

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

用于滤膜称重的饱和氯化镁溶液恒湿系统搭建与评估	李晓晓, 张强, 邓建国, 蒋靖坤, 郝吉明 (3095)
钢铁工业排放颗粒物中碳组分的特征	张进生, 吴建会, 马威, 冯银厂 (3102)
常州市大气 PM _{2.5} 中 PAHs 污染特征及来源解析	顾爱军, 刘佳澍, 罗世鹏, 毕承路, 苏亚兰, 叶招莲, 盖鑫磊 (3110)
兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源	尉媛丽, 刘攀亮, 于周锁, 高宏, 毛潇萱, 马建民, 黄韬 (3120)
株洲市大气降尘中元素特征及来源分析	王世豪, 张凯, 柴发合, 钟学才, 周广柱, 杨晴, 柯馨妹 (3130)
传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征	徐敏, 何万清, 聂磊, 韩力慧, 潘涛, 石爱军 (3139)
基于车载测试的重型柴油车尾气典型烷烃排放特征	史纯珍, 郝雪薇, 申现宝, 曹鑫悦, 张伟, 吴辉, 姚志良 (3146)
基于 wavelet-SVM 的 PM ₁₀ 浓度时序数据预测	王平, 张红, 秦作栋, 姚清晨, 耿红 (3153)
广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算	黄学良, 张洲, 杨威强, 李晟, 朱明, 方华, 何俊杰, 陈俊文, 万承浩, 张艳利, 刘国光, 黄祖照, 王宇骏, 王新明 (3162)
沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响	李鸿涛, 祁建华, 董立杰, 高冬梅 (3169)
典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价	芦会杰 (3178)
杭州地区城区降雪中全氟化合物的污染特征	张明, 唐访良, 俞雅雲, 徐建芬, 陈金汉, 余波, 周姗, 张伟 (3185)
黄浦江流域典型污水中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征	聂明华, 晏彩霞, 杨毅, 周俊良, 刘敏 (3192)
漓江地表水体有机碳来源	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (3200)
夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响	吴飞红, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶, 李丽, 黄思宇 (3209)
城市不同功能区地表水重金属污染特性比较: 以宁波为例	徐美娟, 童桂华, 孙丹, 李建新, 虞效益 (3218)
地下水主要组分水化学异常识别方法对比: 以柳江盆地为例	张小文, 何江涛, 彭聪, 张昌延, 倪泽华 (3225)
人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析	李如忠, 叶舟, 高苏蒂, 郑悦 (3235)
长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义	刘军, 臧家业, 冉祥滨, 赵晨英, 刘季花, 王小静 (3243)
三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系	陈成龙, 高明, 木志坚, 倪九派, 祁乐 (3254)
黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估: 以羊圈沟坝系流域为例	鄂馨卉, 汪亚峰, 高扬, 陈利顶, 陈世博, 陈维梁 (3264)
新型溴代苯酚类消毒副产物的氯化降解机制	李欢, 李正魁, 李爱民, 周庆, 王莹, 潘咏 (3273)
藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响	张大为, 徐慧, 王希, 门彬, 王东升, 段晋明 (3281)
汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析	向蓉, 李巧玉, 喻焱, 张洪波, 董聪聪, 施军琼, 吴忠兴 (3290)
石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析	宋云龙, 张金松, 郭小雅, 朱佳, 王丽, 陶益, 张丽 (3302)
不同湿地模型中根系微生物的多样性	王林, 李冰, 余家辉, 朱加宾, 朱健 (3312)
北海湖微生物群落结构随季节变化特征	张雅洁, 李珂, 朱浩然, 张洪勋 (3319)
基于高通量测序的流化床生物滤器细菌群落结构分析	张海耿, 宋红桥, 顾川川, 单建军, 张宇雷, 倪琦 (3330)
高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析	孟婷, 杨宏 (3339)
基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理	韩松芳, 金文标, 涂仁杰, 陈洪一 (3347)
生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果	王愿珠, 程鹏飞, 刘德富, 刘天中 (3354)
微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水	刘春, 周洪政, 张静, 陈晓轩, 张磊, 郭延凯 (3362)
pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响	于德爽, 周同, 李津, 王晓霞, 吴国栋, 王骁静 (3369)
酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性	周正, 林兴, 王凡, 顾澄伟, 沈婧, 袁砚, 金润 (3377)
模拟废水中钼的微生物回收及其对亚甲基蓝的催化特性	康乃馨, 朱能武, 郭雯颖, 何志心 (3385)
采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程	王利君, 李志华, 韩冬, 张天宇, 杨成建 (3393)
CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动	张婷, 吴鹏, 沈耀良, 闫刚, 徐乐中, Samwine Thomas (3399)
硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径	完颜德卿, 黄勇, 毕贞, 刘忻, 姚鹏程, 张文静 (3406)
不同 TOC/NH ₄ ⁺ -N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响	王凡, 刘凯, 林兴, 周正, 李祥, 黄勇 (3415)
盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响	谭潇, 黄靛, 杨平, 涂奔州 (3422)
CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (3429)
胞外聚合物对活性污泥吸附去除全氟辛酸磺酸 (PFOS) 的影响	刘鑫彤, 尹华, 彭辉, 李浩榕, 杨萍萍, 曹雅娟 (3435)
不同施肥方式下紫色土 N ₂ O 与 NO _x 的排放特征	胡磊, 刘韵, 朱波 (3442)
地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响	张凯莉, 郝庆菊, 冯迪, 石将来, 石孝均, 江长胜 (3451)
模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响	张翠景, 沈菊培, 孙翼飞, 王军涛, 杨中领, 韩红艳, 张丽梅, 万师强, 贺正 (3463)
长期施肥酸性旱地土壤硝化活性及自养硝化微生物特征	徐白璐, 钟文辉, 黄欠如, 秦红益, 邓欢, 韩成 (3473)
施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响	郭安宁, 段桂兰, 赵中秋, 唐仲, 王杨扬, 王伯勋 (3483)
水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应	魏亮, 汤珍珠, 祝贞科, 蔡观, 葛体达, 王久荣, 吴金水 (3489)
凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素	张彦军 (3497)
西北干旱区农田土壤磁性特征及其环境意义	王新, 夏敦胜, 王博, 陈红, 刘浩 (3507)
小麦秸秆驱动菱铁矿热解制备磁性生物炭及其吸附 Cd ²⁺ 活性	张如玉, 刘海波, 邹雪华, 庆承松, 李梦雪, 陈冬, 陈天虎 (3519)
交通污染暴露对 DNA 甲基化的影响	汪婷, 丁锐, 黄丹妮, 祝子逸, 章军, 叶怀庄, 徐迎春, 金永堂 (3529)
外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响	杨萍萍, 尹华, 彭辉, 唐少宇, 卢妙, 刘皓 (3536)
中国电动自行车动力铅酸蓄电池生命周期评价	刘巍, 田金平, 陈吕军 (3544)
《环境科学》征稿简则 (3280) 《环境科学》征订启事 (3301) 信息 (3353, 3472, 3535)	

漓江地表水体有机碳来源

赵海娟^{1,2}, 肖琼^{2*}, 吴夏², 刘凡², 苗迎², 蒋勇军¹

(1. 西南大学地理科学学院, 岩溶环境重庆市重点实验室, 重庆 400715; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004)

