 一般来说,微生物 TN: TP 在 16 左右则表现为稳定状态,而该参数高于 25 则表现为 P 限制^[28,29]. 芙蓉江干流与支流 TN: TP 率分别为 377.9 ± 204.6 和 487.3 ± 587.0 ,表现为显著的 P 限制状态.

3 讨论

3.1 河流 $p\text{CO}_2$ 空间变化因素

河流表层水体 $p\text{CO}_2$ 通常由陆源输入和微生物新陈代谢过程所控制. 一般来说,河流支流发源于山地或土壤裸露的地区,可能导致大量由土壤携带的陆源 CO_2 或有机碳进入河水,从而促使其 $p\text{CO}_2$ 高于干流^[30],这解释了该研究中支流 $p\text{CO}_2$ 较高 [$(6 116.4 \pm 6 882.5) \text{Pa}$, 图 2] 的原因. 同时,支流较大的水流速度及坡度也增加了周围陆源泥土输入的机会,从而共同促进 $p\text{CO}_2$ 的陆源输入. 另一方面,区域岩性也是决定水体 $p\text{CO}_2$ 量级的重要因素. 对喀斯特河流来说,区域内碳酸盐岩溶解过程会导致水体 Alk [$(2 493.1 \pm 435.6) \mu\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$] 和 DIC 浓度 [$(2 629.7 \pm 642.3) \mu\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$] 增大,这会潜在增加区域碳酸盐平衡的缓冲能力,从而导致各平衡参数无显著的空间变化($P > 0.05$). 先前的研究报道喀斯特区域土壤侵蚀严重^[31],这也是芙蓉江陆源输入显著的重要原因. 虽然快速的碳酸盐溶解、沉淀过程会抵消掉部分 DIC 变化,但喀斯特河流仍然显

示了巨大的 $p\text{CO}_2$ 量级 [$(3 733.4 \pm 4 832.7) \text{Pa}$],且有 79% 的样品高于大气平衡值,表现为向大气中排放 CO_2 (图 2). 这与先前在其它喀斯特地区所观测到的结果相似,说明该区域河流可同时作为大气碳源和碳汇^[15].

人为活动可以直接或间接地影响河流 $p\text{CO}_2$ 量级. 例如,生活污水的直接排放可能增加水体中的溶解性 CO_2 、TOC、TN 和 TP 浓度. 它们一方面向河流直接输入 $p\text{CO}_2$,一方面通过调节河流化学荷载来改变 $p\text{CO}_2$ 的生物化学环境^[32]. 该研究中,最大浓度 $p\text{CO}_2$ 及营养元素(图 2 和 3)均出现在城市河流(正安县石梁河),说明了人为活动对河流 $p\text{CO}_2$ 的重要调控作用. 除此之外,土地利用改变破坏了原有的土壤植被类型和生态系统,对周遭河流 $p\text{CO}_2$ 具有巨大影响^[33]. 同时,农业的耕作与灌溉会影响河流与周围陆地的水-土链接关系,促使大量的土壤有机碳(SOC)和营养物质进入河流,进而导致水体 $p\text{CO}_2$ 发生剧烈变化^[34].

对河流水体内源 $p\text{CO}_2$ 来说,微生物呼吸作用和光合作用控制了其量级大小. 当前普遍认为,河流微生物呼吸矿化 TOC 生成 CO_2 是 $p\text{CO}_2$ 饱和的主要原因^[35]. 然而,芙蓉江 TOC 浓度较低 [$(302.8 \pm 50.1) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 图 3],这可能源于以下两方面原因:①微生物呼吸矿化 TOC 不是芙蓉江 $p\text{CO}_2$ 饱和的主要原因,②芙蓉江 TOC 正处于有机相和无机相的快速循环当中,微生物呼吸作用极大地贡献了水体 $p\text{CO}_2$ ^[24]. 这两种看似冲突的推论可通过 $p\text{CO}_2$ 与营养元素的耦合关系进行验证. 事实上,先前的研究显示,喀斯特小流域原位微生物新陈代谢是河流 CO_2 释放的主导因素,并说明长期的碳酸盐岩溶解、沉淀过程与 TOC 呼吸矿化作用相互独立^[16].

