

E方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示  
李勳之, 姜榕, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心  
■ 出版 科学出版社



2022年2月

第43卷 第2期  
Vol.43 No.2

目次

综述

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示 ..... 李勛之, 姜蓉, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁 (577)  
再生水水质稳定性评价指标与体系 ..... 张馨怡, 魏东斌, 杜宇国 (586)

研究报告

兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源 ..... 黄文, 王胜利 (597)  
基于多种新型受体模型的PM<sub>2.5</sub>来源解析对比 ..... 王振宇, 李永斌, 郭凌, 宋志强, 许艳玲, 王丰, 梁维青, 史国良, 冯银厂 (608)  
华中地区夏季PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子污染特征及来源分析 ..... 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 程铨, 石明明, 许安, 李星谕, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (619)

淄博2021年元宵节PM<sub>2.5</sub>水溶性离子污染特征 ..... 陈巧, 吴丽萍, 徐勃, 张向炎, 李梦辉, 赵雪艳, 杨文 (629)

浙江省大气颗粒物PM<sub>2.5</sub>中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 ..... 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 王静, 何士冲 (639)

2001~2019年气象条件对江苏省PM<sub>2.5</sub>分布的影响 ..... 潘晨, 康志明 (649)

基于神经网络和数值模型的重点区域PM<sub>2.5</sub>预报比较分析 ..... 高愈霄, 汪巍, 黄永海, 王晓彦, 朱媛媛, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (663)

2015~2020年海南省臭氧时空变化及其成因分析 ..... 符传博, 徐文帅, 丹利, 佟金鹤 (675)

济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析 ..... 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 刘杨, 杜明月, 张文娟, 许宏宇, 范国兰, 公华林, 李青松, 李大秋, 高晓梅, 张丽娜 (686)

山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析 ..... 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 江春美, 张鹏程, 李灵婕, 赵世阳, 张书源 (696)

基于气团老化程度对挥发性有机物分类改善PMF源解析效果 ..... 朱玉凡, 陈强, 刘晓, 张瑞欣, 郭文凯 (707)

日照市夏季VOCs物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响 ..... 姚维杰, 王大玮, 谢付莹, 朱宏伟, 孟祥宇, 田雨, 刘航, 刘晓咏, 张宇婷, 雷山东, 孙业乐, 吴林, 潘小乐, 王自发 (714)

泰山大气卤代烃的长期变化趋势与来源 ..... 赵峰, 陈天舒, 董灿, 李洪勇, 刘子璐, 毕于健, 国兆新, 王新锋, 杨凌霄, 王韬, 王文兴, 薛丽坤 (723)

典型内燃叉车尾气挥发性有机物与正构烷烃的排放特征 ..... 周文钦, 李成, 刘俊文, 朱曼妮, 桂小亮, 余飞, 廖松地, 姜帆, 李光辉, 蒋斌, 郑君瑜 (735)

2000~2020年黄河流域植被时空演化驱动机制 ..... 田智慧, 任祖光, 魏海涛 (743)

西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响 ..... 徐森, 李思亮, 钟君 (752)

生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮化和淋失特征的影响 ..... 熊钰婷, 袁旭音, 周慧华, 高一丹, 汪宜敏 (762)

不同降雨条件下北运河河岸带类型对径流污染削减效果的影响 ..... 朱利英, 赵凯, 张俊亚, 王春荣, 魏源送 (770)

雨源型城市河流水污染特征及水质联合评价:以深圳龙岗河为例 ..... 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 姜参参, 吴伟业, 李志林, 李诗敏, 宿辉, 白志辉, 徐圣君, 庄绪亮 (782)

廊坊市区径流污染时空分布特征及来源解析 ..... 潘欣荣, 左剑恶, 张宇, 门聪, 张丽萍, 黄守斌 (795)

北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析 ..... 郭芝芝, 苏振华, 邱琰若, 郭道宇 (803)

河北省典型景观水体反硝化菌群落时空分布特征及驱动因素:以石家庄为例 ..... 陈召堂, 张紫薇, 张甜娜, 周石磊, 张艺冉, 董宛佳, 于明会, 张一凡, 张家丰 (813)

青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析 ..... 俞晓琴, 孟先强, 吴华武, 陈慧敏, 李宇阳, 朱俊羽, 郭燕妮, 姚磊 (826)

鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响 ..... 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 俞晓琴, 李宇阳, 朱俊羽, 韩龙飞, 周蕾, 周永强 (837)

鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征 ..... 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 聂明华, 丁明军, 鞠民, 刘赞 (847)

汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 ..... 李星谕, 李朋, 苏业旺, 石明明, 胡天鹏, 毛瑶, 刘力, 张雅, 邢新丽, 祁士华 (859)

基于核密度估计的城市基础要素与街尘营养元素含量特征关联 ..... 王子娇, 李叙勇 (867)

新冠疫情下武汉典型饮用水水源中DBPs污染特征与风险评估 ..... 张坤峰, 昌盛, 涂响, 付青, 杨光, 樊月婷, 孙兴滨 (878)

铁改性石英砂过滤协同控制饮用水含氮消毒副产物和条件致病菌 ..... 齐鹏, 胡春, 邢学群, 毕志浩, 李泽松 (887)

氮掺杂生物炭催化臭氧对于布洛芬的降解特性与机制 ..... 柴铨, 许路, 金鑫, 石炬, 吴晨曦, 金鹏康 (896)

环糊精多孔聚合物对水中染料分子的吸附性能及主客效应 ..... 赵传靓, 王子婕, 闫仪, 徐慧, 周俊垣, 杨利伟, 王东升 (907)

冷冻PN/A颗粒污泥快速活化过程中的污泥形态与菌群演化特征分析 ..... 黄子恒, 张立, 崔舒惠, 张绮英, 文言, 钱飞跃 (920)

不同阳离子聚丙烯酰胺有机脱水剂对污泥脱水性能的影响 ..... 冯齐云, 高宝玉, 岳钦艳, 石伟杰, 冯春晖, 周继柱, 王国瑞 (928)

云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价 ..... 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 张迪, 潘波 (936)

山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析 ..... 张丁, 黄蓉, 高雪松 (946)

地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索:以农业发达地区为例 ..... 鞠铁男, 雷梅 (957)

西南地质高背景区蔬菜Pb的安全生产阈值与土地质量类别划分 ..... 穆德苗, 孙约兵 (965)

典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价 ..... 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 彭锐, 石雪芳, 李峰 (975)

矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征 ..... 周鹏飞, 张世文, 罗明, 魏洪斌, 宋强, 方兵, 庄红娟, 陈弘扬 (985)

不同种植年限蔬菜大棚土壤特性、重金属累积和生态风险 ..... 任强, 孙瑞玲, 郑凯旋, 刘祎丹, 阮心玲, 王洋洋 (995)

温室与大田种植方式对胡萝卜生长过程中重金属吸收的影响 ..... 曹春, 任丹, 吕贞英, 张鹏, 李锦超, 陈勋文, 王俊坚 (1004)

两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全的影响 ..... 王港, 余海英, 李廷轩, 唐焯 (1015)

