

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析·····	廖晓农, 张小玲, 王迎春, 刘伟东, 杜佳, 赵玲慧 (2031)
阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究·····	苗红妍, 温天雪, 王跃思, 刘子锐, 王丽, 兰中东 (2045)
上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究·····	包良满, 雷前涛, 谈明光, 李晓林, 张桂林, 刘卫, 李燕 (2052)
七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究·····	马娟娟, 李真 (2060)
冬季东海、南黄海中 DMS 和 DMSP 浓度分布及影响因素研究·····	宋以柱, 张洪海, 杨桂朋 (2067)
大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价·····	徐姗姗, 李纯厚, 徐娇娇, 肖雅元, 林琳, 黄小平 (2075)
深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征·····	王鑫璇, 张鸿, 何龙, 沈金灿, 柴之芳, 杨波, 王艳萍 (2085)
表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析·····	孙玉川, 沈立成, 袁道先 (2091)
桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程·····	唐文魁, 陶贞, 高全洲, 毛海若, 姜光辉, 焦树林, 郑雄波, 张乾柱, 马赞文 (2099)
汾河源区不同景观带水文过程研究·····	杨永刚, 李彩梅, 秦作栋, 邹松兵 (2108)
北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征·····	郭高轩, 琚宜文, 翟航, 许亮, 沈媛媛, 纪轶群 (2114)
光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用·····	章艳红, 叶淑君, 吴吉春 (2120)
紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应·····	陈维梁, 高扬, 林勇明, 朱波, 徐亚娟, 于贵瑞, 吴承祯 (2129)
基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究·····	陆宇超, 毕孟飞, 李泽利, 沙健, 王玉秋, 钱丽萍 (2139)
镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价·····	周晓红, 李义敏, 周艺, 卫安平, 周广顺, 肖思思 (2148)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响·····	杨文斌, 李阳, 孙共献 (2156)
湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化·····	武晓飞, 李大鹏 (2164)
不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响·····	王尚, 李大鹏 (2171)
池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究·····	吕元蛟, 李瑞娇, 张念, 赵峰, 谢从新, 张敏 (2178)
再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放·····	王晓慧, 毕春娟, 韩景超 (2185)
低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响·····	赵士波, 孙荣国, 王定勇, 王小文, 张成 (2193)
活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂·····	刘海龙, 张忠民, 赵霞, 焦茹媛 (2201)
准分子灯光照降解水中烷基酚的动力学·····	刘玉海, 叶招莲, 文颖频, 毕承路 (2209)
AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究·····	涂勇, 刘伟京, 张耀辉, 徐军, 唐敏, 陈勇, 白永刚 (2216)
镉(II)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究·····	杨春艳, 陈复彬, 赵慧, 常自强, 章竹君 (2223)
微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究·····	刘春, 年永嘉, 张静, 张明, 张磊, 龚鹏飞, 肖太民, 李星 (2230)
聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究·····	唐丹琦, 王娟, 郑天龙, 刘建国, 汪群慧 (2236)
丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响·····	侍宽, 薛罡, 高品, 吴凡 (2241)
聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化·····	周振, 胡大龙, 乔卫敏, 陈冠翰, 蒋玲燕, 李震, 麦穗海 (2249)
鄱阳湖持久性有机污染物(POPs)长距离传输潜力模拟·····	弓晓峰, 向洪锐, 陈春丽, 周文斌, 王佳佳, 刘春英, 曾艳 (2256)
基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估·····	廖志恒, 孙家仁, 吴兑, 范绍佳, 任明忠, 吕家扬 (2264)
农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策·····	谭冰, 王铁宇, 李奇峰, 张海燕, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (2272)
渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价·····	王莎莎, 高丽荣, 田益玲, 朱帅, 张芹 (2281)
基于荧光传感器 Frex 的特性检测水质环境中生物毒性物质·····	赵巍, 汪钊, 蔡强, 欧文斌, 孟凡国 (2287)
对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放·····	张元春, 梁文艳, 赵远, 李飞贞, 曹敬灿, 胡绍杰 (2294)
基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育·····	赵凤敏, 梅帅, 曹有福, 丁进锋, 徐嘉杰, 李树君 (2300)
酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究·····	刘莹, 王丽华, 郝春博, 李璐, 李思远, 冯传平 (2305)
河蚬(<i>Corbicula fluminea</i>)扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响·····	王雪, 赵大勇, 曾巾, 余多慰, 吴庆龙 (2314)
海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态·····	田琪, 王佳, 范晓蕾, 罗生军, 郭荣波, 邱艳玲 (2322)
DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响·····	吴义诚, 邓欢, 肖勇, 赵峰 (2328)
重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究·····	田江, 彭霞薇, 李霞, 孙雅君, 冯红梅, 江泽平 (2334)
1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性·····	王兆阳, 陈国耀, 姜珂, 许培雅 (2341)
黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响·····	江玲, 杨芸, 徐卫红, 王崇力, 陈蓉, 熊仕娟, 谢文文, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (2349)
黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应·····	李玲, 仇少君, 陈印平, 赵西梅, 刘京涛, 陆兆华 (2358)
宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征·····	蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 黄懿梅 (2365)
长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响·····	张俊, 杨晓洪, 葛峰, 王娜, 焦少俊, 叶波平 (2374)
长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响·····	常同举, 崔孝强, 阮震, 赵秀兰 (2381)
伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价·····	赵新儒, 特拉津·那斯尔, 程永毅, 詹江渝, 杨剑虹 (2392)
江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价·····	张龙辉, 杜永芬, 王丹丹, 高抒, 高文华 (2401)
小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析·····	欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 耿晓君 (2411)
保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究·····	张赛, 王龙昌, 黄召存, 贾会娟, 冉春燕 (2419)
米楮天然林和人工林土壤呼吸的比较研究·····	吴君君, 杨智杰, 翁发进, 刘小飞, 陈朝琪, 林伟盛, 王小红, 陈坦 (2426)
水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响·····	刘晓桦, 张洪, 李永峰 (2433)
《环境科学》征订启事 (2208)	
《环境科学》征稿简则 (2400)	
信息 (2084, 2200, 2229, 2391)	

桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程

唐文魁¹, 陶贞¹, 高全洲^{1,2*}, 毛海若¹, 姜光辉³, 焦树林⁴, 郑雄波¹, 张乾柱¹, 马赞文¹

(1. 中山大学地理科学与规划学院, 广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广州 510275; 2. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广州 510275; 3. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004; 4. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001)

摘要: 河流水体的化学组成记录了流域内各种自然过程与人类活动的信息. 对西江一级支流桂江化学径流的分析结果表明, 桂江水体的离子组成主要受碳酸盐岩化学风化过程的控制, CO_2 是这一过程的主要侵蚀介质; H_2SO_4 对碳酸盐岩的风化影响桂江河水的化学组成. 大气沉降、人类活动、碳酸盐岩和硅酸盐岩化学风化对桂江水体贡献的溶解物质分别占总溶解物质的 2.7%、6.3%、72.8% 和 18.2%. 河流溶解无机碳(DIC)的稳定同位素组成($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$)揭示桂江河水中的 DIC 明显被浮游植物的光合作用所利用. 浮游植物初级生产力对桂江颗粒有机碳(POC)的贡献达 22.3%~30.9%, 这表明岩石风化来源的 DIC 经浮游植物的光合作用转化为有机碳, 并在迁移过程中部分沉积水体底部, 进而形成埋藏有机碳.