3.2 河流 $p\text{CO}_2$ 的营养调控因素

为进一步探索喀斯特河流营养状态及微生物新

陈代谢过程影响水体 $p\text{CO}_2$ 的证据, 对河流 $p\text{CO}_2$ 与 TOC、TN 和 TP 及其化学计量比 (TOC: TN、TOC: TP 和 TN: TP) 进行线性拟合, 结果如图 4 所示。

芙蓉江 $p\text{CO}_2$ 与 TOC 不具有显著的相关关系 ($P > 0.05$), 这可能是由于该河流 TOC 浓度较低, 其耦合关系被其它环境因子所掩盖, 同样的现象也出现在低 TOC 浓度的大宁河^[24]。 $p\text{CO}_2$ 与 TN 在支流具有显著相关关系 ($P < 0.05$), 而干流无明显的统计性相关 ($P > 0.05$), 这可能是由于干流不断增大的流量引发了“稀释效应”^[36], 从而掩盖了 $p\text{CO}_2$ -TN 耦合。 $p\text{CO}_2$ 与 TP 具有显著耦合关系, 表示 TP 的改变直接影响了河流 $p\text{CO}_2$, 这说明 $p\text{CO}_2$ 与 TP 可能具有相同的来源或者 TP 是河流微生物新陈代谢

的控制元素。联系该河流的高 TN: TP 率, 说明芙蓉江是以 P 限制为主要的营养状态 (表 2)。因此, 印证了“TP 为芙蓉江微生物新陈代谢主控元素”这一猜想, 同时也支撑了喀斯特河流 TOC 正处于快速循环中的说法。另一方面, 通过 $p\text{CO}_2$ 与 TOC: TP 和 TN: TP 的强负相关关系 ($P < 0.05$) 进一步说明喀斯特河流仍以微生物矿化有机质作为水体 CO_2 饱和和的主导机制^[37]。

3.3 典型喀斯特河流水-气界面 CO_2 排放

芙蓉江 $p\text{CO}_2$ 为 $(3\ 733.4 \pm 4\ 832.7)$ Pa, 这高于先前在长江干流所观测到的 $p\text{CO}_2$ 值 ($1\ 002 \sim 3\ 438$ Pa)^[38], 同时也高于我国另一大水系黄河的 $p\text{CO}_2$ 值 $[(2\ 810 \pm 1\ 985)$ Pa]^[10], 说明喀斯特区域特殊的环