复合淋洗条件下农用地耕作层土壤去镉效率及其功能调节 ..... 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (1023)

产多胺细菌调控根际细菌群落阻控小麦Cd吸收效应 ..... 李晓哲, 覃善梅, 陈兆进, 张君, 姚伦广, 李娜, 鹿发虎, 韩辉 (1031)

土壤phoC和phoD微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 ..... 杨文娜, 余烁, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 王子芳, 高明 (1040)

刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系 ..... 李文杰, 张祯敏, 赵雅萍, 许森平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娟, 韩新辉 (1050)

中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征 ..... 焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (1059)

稻田与旱地土壤中真菌和细菌对秸秆碳的利用特征 ..... 邓少虹, 郑小东, 毛婉琼, 陈香碧, 胡亚军, 程爱武, 何寻阳, 苏以荣 (1069)

模拟及实际根系分泌物对镉污染土壤微生物群落的影响 ..... 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 赵庆庆, 卢媛, 孔学, 吕俊岗 (1077)

德兴铜矿区抗生素抗性基因污染特征及其驱动因子 ..... 韩柳, 楼倩, 乔敏, 刘梦婷, 钟家有, 丁惠君 (1089)

陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法 ..... 尉芳, 刘京, 夏利恒, 徐仲伟, 龙小翠 (1097)

长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力 ..... 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 沈根祥, 钱晓雍, 付侃, 高宗源, 王振旗 (1108)

《环境科学》征订启事(618) 《环境科学》征稿简则(761) 信息(685, 935, 956)

# 西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响

徐森, 李思亮\*, 钟君

(天津大学地球系统科学学院, 表层地球系统科学研究院, 天津 300072)

**摘要:** 河流溶解无机碳(DIC)作为流域碳循环的重要部分一直备受关注,其稳定同位素( $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ )能够反映DIC来源和转化过程,而其受土地利用变化的影响的研究还较为缺乏.为了研究喀斯特河流域水体DIC和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响因素,在典型喀斯特流域赤水河进行了河水样品采集与分析.赤水河流域上游主要分布碳酸盐岩而下游分布硅酸盐岩,且下游林地覆盖率较高,河水的元素组成揭示了流域上游河流水化学主要受碳酸盐岩风化作用控制,而下游部分支流主要受硅酸盐岩风化的影响.丰水期河流 $c(\text{DIC})$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的平均值分别为 $(1940 \pm 493) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(-9 \pm 1) \text{‰}$ ;枯水期 $c(\text{DIC})$ 偏高, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值更偏正,二者平均值分别为 $(2334 \pm 626) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(-7.3 \pm 1) \text{‰}$ .河流DIC主要受开放体系中碳酸盐岩风化作用控制,来源于碳酸盐矿物以及大气和土壤 $\text{CO}_2$ . $c(\text{DIC})$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值的季节差异反映了气候、水文和生物作用对DIC的调控,夏季生物碳的汇入和有机质降解是 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 偏负的主要控制因素,而较高径流导致的稀释效应是 $c(\text{DIC})$ 偏低的主要原因.流域下游硅酸盐岩和林地面积占比均最高的3个支流流域的河水在丰水期具有最高的溶解有机碳浓度 $[c(\text{DOC})]$ 、最低的 $c(\text{DIC})$ 和最偏负的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值.碳酸盐岩面积占比和丰水期( $R^2 = 0.52, P < 0.01$ )以及枯水期( $R^2 = 0.58, P < 0.01$ )的 $c(\text{DIC})$ 均具有较好的正相关关系,表明岩性是控制河水 $c(\text{DIC})$ 的主要因素.流经碳酸盐岩地区的河段,丰水期具有比枯水期低的 $c(\text{DIC})$ 和偏负的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值.而对于流经林地面积占比高、植被覆盖较好的非碳酸盐岩地区的河段,丰水期具有比枯水期高的 $c(\text{DIC})$ 和显著偏负的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值,表明DIC和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 在受岩性影响较小的情况下,受土地利用影响较大.

**关键词:** 喀斯特; 碳循环; 溶解无机碳(DIC); 溶解有机碳(DOC); 同位素; 土地利用

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)02-0752-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202106198

## Effects of Land Use on Riverine Dissolved Inorganic Carbon (DIC) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in a Karst River Basin, Southwestern China

XU Sen, LI Si-liang\*, ZHONG Jun

(Institute of Surface-Earth System Science, School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** As an important part of the riverine carbon cycle, dissolved inorganic carbon (DIC) has attracted continuous attention. The stable carbon isotope ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ ) of DIC can reflect its sources and transformations. However, the effects of land use on DIC and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  are rarely investigated. To study the influencing factors of DIC and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ , river water samples were collected and analyzed from the Chishui River basin, a typical karst river basin in southwestern China. The upper reaches of the Chishui River basin were predominantly underlain by carbonate sedimentary rocks, whereas the lower reaches contained mostly siliciclastic sedimentary rocks, and the forest coverage in the lower reaches was relatively high. The elemental compositions of the river water revealed that the hydrochemistry of rivers in the upper reaches of the basin was mainly controlled by carbonate weathering, whereas the hydrochemistry of some tributaries in the lower reaches was mainly affected by silicate weathering. During the wet season, the average values of  $c(\text{DIC})$  and the  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  value were  $(1940 \pm 493) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  and  $(-9 \pm 1) \text{‰}$ , respectively, whereas the  $c(\text{DIC})$  was relatively high, and the  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  value was more positive in the dry season, with the average values of  $(2334 \pm 626) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  and  $(-7.3 \pm 1) \text{‰}$ , respectively. The DIC of most samples was mainly controlled by carbonate weathering under an open system and was derived from carbonate minerals and atmospheric and soil  $\text{CO}_2$ . The seasonal variations in the  $c(\text{DIC})$  and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  values suggested that  $c(\text{DIC})$  was regulated by climate, hydrology, and biology. The increasing contribution of biological carbon to DIC in summer was the main cause of the more negative  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  value in the wet season, whereas the dilution effect of higher discharge was the main cause of the low  $c(\text{DIC})$  in the wet season. The samples from three tributaries in the lower reaches with the highest proportion of silicate and forest distribution had the highest dissolved organic carbon concentration  $[c(\text{DOC})]$ , the lowest  $c(\text{DIC})$ , and the most negative  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  value in the wet season. The proportion of carbonate distribution had positive correlations with  $c(\text{DIC})$  in the wet and dry seasons, indicating that lithology was the main controlling factor of  $c(\text{DIC})$ . The rivers draining the carbonate areas had a lower  $c(\text{DIC})$  and a more negative  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  value in the wet season than those in the dry season, whereas for the rivers draining non-carbonate areas with high forest coverage, the  $c(\text{DIC})$  was higher and the  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  value was significantly more negative in the wet season than those in the dry season. This implies that  $c(\text{DIC})$  and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  are significantly affected by land use when they are less affected by lithology.