关键词: 化学径流; 溶解无机碳; 颗粒有机碳; 碳稳定同位素; 桂江

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2099-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.06.009

Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River

TANG Wen-kui¹, TAO Zhen¹, GAO Quan-zhou^{1,2}, MAO Hai-ruo¹, JIANG Guang-hui³, JIAO Shu-lin⁴, ZHENG Xiong-bo¹, ZHANG Qian-zhu¹, MA Zan-wen¹

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory for Urbanization and Geo-simulation, School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Guangdong Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resource Exploration, Guangzhou 510275, China; 3. Key Laboratory of Karst Dynamics, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China; 4. School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: Within the drainage basin, information about natural processes and human activities can be recorded in the chemical composition of riverine water. The analysis of the Guijiang River, the first level tributary of the Xijiang River, demonstrated that the chemical composition of water in the Guijiang River was mainly influenced by the chemical weathering of carbonate rocks within the drainage basin, in which CO_2 was the main erosion medium, and that the weathering of carbonate rock by H_2SO_4 had a remarkable impact on the water chemical composition in the Guijiang River. Precipitation, human activities, the weathering of carbonate rocks and silicate rocks accounted for 2.7%, 6.3%, 72.8% and 18.2% of the total dissolved load, respectively. The stable isotopic compositions of dissolved inorganic carbon ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) indicated that DIC in the Guijiang River had been assimilated by the phytoplankton in photosynthesis. The primary production of phytoplankton contributed to 22.3%-30.9% of particulate organic carbon (POC) in the Guijiang River, which implies that phytoplankton can transform DIC into POC by photosynthesis, and parts of POC will sink into the bottom of the river in transit, which leads into the formation of burial organic carbon.

Key words: chemical runoffs; dissolved inorganic carbon; particulate inorganic carbon; carbon stable isotope; the Guijiang River

全球气候变化和碳循环密切相关. 不同碳库间碳的迁移转化机制一直是全球变化研究的核心问题^[1]. 河流不仅对流域地貌的塑造起着关键作用, 还是陆地地表过程产出物质向海洋输送的重要通道, 是全球碳循环中的关键环节^[2~4]. 河水溶解组分与流域岩性、地貌、气候、水文、土壤、植被覆盖和人类活动等要素密切相关. 通过分析河流的水化学组成, 可以获取关于流域地貌过程、水文过程、生态过程和人类活动的信息.

根据组成形态, 可以把河流碳划分为溶解有机碳(DOC)、溶解无机碳(DIC)、颗粒有机碳(POC)

和颗粒无机碳(PIC), 而且这 4 种形式的碳在水体内部可以相互转换: 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; 如果河水相对矿物过饱和, DIC 可能形成矿物沉淀(PIC). 通常情况下, 在碳的有机循环中, “轻”碳较“重”碳易于被摄入有机质中; 而在碳的无机循环

收稿日期: 2013-10-27; 修订日期: 2013-12-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41340019, 41071054); 中国地质调查局地调项目(岩[2011]地调 01-01-23)

作者简介: 唐文魁(1985~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为河流碳循环与全球变化, E-mail: tangweikui@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: eesgqz@mail.sysu.edu.cn

中,“重”碳更易于富集在无机盐中.因此,碳循环和碳同位素分馏决定了自然界物质中碳同位素组成的特征.随着碳同位素示踪技术在流域研究中的广泛应用,许多学者利用碳稳定同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)数据研究河流水体中侵蚀物质的来源及演变^[5~7]、水体污染物来源^[8,9]和人类活动对河流输出物性质的影响^[10~12]等问题.桂江是西江主要支流之一,上游是典型的碳酸盐岩分布区,下游以硅酸盐岩为主,属典型山区河流.本研究通过对桂江化学径流的采样分析,并结合 DIC、POC 及相关碳同位素资料,阐明亚热带季风区中小流域化学径流的组成特征、影响因素以及物质循环机制.

1 材料与方法

1.1 流域概况

桂江系西江的一级支流,发源于广西兴安县境内的猫儿山,由北向南流经灵川、桂林、阳朔、平乐、昭平,于梧州汇入西江.桂江全长 426 km,流域面积 19 288 km²,河道平均纵比降为 0.43‰.桂江流域岩石空间分布特征明显:桂林以南平乐以北的地层为泥盆-石炭系,岩性以碳酸岩(石灰岩和白云岩)为主;平乐以南沉积地层为寒武系,岩性以砂岩、页岩为主.桂江流域(23°28′~25°55′N, 110°23′~111°34′E)属于亚热带季风气候,流域内多年平均降水量在 1 500~2 500 mm 之间^[13],年内降雨集中在 3~8 月,占全年降雨量的 78%^[14].桂江径流的季节变化与降水一致.

1.2 数据来源

2010 年 7 月在桂江桂林至梧州河段采集表层水样 31 个(图 1).现场用 Ultrameter™ Model 6P 型便携式电导率仪测量水温、pH 值和总溶解固体(TDS)含量,测量精度分别达到 0.1℃、0.01、0.1 mg·L⁻¹.实验室内将采集的水样分为 2 份,1 份用来滴定总碱度,1 份经 Whatman GF/F 滤膜(孔径 0.7 μm)过滤,滤液用于测量阴阳离子和溶解 Si 含量.预处理的所有水样放入冰箱(4℃)保存,所有分析测试均在采样后一周内完成.阳离子(K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺)和溶解 Si 含量使用 IRIS(HR)型全谱直读等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES,美国 TJA 公司生产)测定,阴离子(Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻)含量用 ICS-900 型离子色谱仪测定,测试精度均优于 0.5%.总碱度用 Digital Burette III 滴定仪(德国 Brand 公司生产)滴定,滴定剂为 0.02 mol·L⁻¹ HCl,滴定终点 pH=4.5.

使用 CO2SYS 程序^[15]计算水体 HCO₃⁻、DIC 含量以及二氧化碳分压 [$p(\text{CO}_2)$],采用 Millero^[16]给出的 K_1 、 K_2 常数.河水中 DIC 和 POC 的稳定碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$)数据来源于文献^[17](为同步采集样品测定数据).

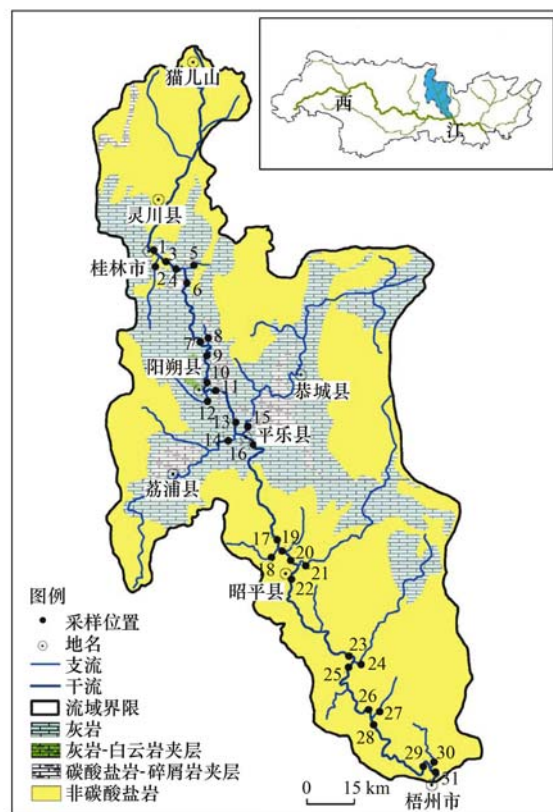


图 1 桂江流域岩性及采样位置分布示意

Fig. 1 Distribution of the lithology and the sampling station in the Guijiang River