摘要: 科学辨识河流有机碳来源是碳循环研究的关键。本文选取典型岩溶流域漓江流域为研究对象, 通过同位素示踪法、相关分析法、端元混合模型, 利用碳稳定同位素、C/N 对其 2016 年 7~9 月有机碳来源进行研究。结果表明: ① DIC 浓度空间分布特征为: 岩溶区 > 岩溶区与非岩溶区的混合区 > 非岩溶区; 干流区 DIC 浓度从上游到下游递增, 主要受控于流域碳酸盐岩的空间分布比例。② DOC 是构成漓江水体 TOC 的主体, TOC 来源以内源有机碳为主, 内源碳浓度空间分布特征为: 岩溶区 > 混合区 > 非岩溶区, 可能与岩溶区水生植物丰茂、碳酸酐酶活性较强有关, TOC 中内源碳的浓度介于 $1.02 \sim 5.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均为 $2.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; TOC 中内源碳的比例空间分布差异不大, 平均为 73.07%。③ POC 浓度、POC 中内源碳的浓度及 POC 中内源碳的比例空间分布差异不大, POC 来源以外源碳为主, POC 中内源有机碳浓度介于 $0.01 \sim 0.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均为 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 水生生物量对漓江流域 POC 贡献平均为 17.31%。④ DOC 浓度及内源 DOC 浓度空间分布均为: 岩溶区 > 混合区 > 非岩溶区, DOC 主要来源于水生生物的初级生产力, DOC 中内源碳的浓度介于 $0.97 \sim 5.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均为 $2.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; DOC 中内源碳的比例空间分布差异不大, 平均为 79.51%。研究水生光合生物对流域有机碳的影响, 可以为岩溶碳汇稳定性科学问题的解答提供基础。

关键词: 漓江; 碳稳定同位素; C/N; 溶解有机碳; 颗粒有机碳; 来源

中图分类号: X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2017)08-3200-09 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.201701176

Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River

ZHAO Hai-juan^{1,2}, XIAO Qiong^{2*}, WU Xia², LIU Fan², MIAO Ying², JIANG Yong-jun¹

(1. Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Land and Resources/Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China)

Abstract: This study selected a larger typical karst basin, that of Lijiang River, as the research subject and studied the sources of organic carbon in the Lijiang basin in July, August, and September in 2016 by an isotope tracer method, a correlational analysis method, and endmember mixture model, using a stable isotope of carbon and the organic carbon to nitrogen ratio. The results showed the following. ① The spatial distribution characteristics of DIC concentration were as follows: karst area > karst and non-karst mixed area > non-karst area. The content of DIC downstream was higher than upstream. The spatial distribution of DIC concentration was mainly controlled by the distribution of carbonate rocks in the Lijiang basin. ② DOC was the main part of TOC in the Lijiang basin. TOC was mainly derived from the primary productivity of aquatic organisms. The spatial distribution characteristics of autochthonous organic carbon content were as follows: karst area > karst and non-karst mixed area > non-karst area, which may be related to more lush aquatic plants in the karst area than in the non-karst area and the carbonic anhydrase activity in the karst area being higher than in the non-karst area. The content of autochthonous organic carbon in the TOC ranged from 1.02 to $5.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, with an average of $2.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. There was no significant spatial difference of the proportion of autochthonous organic carbon in the TOC; it ranged from 51.68% to 85.99%, with an average of 73.07%. ③ The POC concentration, the content of autochthonous organic carbon in the POC, and the proportion of autochthonous organic carbon in the POC had no significant spatial differences. The main source of POC was allochthonous organic carbon, and the content of autochthonous organic carbon in the POC ranged from 0.01 to $0.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, with an average of $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The proportion of autochthonous organic carbon in the POC ranged from 3.69% to 41.94%, with an average of 17.31%. ④ The spatial distribution of the content of DOC and autochthonous organic carbon in the DOC are as follows: karst area > karst and non-karst mixed area > non-karst area. DOC mainly came from the primary productivity of aquatic organisms. The content of autochthonous organic carbon of the DOC ranged from 0.97 to $5.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, with an average of $2.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The spatial distribution of the proportion of autochthonous organic carbon in the DOC had no obvious difference and ranged from 54.43% to 94.69%, with an average of 79.51%. Studying the influence of aquatic photosynthetic organisms on organic carbon in rivers can provide basis for scientific problem solution of the stability of karst carbon sinks.

收稿日期: 2017-01-20; 修订日期: 2017-03-13

基金项目: 中国地质科学院基本科研业务费专项 (YYWF201639); 广西自然科学基金项目 (2016GXNSFAA380064); 重庆市自然科学基金项目 (CSTC2016JCYJS0003)

作者简介: 赵海娟 (1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为资源环境与 GIS 应用, E-mail: 18189538930@163.com

* 通信作者, E-mail: xiaoqiong-8423@163.com

Key words: Lijiang basin; stable isotope of carbon; C/N; dissolved organic carbon; particulate organic carbon; sources

河流作为连接陆地与海洋两大碳库的重要通道,研究其碳输送是全球碳循环研究的一个重要环节^[1]。根据组成形态,河流碳一般可分为溶解无机碳(dissolved inorganic carbon, DIC)、溶解有机碳、颗粒有机碳、颗粒无机碳(particulate inorganic carbon, PIC),4种形式的碳在水体内部相互转化:PIC可溶解成为DIC,DOC可降解为DIC,水生植物生长可利用DIC生成POC、DOC^[2]。每年由陆地生态系统通过河流向海洋排放的有机碳约0.4 Pg,其中约60%为溶解有机碳(dissolved organic carbon, DOC),40%是颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)^[3],通过河流陆地生态系统向海洋排放的有机碳大致相当于全球陆地生态系统净初级生产力的1%~2%^[4]。溶解有机碳根据生物可利用性分为三类:容易被降解的活性DOC(labile DOC, LDOC)、可被缓慢降解的半活性DOC(semi-labile DOC, SLDOC),以及难以被生物降解的惰性DOC(recalcitrant DOC, RDOC)^[5]。

岩溶地质作用的碳汇一度被质疑^[6],是源于传统的碳循环模型中把地质作用当作一种纯无机过程^[7],然而,近来的研究表明,岩溶作用并非纯无机地质过程,生物广泛参与岩溶作用,当水生系统的光合作用强度超过呼吸作用强度时,碳酸钙沉降过程将无机碳转化成有机碳^[8~12],进一步沉积和埋藏;同时海洋研究中发现, AAPB(aerobic anoxygenic phototrophic bacteria)作用下形成RDOC,使碳酸盐岩的风化也能形成长久的碳汇(千年尺度)^[13, 14],通过河流陆地生态系统向海洋排放的有机碳约0.1Pg的DOC循环周期可达到4~6千年^[15]。

河流有机碳来源主要包括内源有机碳(水生植物光合作用产物)和外源有机碳(地表径流的侵蚀冲刷而进入河流的产物)。碳同位素示踪、水中有有机质C/N及生物标记法是国内外常用的研究方法,能很好地解决河流有机碳的来源问题。Waterson等^[16]利用C/N和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 揭示了美国密西西比河水的总有机碳中50%是内源有机碳,唐文魁等^[2]利用 $\delta^{13}\text{C}_{\text{poc}}$ 研究发现桂江流域水生光合产物对颗粒有机碳的贡献达25.1%,陶贞等^[17]利用C/N研究发现增江流域河水悬移质中的有机碳以水生藻类(内源碳)的贡献为主(超过70%),Sun等^[18]利用C/N和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{poc}}$ 研究发现,我国西江流域雨季和旱季时河水中3%~21%和12%~22%的POC是河流

水生系统的光合作用利用碳酸岩盐风化产物DIC而形成的。原雅琼^[19]利用C/N、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 分析发现漓江水体在非洪水过程时,河流有机碳主要来源于水生植物,内源有机碳的比例可达92%,且在内源有机碳中来自植物光合利用 HCO_3^- 生成的有机碳的比例达46%~77%。原雅琼利用的C/N值与其他数据不是同一时间段,同时采样密度不够多,DOC与POC中内源有机碳的含量及比例也未做研究,因此,剖析水生光合生物对不同形式碳的作用和影响,有助于对漓江流域碳循环的认识。

本文以珠江支流桂江的上游河段漓江为研究对象,采用同位素示踪法及相关分析法,利用稳定同位素、C/N、端元混合模型来辨析漓江流域DOC、POC来源端元及贡献,分析水生光合生物对流域有机碳的影响,以期为岩溶碳汇稳定性科学问题的解答提供基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