**Key words:** karst; carbon cycle; dissolved inorganic carbon (DIC); dissolved organic carbon (DOC); isotope; land use

碳循环是碳元素在四大碳库(岩石圈、海洋、陆地生态系统和大气)之间的循环流动<sup>[1,2]</sup>.流域碳循环是指大气、陆地生态系统和岩石圈碳库中的碳经过复杂的过程流入河流,同时在流域内发生着不同碳库之间的碳交换,并最终到达海洋碳库的过

收稿日期: 2021-06-23; 修订日期: 2021-07-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFA0601000); 国家自然科学基金项目(41571130072)

作者简介: 徐森(1993~),男,博士研究生,主要研究方向为流域碳循环, E-mail: xusen@tju.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: siliang.li@tju.edu.cn

程<sup>[3,4]</sup>. 在此过程中, 不同来源的碳在物理、化学、生物和人为活动等作用下, 以不同的形态进入河流并且伴随着河流的运移发生一系列的生物地球化学反应过程<sup>[1,3,5,6]</sup>.

陆生植物光合作用和岩石风化是大气 CO<sub>2</sub> 的两个重要碳汇, 其中碳酸风化碳酸盐岩和硅酸盐岩生成 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 能够固定大气的 CO<sub>2</sub>, 在碳的生物地球化学循环中起着重要的作用<sup>[7-9]</sup>. 碳酸风化碳酸盐岩过程生成的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 中有一半的碳来自大气, 一半的碳来自碳酸盐岩, 而碳酸风化硅酸盐岩过程生成的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 中的碳全部来自大气, 此外强酸(硫酸和硝酸)风化产生的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 中的碳均来自岩石<sup>[2,7,9-12]</sup>. 因此不同岩性类型的区域不同类型的化学风化对河流溶解无机碳(DIC)的浓度及其稳定碳同位素( $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ )组成具有不同的影响<sup>[7-10,12]</sup>.

河流 DIC 和  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  可提供河流碳循环所涉及的碳源和过程的信息, DIC 的运移既可以反映陆地过程, 也可反映河流中的生物地球化学过程. DIC 包括来自化学风化产生的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 也包括土壤呼吸产生的 CO<sub>2</sub> 向河流的运输等, 这些产生和运输过程均受到区域水文、地质、土地利用、土壤和气候的调控<sup>[13-17]</sup>. 水生植物光合作用和呼吸作用也可以产生和利用 CO<sub>2</sub> 并改变  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  信号<sup>[8,13]</sup>. 岩石的化学风化强度受到温度、生态系统呼吸、矿物饱和指数、水岩反应时间和接触面积等因素控制<sup>[7,16-19]</sup>. 陆地绝大多数地表覆盖土壤, 土壤属性等受上覆土地利用的影响, 土壤呼吸产生较高浓度的 CO<sub>2</sub> 随土壤水下渗与碳酸盐岩反应, 是岩石风化的主要驱动因子之一<sup>[16]</sup>. 土地利用类型同时能够影响下垫面温度和降雨的截留、入渗和蒸腾等过程<sup>[14,20,21]</sup>, 从而对

域径流产生影响, 影响岩石风化强度和 DIC 的运输<sup>[14,18,22]</sup>. 上述这些使得土地利用方式的改变能够影响 DIC 的产生和运输.

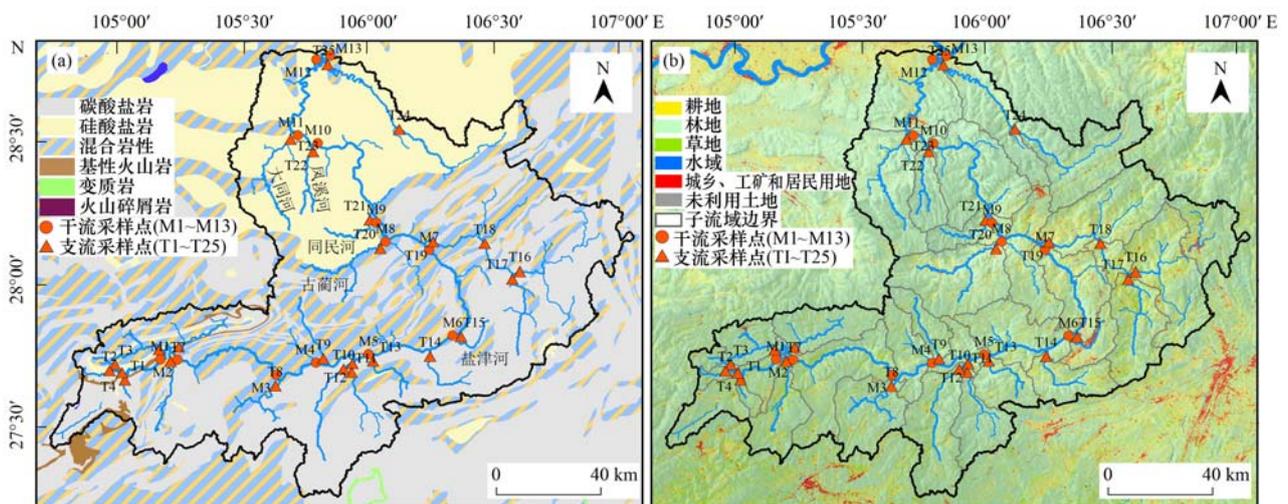
赤水河是长江流域少有的未受强烈人为活动干扰的一级支流, 其干流未修筑水利大坝, 至今仍保持着自然流动的状态, 有助于研究流域碳循环过程. 本研究通过丰水期和枯水期采样, 分析了流经不同土地利用和岩性地区的河段的水化学和  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  组成特征, 通过探讨岩性和土地利用对河流 DIC 和  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  的影响, 以期加深对流域碳循环过程和影响机制的认识.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究以中国西南典型喀斯特流域赤水河流域(27°15'~28°50' N, 104°44'~107°01' E)为例(图1). 赤水河是长江上游南岸一级支流, 处于云、贵、川这3省的接壤地带, 河流全长约445 km, 流域面积约18 852 km<sup>2</sup>. 流域气候温暖湿润, 降水量从上中游至下游逐渐递增, 多年平均降水量在800~1 200 mm, 年均气温为11~13℃<sup>[23]</sup>. 河流的年均流量为252 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, 年均输沙率为255 kg·s<sup>-1</sup>, 其中约66%的年径流量出现在6~9月的雨季<sup>[23]</sup>. 流域的林地、耕地、草地和城乡-工矿-居民用地分别占流域总面积的73.4%、19.6%、5%和1.2%<sup>[20]</sup>.

赤水河流域上游地层主要是震旦系灯影组的白云岩, 主要矿产有磷矿、重晶石、萤石和铅锌矿等<sup>[24]</sup>; 中游地层主要以寒武系、奥陶系、志留系、二叠系、三叠系和侏罗系的灰岩类、白云岩类为主, 其次有泥岩、砂页岩和含煤岩组, 还有相当数量的玄武



修改自文献[12]

图1 研究区采样点位置示意

Fig. 1 Sample locations in the Chishui River basin

岩出露,主要矿产有煤(桐梓等)、硫化铁、磷和重晶石等;下游地层单一,构造简单,主要为侏罗-白垩系的紫红色粉砂岩和泥岩,另有少量油页岩<sup>[25]</sup>. 流域碳酸盐岩分布面积占流域总面积的 44.6%,其次为碳酸盐岩夹硅酸盐岩或互层[图 1(a)中混合岩性],占流域总面积的 30.1%,硅酸盐岩主要分布在流域下游,占流域总面积的 24.5%<sup>[26]</sup>.