2 结果与讨论

2.1 化学径流组成特征

所有测定数据列于表 1.桂江河水 pH 值变化范围为 7.38~8.14,平均为 7.94 ± 0.18 ,表现出中偏弱碱性. TDS 变化范围为 22.8~214.9 mg·L⁻¹,平均值 $(114.9 \pm 36.8) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,低于西江河流 TDS 的平均值 $174 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[18],远高于世界河流 TDS 的平均值 $69 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[19],揭示桂江流域较强烈的化学侵蚀作用.河流水体主要离子组成为 Ca²⁺、Mg²⁺和 HCO₃⁻离子,按所占比重排序阳离子和阴离子分别是 Ca²⁺ > Mg²⁺ > Na⁺ > K⁺ 和 HCO₃⁻ > SO₄²⁻ > Cl⁻ > NO₃⁻. Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺ 分别占总阳离子当量浓度的 77.3%、14.7% 和 6.1%; HCO₃⁻ 占总阴离子当量浓度的 78.1%, SO₄²⁻ 和 Cl⁻ 共占 18.1%.

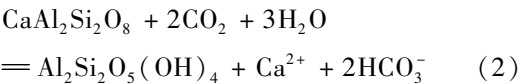
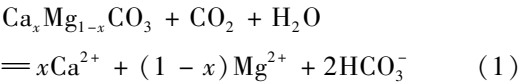
表 1 桂江水体化学组成¹⁾

Table 1 Chemical composition of surface water in the Guijiang River

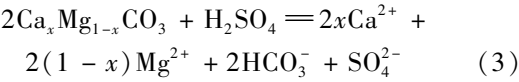
样点 编号	水温/℃	pH	TDS /mg·L ⁻¹	成分/μmol·L ⁻¹										p(CO ₂) /Pa
				Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	溶解 Si	DIC	
1	24.3	7.75	107.8	67.0	658.3	157.8	39.0	1306.8	0.0	103.9	185.0	94.8	1453.2	440
2-支	24.4	7.71	208.8	215.2	1259.9	281.8	67.2	2690.2	86.4	156.2	465.3	97.0	2930.6	694
3	24.4	7.82	116.3	81.0	719.5	164.1	40.4	1411.3	0.0	106.7	206.7	94.6	1536	343
4	24.5	7.95	214.9	108.2	1557.9	69.7	28.2	2999.9	98.4	163.2	182.9	111.2	3124.7	41
5-支	24.5	8.14	133.8	160.7	870.2	54.6	18.9	1745.4	109.1	106.9	83.6	79.0	1790.8	107
6	24.5	8.08	119.7	84.7	770.2	143.7	36.9	1450.1	102.5	110.4	187.7	93.2	1482.5	48
7	24.5	8.04	121.3	89.6	781.1	142.3	35.5	1527.2	100.1	109.5	182.8	91.0	1595.9	198
8-支	24.6	7.98	151.5	259.5	919.6	58.1	20.1	2098.0	91.4	136.4	60.1	94.1	2184.7	223
9	24.6	8.04	122.3	93.0	779.5	136.4	34.0	1554.3	99.6	110.6	178.0	91.2	1617.1	172
10	24.7	8.10	124.3	101.1	796.5	129.2	34.0	1562.8	60.1	110.0	167.1	90.5	1599.9	77
11-支	24.8	8.07	158.7	294.2	929.6	77.7	36.1	2252.6	68.4	100.0	160.1	81.8	2308.2	116
12	24.7	8.12	127.7	122.0	813.0	126.7	34.6	1645.8	70.9	108.3	167.0	89.0	1683.1	68
13	24.8	8.09	125.9	112.3	797.7	121.6	36.0	1603.1	93.4	114.4	177.1	87.6	1648.6	116
14-支	24.9	8.01	104.0	149.9	584.5	97.8	63.0	1298.9	62.8	133.6	161.9	97.0	1358.1	172
15-支	24.8	7.97	132.6	196.4	808.6	72.6	31.0	1811.0	110.3	88.6	113.4	102.3	1861.7	123
16	24.8	7.99	126.9	165.2	775.1	89.0	36.5	1692.8	100.5	101.2	138.0	99.1	1744.9	133
17	24.8	8.03	122.0	142.8	744.7	116.8	34.3	1578.9	91.7	111.1	157.8	67.5	1651.9	202
18-支	24.8	7.99	104.8	132.1	636.3	100.2	28.5	1368.2	73.5	93.7	123.7	66.9	1401.1	66
19	24.7	7.93	117.5	139.9	710.8	112.5	31.8	1528.9	88.0	104.8	144.6	60.4	1590.5	159
20	24.0	7.96	111.5	137.5	681.7	106.8	31.6	1445.4	78.8	99.6	133.9	58.3	1500.4	136
21-支	24.0	8.02	92.40	121.8	542.3	103.9	37.0	1206.1	54.4	80.4	121.4	109.9	1239.2	80
22	24.4	7.94	111.4	134.8	683.1	107.9	30.9	1461.2	80.0	98.0	130.9	59.4	1523.5	158
23	24.7	7.97	96.23	120.8	577.1	97.0	28.7	1266.3	65.5	85.0	112.5	81.8	1322.6	142
24-支	24.9	7.96	83.76	157.8	450.8	83.3	38.2	1118.2	42.1	70.7	114.4	119.4	1178.4	166
25	25.2	7.93	96.01	120.7	574.6	96.4	28.6	1242.7	67.2	84.8	111.3	81.0	1290.9	128
26	25.1	7.93	91.83	122.9	543.5	90.4	27.5	1199.1	63.3	80.1	103.2	89.0	1249.3	118
27-支	25.2	8.13	22.82	62.8	62.1	93.7	19.3	271.9	24.2	29.8	2.4	164.9	320.8	135
28	25.2	7.75	90.05	121.1	536.1	92.7	27.6	1194.3	63.5	80.0	105.6	90.9	1240.7	114
29	26.8	7.48	84.08	111.0	490.2	81.4	26.3	1094.8	64.8	68.2	79.6	103.9	1180.4	141
30-支	25.2	7.76	58.04	97.0	213.3	172.2	66.9	572.8	48.0	67.7	214.8	249.3	788.8	653
31	26.9	7.38	83.50	109.6	483.7	82.5	27.4	1073.6	66.1	68.9	77.6	106.3	1178.3	155

1) 样点编号中“-支”代表汇入的支流样点

岩石风化产物在很大程度上决定了地表径流的水化学性质。一般而言,大气或土壤的 CO₂ 是碳酸盐岩和硅酸盐岩化学风化最常见的侵蚀介质,其化学风化过程可简化为:



但是已有研究表明水体中 HCO₃⁻ 不完全是 CO₂ 参与下岩石化学风化的结果,地质和人类活动来源的 H₂SO₄ 作为侵蚀介质也参与碳酸盐岩的风化^[12,20-23],反应式如下:



