

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

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

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化 姚利, 刘进, 潘月鹏, 田世丽, 王振波, 韦霞, 张国忠, 周保华, 王跃思 (423)

海西城市群 PM_{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评估 陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)

岷泗地区大气 PM_{2.5} 中汞形态污染及其与碳组分的关系 程娜, 钱冠磊, 段炼, 赵梦飞, 修光利 (438)

泰山夏季 PM_{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源 孟静静, 侯战方, 刘晓迪, 邢继钊 (445)

南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估 张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 王俊秀, 师远哲, 刘静达, 梁静舒 (453)

长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响 尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 苏艳蓉 (461)

南京城市交通甲烷排放特征 张雪, 胡凝, 刘寿东, 王淑敏, 高韵秋, 赵佳玉, 张圳, 胡勇博, 李旭辉, 张国君 (469)

2003~2014年东北三省气溶胶光学厚度变化分析 张宸赫, 赵天良, 王富, 徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好 (476)

基于增强回归树的城市 PM_{2.5} 日均值变化分析: 以常州为例 葛跃, 王明新, 孙向武, 齐今笛 (485)

重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量 张成, 张雅惠, 王永敏, 王定勇, 徐凤, 杨熹, 何秀清 (495)

几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响 付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠 (502)

养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征 高敏, 仇天雷, 秦玉成, 王旭明 (510)

百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征 吴亚林, 李帅东, 江俊武, 沈胤胤, 黄昌春, 黄涛, 杨浩, 余艳红, 罗玉 (517)

岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶 (527)

三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素 张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 王丽婧, 谭纤茹 (535)

分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应 邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正, 史建超, 曹占辉 (547)

淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响 林俊杰, 刘丹, 张帅, 于志国, 何立平, 余顺慧 (555)

湖泊水体中铁(III)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根 蒋永参, 彭云霄, 刘广龙, 周易勇, 朱端卫 (563)

高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制 王卫东, 郝瑞霞, 张晓娴, 万京京, 钟丽燕 (572)

改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制 吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 梁奇奇, 沈耀良 (580)

几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用 姚程, 胡小贞, 卢少勇, 耿荣妹 (589)

模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学 何沅洁, 刘江, 江韬, 黄京晶, 成晴, 陈宏 (600)

TiO₂/膨润土复合材料对 Hg²⁺ 的吸附性能研究 唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇 (608)

氨氮及 H₂O₂ 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响 王永京, 杜旭, 金萌, 冯思捷, 杨凯, 张明露, 于建伟 (616)

配水管网细菌活性影响因素 王晓丹, 赵新华 (622)

施氏矿物的化学合成及其对含 Cr(VI) 地下水吸附修复 朱立超, 刘元元, 李伟民, 牟海燕, 王婉玉, 石德智, 王涛 (629)

臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制 侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 王晓昌 (640)

单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N₂O 的产生特性 郭昌梓, 张凤燕, 刘富宇, 朱超, 裴立影 (647)

有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能 管勇杰, 于德爽, 李津, 齐泮晴, 魏思佳 (654)

完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析 王硕, 徐巧, 张光生, 李激 (665)

颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究 孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (672)

游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响 戴晓虎, 何进, 严寒, 李宁, 丁月玲, 董滨, 戴翎翎 (679)

利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻 顾琼, 金文标, 陈远清, 郭仕达, 万超凡 (688)

零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响 魏欣, 薛顺利, 杨帆, 李响, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (697)

沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评估 王静, 刘明丽, 张士超, 鲁垠涛, 姚宏 (703)

河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险 陈轶楠, 马建华, 段海静, 魏林恒 (711)

外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用 杨雷峰, 尹华, 彭辉, 李跃鹏 (721)

微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应 叶茜琼, 吴蔓莉, 陈凯丽, 李炜, 袁婧 (728)

沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响 罗路云, 金德才, 左晖, 张卓, 谭新球, 张德咏, 卢向阳, 刘勇 (735)

再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响 邱琰茗, 王广煊, 黄兴如, 郭道宇 (743)

矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响 贺龙, 李艳琴, 李彬春, 李君剑 (752)

稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征 刘琼, 魏晓梦, 吴小红, 袁红朝, 王久荣, 李裕元, 葛体达, 吴金水 (760)

不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响 赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 张霞, 王旭东, 张阿凤 (769)

复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响 聂文翰, 戚志萍, 冯海玮, 孙玉静, 支月娥, 张进忠, 张丹 (783)

秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析 成功, 陈静, 刘晶晶, 张阿凤, 王旭东, 冯浩, 赵英 (792)

1株氯苯高效降解菌的分离鉴定及降解特性 叶杰旭, 林彤晖, 骆煜昊, 陈东之, 陈建孟 (802)

1株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性 谭文勃, 马晓丹, 黄聪, 陈川, 王爱杰 (809)

连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响 孙娜, 商和平, 茹淑华, 苏德纯 (815)

施氮对小麦(Ⅵ)吸收、转运和分配的影响 陈玉鹏, 彭琴, 梁东丽, 宋卫卫, 雷凌明, 喻大松 (825)

长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体增殖与生物转化的影响 李金丽, 王振红, 严雅萌, 黄兵, 罗专溪 (832)

不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用 马锋锋, 赵保卫 (837)

《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)

岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化

李丽^{1,2}, 蒲俊兵¹, 李建鸿^{1*}, 张陶^{1,2}

(1. 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; 2. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715)

摘要: 岩溶水体中溶解无机碳(DIC)主要以 HCO_3^- 形式存在, 其同位素 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) 被广泛用于示踪 DIC 的不同来源及其影响因素. 为了解亚热带典型岩溶溪流溶解无机碳及其稳定同位素的分布规律, 本文以广西柳州官村地下河补给的地表溪流为研究对象, 对其水化学特征和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 进行分析. 结果表明, 溪流上游和下游的 DIC 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 都表现出明显的时空变化特征, 地下河出口(G1 点) HCO_3^- 旱季浓度变化范围为 $(4.73 \pm 0.14) \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 而雨季为 $(4.23 \pm 0.68) \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$. 溪流下游(G2 点) HCO_3^- 旱季浓度变化范围为 $(4.56 \pm 0.23) \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 而雨季为 $(4.20 \pm 0.59) \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$. 溪流上游的旱季 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 变化范围为 $-12.22\% \pm 0.49\%$, 雨季的变化范围为 $-12.28\% \pm 0.82\%$; 溪流下游的旱季变化范围为 $-10.73 \pm 0.71\%$, 雨季的变化范围为 $-11.10\% \pm 0.90\%$. 两个点水体 DIC 含量旱季均高于雨季, 且 G1 点要高于下游 G2 点. 两个点水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值旱季较雨季偏重, 且 G2 点水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值显著高于 G1 点 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值. 地下河水和溪流 DIC 主要来源于土壤 CO_2 和碳酸盐岩溶蚀, 但是溪流上游与下游 DIC 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值差异表明水体的 CO_2 脱气作用, 水生植物的光合作用显著影响了水体 DIC 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值.