## 1.2 样品采集与分析

河水样品采集于 2017 年 7 月和 2018 年 1 月,涵盖干流和流域主要支流,两次采样均在相同地点采集了 13 个干流河水样品和 25 个支流河水样品,采样点分布如图 1 所示<sup>[12]</sup>. 河水基本水质参数采用多参数水质分析测定仪在野外现场测定. 样品采集后于 24 h 内用 0.45  $\mu\text{m}$  醋酸纤维滤膜(天津津腾)过滤,存储于聚乙烯瓶密封避光冷藏保存. 河水碱度用稀盐酸溶液滴定,由于河水 pH 值介于 7.4~9.1 之间,因此  $\text{HCO}_3^-$  是 DIC 的主要组成成分,可以用滴定得到的碱度来表征水中  $c(\text{HCO}_3^-)$  和  $c(\text{DIC})$ <sup>[12]</sup>.  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值采用 Li 等<sup>[8]</sup>的研究改进的测试方法测定,水样中的 DIC 利用磷酸转化为  $\text{CO}_2$ ,然后利用真空管提取纯化并使用 MAT 252 质谱仪测定  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值,结果相对于标准 V-PDB 使用符号  $\delta$  表示,测试精度为 0.1‰. 阳离子  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和溶解性  $\text{SiO}_2$  浓度使用美国 Varian 公司 Vista MPX 型电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定;阴离子  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度使用美国 Dionex 公司 ICS-90 型离子色谱仪测定,精度优于 5%<sup>[12]</sup>. 样品溶解有机碳浓度 [ $c(\text{DOC})$ ] 使用 TOC 仪测定(OI Analytical Aurora 1030 TOC)<sup>[20]</sup>. Sr 元素浓度使用电感耦合等离子体质谱仪测定(ICP-MS, Agilent 7700)<sup>[26]</sup>. 样品测定过程中定期加入标准、平行和空白样品以保证数据质量.

## 1.3 碳酸盐矿物饱和指数和二氧化碳分压计算

本研究使用 WATSPEC 软件计算矿物饱和指数(saturation index, SI)[包括方解石饱和指数( $\text{SI}_c$ )和白云石饱和指数( $\text{SI}_d$ )]和二氧化碳分压( $p\text{CO}_2$ )<sup>[27]</sup>. 计算所用到的基本水化学参数包括采样点水样的  $T$ 、pH,以及  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Cl}^-$  这 7 种主要离子的浓度数据. SI 和  $p\text{CO}_2$  的计算公式分别如下:

$$\text{SI} = \lg(\text{IAP}/K_{\text{sp}}) \quad (1)$$

式中, IAP 为相关离子的活度积,  $K_{\text{sp}}$  为特定温度下矿物的溶度积常数.

$$p\text{CO}_2 = \frac{c(\text{HCO}_3^-) \times c(\text{H}^+)}{K_1 K_{\text{CO}_2}} \quad (2)$$

式中,  $K_1$  和  $K_{\text{CO}_2}$  分别代表  $\text{H}_2\text{CO}_3$  和  $\text{CO}_2$  的平衡常数.

## 2 结果与分析

### 2.1 河流 DIC 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的组成特征

赤水河流域河水的离子组成表明,流域上游河流水化学主要受碳酸盐风化作用控制,而下游部分支流受硅酸盐岩风化作用控制<sup>[12,28]</sup>. 河水  $c(\text{DIC})$  较高,在丰水期和枯水期变化范围分别为 662~3452  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和 615~4054  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值分别为  $(1940 \pm 493)$   $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $(2334 \pm 626)$   $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ <sup>[12,28]</sup>. 与其它流经中国西南喀斯特地区的河流相比,赤水河流域  $c(\text{DIC})$  接近乌江 [ $(2447 \pm 112)$   $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ]<sup>[6]</sup> 和北盘江 [ $(2754 \pm 823)$   $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ]<sup>[10]</sup>,高于西江 [ $(1645 \pm 277)$   $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ]<sup>[15]</sup>,低于后寨河小流域 [ $(3760 \pm 560)$   $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ]<sup>[8]</sup>. 赤水河丰水期  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  的变化范围为  $-11.2\text{‰} \sim -7.4\text{‰}$ ,平均值为  $(-9.0 \pm 1)\text{‰}$ ,而枯水期  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  的变化范围为  $-9.5\text{‰} \sim -5.7\text{‰}$ ,平均值为  $(-7.3 \pm 1)\text{‰}$ . 与乌江 [ $(-12.1 \pm 1.3)\text{‰}$ ]<sup>[6]</sup>、北盘江 [ $(-9.4 \pm 2.1)\text{‰}$ ]<sup>[10]</sup>、西江 [ $(-13.3 \pm 2)\text{‰}$ ]<sup>[15]</sup> 和后寨河小流域 [ $(-9.8 \pm 1.7)\text{‰}$ ]<sup>[8]</sup> 相比,赤水河流域河水 DIC 更富集  $^{13}\text{C}$ .

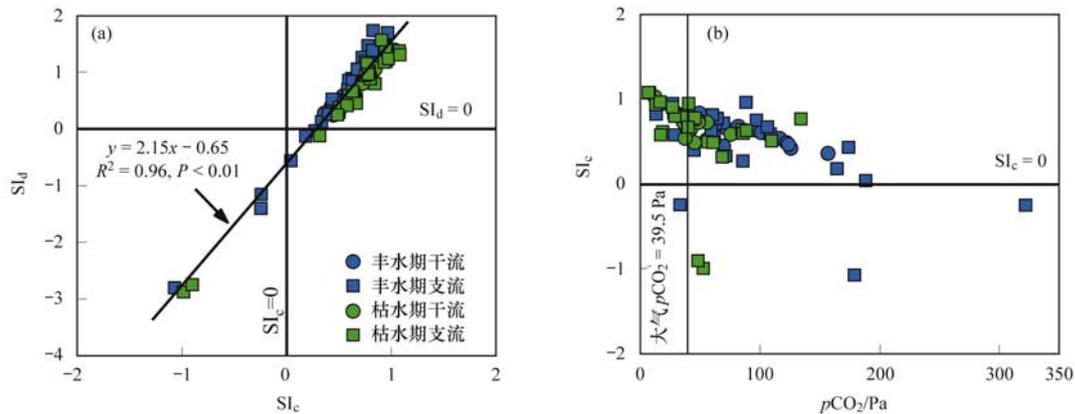
### 2.2 碳酸盐矿物饱和指数与二氧化碳分压

#### 2.2.1 碳酸盐矿物饱和指数

矿物饱和指数是反映矿物溶解和沉淀方向的指标,表征了矿物在水溶液中的状态. 赤水河流域河水样品  $\text{SI}_c$  在丰水期和枯水期的平均值分别为  $0.51 \pm 0.39$  和  $0.64 \pm 0.42$ .  $\text{SI}_d$  在丰水期和枯水期的平均值分别为  $0.57 \pm 0.88$  和  $0.62 \pm 0.9$ . 这些结果表明大部分河水样品都处于过饱和状态,方解石和白云石都有发生沉淀的趋势,碳酸盐的过饱和和沉淀会导致河流  $\text{CO}_2$  脱气并对河流  $c(\text{DIC})$  和  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值产生影响<sup>[8,29]</sup>.  $\text{SI}_c$  与  $\text{SI}_d$  具有良好的正相关关系[图 2(a)],表明方解石与白云石发生同步溶解. 部分样品  $\text{SI}_c > 0$  而  $\text{SI}_d < 0$ ,可能与区域地层中白云石和方解石的分布有关,另一方面可能是白云石溶解产物  $\text{Mg}^{2+}$  转化为沉淀,导致白云石趋于溶解<sup>[30]</sup>.