显然,这一风化过程并没有吸收大气 CO₂。

图 2 给出了桂江流域不同的岩石风化类型对河水溶解组分的影响。干流水体离子化学组成分布较支流集中,大部分样品的阳离子组成靠近石灰岩与白云岩溶蚀一侧,阴离子组成靠近 CO₂ 风化岩石一侧,表明桂江河水的化学组成主要受流域碳酸盐岩矿物的风化过程的控制,其侵蚀介质多为 CO₂。但是位于下游的支流样品(样品 27 和 30)表现出较强的硅酸盐岩风化信息。

当 CO₂ 风化碳酸盐岩时, [Ca²⁺ + Mg²⁺] / [HCO₃⁻] 的当量比值应为 1 [反应式(1)]; H₂SO₄ 风化碳酸盐岩时, [SO₄²⁻] / [HCO₃⁻] 的当量比值为 1, [Ca²⁺ + Mg²⁺] / [HCO₃⁻] 的当量比值为 2 [反应式(3)]。图 3 中除了下游流经硅酸盐岩的几条支流样品出现偏离外,大多数桂江河水样品 [Ca²⁺ + Mg²⁺] / [HCO₃⁻] 比值大于 1,说明 HCO₃⁻ 离子不能

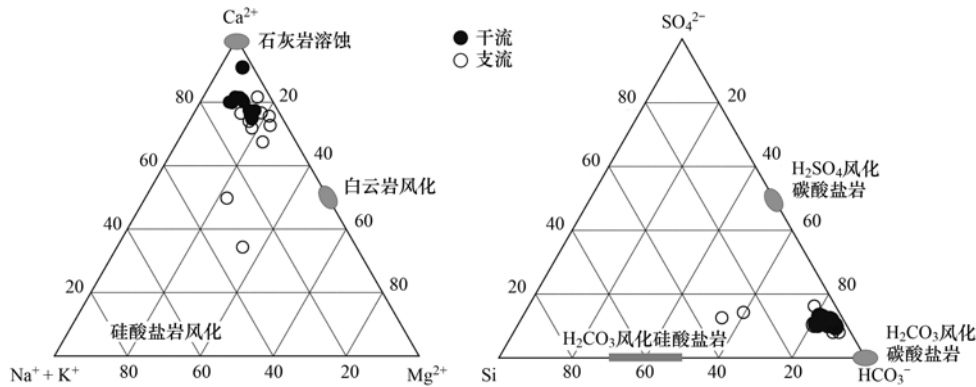
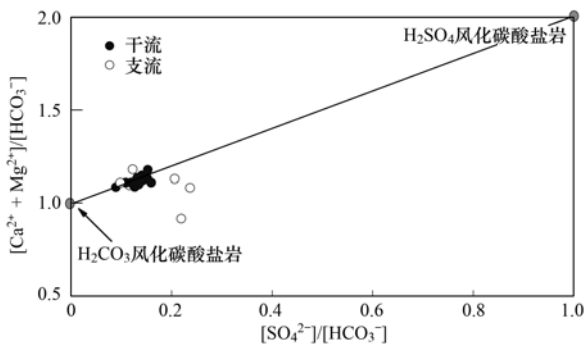


图2 桂江河水主要离子三角图

Fig. 2 Ternary diagrams of water chemical compositions in the Guijiang River

与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 平衡, 需要考虑 SO_4^{2-} 离子^[12]. 样品分布于 CO_2 风化碳酸盐岩和 H_2SO_4 风化碳酸盐岩两个端元组成之间(图3), 表明 H_2SO_4 参与下的碳酸盐岩风化对桂江河水化学组成也有较大影响.

图3 桂江河水 $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/[\text{HCO}_3^-]$ 与 $[\text{SO}_4^{2-}]/[\text{HCO}_3^-]$ 当量比值关系Fig. 3 Equivalent ratios of $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/[\text{HCO}_3^-]$ versus $[\text{SO}_4^{2-}]/[\text{HCO}_3^-]$ in the Guijiang River

2.2 化学径流来源估算

河水中溶质主要来源可分为3类: 岩石化学风化、大气沉降和人类活动输入^[24,25]. 根据质量平衡, 河水溶解物质 $[X]$ 可表示如下:

$$[X]_{\text{riv}} = [X]_{\text{cyc}} + [X]_{\text{eva}} + [X]_{\text{car}} + [X]_{\text{sil}} + [X]_{\text{anth}} \quad (4)$$

式中, 下标 riv 代表河流; cyc 代表循环源; eva 代表蒸发岩源; car 代表碳酸盐岩源; sil 代表硅酸盐岩源; anth 代表人类活动源.

从图1可以看出桂江流域内基本没有蒸发岩出露, 因此蒸发岩源对桂江化学径流的贡献可以忽略. 大气降水对河流离子贡献, 可以通过 Cl^- 离子海盐校正求得. 用氯离子参考值 $(\text{Cl}^-)_{\text{ref}}$ 以反映海盐沉降对径流 Cl^- 的最大输送, 计算公式^[26]为:

$$(\text{Cl}^-)_{\text{ref}} = [P/E] \times (\text{Cl}^-)_{\text{rain}} \quad (5)$$

式中, $(\text{Cl}^-)_{\text{rain}}$ 为大气降水中 Cl^- 的浓度 ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$), P 为流域年均降水量 (mm), E 为河流多年平均径流深 (mm).

桂江流域年均降雨量约为1677 mm, 多年平均径流深为1033 mm^[27], 大气降水中 Cl^- 的平均浓度约为 $23.0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[28], 计算得到 $(\text{Cl}^-)_{\text{ref}}$ 的值为 $37.3 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$. 然后, $(\text{Cl}^-)_{\text{ref}}$ 参照标准海水中其他离子的浓度比值进行海盐校正, 其中 $\text{Cl}^-/\text{Na}^+ = 1.15$, $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+ = 0.02$, $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+ = 0.11$, $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+ = 0.004$ ^[29], 水体中 NO_3^- 和过量的 Cl^- 则归因于人类活动输入.

扣除大气降水和人类活动的影响后, 剩余的离子均与岩石风化过程有关. 其中 Na^+ 和 K^+ 均来自硅酸盐岩风化; 选取 Zhang 等^[30] 根据西江流域纯硅酸盐岩地区样品得出的 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+ = 0.4$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+ = 0.2$, 估算硅酸盐岩风化产生的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , 剩余的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 则认为来自碳酸盐岩风化. 根据反应产物电荷平衡, 可用阳离子总电荷数算出硅酸盐岩风化贡献的 $[\text{HCO}_3^-]_{\text{sil}}$, 剩余的即为碳酸盐岩风化贡献的 $[\text{HCO}_3^-]_{\text{car}}$, 具体计算方法如下^[17,30]:

$$[\text{K}^+]_{\text{riv}} = [\text{K}^+]_{\text{sil}} \quad (6)$$

$$[\text{Na}^+]_{\text{riv}} = [\text{Na}^+]_{\text{cyc}} + [\text{Na}^+]_{\text{sil}} \quad (7)$$

$$[\text{Mg}^{2+}]_{\text{riv}} = [\text{Mg}^{2+}]_{\text{cyc}} + [\text{Mg}^{2+}]_{\text{sil}} + [\text{Mg}^{2+}]_{\text{car}} \quad (8)$$

$$[\text{Ca}^{2+}]_{\text{riv}} = [\text{Ca}^{2+}]_{\text{cyc}} + [\text{Ca}^{2+}]_{\text{sil}} + [\text{Ca}^{2+}]_{\text{car}} \quad (9)$$

$$[\text{Cl}^-]_{\text{riv}} = [\text{Cl}^-]_{\text{cyc}} + [\text{Cl}^-]_{\text{anth}} \quad (10)$$

$$[\text{HCO}_3^-]_{\text{sil}} = [\text{K}^+]_{\text{sil}} + [\text{Na}^+]_{\text{sil}} + 2[\text{Mg}^{2+}]_{\text{sil}} + 2[\text{Ca}^{2+}]_{\text{sil}} \quad (11)$$

$$[\text{HCO}_3^-]_{\text{car}} = [\text{HCO}_3^-]_{\text{riv}} - [\text{HCO}_3^-]_{\text{sil}} \quad (12)$$

$$[\text{HCO}_3^-]_{\text{car}}^{\text{H}_2\text{SO}_4} = 2[\text{SO}_4^{2-}] \quad (13)$$