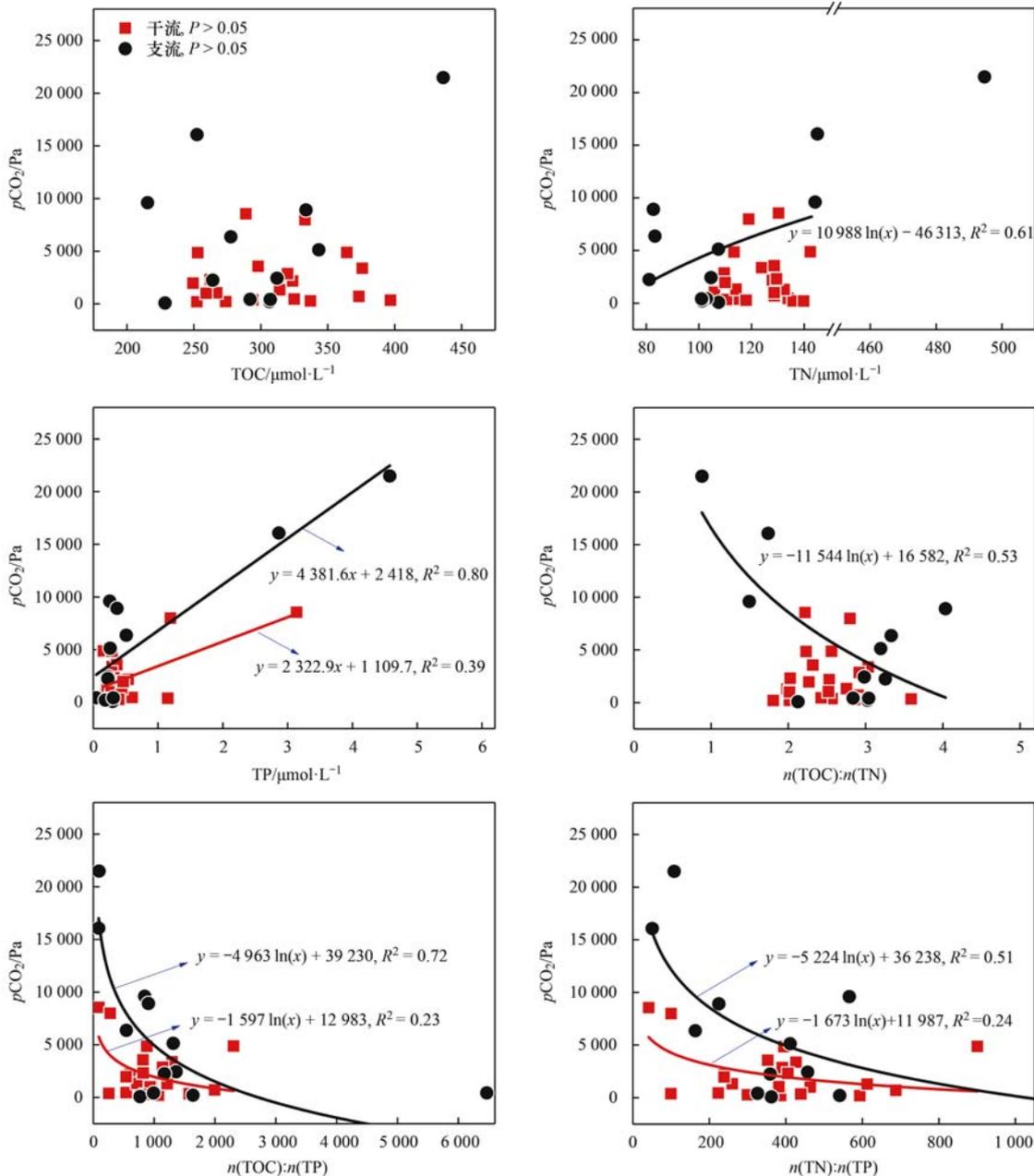


图 4 河流 $p\text{CO}_2$ 与营养状态参数 (TOC、TN、TP、TOC: TN、TOC: TP 和 TN: TP) 之间的关系

Fig. 4 Relationships between $p\text{CO}_2$ and nutritional status parameters (TOC, TN, TP, TOC: TN, TOC: TP, and TN: TP)

境生物地球化学特征促使河流溶解性 CO₂ 累积. 与国外河流相比(表3),同属于喀斯特河流的 Santa Fe River^[25]也具有巨大的 pCO₂ 变化区间(169 ~ 46 773

Pa),进一步证明区域岩性对河流 CO₂ 饱和具有一定影响. 总的来说,众多世界河流 pCO₂ 高于大气平衡,表现为向大气排放 CO₂.

表3 世界河流-气界面 CO₂ 排放比较¹⁾

Table 3 Comparison of CO₂ outgassing from world rivers to the atmosphere

河流	pCO ₂ /Pa	k 或 k ₆₀₀ /cm·h ⁻¹	F 值 /mmol·(m ² ·d) ⁻¹	文献
芙蓉江	3 733.4 ± 4 832.7	20.7 ± 13.1 ^b	534.5 ± 801.4	本研究
长江	1 002 ~ 3 438	0.2 ~ 58.9 ^a		[38]
黄河	2 810 ± 1 985	42.1 ± 16.9 ^b	856 ± 409	[10]
龙川江	1 648 ± 1 540	43.4 ~ 80.5 ^b	443 ~ 514	[21]
三岔河	300 ~ 10 000	8 ~ 15 ^b	246.6 ~ 463.5	[39]
大宁河	1 198 ± 1 123	29.2 ~ 58.8 ^b	329.8 ± 470.2	[24]
三峡库区河流	50 ~ 6 019	10 ~ 45.6 ^b	71.5 ~ 349.9	[40]
Santa Fe River	169 ~ 46 773	0.6 ~ 5.6 ^a	91.8 ~ 263.9	[25]
Tigris River	95.6 ~ 16 001.8	11 ^b	106.8	[41]
Mississippi River	1 335	16.3 ^b	270	[42]
Yukong River	> 1 500	12.9 ~ 21.7 ^b	171	[43]