漓江流域位于广西壮族自治区的东北部,属珠江水系的桂江上游段。发源于越城岭老山界南侧,由北向南经兴安、桂林、阳朔,桂林断面以上河段主要为花岗岩、碎屑岩非岩溶区,桂林到阳朔河段主要为覆盖型及裸露型岩溶区。地理坐标为 $\text{E}109^{\circ}45' \sim 111^{\circ}02'$, $\text{N}24^{\circ}16' \sim 26^{\circ}21'$,全长164 km,流域总面积12 680 km^2 ,整个漓江流域以漓江为轴线,呈南北向狭长带状分布(图1),属于中亚热带季风气候区,年平均气温为16.5~20.0℃,雨量充沛,年平均降雨量为1 367.5~1 932.9 mm,雨热同期。漓江为雨源型河流,河道径流由流域降雨补给,汛期为每年的4~8月,其降雨量占全年降雨量的70%左右,枯季(11月至翌年2月)降雨稀少^[20]。漓江的地表径流来源于流域内的地表水和地下水,在雨季发洪水时地表水向地下渗透,低水期和枯水期地下水补给河槽^[20]。因流域内碳酸盐岩质纯层厚,加之雨热同期的季风气候条件,岩溶发育强烈,碳酸盐岩峰丛、峰林地貌广布,漓江贯穿于两者之间,形成流域区独特的自然景观。

1.2 样品的采集与前处理

在漓江兴安—阳朔段,上游(兴安段)、中游(桂林段)和下游(阳朔段)主要断面及支流汇入处布置了13个采样点(图1),分别为漓江上游华江

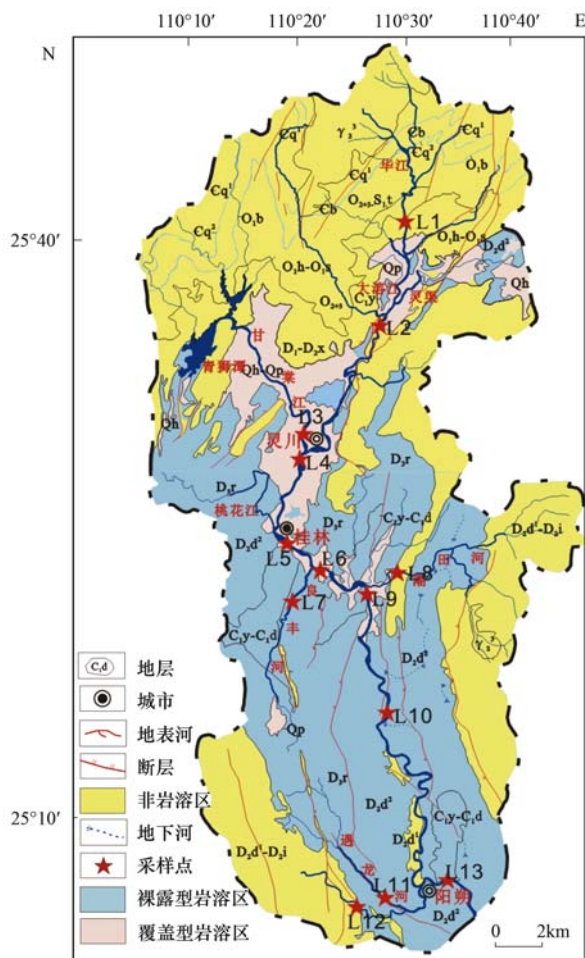


图1 研究区水文地质图与采样点位置^[19]

Fig. 1 Hydrogeological map of the study area and the locations of the sampling sites

(L1)、峡背(L2;灵渠与大溶江汇合后)、灵川(L3;漓江支流甘棠江)、大面圩(L4;甘棠江水汇入漓江后)、漓江干流桂林水文站(L5)、父子岩(L6;干流良丰河水汇入漓江后)、漓江支流良丰河(L7)、潮田河水文站(L8;漓江支流潮田河)、省里(L9;干流潮田河水汇入漓江后)、下游干流杨堤(L10)、遇龙河(L11)、遇龙河支流(L12)、阳朔水文站(L13)。于2016年7月27日、8月27日、9月12日采集POC、DOC、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 、C/N水样,为避免采样过程中发生污染,采样前先用待采水样洗涤采样瓶3~5次。现场利用便携式水质分析仪(法国PONSEL)测定水样pH、水温(T)和溶解氧(DO),见表1,其精度分别为0.01 pH单位、0.01℃、0.01 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;用德国Merck公司生产的碱度计现场滴定 HCO_3^- ,精度为0.1 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.3 样品分析

DOC含量分析使用德国耶拿公司(Aanalytik Jena AG)生产的Multi C/N 3100测定,精度为

0.001 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。POC和 $^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 的采样及测定:用于过滤水样的玻璃纤维膜预先在马弗炉450℃灼烧6 h以去除无机碳。用玻璃抽滤器加47 mm GF/F滤膜(孔径0.7 μm)过滤,并送国家海洋局第三海洋研究所测试中心测试,分析精度为 $\pm 0.2\%$,测试流程如下:用不锈钢打孔器取固定面积酸熏后的玻璃纤维膜样,用5×9锡杯包样,用Thermo公司生产的元素分析仪-稳定同位素质谱仪联机(Flash EA 1112 HT-Delta V Advantages)测定膜样中POC、 $^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 值。载气He流速90 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$,反应管温度960℃,色谱柱温度50℃。

$\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 值以PDB国际标准作为参考标准, $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 值按以下公式计算:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = \left[\frac{R(^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{sample}})}{R(^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{VPDB}})} - 1 \right] \times 1000 \quad (1)$$

式中, $R(^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{VPDB}})$ 为国际标准物VPDB(vienna peedee belemnite)的碳同位素丰度比值。

2 结果与讨论

2.1 溶解无机碳与有机碳浓度变化特征

本研究测得漓江流域DIC浓度介于24.4~183.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均为91.66 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。DOC浓度介于1.14~5.66 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均为3.15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,低于全球DOC浓度平均值(5.29 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)^[21]。POC浓度介于0.19~0.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均为0.33 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

漓江流域DIC浓度空间分布特征为:岩溶区(L7、L11)>岩溶区与非岩溶区的混合区(L3、L4、L5、L6、L9、L8、L10、L13)>非岩溶区(L1、L2、L12),混合区干流DIC浓度从上游到下游递增,支流DIC浓度在干流DIC浓度的上下摆动(图2),主要受控于流域碳酸盐岩的空间分布比例,DIC质量浓度与碳酸盐岩的空间分布比例呈显著正相关关系($R^2=0.80$),DIC质量浓度随着碳酸盐岩的分布比例增加而相应增大(图3)。POC含量上下游差异不大(图2)。漓江水体DOC浓度空间分布特征为:岩溶区(3.50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)高于非岩溶区(1.80 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$);上游(1.91 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)低于下游(3.58 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)(图2)。其原因可能为非岩溶区水进入岩溶区后,水生植物增加,水生植物利用 HCO_3^- 进行光合作用,从而导致水体中DOC浓度岩溶区大于非岩溶区。DO也表现为岩溶区大于非岩溶区,主要是岩溶区水生植物光合作用的原因。一般情况下,小河流或大河的上游水流湍急,不利于水生植物的生长;在大河