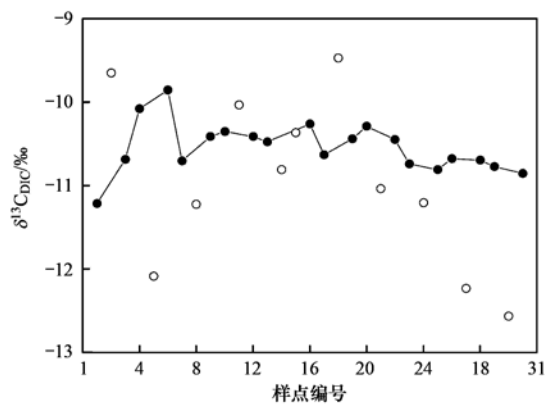
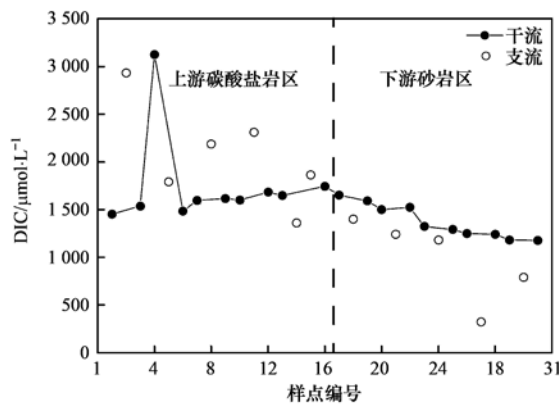
计算结果表明,桂江大气沉降、人类活动、碳酸盐岩和硅酸盐岩化学风化贡献的溶解物质分别占总溶解物质的 2.7%、6.3%、72.8% 和 18.2%。虽然桂江广泛出露硅酸盐岩,由于湿热同步的季风气候极有利于碳酸盐岩风化,即使在一些硅酸盐岩流域,只要夹杂少量碳酸盐地层亦会对河水溶解质产生显著贡献^[31,32]。总体而言,桂江径流溶解质主要由碳酸盐岩风化贡献,硅酸盐岩风化次之,人类活动及大气沉降贡献较小。

2.3 桂江河水 DIC 的主要来源端元分析

2.3.1 河水 DIC 组成特征及来源判别

河流中 DIC 由 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 和溶解态 CO_2 组成。当 pH 值小于 8.3 时, CO_3^{2-} 可以被忽略。桂江

DIC 浓度范围 $320.8 \sim 3124.7 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均为 $(1567.0 \pm 534.7) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 高于世界河流的平均浓度 $1100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[33]。与西江下游的几条支流相比,桂江 DIC 浓度高于贺江($1032 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)和罗定江($1247 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)^[34]。桂江 DIC 从上游到下游呈下降趋势(图 4),与流域碳酸盐岩/硅酸盐岩空间分布格局相一致。桂江河水 $p(\text{CO}_2)$ 的变化范围为 $41 \sim 693 \text{ Pa}$, 高于大气 [$p(\text{CO}_2) = 38 \text{ Pa}$]。桂江河水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值的变化范围在 $-12.57\text{‰} \sim -9.47\text{‰}$, 平均值为 $-10.69\text{‰} \pm 0.68\text{‰}$ ^[17]。由于采样河段流经碳酸盐岩区和砂岩区的交界地带,有多条流经碳酸盐岩区和砂岩区的支流汇入,因此支流 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值波动大于干流,且下游砂岩区的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 相对上游偏负,但是所有样品的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值变化幅度较小 ($<3\text{‰}$)。



$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 数据引自文献[17]

图 4 桂江 DIC 及其稳定碳同位素组成 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) 变化

Fig. 4 Spatial variation of the content of DIC and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in karst and non-karst areas before and after tributary entrance

河流 DIC 往往受到多个过程影响,其 $\delta^{13}\text{C}$ 也会受相应分馏和混合效应的影响。这些过程主要为:①水-气界面 CO_2 交换过程;②化学风化过程;③土壤生物呼吸生成 CO_2 被携入径流;④水体内部生物的光合作用和呼吸作用;⑤矿物沉淀。大气降水中 DIC 浓度很低 ($1 \sim 50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)^[35], 因此降水对河流 DIC 的影响可以忽略。下面就上述过程对桂江河水 DIC 及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响进行分析。

(1) 水-气界面 CO_2 的交换可以同时改变水体中 DIC 含量和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值。大气 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 约为 -8‰ , 向水中溶解的过程会产生 9‰ 左右正向分馏^[36,37]。则大气 CO_2 与河水 DIC 建立同位素平衡, 水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 约为 1‰ 。桂江河水 $p(\text{CO}_2)$ 较大气高, 通过水-气交换河水向大气释放 CO_2 , 这一过程虽然会减少水中的 DIC 含量, 但几乎不影响 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$

值^[38,39]。

(2) 土壤 CO_2 主要来源于植物根系呼吸以及植物的分解。土壤 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 一般主要被当地植被的光合作用类型 (C3 和 C4 植物) 控制^[40]。桂江流域 C3 型植物发育, 曹建华等^[41] 对桂江流域土壤研究表明, 土壤中 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 $-29.35\text{‰} \sim -18.26\text{‰}$, 平均为 -24.26‰ 。土壤 CO_2 溶于土壤水或地下水中, 在 $10 \sim 30^\circ\text{C}$ 条件下会发生 -1.2‰ 左右的分馏^[40], 故溶解 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 大约为 $-30.6\text{‰} \sim -19.5\text{‰}$, 平均为 -25.5‰ 。

(3) 土壤层中有机质分解 CO_2 溶于水中形成的 H_2CO_3 , 是岩石风化酸性介质的主要来源。通常, 碳酸盐岩风化速度远远超过硅酸盐岩风化, 例如斜长石的风化速率 $10^{-17} \sim 10^{-12} \text{ mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, 而方解石高达 $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ^[42]。桂江流域内

出露地层主要有泥盆系和石炭系碳酸盐岩,其 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-4.40\text{‰} \sim +2.90\text{‰}$,平均为 -0.12‰ ,约为 0‰ ^[43]. CO_2 风化碳酸盐岩产生两份份量相等但同位素组成不同的 HCO_3^- ,分别来自于碳酸盐岩和土壤 CO_2 ,则 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 约为 -12.7‰ . 而 H_2SO_4 参与的岩石风化也是桂江河水 DIC 的一个来源,其产生的 HCO_3^- 全部来自碳酸盐矿物, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 约为 0‰ . 硅酸盐岩风化产生的 HCO_3^- 则全部来自土壤 CO_2 , $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 约为 -25.5‰ .