关键词: 岩溶地表溪流; 溶解无机碳(DIC); $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$; 碳酸盐岩风化; 广西

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0527-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201607171

Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge

LI Li^{1,2}, PU Jun-bing¹, LI Jian-hong^{1*}, ZHANG Tao^{1,2}

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

Abstract: Stable carbon isotope of dissolved inorganic carbon ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$), which is mainly constituted by HCO_3^- in karst water, is widely used to trace the different sources and influential factors of dissolved inorganic carbon (DIC). In order to understand the distribution of DIC and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in subtropical karst area, this paper researched the water chemistry and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in a karst surface stream in detail, which is fed by Guancun subterranean stream in Liuzhou City, Guangxi Province, in the southwest of China. The results showed that the contents of DIC in subterranean stream outlet (G1 site) ranged from 4.60 to 4.90 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ with an average of 4.73 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ in dry season, and from 2.80 to 4.70 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ with an average of 4.23 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ in rainy season. The contents of DIC in 1.35 km downstream site (G2 site) ranged from 4.30 to 4.90 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ with an average of 4.56 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ in dry season, and from 3.00 to 4.70 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ with an average of 4.20 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ in rainy season. The $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of subterranean stream outlet (G1 site) varied from -12.8% to -11.53% with an average of -12.22% in dry season, and from -13.12% to -11.01% with an average of -12.28% in rainy season. The $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of stream downstream site (G2 site) ranged from -11.71% to -9.55% with an average of -10.73% in dry season, and ranged from -12.18% to -9.85% with an average of -11.10% in rainy season. The contents of DIC of G1 site were higher than those of G2 site. The DIC contents in dry season in both G1 and G2 site were higher than those in rainy season. The values of $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of G1 and G2 site in dry season were more positive than those in rainy season. The $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ value of G1 site was more negative than that of G2 site. The main sources of DIC in underground river and surface stream were soil CO_2 and carbonate dissolution. However, the differences of DIC and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ between G1 and G2 site showed that CO_2 degassing and photosynthesis of aquatic plants had significant influence on water DIC and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ value. This study is helpful to understand the dynamic change and distribution of DIC and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in karst surface stream.

Key words: karst surface stream; dissolved inorganic carbon (DIC); $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$; carbonate dissolution; Guangxi

流域中岩石风化是一个重要的大气 CO_2 汇, 碳酸盐岩的化学风化会消耗大气中的 CO_2 , 并在碳的生物化学循环中起重要作用^[1]. 世界上 60 条大河的研究揭示碳酸盐岩溶解每年约向海洋输送 12.3

收稿日期: 2016-07-25; 修订日期: 2016-09-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572234, 41202185); 中国地质科学院基本科研业务费项目(YYWF201636)

作者简介: 李丽(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为岩溶环境与全球气候变化, E-mail: 894123302@qq.com

* 通信作者, E-mail: jianhongli1988@karst.ac.cn

$\times 10^{12} \text{ mol C}^{[2]}$. 在短时间尺度上,碳酸盐岩风化会受到当地气候以及区域地下水和地表水中 CO_2 运移的影响,接受岩溶地下水补给的地表溪流、河流成为连接岩溶系统碳循环-地表水体碳循环的关键. 因此,碳酸盐岩型河流的碳动态对了解全球或地区短时间尺度的碳循环有着重要作用. 水体溶解无机碳(DIC)含量和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的变化反映了碳的地球化学行为和生物地球化学循环特征,可以为河流参与的碳循环过程提供重要信息^[3-7],而岩溶地下水中的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 能够示踪地下水中 DIC 的来源,进而指示流域碳酸盐岩溶蚀作用的方式和强度以及流域碳汇量的变化^[8]. 已有研究表明,岩溶地下水中 DIC 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 具有明显的时空变化,且与区域温度、降水具有明显相关性,故碳酸盐岩风化碳汇也具有较强的动态变化特征^[9-11]. 在研究中还发现小河流比大河流有更大的 DIC 浓度的波动. 事实上,由于河流 CO_2 分压存在很大的时空变化,精确评价河流与大气间 CO_2 通量的关键在于采样覆盖率^[4]. 关于溪流溶解无机碳(DIC)及其同位素 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 相互关系的研究,Cane 等^[12]对加拿大的 Raisin 河地区岩溶地下水的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 与 DIC, Li 等^[13]对贵阳地区地下水的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 与 DIC 和 Li 等^[14]研究水城盆地岩溶地下水的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 与 DIC 关系时均发现两者几乎没有相关性,这表明 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 还受到其它环境因素的影响. 不少研究也指出在碳酸参与碳酸盐岩风化之外,硫酸也参与了碳酸盐岩的风化,参与的硫酸主要来源于煤矿开采、酸沉降、污水排放等^[15]. 因此,外界自然变化和人为输入等对岩溶地下水水化学以及地质碳汇的影响研究显得尤为重要.

河流作为陆地地表过程产出物质向海洋运输的重要通道^[16],能直接反映流域内的生物地球化学过程,但由于流域范围大的河流往往有无数的支流汇入,其水体溶解无机碳来源较为复杂,因而选择小流域范围的溪流作为研究区则避免了溶解无机碳来源的复杂性,更有利于探索在岩溶动力系统中溶解无机碳的变化过程. 因此本文选取广西融安县大良镇接收官村地下河补给的典型岩溶地表溪流为研究对象,分析溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成特征,以期了解溪流中 DIC 来源及其动态变化提供科学支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区柳州市融安县大良镇官村,经度为 $109.33^\circ \sim 109.35^\circ \text{E}$, 纬度为 24.84°

$\sim 24.87^\circ \text{N}$, 海拔约 160 m, 属于典型的亚热带岩溶峰丛山区,广泛发育落水洞、岩溶洼地、洞穴等岩溶形态(图 1). 区域年均气温为 19.7°C , 年均降水量 1726 mm, 存在明显雨季、旱季, 雨季为每年 3~8 月(约占全年降水量的 90%), 旱季为每年 9 月~次年 2 月. 研究区地表溪流源头为官村地下河出口, 流经山口村、官村、雷崖村, 最后汇入融江支流石门河中. 溪流河道中黑藻、金鱼藻、苦草等水生植物丰富. 由于接受官村地下河的唯一补给并在岩溶地区径流, 研究区是典型的岩溶地表溪流, 溪流全长约 1.35 km, 坡度较缓 ($< 2 \text{ m} \cdot \text{km}^{-1}$), 平均宽度约 5.2 m, 平均深度约 0.5 m. 本文选取官村地下河出口(G1)和下游雷崖监测站(G2)两个点进行监测(图 1), 两点相距 1.30 km.