1) a 表示该值为标准化的气体传输速率(k₆₀₀), b 表示该值为气体传输速率(k)

芙蓉江 k 值为(20.7 ± 13.1) cm·h⁻¹, 这低于在其它长江支流中所观测到的结果^[24], 说明该河流水流速度相对较慢. 但高于一些世界大河(如: Mississippi River)^[42], 这是由于河流越大其流速越相对稳定, 进而导致与湍流程度密切相关的 k 值较小. 芙蓉江 F 值为(534.5 ± 801.4) mmol·(m²·d)⁻¹, 高于其它长江支流^[21, 39]和一些世界大河^[41, 43], 说明喀斯特区域河流具有巨大 CO₂ 的排放潜力. 未来的研究可进一步具体分析喀斯特河流呼吸作用和光合作用速率与表层水体 CO₂ 的排放的关系.

4 结论

(1) 喀斯特河流表层水体 pCO₂ 受陆源输入、人为扰动和微生物新陈代谢的控制, 其值在 78.5 ~ 21 491.2 Pa 范围内, 且支流 pCO₂ [(6 116.4 ± 6 882.5) Pa] 显著高于干流 [(2 371.7 ± 2 441.5) Pa].

(2) 水体 pCO₂ 与营养元素 P 及其相关化学计量比具有显著的耦合关系, 说明该河流处于 P 限制营养状态, 且微生物新陈代谢是河流 CO₂ 饱和的主要原因.

(3) 芙蓉江 k 值为(20.7 ± 13.1) cm·h⁻¹, F 值为(534.5 ± 801.4) mmol·(m²·d)⁻¹, 普遍高于一些世界河流, 说明喀斯特河流具有巨大的 CO₂ 排放潜力.

参考文献:

[1] 杨平, 傅伯杰. 土地利用变化与陆地—海洋的相互作用[J]. 地球科学进展, 2000, 15(6): 723-728.
Yang P, Fu B J. Land use change and land-ocean interaction

[J]. Advance in Earth Sciences, 2000, 15(6): 723-728.
[2] Sorribas M V, Da Motta Marques D, Castro N M D R, et al. Fluvial carbon export and CO₂ efflux in representative nested headwater catchments of the eastern La Plata River Basin [J]. Hydrological Processes, 2017, 31(5): 995-1006.
[3] Borges A V, Darchambeau F, Teodoru C R, et al. Globally significant greenhouse-gas emissions from African inland waters [J]. Nature Geoscience, 2015, 8(8): 637-642.
[4] 罗佳宸, 倪茂飞, 李思悦. 重庆西部山区典型湖泊水-气界面 CO₂ 交换通量及其影响因素[J]. 环境科学, 2019, 40(1): 192-199.
Luo J C, Ni M F, Li S Y. Water-air interface CO₂ exchange flux of typical lakes in a mountainous area of the western Chongqing and their influencing factors[J]. Environmental Science, 2019, 40(1): 192-199.
[5] 王晓锋, 袁兴中, 陈槐, 等. 河流 CO₂ 与 CH₄ 排放研究进展[J]. 环境科学, 2017, 38(12): 5352-5366.
Wang X F, Yuan X Z, Chen H, et al. Review of CO₂ and CH₄ emissions from rivers [J]. Environmental Science, 2017, 38(12): 5352-5366.
[6] 龚小杰, 王晓锋, 袁兴中, 等. 城镇快速发展对河流温室气体溶存及扩散通量的影响——以重庆市黑水滩河流域场镇为例[J]. 生态学报, 2019, 39(22): 8425-8441.
Gong X J, Wang X F, Yuan X Z, et al. Effects of field towns development on the dissolved and diffusion fluxes of greenhouse gases in Heishuitan River basin, Chongqing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(22): 8425-8441.
[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] Raymond P A, Oh N H, Turner R E, et al. Anthropogenically enhanced fluxes of water and carbon from the Mississippi River [J]. Nature, 2008, 451(7177): 449-452.
[9] 李双. 长江流域水气界面二氧化碳交换通量及其影响机制研究[D]. 上海: 上海大学, 2018.
[10] Ran L S, Lu X X, Yang H, et al. CO₂ outgassing from the Yellow River network and its implications for riverine carbon cycle [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2015, 120(7): 1334-1347.