#### 2.2.2 二氧化碳分压

丰水期河水中  $p\text{CO}_2$  的变化范围为 13.2~321.9 Pa,平均值为  $(91.9 \pm 58.9)$  Pa,枯水期  $p\text{CO}_2$  的变化范围为 6.7~134.2 Pa,平均值为  $(46.2 \pm 27.5)$  Pa,绝大多数河水的  $p\text{CO}_2$  都要高于大气(39.5 Pa)[图 2(b)]<sup>[29]</sup>,存在河流向大气排放  $\text{CO}_2$  的可能,也进一步表明河流  $\text{CO}_2$  的脱气过程是大气  $\text{CO}_2$  的潜在来源,并会导致水体碳同位素的显著分馏.

图2 赤水河流域河水  $SI_c$  与  $SI_d$  和  $pCO_2$  关系Fig. 2 Relationships between the calcite saturation index and dolomite saturation index and between the calcite saturation index and  $pCO_2$  in the Chishui River basin

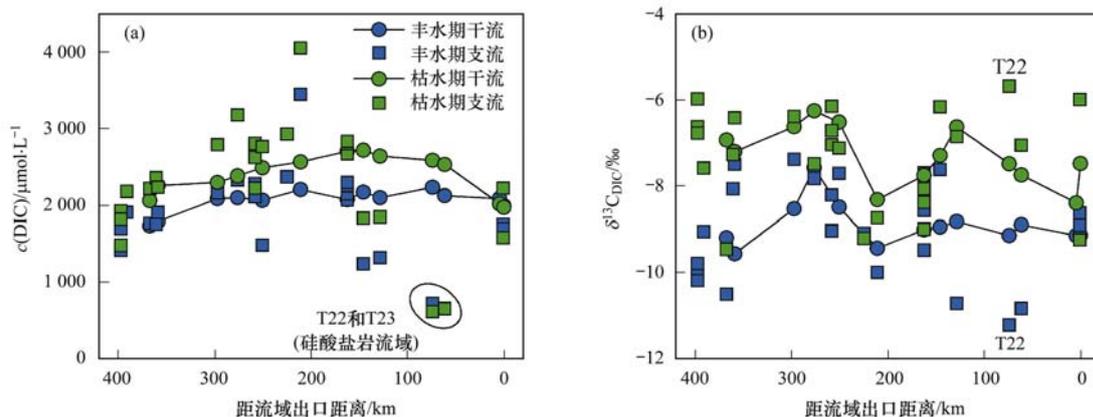
### 3 讨论

#### 3.1 DIC 和 $\delta^{13}C_{DIC}$ 的时空变化特征与影响因素

河流 DIC 受自然和人为过程控制: ① 化学风化, 碳酸盐岩和硅酸盐岩的风化将消耗大气  $CO_2$  产生 DIC<sup>[2,7,9]</sup>; ② 生物效应, 包括土壤呼吸和河流内部生物地球化学作用<sup>[16,31]</sup>; ③ 人类扰动, 如土地利用变化和污水排放<sup>[13,14]</sup>; ④ 水-气界面  $CO_2$  交换<sup>[8,29,32,33]</sup> 和 ⑤ 气候和水文变化<sup>[6,15]</sup>. 丰水期和枯水期河水  $c(DIC)$  与  $\delta^{13}C_{DIC}$  值的空间变化如图 3 所示. 丰水期河水  $c(DIC)$  较枯水期偏低, 可能与丰水期径流增加导致的稀释效应有关, 而  $\delta^{13}C_{DIC}$  值在丰水期更偏负, 反映了夏季强烈生物活动导致的生物碳汇入的影响<sup>[6]</sup>. 来自土壤有机质的氧化分解和河流有机质原位降解产生的  $CO_2$  会使水体中  $\delta^{13}C_{DIC}$  偏负<sup>[1,8,31]</sup>. 丰水期  $\delta^{13}C_{DIC}$  最低值位于支流风溪河 (T22), 最高值位于支流堡合河 (T8); 枯水期  $\delta^{13}C_{DIC}$  最低值位于支流威信河 (T5), 最高值位于支流风溪河 (T22). 风溪河  $\delta^{13}C_{DIC}$  值的极负和极正应与其流域

分布碎屑岩 (100%) 且植被覆盖率较高有关 (流域林地占比最高, 为 96.5%). 从沿程变化来看,  $\delta^{13}C_{DIC}$  值从流域上游至下游呈现出较大的波动趋势, 其中丰水期仁怀市 (M6) 下游河段  $\delta^{13}C_{DIC}$  值变化较为平稳, 枯水期  $\delta^{13}C_{DIC}$  则具有先上升后下降的趋势. 整体上上游河水  $\delta^{13}C_{DIC}$  值要高于下游, 可能与流域上游分布碳酸盐岩而下游分布硅酸盐岩, 来自碳酸盐岩风化的富  $^{13}C$  的 DIC 的比重减少, 而来自硅酸盐岩风化的 DIC 的比重增加有关, 也可能与流域下游林地覆盖率高于上游, 生物量较高, 土壤  $CO_2$  对 DIC 贡献较大有关.

$c(DIC)$  和  $c(DOC)$  在丰水期呈负相关 [ $R^2 = 0.27$ ,  $P < 0.01$ , 图 4 (a)], 且硅酸盐岩面积占比和林地面积占比同时最高的 3 个流域 [同民河 (T21)、风溪河 (T22) 和大同河 (T23)] 具有最高的  $c(DOC)$ 、最低的  $c(DIC)$  和最偏负的  $\delta^{13}C_{DIC}$  值, 表明岩性和土地利用分别影响河流  $c(DIC)$  和  $c(DOC)$ . 从流域上游至下游, 由于岩性由碳酸盐岩转变为硅酸盐岩且森林覆盖率逐渐增加, 因此河水样品具有较高的  $c(DOC)$  和较低的  $c(DIC)$ . 枯水期由于生物

图3 赤水河流域河水 DIC 和  $\delta^{13}C_{DIC}$  的空间变化Fig. 3 Spatial variations in DIC concentration and the  $\delta^{13}C_{DIC}$  value of river waters in the Chishui River basin