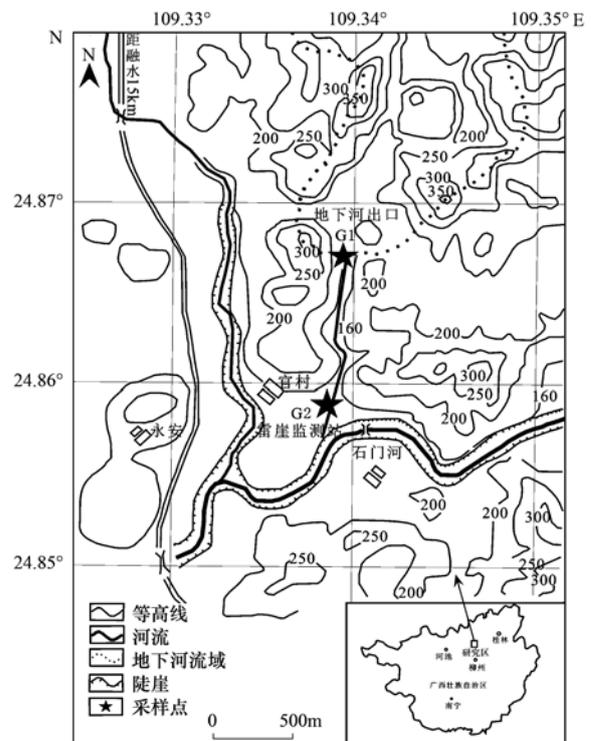


图 1 研究区示意

Fig. 1 Location map of study sites

1.2 研究方法

2014 年 8 月至 2015 年 7 月对 G1、G2 点进行一个水文年的监测及采样工作. 利用德国 WTW 公司 Multi 3430 多参数水质监测仪现场测试 G1、G2 点 pH、水温(T)、电导率(SpC)和溶解氧(DO), 其监测精度分别为 0.004 、 0.1°C 、 $0.1 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 和 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 每月采集的水样均经直径 50 mm, 孔径 $0.45 \mu\text{m}$ 的醋酸纤维滤膜过滤. 用德国 Merck 公司碱度计现场滴定 HCO_3^- 含量, 精度为 0.05

mmol·L⁻¹. 取 30 mL 水样储存于高密度聚乙烯瓶中并加入 3~5 滴饱和 HgCl₂ 溶液,用于测定水体溶解无机碳同位素组成,水样溶解无机碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$)利用连有 Gas Bench II 装置的 MAT 253 质谱仪测试, $\delta^{13}\text{C}$ -DIC 以 V-PDB 标准给出,分析误差 < 0.15‰. 取 100 mL 过滤水样用于测定 Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻ 等阴离子. 取 50 mL 过滤水样装于事先用 1:1 的 HNO₃ 溶液清洗并烘干过的聚乙烯瓶中,立即加入浓硝酸 5~8 滴,使得 pH < 2,用于测定 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 等阳离子. 阴离子采用美国戴安公司 ICS-900 离子色谱仪分析,阳离子采用美国 ICP-OES 光谱仪分析 (IRIS Intrepid II XSP, Thermo Fisher Scientific, USA). 阴阳离子分析误差 < 5%. 根据相关阴阳离子浓度,利用 WATSPEC^[21] 软件计算水体二氧化碳分压($p\text{CO}_2$)和方解石饱和指数(SIc). 所有测试工作均由中国地质科学院岩溶地质研究所国土资源部岩溶地质资源环境监督检测中心完成. 2014 年 8 月至 2015 年 7 月在采样时对 G1 和 G2 点采用自主设计制作的浮游静态

箱^[18,19]进行水-气界面 CO₂ 脱气通量观测,并计算出 CO₂ 脱气通量,计算公式为^[20]:

$$\text{Flux} = \frac{\text{Slope} \times F_1 \times F_2 \times V}{F_3 \times S} \quad (1)$$

式中, Slope 为时间-浓度关系中的斜率($\times 10^{-6} \text{ min}^{-1}$); F_1 为分子摩尔质量(CO₂, 44 g·mol⁻¹; CH₄, 16 g·mol⁻¹); F_2 为分钟和小时的转换系数(60); V 为浮游箱内套入的空气体积(m³); F_3 为 μg 和 mg 的转换系数(1 000), S 为水上浮游箱的面积(m²); Flux 为温室体通量[$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$].

2 结果与分析

2.1 溪流水化学基本特征

G1 点为岩溶地下水, G2 点为接受岩溶地下水补给的地表溪流. 由表 1 可知, 两个研究点水体中的主要阳离子为 Ca²⁺, 比例分别达 88.71% 和 88.72%, 阴离子 HCO₃⁻, 比例分别达 93.48% 和 94.26%. 水化学类型为 HCO₃-Ca 型, 这表明 G1 和 G2 点水化学特征主要受岩溶地质背景的影响.