表 1 漓江地表水体部分测试数据
Table 1 Part of the testing data of the Lijiang surface water

日期 (年-月)	采样点	pH	T /℃	DO /mg·L ⁻¹	DIC /mg·L ⁻¹	DOC /mg·L ⁻¹	POC /mg·L ⁻¹	C/N	δ ¹³ C _{POC} /‰
2016-07	L1	7.41	27.55	7.2	30.5	1.14	0.24	9.34	-24.55
	L2	7.8	29	8.08	36.6	1.74	0.25	8.62	-25.22
	L3	8.5	33.61	10.22	79.3	2.60	0.21	9.53	-24.56
	L4	8.33	29.7	9.25	48.8	2.06	0.27	10.35	-24.90
	L5	8.7	33.9	6.07	67.1	2.68	0.39	8.83	-23.96
	L6	7.59	30.73	7.21	67.1	2.91	0.19	10.94	-25.05
	L7	7.54	32.11	14.07	183	3.82	0.39	9.05	-26.78
	L8	8.09	29.79	9.5	122	2.70	0.26	9.02	-24.40
	L9	9	32.76	12.47	67.1	2.80	0.37	8.80	-24.46
	L10	8.14	31.2	8.34	85.4	1.76	0.26	9.37	-25.24
	L11	7.88	31.54	10.41	164.7	3.23	0.22	8.57	-25.58
	L12	7.48	30.78	7.71	42.7	1.96	0.39	8.91	-25.68
	L13	7.83	30.93	12.14	134.2	3.71	0.80	9.96	-23.43
2016-08	L1	8.12	25.41	7.93	24.4	1.52	0.26	10.16	-24.14
	L2	7.8	27.54	7.68	42.7	1.85	0.40	11.18	-25.43
	L3	7.71	27.75	8.75	73.2	3.29	0.34	11.93	-23.62
	L4	7.81	28.25	8.73	54.9	3.01	0.26	10.46	-24.42
	L5	7.24	25.62	8.67	85.4	4.07	0.39	10.30	-23.83
	L6	7.33	26.37	6.06	79.3	3.84	0.57	10.82	-24.76
	L7	7.55	27.85	9.28	164.7	5.51	0.51	10.90	-23.63
	L8	8.19	24.21	8.79	128.1	2.18	0.29	12.33	-23.85
	L9	9	27.76	6.63	67.1	3.34	0.38	10.89	-23.33
	L10	8.79	28.09	8.82	85.4	3.27	0.27	10.38	-24.35
	L11	8.16	26.54	7.89	176.9	3.04	0.32	12.83	-24.62
	L12	7.86	26.31	8.59	36.6	2.43	0.28	11.56	-25.09
	L13	8.21	27.4	9	152.5	3.37	0.29	11.04	-24.50
2016-09	L1	8.36	24.24	8.93	30.5	1.45	0.37	12.78	-24.22
	L2	7.5	24.57	7.68	48.8	2.02	0.27	9.55	-25.83
	L3	7.62	24.79	8.75	79.3	3.36	0.32	10.20	-24.58
	L4	7.38	25.66	8.73	54.9	2.41	0.19	10.05	-24.57
	L5	8.53	26.32	12.5	54.9	5.66	0.48	8.88	-23.78
	L6	7.84	25.94	2.98	109.8	3.92	0.30	9.58	-24.12
	L7	8.76	25.8	14.18	164.7	5.63	0.67	10.93	-23.87
	L8	8.3	25.5	7.52	97.6	4.51	0.29	9.64	-24.21
	L9	8.43	25.4	7.21	103.7	2.97	0.23	13.41	-24.44
	L10	7.7	27	7.24	152.5	4.24	0.22	11.07	-24.99
	L11	8.36	27.05	7.97	164.7	3.78	0.20	12.77	-25.14
	L12	7.84	27.85	7.85	61	3.70	0.24	9.85	-24.90
	L13	8.28	27.28	12.74	152.5	5.21	0.31	10.63	-23.74
平均值		8.02	27.95	8.81	91.66	3.15	0.33	10.40	-24.56

的下游或河口区,水流较慢,营养物质丰富,有利于河流浮游生物的生长,因而下游较上游有较高的水生生物初级生产力^[22]。

漓江流域 DOC 浓度与 DIC 质量浓度存在正相关关系(图 4),说明 DOC 来源除了外源,还存在 DIC 向 DOC 的转化;DOC 浓度与 DO 存在正相关关系(图 4),说明 DOC 和 DO 有共同的来源(水生生物光合作用)。综上,说明漓江岩溶地表水生系统中水生植物的光合作用可以利用 DIC 产生 DOC,其过

程表示如下:

$$\begin{aligned} &\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- + 4.7\text{CO}_2 + \text{NO}_3^- + \text{H}^+ \\ &+ 3.4\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CaCO}_3 \downarrow + \text{C}_{5.7}\text{H}_{9.8}\text{O}_{2.3}\text{N} \\ &+ 8.25\text{O}_2 \uparrow \end{aligned} \tag{2}$$

漓江水体 POC 浓度与 DO 呈正相关关系(图 5),说明 POC 来源除了外源,还可能来源于水生生物的初级生产力;POC 浓度与 DOC 存在正相关关系(图 5),说明漓江岩溶地表水生系统可能存在 DOC 与 POC 之间的转化。

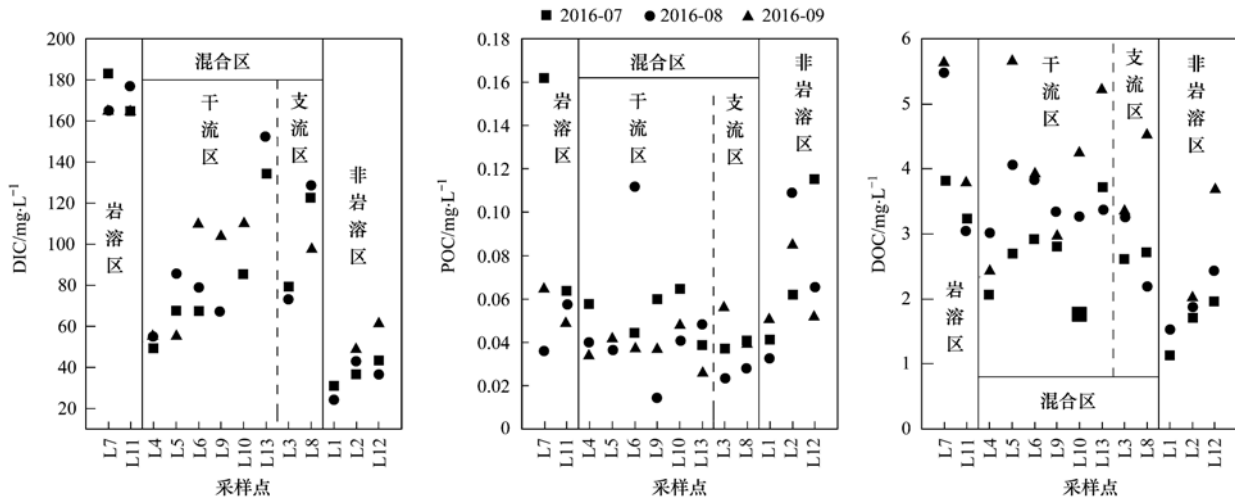
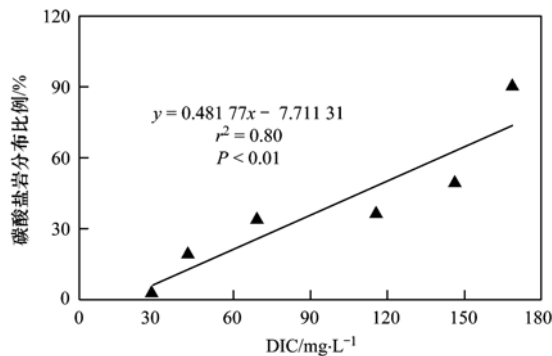


图2 漓江流域 DIC、DOC、POC 浓度变化特征

Fig. 2 Variations in content of DIC, DOC, and POC in the Lijiang basin



碳酸盐岩分布比例数据来源于文献[19]

图3 DIC 与碳酸盐岩分布比例相关关系

Fig. 3 Correlation between DIC and distribution proportion of carbonate rocks

2.2 模型 1: $^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 计算 POC 来源

漓江流域 $^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 值介于 -26.78‰ ~ -23.33‰ , 平均为 -24.56‰ , 上下游差异不明显. 河流输送的颗粒有机碳可以看作水生生物的生物量 (内源碳)

与外源土壤颗粒有机碳的端元混合. 考虑内源、外源端元组分的 $^{13}\text{C}_{\text{POC}}$, 可以定量估算河水 POC 中内源碳与外源碳的比例, 其同位素质量平衡方程如下:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}} = f_{\text{au/POC}} \cdot \delta_{\text{au}} + f_{\text{al/POC}} \cdot \delta_{\text{al}} \quad (3)$$

$$f_{\text{au/POC}} + f_{\text{al/POC}} = 1 \quad (4)$$

式中, $^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 为样品的碳同位素值; δ_{au} 、 δ_{al} 分别为内源碳与外源碳端元组分的碳同位素值; $f_{\text{au/POC}}$ 、 $f_{\text{al/POC}}$ 分别表示 POC 中内源碳与外源碳所占的比例.