作用减弱且地表径流减少,  $c(\text{DIC})$  和  $c(\text{DOC})$  因此没有明显的相关性. 枯水期  $c(\text{DIC})$  和  $p\text{CO}_2$  的正相关关系 [ $R^2 = 0.27$ ,  $P < 0.01$ , 图 4(b)], 表明此时河流 DIC 可能主要受水生植物新陈代谢作用(光合与呼吸)和高  $p\text{CO}_2$  的地下水汇入的影响, 由于枯水期降雨减少, 河流径流较少且流速慢, 河水主要靠地下水补给. 丰水期 DIC 的影响因素可能更复杂, 因此与  $p\text{CO}_2$  没有显著的相关性. 丰水期  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  和  $c(\text{DIC})$

具有较弱的正相关关系[图 5(a)], 和  $c(\text{DOC})$  具有负相关关系 [ $R^2 = 0.3$ ,  $P < 0.01$ , 图 6(a)], 则可能主要与流域上游和下游岩性和土地利用具有差异有关. 枯水期  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  与  $c(\text{DIC})$  [ $R^2 = 0.23$ ,  $P < 0.01$ , 图 5(a)] 和  $p\text{CO}_2$  [ $R^2 = 0.49$ ,  $P < 0.01$ , 图 6(b)] 的负相关关系表明枯水期 DIC 可能主要受河流生物作用影响, 也可能与丰水期存储的富含生物碳的地下水在枯水期流出有关.

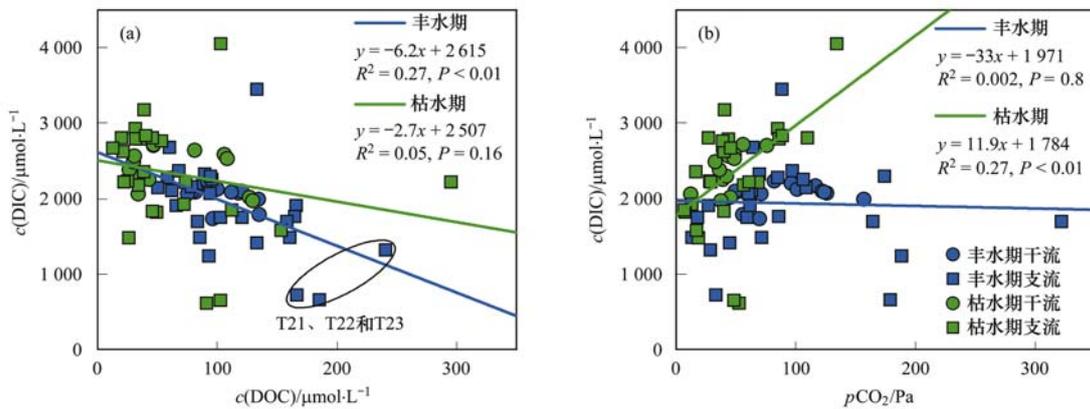


图 4 赤水河流域河水 DIC 与 DOC 和  $p\text{CO}_2$  关系

Fig. 4 Relationships between DIC and DOC and between DIC and  $p\text{CO}_2$  in the Chishui River basin

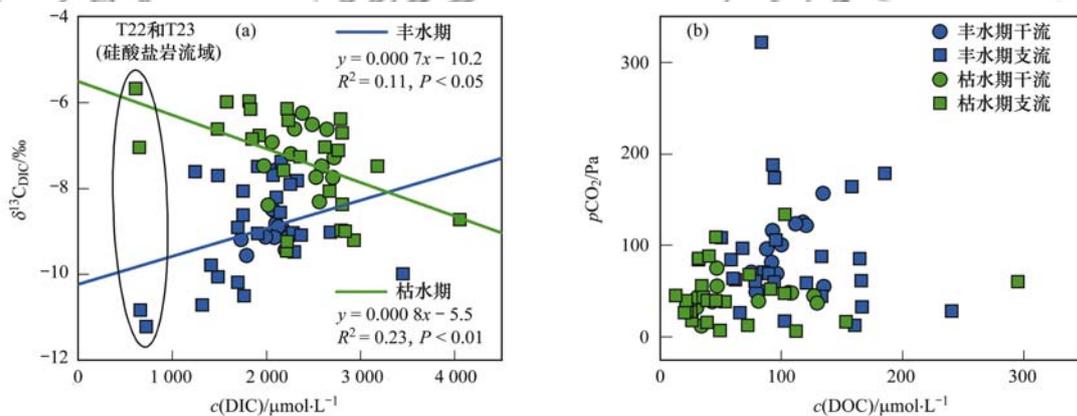


图 5 赤水河流域河水 DIC 和  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  以及 DOC 和  $p\text{CO}_2$  关系

Fig. 5 Relationships between DIC and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  and between DOC and  $p\text{CO}_2$  in the Chishui River basin

### 3.2 河流 DIC 来源的 $\delta^{13}\text{C}$ 示踪

地表水体中 DIC 的主要来源包括碳酸盐矿物、大气  $\text{CO}_2$ 、土壤  $\text{CO}_2$ 、地球深部  $\text{CO}_2$ 、水生生物呼吸和人类活动的输入<sup>[1,4,34,35]</sup>. 不同碳源的  $\delta^{13}\text{C}$  具有不同的值域, 自然界  $\delta^{13}\text{C}$  总变化大于 100‰, 范围约为  $-90\text{‰} \sim 20\text{‰}$ , 地球上物质碳同位素组成的总体变化规律是: ①氧化碳富集  $^{13}\text{C}$ , 还原碳亏损  $^{13}\text{C}$ ; ②大气  $\text{CO}_2$  的平均  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-7\text{‰}$ ; ③海相沉积碳酸盐岩的  $\delta^{13}\text{C}$  变化范围很小 ( $-1\text{‰} \sim 2\text{‰}$ , 平均  $0\text{‰}$ ); ④深源火成碳酸盐岩和金刚石的  $\delta^{13}\text{C}$  值大多集中在  $(-5 \pm 2)\text{‰}$ <sup>[36]</sup>.  $\delta^{13}\text{C}$  的变化与碳的来源和各种生物地球化学过程分馏有关, 河流体系中稳定碳同位素的分馏

主要包括: 生物的呼吸作用使得水体中稳定碳同位素偏负, 碳酸钙的过饱和沉淀使得水体中稳定碳同位素偏负, 光合作用使得水体富集偏重的稳定碳同位素, 水体中的脱气作用使得水体稳定碳同位素偏重<sup>[1,4,8,32,33,35]</sup>.