表 1 溪流水化学基本特征

Table 1 Hydrochemical characteristics of the stream

项目	G1			G2		
	变化范围	平均值	标准偏差	变化范围	平均值	标准偏差
pH	7.01~7.66	7.43	0.16	7.71~8.19	8.03	0.17
T/°C	20.20~21.40	20.83	0.44	14.90~24.90	21.05	3.22
K ⁺ /mg·L ⁻¹	0.24~0.44	0.28	0.06	0.25~0.50	0.28	0.07
Na ⁺ /mg·L ⁻¹	0.15~0.81	0.36	0.17	0.15~0.79	0.33	0.18
Ca ²⁺ /mg·L ⁻¹	57.48~105.9	91.71	11.44	75.19~102.20	89.61	5.28
Mg ²⁺ /mg·L ⁻¹	5.93~14.22	11.03	2.46	5.73~13.86	10.78	2.34
Cl ⁻ /mg·L ⁻¹	1.70~2.87	2.41	0.43	0.64~3.00	2.26	0.66
HCO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	170.80~298.90	274.50	0.56	183.00~292.80	265.35	0.48
SO ₄ ²⁻ /mg·L ⁻¹	2.85~13.99	11.27	3.08	3.66~13.96	10.68	3.39
NO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	0.28~11.18	5.45	4.68	0.29~9.38	3.23	3.84
$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}/\text{‰}$	-13.91~-11.01	-12.15	0.70	-12.39~-9.55	-11.08	0.90
DO/mg·L ⁻¹	6.60~8.57	7.72	0.65	8.59~10.45	9.46	0.75
SIc	0.11~0.48	0.31	0.12	0.37~1.15	0.86	0.31
$p\text{CO}_2 \times 10^{-6}$	5 495.41~25 703.96	10 073.16	3 464.49	575.44~4 073.80	1 283.56	5 576.90

1) 表中每个测试指标的样品数为 11 个

2.2 DIC 及其碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$)、 $p\text{CO}_2$ 时空变化特征

研究区水体 pH 值在 7~9 之间时, 水体中大部分 DIC 以 HCO₃⁻ 的形式存在^[22], 因此本文用水体 HCO₃⁻ 浓度代替 DIC 浓度. 图 2 显示两个监测点的 DIC 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 在时空尺度上都存在明显差异. 地下河出口(G1 点) HCO₃⁻ 浓度旱季平均值为 (4.73 ± 0.14) mmol·L⁻¹, 雨季平均值为 (4.23 ± 0.68) mmol·L⁻¹, 而溪流下游(G2 点) HCO₃⁻ 浓度旱季平

均值为 (4.56 ± 0.23) mmol·L⁻¹, 雨季平均值为 (4.20 ± 0.59) mmol·L⁻¹. 从空间尺度上, 溪流 HCO₃⁻ 浓度从地下河出口(G1)至下游地区(G2)降低, 从时间尺度上, 溪流 HCO₃⁻ 浓度雨季平均值较旱季低(图 2).

对于流水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 而言, 旱、雨季下游 G2 点水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 都明显高于地下河出口 G1 点. G1 点的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的旱季变化范围为 -12.22‰ ± 0.49‰, 雨季的变化范围为 -12.28‰ ± 0.82‰; 溪流下游的旱

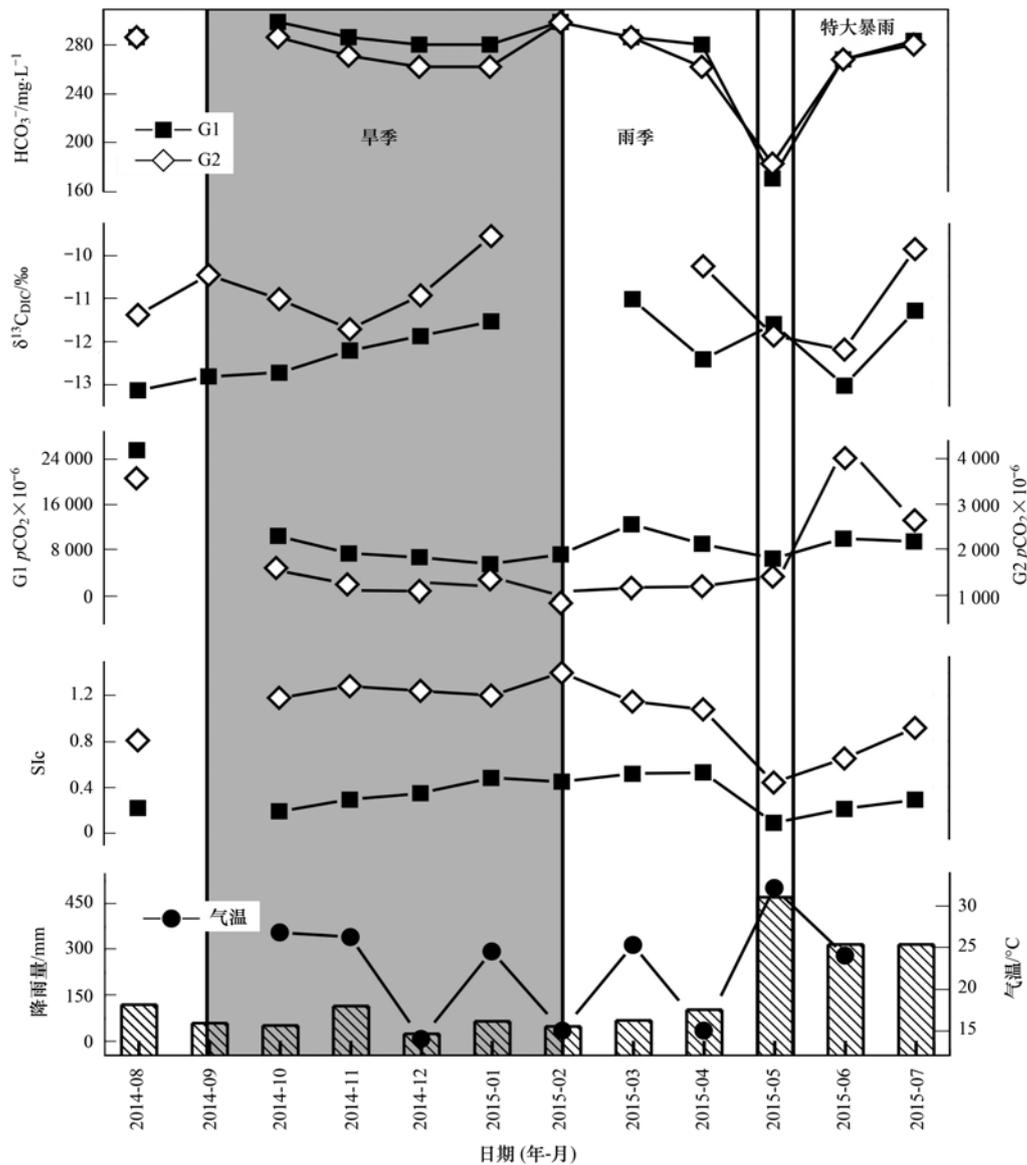


图2 研究区月平均气温、月总降雨量、 $p\text{CO}_2$ 、 SIc 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 、 $[\text{HCO}_3^-]$ 的变化特征