- [11] Reiman J H, Xu Y J. Dissolved carbon export and CO₂ outgassing from the Lower Mississippi River—Implications of future river carbon fluxes[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, **578**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.124093.
- [12] Han G L, Liu C Q. Dissolved rare earth elements in rivers draining karst terrain in Guizhou Province, SW China [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, **70**(18 Suppl), doi: 10.1016/j.gca.2006.06.456.
- [13] 刘丛强, 蒋颖魁, 陶发祥, 等. 西南喀斯特流域碳酸盐岩的硫酸侵蚀与碳循环[J]. *地球化学*, 2008, **37**(4): 404-414.
Liu C Q, Jiang Y K, Tao F X, *et al.* Chemical weathering of carbonate rocks by sulfuric acid and the carbon cycling in Southwest China[J]. *Geochimica*, 2008, **37**(4): 404-414.
- [14] Han Q, Wang B L, Liu C Q, *et al.* Carbon biogeochemical cycle is enhanced by damming in a karst river[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **616-617**: 1181-1189.
- [15] Zhang T, Li J H, Pu J B, *et al.* River sequesters atmospheric carbon and limits the CO₂ degassing in karst area, southwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **609**: 92-101.
- [16] Pu J B, Li J H, Khadka M B, *et al.* In-stream metabolism and atmospheric carbon sequestration in a groundwater-fed karst stream[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **579**: 1343-1355.
- [17] Li S Y, Luo J C, Wu D S, *et al.* Carbon and nutrients as indicators of daily fluctuations of pCO₂ and CO₂ flux in a river draining a rapidly urbanizing area [J]. *Ecological Indicators*, 2020, **109**, doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105821.
- [18] Raymond P A, Cole J J. Gas exchange in rivers and estuaries: choosing a gas transfer velocity[J]. *Estuaries*, 2001, **24**(2): 312-317.
- [19] Ran L S, Li L Y, Tian M Y, *et al.* Riverine CO₂ emissions in the Wuding River catchment on the Loess Plateau: environmental controls and dam impoundment impact [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, **122**(6): 1439-1455.
- [20] Alin S R, Rasera M D F F L, 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: Biogeosciences*, 2011, **116**(G1), doi: 10.1029/2010JG001398.
- [21] Ni M F, Luo J C, Li S Y. Dynamic controls on riverine pCO₂ and CO₂ outgassing in the dry-hot valley region of Southwest China[J]. *Aquatic Sciences*, 2020, **82**(1), doi: 10.1007/s00027-019-0685-5.
- [22] Luo J C, Li S Y, Ni M F, *et al.* Large spatiotemporal shifts of CO₂ partial pressure and CO₂ degassing in a monsoonal headwater stream[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, **579**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.124135.
- [23] 罗佳宸, 李思悦. 三峡库区典型河流水-气界面 CO₂ 通量日变化观测及其影响因素分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(11): 5217-5226.
Luo J C, Li S Y. Daily variation of CO₂ flux at water-air interface and analysis of its affecting factors in a typical river of the Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(11): 5217-5226.
- [24] Ni M F, Li S Y, Luo J C, *et al.* CO₂ partial pressure and CO₂ degassing in the Daning River of the upper Yangtze River, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, **569**: 483-494.
- [25] Khadka M B, Martin J B, Jin J. Transport of dissolved carbon and CO₂ degassing from a river system in a mixed silicate and carbonate catchment[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, **513**: 391-402.
- [26] Goldman J C, Caron D A, Dennett M R. Regulation of gross growth efficiency and ammonium regeneration in bacteria by substrate C:N ratio[J]. *Limnology and Oceanography*, 1987, **32**(6): 1239-1252.
- [27] Hessen D O. Determinants of seston C:P-ratio in lakes [J]. *Freshwater Biology*, 2006, **51**(8): 1560-1569.
- [28] 陈蕾, 李超伦, 赵增霞, 等. N/P 比失衡对两种硅藻元素组成及水体中氮磷组成的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2016, **47**(1): 9-15.
Chen L, Li C L, Zhao Z X, *et al.* N/P ratio imbalance affects compositions of diatom bodies and nutrient concentration of culture[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2016, **47**(1): 9-15.