大气和土壤  $\text{CO}_2$  能够被地表径流和雨水溶解进入到河流当中, 或者通过参与岩石风化转化为  $\text{HCO}_3^-$  进入到河流, 此外, 硫酸等外源酸参与的碳酸盐岩风化也会产生  $\text{HCO}_3^-$  进入到河流<sup>[8,12]</sup>. 赤水河流域大气降水的大背景为酸性, 因此雨水对  $\text{HCO}_3^-$  的贡献可以忽略, 此外河水当中的  $p\text{CO}_2$  远高于大气, 是大气  $\text{CO}_2$  的一个潜在源, 因此大气  $\text{CO}_2$  的溶

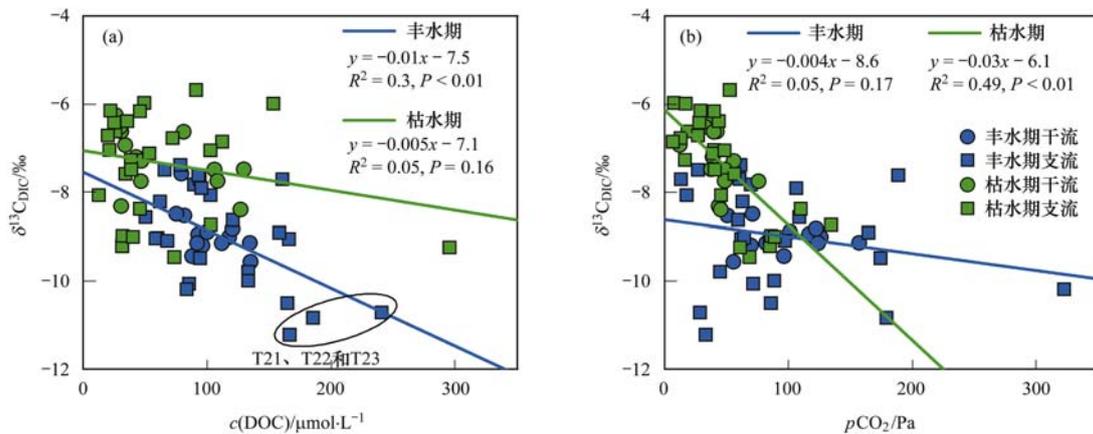
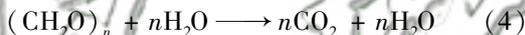
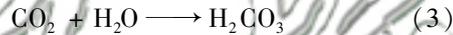


图6 赤水河流域河水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 与 DOC 和  $p\text{CO}_2$  关系

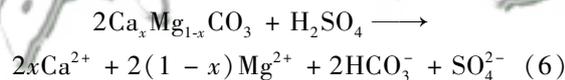
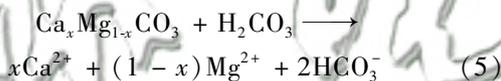
Fig. 6 Relationships between  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  and DOC and between  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  and  $p\text{CO}_2$  in the Chishui River basin

解也可以忽略. 河流当中的 DIC 来源复杂, 且处于开放体系中, 不同碳库之间的碳交换处于动态的过程,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值也受到多种复杂过程影响. 为了初步定量河流当中的 DIC 来源, 进行了简化计算, 认为其主要来自土壤  $\text{CO}_2$  的溶解、有机质的氧化分解和碳酸盐岩风化, 其来源可以用以下方程式来表示<sup>[8]</sup>.

土壤  $\text{CO}_2$  的溶解和有机质的氧化分解:



碳酸和硫酸参与的碳酸盐岩风化:



土壤中的  $\text{CO}_2$  主要源于植物残体分解和植物根部呼吸作用, 其碳同位素组成最终反映了原始有机质的同位素组成, 与区域植被类型 (C3 植物与 C4 植物) 和生物量有关<sup>[11]</sup>. 赤水河流域主要植物类型为 C3 植物, 贵州地区 C3 植物的  $\delta^{13}\text{C}$  值约为  $-28.5\text{‰}$ <sup>[37]</sup>, 土壤有机质氧化产生  $\text{CO}_2$  几乎不发生同位素分馏, 但  $\text{CO}_2$  在扩散至土壤溶液当中会发生约  $4.4\text{‰}$  的分馏<sup>[38]</sup>, 因此可近似认为流域土壤  $\text{CO}_2$  的  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-24.1\text{‰}$ . 海相沉积碳酸盐岩的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值约为  $0\text{‰}$ <sup>[39]</sup>. 碳酸溶解碳酸盐岩产生的  $\text{HCO}_3^-$  有一半来自碳酸盐岩, 另一半来自土壤  $\text{CO}_2$ , 因此可认为产生的  $\text{HCO}_3^-$  的  $\delta^{13}\text{C}$  值约为  $-12\text{‰}$ ; 硫酸等外源酸溶解碳酸盐岩产生的  $\text{HCO}_3^-$  全部来自碳酸盐岩, 因此产生的  $\text{HCO}_3^-$  的  $\delta^{13}\text{C}$  值约为  $0\text{‰}$ ; 碳酸溶解硅酸盐岩形成的  $\text{HCO}_3^-$  全部来自土壤  $\text{CO}_2$ , 因此可认为产生的  $\text{HCO}_3^-$  的  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-24.1\text{‰}$ . 可见赤水河流域河水  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值更靠近碳酸风化碳酸盐岩所产生的  $\text{HCO}_3^-$  的  $\delta^{13}\text{C}$  值.

根据以上分析, 河流中 DIC 的来源可认为主要为土壤  $\text{CO}_2$  和碳酸盐矿物的溶解. 通过同位素平衡模型可以粗略计算河流中 DIC 来源端元贡献的比例, 计算公式如下:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}} = \delta^{13}\text{C}_{\text{Carb}} \times F_{\text{Carb}} + \delta^{13}\text{C}_{\text{Bio}} \times (1 - F_{\text{Carb}}) \quad (7)$$

式中,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  为河水样品的实测值,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{Carb}}$  和  $\delta^{13}\text{C}_{\text{Bio}}$  分别代表了碳酸盐岩和土壤  $\text{CO}_2$  的  $\delta^{13}\text{C}$  值,  $F_{\text{Carb}}$  代表了来自碳酸盐岩的 DIC 的比例. 结果表明来自碳酸盐岩的 DIC 的比例高于来自土壤  $\text{CO}_2$  的 DIC 的比例, 且丰水期来自碳酸盐岩的 DIC 的比例低于枯水期. 如果只存在碳酸风化碳酸盐岩, 则河水 DIC 至多有 50% 来自碳酸盐岩, 而河水来自碳酸盐岩的 DIC 的比例普遍大于 50%, 且上游来自碳酸盐岩的 DIC 的比例要高于下游, 表明存在硫酸等外源酸参与溶解碳酸盐岩, 且对上游碳酸盐岩溶解的影响大于下游.