(4)通常在水体内部,生物的呼吸作用会释放“轻”碳的 DIC,而水生植物或藻类光合作用会优先利用“轻”碳,导致河水 DIC 浓度降低和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 升高^[44]. 这两个过程同时存在,其相对强弱取决于河流的水文过程和河水的滞留时间^[37,45]. 水生生物的光合作用和呼吸作用对桂江 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响将在后面讨论.

(5) CaCO_3 的沉淀会导致水体 DIC 浓度降低,但对 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响相对较小(同位素分馏约 1‰ ^[46]).

综上所述,水-气 CO_2 交换与矿物沉淀对 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响可以忽略. 如图 5 所示,DIC 含量与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值有明显的正相关关系($R^2 = 0.56, P = 0.001$),所有采样点 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 分布在土壤 CO_2 和 H_2SO_4 溶解碳酸盐岩的数值区间内,集中在土壤 CO_2 溶解碳酸盐岩的理论线附近,反映出碳酸盐岩风化对 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的绝对影响. 桂江河水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 受大气 CO_2 溶解影响较小,硅酸盐岩风化的同位素信息被掩盖.

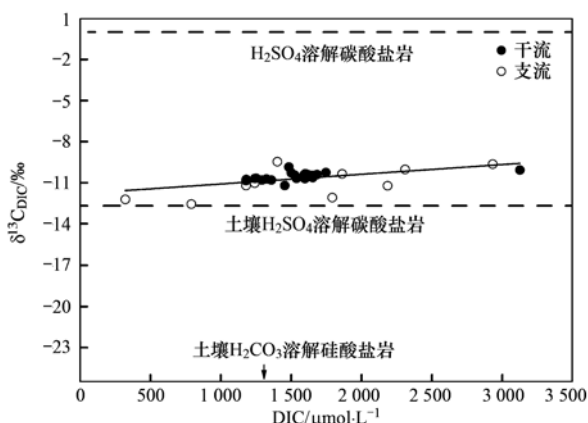


图 5 桂江河水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 与 DIC 之间的关系

Fig. 5 Correlation relationship between $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ and DIC in the Guijiang River

2.3.2 桂江岩石风化对河水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 影响的计算

桂江流域的岩石风化过程是河水 DIC 的主要

贡献者. 若假设桂江河水 DIC 全部来源于碳酸盐岩和硅酸盐岩的风化,则河水的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值(即 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC-rock}}$)可以通过端元混合模型进行估算,公式如下:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC-rock}} = \alpha_{\text{sulf}} \delta^{13}\text{C}_{\text{sulf}} + \alpha_{\text{car}} \delta^{13}\text{C}_{\text{car}} + \alpha_{\text{sil}} \delta^{13}\text{C}_{\text{sil}} \quad (14)$$

$$\alpha_{\text{sulf}} + \alpha_{\text{car}} + \alpha_{\text{sil}} = 1 \quad (15)$$

式中, α_{sulf} 、 α_{car} 和 α_{sil} 分别代表 H_2SO_4 风化碳酸盐岩、 CO_2 风化碳酸盐岩和硅酸盐岩对河水 DIC 的贡献比例.

$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC-rock}}$ 各组成端元可以确定如下: H_2SO_4 溶解碳酸盐岩, $\delta^{13}\text{C}_{\text{sulf}}$ 为 0‰ ; CO_2 溶解碳酸盐岩, $\delta^{13}\text{C}_{\text{car}}$ 为 -12.8‰ ; CO_2 溶解硅酸盐岩, $\delta^{13}\text{C}_{\text{sil}}$ 为 -25.5‰ . α_{sulf} 、 α_{car} 和 α_{sil} 可以基于前面阴阳离子质量平衡计算扣除得出,其平均比值分别为 14.4% 、 68.4% 和 17.2% .

通过式(14)和(15)对组成端元进行估算. 结果表明,桂江实测所得的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 均高于 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC-rock}}$ 计算结果, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC-rock}}$ 平均为 -13.1‰ ,相比 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 实测平均值负偏 2.4‰ ,特别下游流经硅酸盐岩地区的支流,负偏高达 5.6‰ . 由于 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC-rock}}$ 的计算结果仅表明岩石风化初始时河水的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$,因此在河流的输送过程中,必然还有其它过程改造了 DIC,使 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC-rock}}$ 达到实测结果.

除了化学风化过程,能影响桂江河水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的过程还有:土壤 CO_2 直接溶解形成 DIC,以及水生生物的光合作用和呼吸作用. 在自然条件下,土壤 CO_2 主要参与了碳酸盐岩和硅酸盐岩的化学风化过程,直接溶解形成 DIC 只是小部分,可以忽略不计^[47]. 而河水中生物分解有机质释放“轻”碳性质的 DIC,导致水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 负移,这与前面的计算不符,因此,桂江水体有机质的分解不是影响 DIC 稳定同位素组成的主要过程. 仅有可能是由于水生植物的光合作用趋于利用 DIC 的“轻”碳,使实测值 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 相对 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC-rock}}$ 偏重. 对于一般河流来说,较高的悬浮固体(TSS)以及快速的水文过程往往抑制了水体光合作用,导致河水悬移质的陆源有机质部分占主导. 但在一些水库开发为主或宽浅清澈的河流中,由于河水较低的流速,极有利于水生藻类的生长,可以表现为河流悬移质中有机碳以浮游植物生物量贡献为主^[48,49]. 申泰铭等^[50]检测了桂江河水存在不同程度的碳酸酐酶(carbonic anhydrase, CA)活性,水体藻类通过 CA 催化实现水体 CO_2 与 HCO_3^- 之间

的快速转换,完成对 DIC 的光合利用. Sun 等^[45]发现西江下游河流 POC 的¹⁴C 年龄偏老,可能与生物利用年龄较老的 DIC 有关. 陶贞等^[51]于 2005 年对桂江出口处的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 和 C/N 比值的研究也表明,虽然桂江河水 POC 主要来源于流域生态系统的侵蚀产物,但浮游植物生物量也占据其中一定比例.

2.4 水体光合作用产物对颗粒有机碳的贡献

桂江 POC 的浓度范围 $0.11 \sim 1.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 稳定碳同位素组成 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$) 范围为 $-33.97\text{‰} \sim -25.36\text{‰}$ ^[17]. 河流输送的颗粒有机碳可以看作浮游植物生物量(内源碳)与外源土壤颗粒有机碳的端元混合. 基于前面 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的分析表明,桂江水生植物的光合作用利用 DIC 对水体 POC 有着显著的贡献.

通过考虑内源与外源端元组分的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$,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:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}} = \alpha_{\text{au}} \delta^{13}\text{C}_{\text{au}} + \alpha_{\text{al}} \delta^{13}\text{C}_{\text{al}} \quad (16)$$

$$\alpha_{\text{au}} + \alpha_{\text{al}} = 1 \quad (17)$$

式中, α_{au} 为 POC 中浮游植物生物量所占比例; α_{al} 为 POC 中陆源颗粒有机碳所占比例.