Fig. 2 Temporal-spatial variations of monthly average temperature, monthly total precipitation, $p\text{CO}_2$, SIc , $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, and $[\text{HCO}_3^-]$

季变化范围为 $-10.73 \pm 0.71\text{‰}$, 雨季的变化范围为 $-11.10\text{‰} \pm 0.90\text{‰}$ (图2)。

本研究发现两个监测点的水体 $p\text{CO}_2$ 值均大于溪流水面上空 1.5 m 处大气 $p\text{CO}_2$ 值 (约为 420×10^{-6}), 并表现出明显的季节变化, 且雨季显著高于旱季. 溪流上游 (G1 点) $p\text{CO}_2$ 旱季的变化范围为 $5495.41 \times 10^{-6} \sim 10471.29 \times 10^{-6}$, 平均值为 7477.00×10^{-6} , 雨季的变化范围为 $6456.54 \times 10^{-6} \sim 25703.96 \times 10^{-6}$, 平均值为 12236.63×10^{-6} , 而溪流下游 (G2 点) $p\text{CO}_2$ 旱季变化范围为 $575.44 \times 10^{-6} \sim 1047.13 \times 10^{-6}$, 平均值为 814.86×10^{-6} , 雨季的变化范围为 $1318.26 \times 10^{-6} \sim 4073.80 \times 10^{-6}$, 平均值为 2664.12×10^{-6} (图2). 通过空间对比来

看, G2 点不论旱季还是雨季, 其水体 $p\text{CO}_2$ 值均低于 G1 点.

2.3 溪流 CO_2 脱气通量

根据通量箱法监测结果, 溪流的 CO_2 交换通量以脱气为主, 地下河出口 (G1 点) 脱气通量变化范围为 $139.48 \sim 890.84 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 平均值为 $445.72 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 溪流下游 (G2 点) 脱气通量变化范围为 $16.54 \sim 844.18 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 平均值为 $159.81 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$.

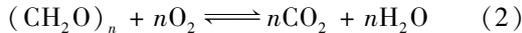
3 讨论

3.1 溪流 DIC 的来源分析

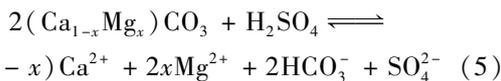
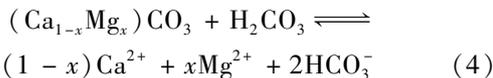
岩溶水体中 DIC 主要有 3 种来源, 大气 CO_2 、

有机质分解产生的 CO_2 和碳酸盐岩溶解^[23~26]. 大气 CO_2 和土壤 CO_2 都可以被地表水或雨水溶解, 直接形成水中的溶解无机碳或以碳酸形式参与岩石风化. 碳酸盐岩的溶蚀作用能够提供大量的 HCO_3^- (DIC), 因此会对溪流的地球化学过程产生重要的影响. 由于不同来源 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值的较大差异, 因此可以用 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值识别 DIC 的来源. 由于 C3 植被分布比 C4 植被广泛, 因此理论上碳酸参与碳酸盐岩溶蚀形成的地下水中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值约为 $-14\text{‰} \sim -11.5\text{‰}$ ^[14,27,28], 而地下水在转化为地表水的时候, 地表水的 DIC 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值主要依赖于地下水的 DIC 和其同位素组成. G1 点为地下河出口, 其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的变化范围为 $-13.12\text{‰} \sim -11.01\text{‰}$, 平均值为 -12.15‰ , 介于岩溶地下水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 理论值之间, 说明溪流 DIC 主要还是来源于碳酸盐岩溶蚀, G2 点则为岩溶地下水补给的地表溪流, 其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的变化范围 $-12.18\text{‰} \sim -9.55\text{‰}$, 其中偏大的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值可能是由其他的过程或机制而不是碳酸盐岩风化控制. 以下方程式说明各种机制参与下的 DIC 形成过程.

(1) 溶解 CO_2 (包括土壤 CO_2 和空气 CO_2) 和有机的氧化分解



(2) 碳酸盐岩化学风化(如碳酸、硫酸作用)



由于溪流水体的 $p\text{CO}_2$ 高于大气(图 2), 大气 CO_2 成因的 DIC 可以忽略不计, 而岩溶区土壤 CO_2 浓度是大气的几十倍甚至几百倍^[36], 因此, 研究区的 DIC 主要有两个来源: 碳酸盐岩风化和土壤 CO_2 .

另外, 外源酸对碳酸盐岩溶蚀也可能造成影响, 已有研究表明, 被硫酸或其它酸(如硝酸和有机酸)溶解的碳酸盐岩会影响水中的 DIC 收支^[29]. 在以往的研究中表明, 来源于黄铁矿氧化物和酸雨中的硫酸, 在我国西南地区的碳酸盐岩化学风化过程中起着重要作用^[29,30]. 柳州为我国重要的酸雨区^[31], 主要为硫酸型酸雨, 雨中的 H_2SO_4 能积极参与岩溶作用. 但是在研究区未发现硫化物矿床, 因此估计硫酸参与的碳酸盐岩溶蚀对溪流 DIC 收支的影响较小.

然而如图 3, 关于溪流溶解无机碳 (DIC) 及其同位素 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的相互关系, G1 和 G2 两个监测点的 DIC 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 并没有相关性 (R^2 为 0.07 和 0.08), 这与其他相关研究结果相似^[12~14], 这表明 DIC 并不是控制 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值变化的唯一因素, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 还受到其它环境因素的影响^[32~35], 下文将详细分析.