- [29] Ni M F, Li S Y, Santos I, *et al.* Linking riverine partial pressure of carbon dioxide to dissolved organic matter optical properties in a Dry-hot Valley Region[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **704**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135353.
- [30] Hotchkiss E R, Hall Jr R O, Sponseller R A, *et al.* Sources of and processes controlling CO₂ emissions change with the size of streams and rivers[J]. *Nature Geoscience*, 2015, **8**(9): 696-699.
- [31] 陈洪松, 冯腾, 李成志, 等. 西南喀斯特地区土壤侵蚀特征研究现状与展望[J]. *水土保持学报*, 2018, **32**(1): 10-16.
Chen H S, Feng T, Li C Z, *et al.* Characteristics of soil erosion in the karst regions of southwest China: research advance and prospective[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, **32**(1): 10-16.
- [32] Gu C J, Mu X M, Gao P, *et al.* Effects of climate change and human activities on runoff and sediment inputs of the largest freshwater lake in China, Poyang Lake [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2017, **62**(14): 2313-2330.
- [33] Borges A V, Darchambeau F, Lambert T, *et al.* Effects of agricultural land use on fluvial carbon dioxide, methane and nitrous oxide concentrations in a large European river, the Meuse (Belgium)[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **610-611**: 342-355.
- [34] Oh N H, Pellerin B A, Bachand P A M, *et al.* The role of irrigation runoff and winter rainfall on dissolved organic carbon loads in an agricultural watershed[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, **179**: 1-10.
- [35] Lauerwald R, Laruelle G G, Hartmann J, *et al.* Spatial patterns in CO₂ evasion from the global river network [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2015, **29**(5): 534-554.
- [36] 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.
- [37] 陈银波. 喀斯特小流域水-气界面二氧化碳释放及其影响因素研究——以阿哈湖入湖河流为例[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019. 41-44.
- [38] Liu S D, Lu X X, Xia X H, *et al.* Hydrological and geomorphological control on CO₂ outgassing from low-gradient large rivers: an example of the Yangtze River system[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, **550**: 26-41.
- [39] 钱娟婷, 吴起鑫, 安艳玲, 等. 三岔河 pCO₂ 特征及水-气界面通量分析[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(6): 2263-2269.
Qian J T, Wu Q X, An Y L, *et al.* Partial pressure of CO₂ and CO₂ outgassing fluxes of Sancha River[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(6): 2263-2269.

- [40] Li S Y, Ni M F, Mao R, *et al.* Riverine CO₂ supersaturation and outgassing in a subtropical monsoonal mountainous area (Three Gorges Reservoir Region) of China [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, **558**: 460-469.
- [41] Varol M, Li S Y. Biotic and abiotic controls on CO₂ partial pressure and CO₂ emission in the Tigris River, Turkey [J]. *Chemical Geology*, 2017, **449**: 182-193.
- [42] Dubois K D, Lee D, Veizer J. Isotopic constraints on alkalinity, dissolved organic carbon, and atmospheric carbon dioxide fluxes in the Mississippi River [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2010, **115** (G2), doi: 10. 1029/2009JG001102.
- [43] Striegl R G, Dornblaser M M, McDonald C P, *et al.* Carbon dioxide and methane emissions from the Yukon River system [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, **26** (4), doi: 10. 1029/2012GB004306.

《环境科学》连续 9 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2020 年 12 月 17 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2020 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》荣获“2020 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 9 次获此殊荣.评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.

环 境 科 学

CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, WANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangshai Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangshai	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)