两个端元可以确定如下:①其中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{al}}$ 可以参照陶贞等^[51]关于桂江 2005 年 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 的数据,5 月桂江迎来罕见洪水,TSS 达到 $637.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的峰值,高于其它月份 10 ~ 15 倍,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 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 可以作为 $\delta^{13}\text{C}_{\text{al}}$ 的典型值,为 -24.1‰ . ② $\delta^{13}\text{C}_{\text{au}}$ 则选择 Sun 等^[45]在西江下游水生浮游生物量 $\delta^{13}\text{C}$ 的取值,其 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -32‰ .

计算结果表明,浮游植物生物量对桂江 POC 的贡献百分比范围为 $22.3\% \sim 30.9\%$, 平均为 25.1% , 上下游差异不大. 这里值得注意的是,考虑到河流系统浮游植物光合作用过程利用的 DIC,大部分是碳酸盐岩的风化产物. 因此,岩石风化来源的 DIC 在河流输送过程中经浮游植物的光合作用转化为 POC,并在迁移过程中部分沉积水体底部,进而形成埋藏有机碳. 这一河流生态系统的生物-沉积过程是岩石风化特别是碳酸盐岩风化作用的碳汇效应被低估的原因之一^[32,52].

3 结论

(1) 桂江河水主要离子为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- , Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 分别占总阳离子当量浓度的 77.3% 、 14.7% ; HCO_3^- 占总阴离子当量浓度的

78.1% . 桂江流域水化学组成主要受到碳酸盐岩化学风化的控制, CO_2 是化学风化的主要侵蚀介质, H_2SO_4 次之. 桂江流域大气沉降、人类活动、碳酸盐岩和硅酸盐岩化学风化对河流贡献的溶解物质分别占总溶解物质的 2.7% 、 6.3% 、 72.8% 和 18.2% .

(2) 桂江流域的岩石风化过程是河水 DIC 的主要贡献者. 桂江河水 DIC 浓度向下游逐渐降低,与流域碳酸盐岩/硅酸盐岩空间分布格局一致. DIC 含量与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值有明显的正相关关系 ($R^2 = 0.56$, $P = 0.001$),所有样品的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值分布在 CO_2 溶解碳酸盐岩的理论线附近,硅酸盐岩风化的同位素信息被掩盖.

(3) 通过对河水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的理论计算表明,桂江河水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 组成明显受浮游植物生物量的影响. 浮游植物初级生产量对桂江 POC 的贡献达 $22.3\% \sim 30.9\%$,揭示河流浮游植物的光合作用可将岩石风化来源的 DIC 转化为有机碳,并在迁移过程中部分可以沉积水体底部,进而形成埋藏有机碳.

参考文献:

- [1] Fang J, Zhu J, Wang S, *et al.* Global warming, human-induced carbon emissions, and their uncertainties [J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, **54**(10): 1458-1468.
- [2] 张连凯,覃小群,杨慧,等. 珠江流域河流碳输出通量及变化特征[J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 3025-3034.
- [3] Tank S E, Raymond P A, Striegl R G, *et al.* A land-to-ocean perspective on the magnitude, source and implication of DIC flux from major Arctic rivers to the Arctic Ocean [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, **26**(4): B4018.
- [4] Goudie A S, Viles H A. Weathering and the global carbon cycle: Geomorphological perspectives [J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, **113**(1-2): 59-71.
- [5] 魏秀国,沈承德,孙彦敏,等. 珠江水体悬浮物碳稳定同位素组成与流域土壤侵蚀研究[J]. *沉积学报*, 2008, **26**(1): 151-157.
- [6] 蔡德陵,李红燕. 稳定碳、氮同位素在河流系统研究中的应用[J]. *海洋科学进展*, 2004, **22**(2): 225-232.
- [7] 吴莹,张经,张再峰,等. 长江悬浮颗粒物中稳定碳、氮同位素的季节分布[J]. *海洋与湖沼*, 2002, **33**(5): 546-552.
- [8] Barnes R T, Raymond P A. The contribution of agricultural and urban activities to inorganic carbon fluxes within temperate watersheds [J]. *Chemical Geology*, 2009, **266**(3-4): 318-327.
- [9] Perrin A, Probst A, Probst J L. Impact of nitrogenous fertilizers on carbonate dissolution in small agricultural catchments: Implications for weathering CO_2 uptake at regional and global scales [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, **72**(13): 3105-3123.