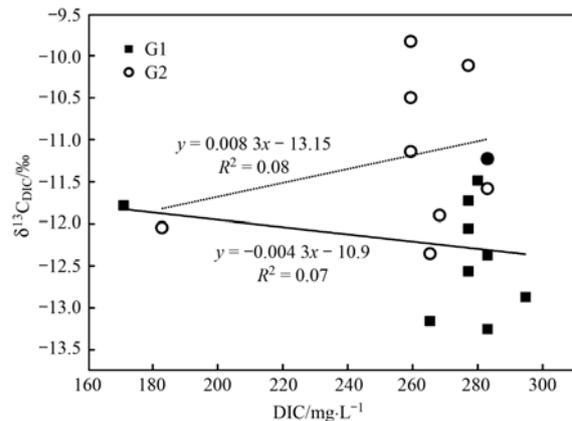


图 3 溪流溶解无机碳 (DIC) 及其同位素 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的关系

Fig. 3 Correlation of DIC with $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$

3.2 溪流上游、下游 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值产生差异的原因分析

3.2.1 G1 点 DIC 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 变化的影响因素

G1 点为地下河出口, 其 DIC 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的变化即为岩溶地下水本身的变化, 具有明显的季节性. G1 点 DIC 浓度旱季平均值为 $4.73 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 雨季平均值为 $4.23 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 旱季要明显高于雨季, 这说明雨季较多的雨水补给使得地下河流速加快, 减少了岩溶地下水滞留时间, 加之雨水的稀释效应, 显著降低了地下河系统的 DIC 浓度^[35]. G1 点的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的变化范围 $-13.12\text{‰} \sim -11.01\text{‰}$, 旱季平均值为 -12.22‰ , 而雨季平均值为 -12.28‰ . 地下水中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值处于前述理论值范围内, 显示了岩溶地下河的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 主要还是受到土壤生物成因 CO_2 来源和碳酸盐岩溶蚀作用的控制^[14,27,28]. 但是受流域内农业活动的影响, 降水可携带含有硝酸、硫酸、有机酸类物质进入地下河, 同碳酸盐岩作用^[29,30], 可导致 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值出现偏高现象. G1 点 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 季节变化说明雨季更多的生物成因 CO_2 的贡献, 雨季土壤 CO_2 含量较高^[36], 雨季降水使得大量的土壤生物成因 CO_2 补给地下河系统, 从而导致雨季 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 平均值要低于旱季.

3.2.2 G2 点 DIC 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 变化的影响因素

(1) 溪流 CO_2 脱气与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$

岩溶地下水具有较高水体 CO_2 分压 ($p\text{CO}_2$) (图

2), 出露地表后常与大气形成较高的正向 CO₂ 浓度梯度, 因此岩溶水体水气界面 CO₂ 交换通量对于岩溶碳循环过程具有重要意义, 根据通量箱法检测结果, 溪流的 CO₂ 交换通量以脱气为主。

河流系统中 DIC 主要有 3 种流失途径, 包括同化到水生环境、方解石沉淀和溪流水体表面与大气间的 CO₂ 气体交换。研究区的方解石饱和指数 (SIc) 始终大于 0, 说明下列反应式能够充分反应:



方解石沉淀会导致溪流向空气中排放 CO₂, 很多研究表明, 基于河流与大气间 CO₂ 理论扩散模型, CO₂ 脱气在碳循环中有重要作用^[14,23]。由图 4 可以发现, G1、G2 点 δ¹³C_{DIC} 值与脱气量总体上表现出一定的相关性。位于溪流下游 (G2) δ¹³C_{DIC} 值与脱气量有较显著正相关关系 (R² = 0.47, N = 7, P < 0.05), 这是由于溪流自上游沿流程的水体 CO₂ 脱气使得富含¹²C 的 CO₂ 气体优先从水中逸出, 这可能是使得下游地区 (G2) 水体 DIC 的¹³C 值比地下河出口地区 (G1) 偏高的主要原因。而地下河出口地区 (G1) δ¹³C_{DIC} 值与脱气量的相关性较差 (R² = 0.22, N = 8), 最可能原因为出口地区不断接受来自于地下河系统的 DIC 的影响, 因此水体 δ¹³C_{DIC} 值主要受控于地下河输出的 δ¹³C_{DIC} 值, 而其它因素影响较小。

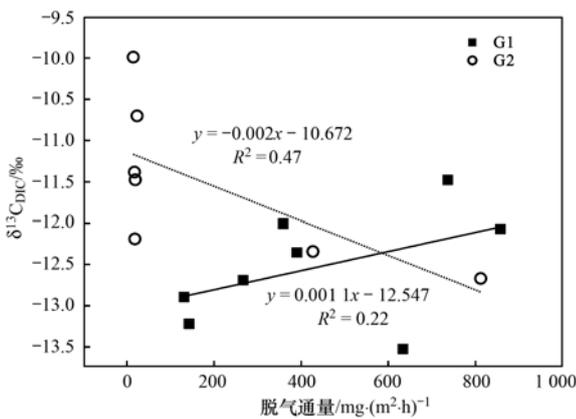


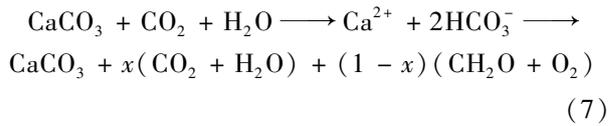
图 4 脱气通量与 δ¹³C_{DIC} 值的相关关系

Fig. 4 Correlation of CO₂ exchange fluxes and δ¹³C_{DIC}

(2) 水生植物光合作用与水体 δ¹³C_{DIC}

生物的光合作用和呼吸作用决定着生态系统中的碳氧平衡, 而在生物过程中起关键作用的监测指标为溶解氧 (DO), DO 作为光合作用、呼吸作用、水气交换的产物, 通过监测 DO 的变化能观测出生物水生生物新陈代谢过程对溪流溶解无机碳的变化

影响。



由方程 (7) 可知, 碳酸盐岩经岩溶作用产生的 HCO₃⁻, 经水生光合生物光合作用, 转化为有机碳, 并且产生 O₂。据前人研究^[17] 溪流中水体 DIC 同水体溶解氧和 δ¹³C_{DIC} 昼夜变化特征相反, 表明溪流中溶解无机碳浓度和 δ¹³C_{DIC} 值的昼夜变化受到水生植物生理作用的影响。由图 5, 两个监测点 DO 与 δ¹³C_{DIC} 值具有较弱的相关性 (G1 点 R² 为 0.13, G2 点 R² 为 0.27), 溪流上游地区的 G1 点主要受地下河系统的影响, 因此几乎没有相关性, 而 G2 点位于溪流下游地区, 溪流从地下河出口 G1 点经过 1.30 km 的流动到达 G2 点, 溪流内丰富的水生植物光合作用过程中消耗了溪流中的 DIC, 优先利用水体 DIC 的¹²C, 从而导致 δ¹³C_{DIC} 值偏重。