两个端元的确定如下: 其中 δ_{al} 可以参照 Sun 等^[18] 关于西江 2005 年 $^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 的数据, 6 月西江发生罕见洪水, 期间 $^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 介于 -23.8‰ ~ -22.2‰ , 平均为 -23.0‰ , 河流初级生产对 POC 的贡献可以忽略不计, POC 几乎全部来自于陆源侵蚀, 此时的 $^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 可以作为 δ_{al} 的典型值, 为 -23.0‰ ; δ_{au} 则选择 Sun 在西江下游水生生物量的 ^{13}C 取值, 为 -32‰ .

结合 POC 浓度值, 可计算出漓江流域颗粒有机

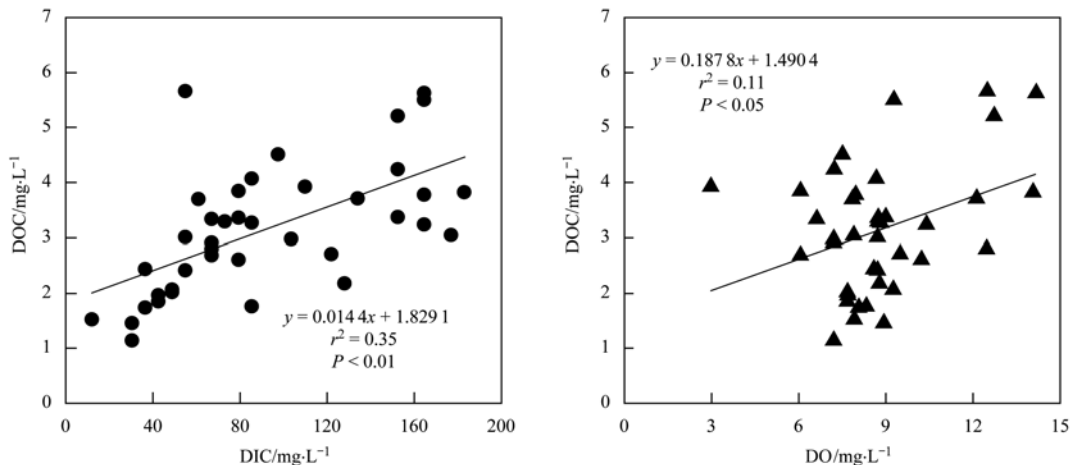


图4 DOC 与 DIC 及 DOC 与 DO 的相关关系

Fig. 4 Correlation between DOC and DIC, DOC, and DO

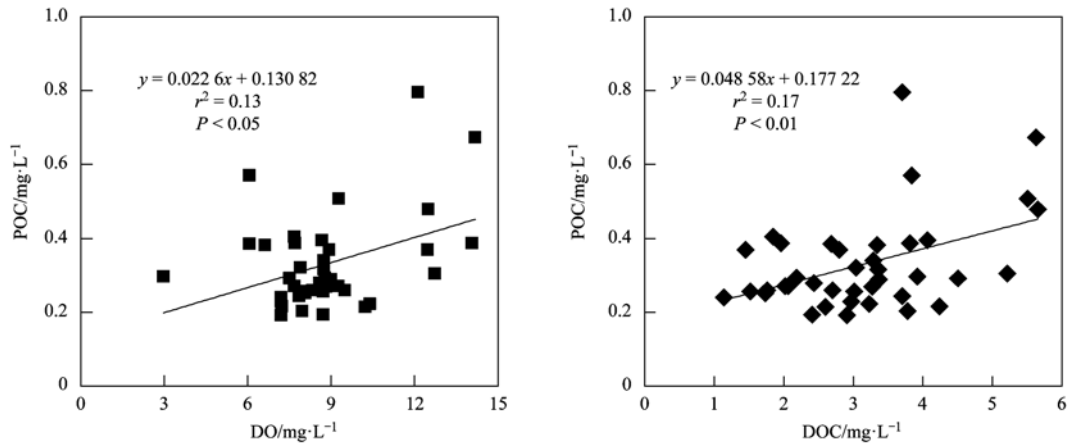


图5 POC与DO、POC与DOC的相关关系
Fig. 5 Correlation between POC and DO, POC, and DOC

碳中内源有机碳浓度,方程如下:

$$POC_{au} = POC \cdot f_{au/POC} \tag{5}$$

式中,POC 为样品的 POC 浓度值; $f_{au/POC}$ 为 POC 中内源碳所占比例; POC_{au} 为 POC 中内源有机碳的浓度.

计算结果表明水生生物量对漓江流域 POC 贡献率范围为 3.69% ~ 41.94%, 平均为 17.31%, 低于桂江水体水生生物量对 POC 的贡献 7 月平均值 (25.1%)^[2]; POC 中内源有机碳浓度 (POC_{au}) 介于 0.01 ~ 0.16 $mg \cdot L^{-1}$, 平均为 0.05 $mg \cdot L^{-1}$ (图 6、图 7). 总体而言,漓江流域 POC 以外源有机碳为主, 上下游差异不大. 即漓江水体中 83% 的 POC 来源于陆生生物, 由水生生物转化过来的 POC 占的比例为 17%.

2.3 模型 2: C/N 计算 TOC 来源

本研究测得漓江流域 C/N 值介于 8.57 ~ 13.41

之间,平均为 10.40. 已有研究表明外源有机碳 C/N 值大于 15^[23]; 根据典型藻类光合作用形成产物为 $C_{5.7}H_{9.8}O_{2.3}N$, 其 C/N 应为 6 左右, 真菌 ($C_{10}H_{17}O_6N$) 的 C/N 为 10, 细菌 ($C_5H_7O_2N$) 的 C/N 为 5, 因此,内源有机质的 C/N 介于 5 ~ 10 之间. 以 C/N 值 6.6 为内源端元^[24, 25], 20.69 为外源端元^[26], 可以利用端元混合模型计算内源有机碳占总有机碳的比例, 方程如下:

$$C/N = f_{au} \cdot f_B + f_{al} \cdot (1 - f_B) \tag{6}$$

式中 C/N 为样品的 C/N 值; f_{au} 为 C/N 值的内源端元, 取 6.6; f_{al} 为 C/N 值的外源端元, 取 20.69; f_B 为内源有机碳在总有机碳中的比例.

结合漓江流域 TOC (POC + DOC) 浓度值, 可计算出总有机碳中内源碳的浓度 (TOC_{au}), 方程如下:

$$TOC_{au} = TOC \cdot f_B \tag{7}$$

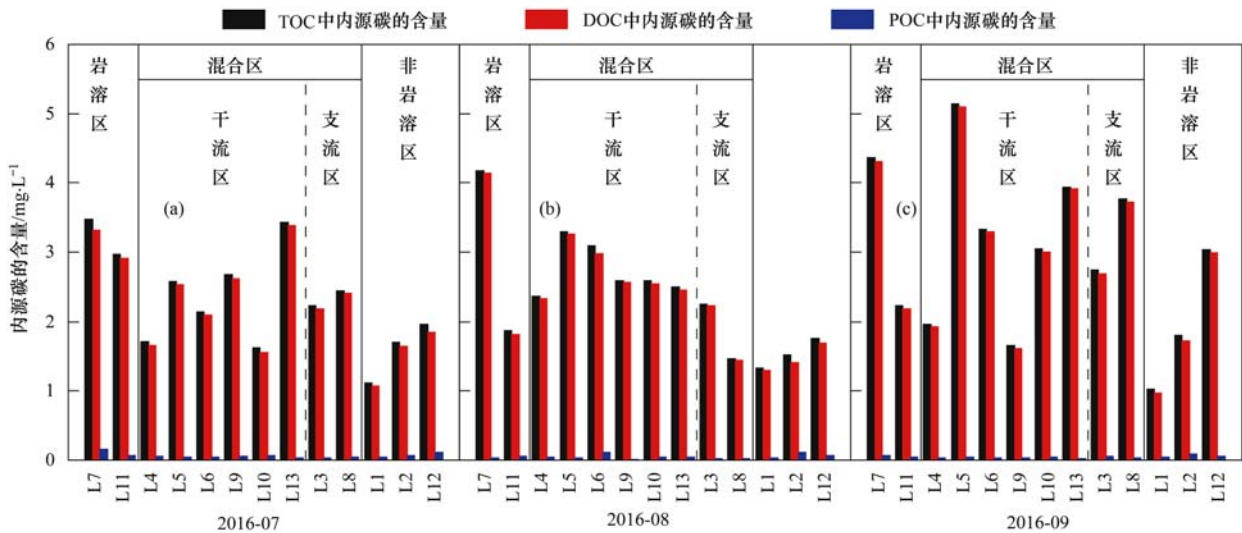


图6 漓江流域 TOC、DOC、POC 中内源碳的含量
Fig. 6 Content of autochthonous organic carbon in the TOC, DOC, and POC of the Lijiang basin