- [10] 张笑微, 周小萍, 徐尚全, 等. 农业活动对表层岩溶泉溶解无机碳及稳定碳同位素的影响[J]. 水土保持学报, 2013, **27**(2): 218-221.
- [11] 王中良, 李军, 刘丛强, 等. 咸化水体中 DIC 的同位素组成及环境过程分析[J]. 地球化学, 2011, **40**(6): 552-558.
- [12] 李军, 刘丛强, 李龙波, 等. 硫酸侵蚀碳酸盐岩对长江河水 DIC 循环的影响[J]. 地球化学, 2010, **39**(4): 305-313.
- [13] 黄奇波, 刘朋雨, 覃小群, 等. 桂江流域岩溶碳汇特征[J]. 中国岩溶, 2011, **30**(4): 437-442.
- [14] 周秀平, 黄伟军, 王文圣. 桂江流域径流变化特性分析[J]. 广西水利水电, 2008, (1): 22-25.
- [15] Pierrot D, Lewis E, Wallace D. MS Excel program developed for CO₂ system calculations [Z]. ORNL/CDIAC-105. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee, 2006.
- [16] Millero F J. The thermodynamics of the carbonate system in seawater [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, **43**(10): 1651-1661.
- [17] 王华, 张春来, 杨会, 等. 利用稳定同位素技术研究广西桂江流域水体中碳的来源[J]. 地球学报, 2011, **32**(6): 691-698.
- [18] Gao Q, Tao Z, Huang X, *et al.* Chemical weathering and CO₂ consumption in the Xijiang River basin, South China [J]. *Geomorphology*, 2009, **106**(3-4): 324-332.
- [19] Meybeck M. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads [J]. *American Journal of Science*, 1987, **287**(5): 401-428.
- [20] Sun H, Han J, Li D, *et al.* Chemical weathering inferred from riverine water chemistry in the lower Xijiang basin, South China [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(20): 4749-4760.
- [21] 张东, 黄兴宇, 李成杰. 硫和氧同位素示踪黄河及支流河水硫酸盐来源[J]. 水科学进展, 2013, **24**(3): 418-426.
- [22] 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.
- [23] 李思亮, 韩贵琳, 张鸿翔, 等. 硫酸参与喀斯特流域(北盘江)风化过程的碳同位素证据[J]. 地球与环境, 2006, **34**(2): 57-60.
- [24] Roy S, Gaillardet J, Allègre C J. Geochemistry of dissolved and suspended loads of the Seine River, France; anthropogenic impact, carbonate and silicate weathering [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, **63**(9): 1277-1292.
- [25] Galy A, France-Lanord C. Weathering processes in the Ganges-Brahmaputra basin and the riverine alkalinity budget [J]. *Chemical Geology*, 1999, **159**(1-4): 31-60.
- [26] Grosbois C, Nègre P, Fouillac C, *et al.* Dissolved load of the Loire River: chemical and isotopic characterization [J]. *Chemical Geology*, 2000, **170**(1-4): 179-201.
- [27] 黄奇波, 覃小群, 唐萍萍, 等. 桂林地区不同类型岩溶地下水中的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及意义[J]. 地球化学, 2013, **42**(1): 64-72.
- [28] 张红波, 于爽, 何师意, 等. 桂林岩溶区大气降水的化学特征分析[J]. 中国岩溶, 2012, **31**(3): 289-295.
- [29] Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, *et al.* Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers [J]. *Chemical Geology*, 1999, **159**(1-4): 3-30.
- [30] Zhang S R, Lu X X, Higgitt D L, *et al.* Water chemistry of the Zhujiang (Pearl River): Natural processes and anthropogenic influences [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**(1): F1011.
- [31] White A F, Schulz M S, Lowenstern J B, *et al.* The ubiquitous nature of accessory calcite in granitoid rocks: Implications for weathering, solute evolution, and petrogenesis [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, **69**(6): 1455-1471.
- [32] 刘再华. 岩石风化碳汇研究的最新进展和展望[J]. 科学通报, 2012, **57**(2-3): 95-102.
- [33] Cai W, Guo X, Chen C A, *et al.* A comparative overview of weathering intensity and HCO₃⁻ flux in the world's major rivers with emphasis on the Changjiang, Huanghe, Zhujiang (Pearl) and Mississippi Rivers [J]. *Continental Shelf Research*, 2008, **28**(12): 1538-1549.
- [34] Sun H G, Han J, Lu X X, *et al.* Modeling the relations between riverine DIC and environmental factors in the lower Xijiang of the Pearl River, China [J]. *Quaternary International*, 2008, **186**(1): 65-78.
- [35] Stumm W, Morgan J J. *Aquatic chemistry: Chemical equilibria and rates in natural waters* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1995: 195-204.
- [36] Górka M, Sauer P E, Lewicka-Szczepak D, *et al.* Carbon isotope signature of dissolved inorganic carbon (DIC) in precipitation and atmospheric CO₂ [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(1): 294-301.
- [37] Cartwright I. The origins and behaviour of carbon in a major semi-arid river, the Murray River, Australia, as constrained by carbon isotopes and hydrochemistry [J]. *Applied Geochemistry*, 2010, **25**(11): 1734-1745.
- [38] Li S, Calmels D, Han G, *et al.* Sulfuric acid as an agent of carbonate weathering constrained by $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$: Examples from Southwest China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, **270**(3-4): 189-199.
- [39] Palmer S, Hope D, Billett M, *et al.* Sources of organic and inorganic carbon in a headwater stream: Evidence from carbon isotope studies [J]. *Biogeochemistry*, 2001, **52**(3): 321-338.
- [40] 贾国东, 陈法锦, 邓文锋. 北江河水溶解无机碳同位素的季节变化[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2012, **37**(2): 365-369.
- [41] 曹建华, 周莉, 杨慧, 等. 桂林毛村岩溶区与碎屑岩区林下土壤碳迁移对比及岩溶碳汇效应研究[J]. 第四纪研究, 2011, **31**(3): 431-437.
- [42] Chamberlain C P, Waldbauer J R, Jacobson A D. Strontium, hydrothermal systems and steady-state chemical weathering in

- active mountain belts [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, **238**(3-4): 351-366.
- [43] 彭建堂, 胡瑞忠. 湘中锡矿山超大型锑矿床的碳、氧同位素体系[J]. *地质论评*, 2001, **47**(1): 34-41.
- [44] Yang C, Telmer K, Veizer J. Chemical dynamics of the "St. Lawrence" riverine system: δD_{H_2O} , $\delta^{18}O_{H_2O}$, $\delta^{13}C_{DIC}$, $\delta^{34}S_{sulfate}$, and dissolved $^{87}Sr/^{86}Sr$ [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, **60**(5): 851-866.
- [45] 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 Discuss*, 2011, **8**(5): 9471-9501.
- [46] Zhang J, Quay P D, Wilbur D O. Carbon isotope fractionation during gas-water exchange and dissolution of CO_2 [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, **59**(1): 107-114.
- [47] Dreybrodt W. Processes in karst systems [M]. Heidelberg: Springer, 1988. 288.
- [48] 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.
- [49] Gao Q, Tao Z, Yao G, *et al.* Elemental and isotopic signatures of particulate organic carbon in the Zengjiang River, southern China[J]. *Hydrological Processes*, 2007, **21**(10): 1318-1327.
- [50] 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.
- [51] 陶贞, 高全洲, 黄夏坤, 等. 桂江河流碳的生物地球化学循环: ^{14}C 和 ^{13}C 示踪[J]. *第四纪研究*, 2012, **32**(3): 465-472.
- [52] Liu Z, Dreybrodt W, Wang H J. A new direction in effective accounting for the atmospheric CO_2 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.

CONTENTS

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing	LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2031)
Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2045)
Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway	BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, <i>et al.</i> (2052)
Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiye Glacier Region	MA Juan-juan, LI Zhen (2060)
Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter	SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (2067)
Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks	XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, <i>et al.</i> (2075)
Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups	WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, <i>et al.</i> (2085)
Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water	SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian (2091)
Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River	TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, <i>et al.</i> (2099)
Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment	YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (2108)
Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis	GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, <i>et al.</i> (2114)
Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application	ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun (2120)
Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil	CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, <i>et al.</i> (2129)
Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuashui Watershed	LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, <i>et al.</i> (2139)
Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town	ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (2148)
Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian (2156)
Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng (2164)
Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal	WANG Shang, LI Da-peng (2171)
Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment	LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, <i>et al.</i> (2178)
Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension	WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao (2185)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury	ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2193)
Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, <i>et al.</i> (2201)
Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation	LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, <i>et al.</i> (2209)
AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park	TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, <i>et al.</i> (2216)
Synthesis and Adsorption Property of Cd(II)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres	YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2223)
Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2230)
Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification	TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, <i>et al.</i> (2236)
Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor	SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, <i>et al.</i> (2241)
Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride	ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, <i>et al.</i> (2249)
Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake	GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, <i>et al.</i> (2256)
Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission	LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, <i>et al.</i> (2264)
Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory	TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (2272)
Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China	WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, <i>et al.</i> (2281)
Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Frex	ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, <i>et al.</i> (2287)
Generation and Release of Microcystin-LR by <i>Microcystis aeruginosa</i> Under Hydroquinone Inhibition	ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (2294)
Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella	ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, <i>et al.</i> (2300)
Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake	LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, <i>et al.</i> (2305)
Effects of <i>Corbicula fluminea</i> Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments	WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2314)
Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments	TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, <i>et al.</i> (2322)
Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP	WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, <i>et al.</i> (2328)
Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability	TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, <i>et al.</i> (2334)
Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier	WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, <i>et al.</i> (2341)
Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato	JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (2349)
Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta	LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, <i>et al.</i> (2358)
Variation of Soil Nitrogen During <i>in situ</i> Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China	JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, <i>et al.</i> (2365)
Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes	ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, <i>et al.</i> (2374)
Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil	CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, <i>et al.</i> (2381)
Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation	ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2392)
Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the <i>Spartina alterniflora</i> Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province	ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2401)
Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification	OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, <i>et al.</i> (2411)
Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage	ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, <i>et al.</i> (2419)
Comparison of Soil Respiration in Natural <i>Castanopsis carlesii</i> Forest and Plantation Forest	WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, <i>et al.</i> (2426)
Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor	LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng (2433)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年6月15日 第35卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 6 Jun. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行