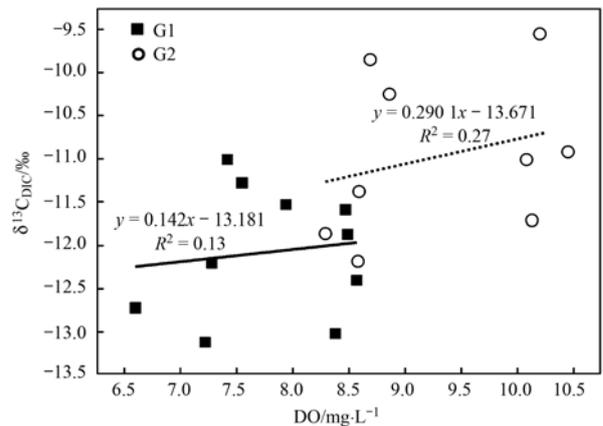


图 5 溪流 DO 与 δ¹³C_{DIC} 值的关系

Fig. 5 Correlation of DO and δ¹³C_{DIC}

4 结论

(1) 溪流上游与下游的 DIC 与 δ¹³C_{DIC} 都表现出明显的时空变化特征, 具体表现为 DIC 含量旱季高于雨季, 地下河出口地区要高于下游地区; 旱季 δ¹³C_{DIC} 值较雨季偏高, 下游地区的水体 δ¹³C_{DIC} 值较出口地区偏高。

(2) 通过分析溪流 δ¹³C_{DIC} 值以及研究区特殊的岩溶地质环境, 溪流 DIC 主要来源于碳酸盐岩溶蚀和土壤 CO₂, 外源酸对碳酸盐岩溶蚀也有一定的影响, 从而影响溪流中的 DIC 收支。

(3) 溪流 δ¹³C_{DIC} 值主要受碳酸盐岩溶蚀控制, 但 G1、G2 点 δ¹³C_{DIC} 值的差异说明除了碳酸盐岩溶蚀的影响外, 溪流脱气作用, 水生植物光合作用也会对溪

流 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值产生影响。

致谢: 感谢莫雪、刘文在野外取样及实验室分析工作中的帮助!

参考文献:

- [1] Meybeck M. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads [J]. *American Journal of Science*, 1987, **287**(5): 401-428.
- [2] Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, *et al.* Global silicate weathering and CO_2 consumption rates deduced from the chemistry of large rivers [J]. *Chemical Geology*, 1999, **159**(1-4): 3-30.
- [3] Yang C, Telmer K, Veizer J. Chemical dynamics of the "St. Lawrence" riverine system: $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, $\delta^{34}\text{S}_{\text{sulfate}}$, and dissolved $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, **60**(5): 851-866.
- [4] Wachniew P. Isotopic composition of dissolved inorganic carbon in a large polluted river: the Vistula, Poland [J]. *Chemical Geology*, 2006, **233**(3-4): 293-308.
- [5] Marfia A M, Krishnamurthy R V, Atekwana E A, *et al.* Isotopic and geochemical evolution of ground and surface waters in a karst dominated geological setting: a case study from Belize, Central America [J]. *Applied Geochemistry*, 2004, **19**(6): 937-946.
- [6] Hélie J F, Hillaire-Marcel C, Rondeau B. Seasonal changes in the sources and fluxes of dissolved inorganic carbon through the St. Lawrence River-isotopic and chemical constraint [J]. *Chemical Geology*, 2002, **186**(1-2): 117-138.
- [7] Andrews J E, Greenaway A M, Dennis P F, *et al.* Isotopic effects on inorganic carbon in a tropical river caused by caustic discharges from bauxite processing [J]. *Applied Geochemistry*, 2001, **16**(2): 197-206.
- [8] Aucour A M, Sheppard S M F, Guyomar O, *et al.* Use of ^{13}C to trace origin and cycling of inorganic carbon in the Rhône river system [J]. *Chemical Geology*, 1999, **159**(1-4): 87-105.
- [9] 李林立, 况明生, 张远瞩, 等. 典型表层岩溶泉水短时间尺度动态变化规律 [J]. *水科学进展*, 2006, **17**(2): 222-226.
- [10] Li L L, Kuang M S, Zhang Y Z, *et al.* Study on diurnal change of physico-chemistry of karst spring of epikarst system [J]. *Advances in Water Science*, 2006, **17**(2): 222-226.
- [11] Yan J H, Wang Y P, Zhou G Y, *et al.* Carbon uptake by karsts in the Houzhai Basin, southwest China [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2011, **116**(G4), doi: 10.1029/2011JG001686.
- [12] Zeng C, Liu Z H, Zhao M, *et al.* Hydrologically-driven variations in the karst-related carbon sink fluxes: insights from high-resolution monitoring of three karst catchments in Southwest China [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, **533**: 74-90.
- [13] Cane G, Clark I D. Tracing ground water recharge in an agricultural watershed with isotopes [J]. *Groundwater*, 1999, **37**(1): 133-139.
- [14] Li S L, Liu C Q, Li J, *et al.* Geochemistry of dissolved inorganic carbon and carbonate weathering in a small typical karstic catchment of Southwest China: isotopic and chemical constraints [J]. *Chemical Geology*, 2010, **277**(3-4): 301-309.
- [15] Li X D, Liu C Q, Harue M, *et al.* The use of environmental isotopic (C, Sr, S) and hydrochemical tracers to characterize anthropogenic effects on karst groundwater quality: a case study of the Shuicheng Basin, SW China [J]. *Applied Geochemistry*, 2010, **25**(12): 1924-1936.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 莫雪, 蒲俊兵, 袁道先, 等. 亚热带典型岩溶区地表溪流溶解无机碳昼夜变化特征及其影响因素 [J]. *第四纪研究*, 2014, **34**(4): 873-880.
- [21] Mo X, Pu J B, Yuan D X, *et al.* Diel variation and influence factors of dissolved inorganic carbon in a surface creek fed by a karst subterranean stream in subtropical area, SW China [J]. *Quaternary Sciences*, 2014, **34**(4): 873-880.
- [22] 刘文, 蒲俊兵, 章程. 一种便携式水陆两用温室气体采集设备 [P]. 中国专利: ZL 201420363633.4, 2014-11-05.
- [23] 李建鸿, 蒲俊兵, 孙平安, 等. 不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量研究 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(11): 4032-4042.
- [24] Li J H, Pu J B, Sun P A, *et al.* Summer Greenhouse gases exchange flux across water-air interface in three water reservoirs located in different geologic setting in Guangxi, China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(11): 4032-4042.
- [25] Hoffer-French K J, Herman J S. Evaluation of hydrological and biological influences on CO_2 fluxes from a karst stream [J]. *Journal of Hydrology*, 1989, **108**: 189-212.
- [26] Wigley T M L. WATSPEC: a computer program for determining the equilibrium speciation of aqueous solutions [C]. *Geo Abstracts for the British Geomorphological Research Group*, 1977.
- [27] Clark I D, Fritz P. *Environmental isotopes in hydrogeology* [M]. New York: Lewis Publishers, 1997. 352.
- [28] Parker S R, Poulson S R, Smith M G, *et al.* Temporal variability in the concentration and stable carbon isotope composition of dissolved inorganic and organic carbon in two Montana, USA rivers [J]. *Aquatic Geochemistry*, 2010, **16**(1): 61-81.
- [29] Telmer K, Veizer J. Carbon fluxes, $p\text{CO}_2$ and substrate weathering in a large northern river basin, Canada: carbon isotope perspectives [J]. *Chemical Geology*, 1999, **159**(1-4): 61-86.
- [30] Barth J A C, Cronin A A, Dunlop J, *et al.* Influence of carbonates on the riverine carbon cycle in an anthropogenically dominated catchment basin: evidence from major elements and stable carbon isotopes in the Lagan River (N. Ireland) [J]. *Chemical Geology*, 2003, **200**(3-4): 203-216.
- [31] Liu Z, Dreybrodt W, Wang H. 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): 162-172.
- [32] Cerling T E, Solomon D K, Quade J, *et al.* On the isotopic