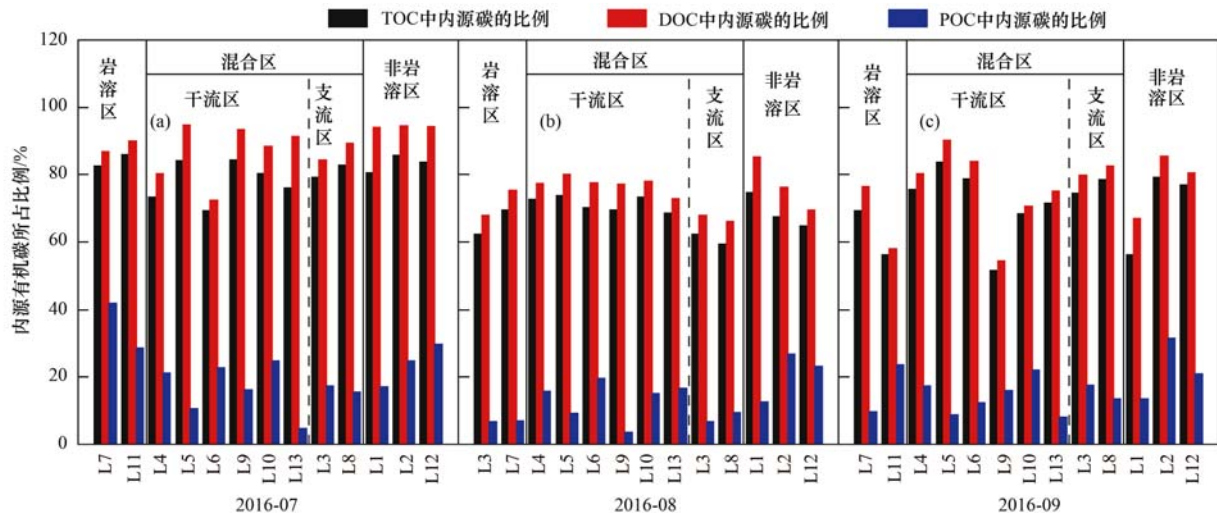


图7 漓江流域 TOC、DOC、POC 中内源碳的比例

Fig. 7 Proportion of allochthonous organic carbon in the TOC, DOC, and POC of the Lijiang basin

式中, TOC 为样品的总有机碳含量值; f_B 为内源有机碳在总有机碳中的比例; TOC_{au} 为总有机碳中内源碳的浓度。

计算表明内源有机碳占总有机碳的比例(f_B)介于 51.68% ~ 85.99%, 平均为 73.07%; 总有机碳中内源碳的含量介于 $0.97 \sim 5.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均为 $2.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图 6、图 7)。即漓江水体中 27% 的 TOC 来源于陆源, 73% 的 TOC 来源于水生植物光合作用产物。

2.4 DOC、TOC、POC 内外源比例及含量分析

结合总有机碳中内源碳的浓度、颗粒有机碳中内源碳的浓度、溶解有机碳浓度, 可以计算出 DOC 中内源碳的浓度 (DOC_{au}) 及 DOC 中内源碳所占比例 ($f_{au/DOC}$)。计算公式如下:

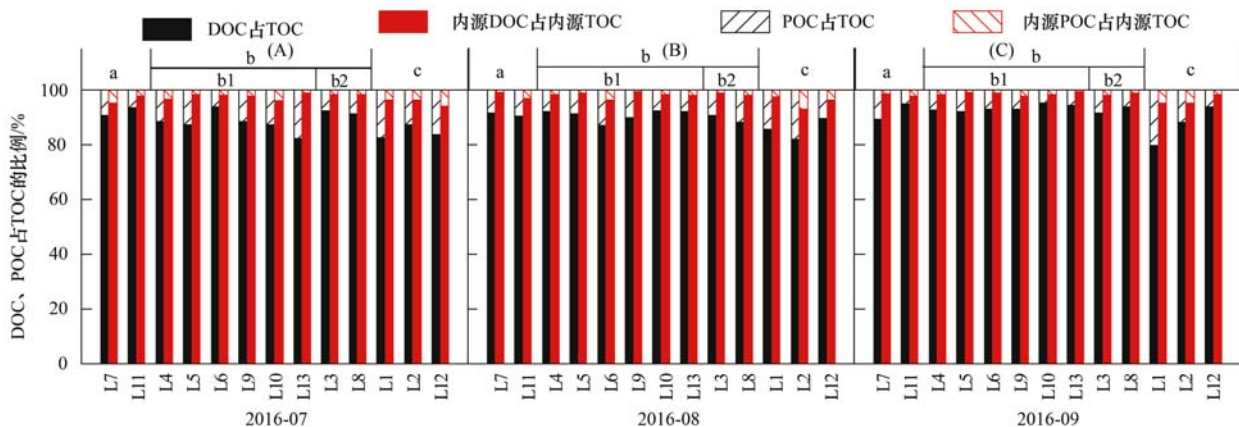
$$DOC_{au} = TOC_{au} - POC_{au} \quad (8)$$

$$f_{au/DOC} = DOC_{au}/DOC \quad (9)$$

式中, DOC_{au} 为 DOC 中内源碳的浓度; TOC_{au} 为总有机碳中内源碳的浓度; POC_{au} 为 POC 中内源碳的浓度; DOC 为样品的溶解有机碳浓度; $f_{au/DOC}$ 为 DOC 中内源碳所占比例。

计算结果表明漓江水体 DOC 中内源碳所占比例 ($f_{au/DOC}$) 介于 54.43% ~ 94.69%, 平均为 79.51%; DOC 中内源碳的浓度介于 $0.97 \sim 5.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均为 $2.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。即漓江水体中 20% 的 DOC 是地表径流的侵蚀冲刷而进入河流的产物, 80% 的 DOC 来源于水生生物的初级生产力。

漓江水体内源 DOC 占内源 TOC 的比例介于 92.83% ~ 99.46%, 平均为 97.58%, 空间分布无明显差异; DOC 占 TOC 的比例平均为 89.83% (DOC 是构成有机碳的主体), 空间分布表现为岩溶区、混



(A) 2016-07, (B) 2016-08, (C) 2016-09

a 表示岩溶区, b 表示岩溶区与非岩溶区的混合区 (b1 表示干流区, b2 表示支流区), c 表示非岩溶区

图8 DOC、POC 占 TOC 比例

Fig. 8 Proportion of DOC and POC in the TOC

合区 > 非岩溶区 (图 8)。DOC 浓度空间分布特征为: 岩溶区 > 混合区 > 非岩溶区, POC 浓度空间分布差异不大 (图 2)。内源 TOC、DOC 浓度空间分布特征为: 岩溶区 > 混合区 > 非岩溶区, 内源 POC 浓度空间分布差异不大 (图 6), 可能与岩溶区水生植物丰茂、碳酸酐酶 (carbonic anhydrase, CA) 活性较强有关 (CA 活性与 HCO_3^- 浓度呈正相关)^[27]; 漓江水体 TOC、DOC、POC 中内源碳的比例空间分布差异不大 (图 7); TOC 来源以内源碳为主 (内源碳的比例为 73%), 而 POC 主要来源于陆生生物 (内源碳的比例为 17%), DOC 主要来源于水生生物的初级生产力 (内源碳的比例为 80%)。