- composition of carbon in soil carbon dioxide[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, **55**(11): 3403-3405.
- [28] Zhang J, Quay P D, Wilbur D O. Carbon isotope fractionation during gas-water exchange and dissolution of CO₂ [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, **59**(1): 107-114.
- [29] Han G L, Liu C Q. Strontium isotope and major ion chemistry of the rainwaters from Guiyang, Guizhou Province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **364**(1-3): 165-174.
- [30] Li S L, Calmels D, Han G L, *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.
- [31] 于爽, 何师意, 杨慧, 等. 酸雨对广西典型碳酸盐岩地区碳源效应研究[J]. *地球与环境*, 2012, **40**(1): 44-49.
Yu S, He S Y, Yang H, *et al.* Research on carbon source effect of acid rain in a typical carbonate rock area, Guangxi[J]. *Earth and Environment*, 2012, **40**(1): 44-49.
- [32] Smith M G, Parker S R, Gammons C H, *et al.* Tracing dissolved O₂ and dissolved inorganic carbon stable isotope dynamics in the Nyack aquifer: Middle Fork, Flathead River, Montana, USA [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, **75**(20): 5971-5986.
- [33] Li S L, Liu C Q, Tao F X, *et al.* Carbon biogeochemistry of ground water, Guiyang, Southwest China [J]. *Groundwater*, 2005, **43**(4): 494-499.
- [34] Tan F C, Strain P M. Sources, sinks and distribution of organic carbon in the St. Lawrence Estuary, Canada [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1983, **47**(1): 125-132.
- [35] 蒲俊兵. 重庆地区岩溶地下水溶解无机碳及其稳定同位素特征[J]. *中国岩溶*, 2013, **32**(2): 123-132.
Pu J B. Dissolved inorganic carbon and stable carbon isotope in karst subterranean streams in Chongqing, China [J]. *Carsologica Sinica*, 2013, **32**(2): 123-132.
- [36] 刘再华, 袁道先. 中国典型表层岩溶系统的地球化学动态特征及其环境意义[J]. *地质论评*, 2000, **46**(3): 324-327.
Liu Z H, Yuan D X. Features of geochemical variations in typical epikarst systems of China and their environmental significance [J]. *Geological Review*, 2000, **46**(3): 324-327.

CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing	YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (423)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China	CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (429)
Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM _{2.5} in Shengsi Region	CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, <i>et al.</i> (438)
Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Mt. Taishan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, <i>et al.</i> (445)
Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, <i>et al.</i> (453)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, <i>et al.</i> (461)
Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing	ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, <i>et al.</i> (469)
Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014	ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, <i>et al.</i> (476)
Variation Analysis of Daily PM _{2.5} Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou	GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, <i>et al.</i> (485)
Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (495)
Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong	FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> (502)
Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations	GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, <i>et al.</i> (510)
Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century	WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, <i>et al.</i> (517)
Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (527)
Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, <i>et al.</i> (535)
Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer	QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, <i>et al.</i> (547)
Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Minerization in the Water Level Fluctuating Zone	LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (555)
Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(III)-oxalate Complex in Lake Water	JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, <i>et al.</i> (563)
Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO	WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, <i>et al.</i> (572)
Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (580)
Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants	YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, <i>et al.</i> (589)
Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, <i>et al.</i> (600)
Experimental Research of Hg ²⁺ Removal by TiO ₂ /Bentonite Composite	TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, <i>et al.</i> (608)
Impact of Ammonia and H ₂ O ₂ on Bromate and Disinfection By-products Control	WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, <i>et al.</i> (616)
Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks	WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua, <i>et al.</i> (622)
Adsorptive Remediation of Cr(VI) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite	ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, <i>et al.</i> (629)
Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (640)
Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes	GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, <i>et al.</i> (647)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources	GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (654)
Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System	WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, <i>et al.</i> (665)
Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (672)
Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge	DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, <i>et al.</i> (679)
Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using <i>Mucor circinelloides</i>	GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, <i>et al.</i> (688)
Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge	WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, <i>et al.</i> (697)
Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City	WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (703)
Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China	CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, <i>et al.</i> (711)
Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes	YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (721)
Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil	YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, <i>et al.</i> (728)
Effects of <i>Rhodospseudomonas palustris</i> PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure	LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, <i>et al.</i> (735)
Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment	DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, <i>et al.</i> (743)
Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas	HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, <i>et al.</i> (752)
Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils	LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (769)
Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity	NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, <i>et al.</i> (783)
Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain	CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, <i>et al.</i> (792)
Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics	YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, <i>et al.</i> (802)
Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain	TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, <i>et al.</i> (809)
Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat	SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (815)
Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat	CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (825)
Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure	LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, <i>et al.</i> (832)
Sorption of <i>p</i> -Nitrophenol by Biochars of Corn cob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei (837)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2017年2月15日 第38卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 2 Feb. 15, 2017

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行

ISSN 0250-3301