综上所述漓江流域 TOC、DOC 以内源碳为主, POC 中水生生物量也占一定比例。

内源有机碳中有多少比例是水生生物利用 HCO_3^- 生成的、内源有机碳的稳定性及 DOC 与 POC 之间的转化本文都未做研究, 以后可以展开这方面的研究。

3 结论

(1) 漓江流域 DIC 浓度空间分布特征为: 岩溶区 (良丰河、遇龙河) > 岩溶区与非岩溶区的混合区 (灵川、大面圩、桂林水文站、父子岩、潮田河水文站、省里、杨堤、阳朔水文站) > 非岩溶区 (华江、峡背、遇龙河支流); 混合区干流 DIC 含量从上游到下游递增, 主要受控于流域碳酸盐岩的空间分布比例, DIC 质量浓度与碳酸盐岩的空间分布比例呈显著正相关关系 ($R^2 = 0.80, P < 0.01$)。

(2) 漓江水体 DOC 浓度与 DIC 质量浓度、DOC 浓度与 DO 均存在正相关关系, 说明岩溶地表水生系统中水生植物的光合作用可以利用 DIC 而形成 DOC; POC 浓度与 DO 呈正相关关系, 说明 POC 来源除了外源, 还可能来源于水生生物的初级生产力; POC 浓度与 DOC 存在正相关关系, 岩溶地表水生系统存在 DOC 与 POC 转化。

(3) POC 浓度、POC 中内源碳的浓度及 POC 中内源碳的比例空间分布差异不大, POC 来源以外源碳为主, POC 中内源有机碳浓度介于 $0.01 \sim 0.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均为 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 水生生物量对漓江流域 POC 贡献介于 $3.69\% \sim 41.94\%$, 平均为 17.31% , 即 83% 的 POC 来源于陆生生物, 由水生生物转化过来的 POC 占的比例为 17%。

(4) DOC 是构成漓江水体 TOC 的主体, TOC 来源以内源有机碳为主, 内源碳的浓度空间分布特征

为: 岩溶区 > 混合区 > 非岩溶区, 可能与岩溶区水生植物丰茂、碳酸酐酶活性较强有关, TOC 中内源碳的浓度介于 $1.02 \sim 5.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均为 $2.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; TOC 中内源碳的比例空间分布差异不大, 介于 $51.68\% \sim 85.99\%$, 平均为 73.07% , 即 27% 的 TOC 来源于陆源, 73% 的 TOC 来源于水生植物光合作用产物。

(5) DOC 浓度、内源 DOC 浓度空间分布均为岩溶区 > 混合区 > 非岩溶区, DOC 主要来源于水生生物的初级生产力, DOC 中内源碳的浓度介于 $0.97 \sim 5.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均为 $2.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; DOC 中内源碳的比例空间分布差异不大, DOC 中内源碳所占比例介于 $54.43\% \sim 94.69\%$, 平均为 79.51% , 20% 的 DOC 是地表径流的侵蚀冲刷而进入河流的产物, 80% 的 DOC 来源于水生生物的初级生产力。

参考文献:

- [1] Alvarez-Cobelas M, Angeler D G, Sánchez-Carrillo S, *et al.* A worldwide view of organic carbon export from catchments [J]. *Biogeochemistry*, 2012, **107**(1-3): 275-293.
- [2] 唐文魁, 陶贞, 高全洲, 等. 桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(6): 2099-2107.
- [3] Tang W K, Tao Z, Gao Q Z, *et al.* Biogeochemical processes of the major ions and dissolved inorganic carbon in the Guijiang river [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(6): 2099-2107.
- [4] Spitzy A, Ittekkot V. Dissolved and particulate organic matter in rivers [A]. In: Mantoura R F C, Martin J M, Wollast R (Eds.). *Ocean Margin Processes in Global Change* [M]. Chichester: John Wiley, 1991. 5-17.
- [5] Meybeck M. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers [J]. *American Journal of Science*, 1982, **282**(4): 401-450.
- [6] 焦念志. 海洋固碳与储碳——并论微型生物在其中的重要作用 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, **42**(10): 1473-1486.
- [7] Jiao N Z. Carbon fixation and sequestration in the ocean, with special reference to the microbial carbon pump [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2012, **42**(10): 1473-1486.
- [8] Curl R L. Carbon shifted but not sequestered [J]. *Science*, 2012, **335**(6069): 655.
- [9] Berner R A, Lasaga A C, Garrels R M. The carbonate-silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon dioxide over the past 100 million years [J]. *American Journal of Science*, 1983, **283**(7): 641-683.
- [10] Zhang C, Wang J L, Pu J B, *et al.* Bicarbonate daily variations in a karst river: the carbon sink effect of subaquatic vegetation photosynthesis [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, **86**(4): 973-979.
- [11] Jiang Y J, Hu Y J, Schirmer M. Biogeochemical controls on daily cycling of hydrochemistry and $\delta^{13}\text{C}$ of dissolved inorganic carbon in a karst spring-fed pool [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, **478**: 157-168.
- [12] Tobias C, Böhlke J K. Biological and geochemical controls on

- diel dissolved inorganic carbon cycling in a low-order agricultural stream: implications for reach scales and beyond[J]. *Chemical Geology*, 2011, **283**(1-2): 18-30.
- [11] de Montety V, Martin J B, Cohen M J, *et al.* Influence of diel biogeochemical cycles on carbonate equilibrium in a karst river [J]. *Chemical Geology*, 2011, **283**(1-2): 31-43.
- [12] 刘再华, 李强, 孙海龙, 等. 云南白水台钙华水池中水化学日变化及其生物控制的发现[J]. *水文地质工程地质*, 2005, **32**(6): 10-15.
- Liu Z H, Li Q, Sun H L, *et al.* Diurnal variations in hydrochemistry in a travertine-depositing stream at Baishuitai, Yunnan, SW China: observations and explanations [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2005, **32**(6): 10-15.
- [13] Liu Z H, Dreybrodt W, Wang H J. A new direction in effective accounting for the atmospheric CO₂ budget: considering the combined action of carbonate dissolution, the global water cycle and photosynthetic uptake of DIC by aquatic organisms [J]. *Earth-Science Reviews*, 2010, **99**(3-4): 162-172.
- [14] 焦念志, 张传伦, 李超, 等. 海洋微生物碳泵储碳机制及气候效应[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, **43**(1): 1-18.
- Jiao N Z, Zhang C L, Li C, *et al.* Controlling mechanisms and climate effects of microbial carbon pump in the ocean [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2013, **43**(1): 1-18.
- [15] Bauer J E, Williams P M, Druffel E R M. ¹⁴C activity of dissolved organic carbon fractions in the north-central Pacific and Sargasso Sea[J]. *Nature*, 1992, **357**(6380): 667-670.
- [16] Waterson E J, Canuel E A. Sources of sedimentary organic matter in the Mississippi River and adjacent Gulf of Mexico as revealed by lipid biomarker and $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ analyses[J]. *Organic Geochemistry*, 2008, **39**(4): 422-439.
- [17] 陶贞, 高全洲, 姚冠荣, 等. 增江流域河流颗粒有机碳的来源、含量变化及输出通量[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(5): 789-795.
- Tao Z, Gao Q Z, Yao G R, *et al.* The sources, seasonal variation and transported fluxes of the riverine particulate organic carbon of the Zengjiang River, Southern China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, **24**(5): 789-795.
- [18] Sun H G, Han J T, Zhang S R, *et al.* Transformation of dissolved inorganic carbon (DIC) into particulate organic carbon (POC) in the lower Xijiang River, SE China: an isotopic approach[J]. *Biogeosciences Discussions*, 2011, **8**(5): 9471-9501.
- [19] 原雅琼. 水生光合生物对漓江流域水化学和岩溶碳汇的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2016. 1-69.
- Yuan Y Q. Impacts of aquatic organism on hydrochemical characteristics and karst carbon sink in Lijiang basin [D]. Chongqing: Southwest University, 2016. 1-69.
- [20] 韩耀全, 周解, 吴祥庆. 漓江的自然地理与水质调查[J]. *广西水产科技*, 2007, (2): 8-16.
- [21] 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.
- [22] 张永领. 河流有机碳循环研究综述[J]. *河南理工大学学报 (自然科学版)*, 2012, **31**(3): 344-351.
- Zhang Y L. The review of the research of the riverine organic carbon cycle [J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2012, **31**(3): 344-351.
- [23] Kendall C, Silva S R, Kelly V J. Carbon and nitrogen isotopic compositions of particulate organic matter in four large river systems across the United States [J]. *Hydrological Processes*, 2001, **15**(7): 1301-1346.
- [24] Redfield A C. The biological control of chemical factors in the environment[J]. *American Scientist*, 1958, **46**(3): 230A, 205-221.
- [25] LaZerte B D. Stable carbon isotope ratios: implications for the source of sediment carbon and for phytoplankton carbon assimilation in Lake Memphremagog Quebec [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1983, **40**(10): 1658-1666.
- [26] 邢长平. 华南亚热带森林土壤¹⁴C年龄及¹⁴C示踪研究[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 1998. 1-57.
- Xing C P. Studies on ¹⁴C age and ¹⁴C tracing for subtropical forest soils in South China [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, 1998. 1-57.
- [27] 申泰铭, 李为, 张强, 等. 流域不同地质生态环境中水体碳酸酐酶活性特征——以桂江流域为例[J]. *中国岩溶*, 2012, **31**(4): 409-414.
- Shen T M, Li W, Zhang Q, *et al.* Carbonic anhydrase activity of the water-body in different eco-environments of river basins: a case study in the Guijiang river basin [J]. *Carsologica Sinica*, 2012, **31**(4): 409-414.

CONTENTS

Evaluation and Development of a Weighing Chamber by Using Saturated MgCl_2 Solution	LI Xiao-xiao, ZHANG Qiang, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (3095)
Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, MA Xian, <i>et al.</i> (3102)
Pollution Characteristics and Source Identification of PAHs in Atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ in Changzhou City	GU Ai-jun, LIU Jia-shu, LUO Shi-peng, <i>et al.</i> (3110)
Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lanzhou Valley, Northwest China	JU Yuan-li, LIU Pan-liang, YU Zhou-suo, <i>et al.</i> (3120)
Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China	WANG Shi-hao, ZHANG Kai, CHAI Fa-he, <i>et al.</i> (3130)
Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck	XU Min, HE Wan-qing, NIE Lei, <i>et al.</i> (3139)
Exhaust Emission Characteristics of Typical Alkanes from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on a Portable Emission Measurement System	SHI Chun-zhen, HAO Xue-wei, SHEN Xian-bao, <i>et al.</i> (3146)
PM_{10} Concentration Forecasting Model Based on Wavelet-SVM	WANG Ping, ZHANG Hong, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (3153)
Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port	HUANG Xue-liang, ZHANG Zhou, YANG Wei-qiang, <i>et al.</i> (3162)
Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols	LI Hong-tao, Qi Jian-hua, DONG Li-jie, <i>et al.</i> (3169)
Odor Emission Characteristics and Pollution Evaluation from Typical Household Rubbish Disposal Facilities	LU Hui-jie (3178)
Perfluorinated Compounds in Snow from Downtown Hangzhou, China	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (3185)
Fluorescence Characterization of Fractionated Colloids in Wastewaters Received by Huangpu River	NIE Ming-hua, YAN Cai-xia, YANG Yi, <i>et al.</i> (3192)
Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (3200)
Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer	WU Fei-hong, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (3209)
Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas; A Case Study of Ningbo	XU Mei-juan, TONG Gui-hua, SUN Dan, <i>et al.</i> (3218)
Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater; A Case Study of Liujiang Basin	ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (3225)
Biotic and Abiotic Uptake of Phosphorus in Benthic Sediments of Suburban Streams Under Intense Human Disturbance Scenario	LI Ru-zhong, YE Zhou, GAO Su-di, <i>et al.</i> (3235)
Sedimentary Phosphorus Speciation in the Coastal Hypoxic Area of Changjiang Estuary and Its Environmental Significance	LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, <i>et al.</i> (3243)
Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3254)
Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China; A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed	E Xin-hui, WANG Ya-feng, GAO Yang, <i>et al.</i> (3264)
New Bromated Phenolic Disinfection Byproducts: Mechanism of Their Decomposition During Chlorination	LI Huan, LI Zheng-kui, LI Ai-min, <i>et al.</i> (3273)
Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process	ZHANG Da-wei, XU Hui, WANG Xi, <i>et al.</i> (3281)
Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River	XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, <i>et al.</i> (3290)
Spatiotemporal Variations of Chlorophyll <i>a</i> and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir	SONG Yun-long, ZHANG Jin-song, Guo Xiao-ya, <i>et al.</i> (3302)
Rhizosphere Microbial Diversity in Different Wetland Microcosms	WANG Lin, LI Bing, YU Jia-hui, <i>et al.</i> (3312)
Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake	ZHANG Ya-jie, LI Ke, ZHU Hao-ran, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Diversity in a Fluidized-Sand Biofilter Based on High-Throughput Sequencing Technology	ZHANG Hai-geng, SONG Hong-qiao, GU Chuan-chuan, <i>et al.</i> (3330)
Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora	MENG Ting, YANG Hong (3339)
Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource	HAN Song-fang, JIN Wen-biao, TU Ren-jie, <i>et al.</i> (3347)
Purification Effect of Piggery Wastewater with <i>Chlorella pyrenoidosa</i> by Immobilized Biofilm-Attached Culture	WANG Yuan-zhu, CHENG Peng-fei, LIU De-fu, <i>et al.</i> (3354)
Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater	LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3362)
Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin, <i>et al.</i> (3369)
Removal of Nitrogen from Alcohol Wastewater by PN-ANAMMOX	ZHOU Zheng, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (3377)
Biorecovery of Palladium from Simulated Wastewaters and Its Catalytic Property for Methylene Blue	KANG Nai-xin, ZHU Neng-wu, GUO Wen-ying, <i>et al.</i> (3385)
Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space	WANG Li-jun, LI Zhi-hua, HAN Dong, <i>et al.</i> (3393)
Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR	ZHANG Ting, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3399)
Conversion Pathways of Substrates in Sulfate-Reducing Ammonia Oxidation System	WANYAN De-qing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3406)
Effect of Different TOC to NH_4^+ -N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process	WANG Fan, LIU Kai, LIN Xing, <i>et al.</i> (3415)
Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge	TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping, <i>et al.</i> (3422)
Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (3429)
Effect of Extracellular Polymeric Substance (EPS) on the Adsorption of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) onto Activated Sludge	LIU Xin-tong, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3435)
Characteristics of N_2O and NO_x Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes	HU Lei, LIU Yun, ZHU Bo (3442)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field	ZHANG Kai-li, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (3451)
Responses of Soil Ammonia Oxidizers to Simulated Warming and Increased Precipitation in a Temperate Steppe of Inner Mongolia	ZHANG Cui-jing, SHEN Ju-pei, SUN Yi-fei, <i>et al.</i> (3463)
Nitrification Activity and Autotrophic Nitrifiers in Long-term Fertilized Acidic Upland Soils	XU Bai-lu, ZHONG Wen-hui, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i> (3473)
Effects of CaCO_3 Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil	GUO An-ning, DUAN Gui-lan, ZHAO Zhong-qiu, <i>et al.</i> (3483)
Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil	WEI Liang, TANG Zhen-zhu, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3489)
Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors	ZHANG Yan-jun (3497)
Magnetic Properties of Farmland Soils in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Implications	WANG Xin, XIA Dun-sheng, WANG Bo, <i>et al.</i> (3507)
Preparation of Magnetic Biomass Carbon by Thermal Decomposition of Siderite Driven by Wheat Straw and Its Adsorption on Cadmium	ZHANG Ru-yu, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, <i>et al.</i> (3519)
Effects of Traffic-related Air Pollution Exposure on DNA Methylation	WANG Ting, DING Rui, HUANG Dan-ni, <i>et al.</i> (3529)
Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting	YANG Ping-ping, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3536)
Life Cycle Assessment of Traction Lead-acid Batteries for Electric Bikes in China	LIU Wei, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun (3544)