### 3.3 土地利用对 DIC 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响

DIC 的形成主要受土壤生物地球化学过程控制, 该过程与流域岩性、气候和人类活动, 以及土壤的物理和生物特性, 如土壤水分、土壤有机质浓度和微生物活动强度有关,  $c(\text{DIC})$  和  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  的变化反映了碳的地球化学行为和地球化学循环特征<sup>[1,8,34,35]</sup>, 因此水体  $c(\text{DIC})$  和  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  对于响应不同地质和土地利用条件具有重要的指示意义. 同民河 (T21)、凤溪河 (T22) 和大同河 (T23) 是赤水河流域下游的 3 条支流, 这 3 条支流所在流域碎屑岩分布面积比例在所有采样点对应流域中最高 [分别为 96.8%、100% 和 80.6%, 图 1(a)], 通过 3 条河流的水化学组成来看 (表 1), 凤溪河与大同河较为接近, 而同民河河水  $c(\text{DIC})$  和  $\rho(\text{Sr})$  相对较高, 受碳酸盐岩溶解影响可能相对较大. 3 条河流所在流域

林地面积占比也最高(分别为 89.4%、96.5% 和 88.5%)。3 条河流中凤溪河和大同河受人类活动影响较小,城乡居住用地面积占比较低,而同民河受人类活动影响稍高,河流出口采样点处为农村生活区。同民河、凤溪河和大同河河水的  $c(\text{DIC})$  均相对较低,其中凤溪河和大同河的  $c(\text{DIC})$  在所有样品中最低[图 3(a)]。丰枯期凤溪河的  $c(\text{DIC})$  分别为  $725 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $615 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,大同河的  $c(\text{DIC})$  分别为  $662 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $650 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,约为流域  $c(\text{DIC})$  均值的三分之一。这 3 条河流流经地区均主要分布硅酸盐岩且林地覆盖率较高,而同民河因碳酸盐岩分布面积比例略高,其  $c(\text{DIC})$  要显著高于凤溪河和大同河,尤其是在枯水期,  $c(\text{DIC})$  高于后者两倍以上。流域碳酸盐岩面积占比[包括图 1(a)中碳酸盐岩和混合岩性]和丰水期 ( $R^2 =$

$0.52, P < 0.01$ ) 以及枯水期 ( $R^2 = 0.58, P < 0.01$ ) 的  $c(\text{DIC})$  均具有较好的正相关关系[图 7(a)],表明岩性是控制河水  $c(\text{DIC})$  的主要因素。流域碳酸盐岩面积占比和丰水期  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  的正相关关系 ( $R^2 = 0.35, P < 0.01$ ) 表明,丰水期碳酸盐岩对河流 DIC 的贡献较大[图 7(b)]。丰水期受降雨、气温和生物活动等影响,流域内水岩反应增加,碳酸盐岩的溶蚀作用增强,并且受到强酸侵蚀的作用可能更强。此外丰水期  $\text{CO}_2$  的脱气作用也会使  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  偏正。碳酸盐岩流域虽然在枯水期也具有较高的  $c(\text{DIC})$ ,而此时河流径流减少,流速变缓,河流水生植物生物作用和地下水汇入对 DIC 的贡献可能较大,因此  $c(\text{DIC})$  和  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  呈负相关[图 5(a)],而碳酸盐岩面积占比和  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值没有明显的关系[图 7(b)]。

表 1 同民河、凤溪河和大同河河水的  $c(\text{DIC})$ 、 $\rho(\text{Sr})$  和  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值

Table 1 The  $c(\text{DIC})$ ,  $\rho(\text{Sr})$ , and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  value of river waters from the Tongmin River, Fengxi River, and Datong River

流域	林地/%	丰水期			枯水期		
		$c(\text{DIC})/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho(\text{Sr})/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}/\text{‰}$	$c(\text{DIC})/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho(\text{Sr})/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}/\text{‰}$
同民河(T21)	89.4	1 320	373	-10.71	1 850	430	-6.85
凤溪河(T22)	96.5	725	146	-11.22	615	158	-5.68
大同河(T23)	88.5	662	118	-10.83	650	133	-7.05

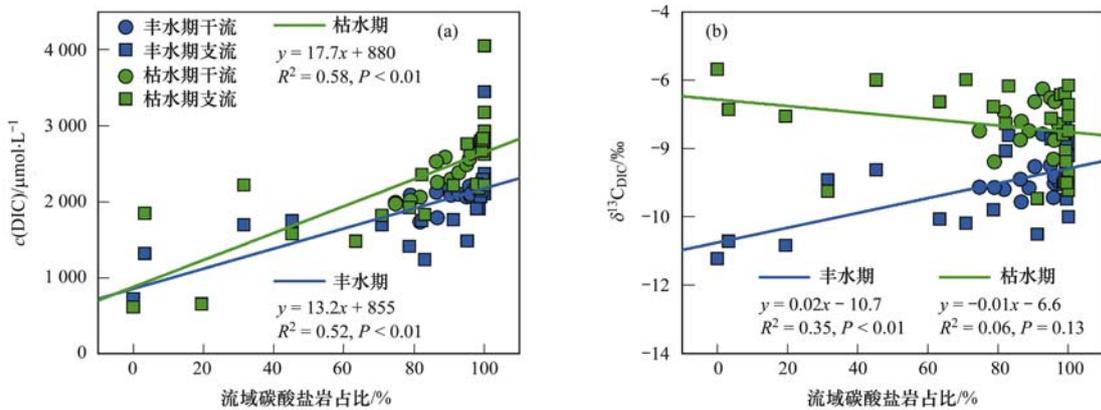


图 7 流域碳酸盐岩面积占比与 DIC 和  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  关系

Fig. 7 Relationships between carbonate distribution ratio and DIC and between carbonate distribution ratio and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  in the Chishui River basin

赤水河流域处于亚热带湿润季风气候区,雨热同期,夏季微生物的剧烈活动会增加土壤中有机质的分解速度,轻碳的大量进入会增加河水 DIC 的轻碳比率,从而出现丰水期  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值偏负的现象<sup>[1,6,8]</sup>。因此赤水河流域除少数明显受人类活动干扰的支流外,其余河流均为丰水期  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值较枯水期偏负,且除凤溪河和大同河等下游几个河流外,几乎所有河流的  $c(\text{DIC})$  都在枯水期更高。丰水期较低的  $c(\text{DIC})$  通常解释为雨季较高径流量的稀释<sup>[6]</sup>,而对于凤溪河和大同河,丰水期具有比枯水期高的  $c(\text{DIC})$  和显著偏负的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值[图 5(a)],表明河流 DIC 在受流

域自身地质背景影响较小(硅酸盐岩风化对河流 DIC 贡献较小)的情况下,较高的林地覆被使得夏季土壤较高的  $\text{CO}_2$  量随雨水溶解进入河流,因此即使在雨季河流也具有比枯水期高的  $c(\text{DIC})$ 。同样丰水期  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值明显偏负的还有同民河,但同民河丰水期  $c(\text{DIC})$  并没有高于枯水期,从流域属性来看可能有两方面原因,一是同民河 DIC 受碳酸盐岩风化影响比凤溪河和大同河更大,  $c(\text{DIC})$  和  $\rho(\text{Sr})$  明显高于其他两条河流可以证明这一点,二是流域内具有相对较高的人类活动强度,而前者可能是更主要的原因。流域林地面积占比和丰水期 ( $R^2 = 0.47, P <$

0.01) 以及枯水期 ( $R^2 = 0.52$ ,  $P < 0.01$ ) 的  $c(\text{DIC})$  均具有负相关关系 [图 8 (a)], 可能与碳酸盐岩流域石漠化程度较高林地覆盖面积较低有关<sup>[1]</sup>. 另一方面林地面积占比较高的流域生物量更高, 丰水期土壤呼吸产生的 DIC 对河流的贡献更大而同时碳酸盐岩的贡献又较小, 因此林地面积占比和丰水期  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值具有负相关关系 [ $R^2 = 0.21$ ,  $P < 0.01$ , 图 8 (b)], 而枯水期由于径流补给条件不同, 二者表现出不同的关系.

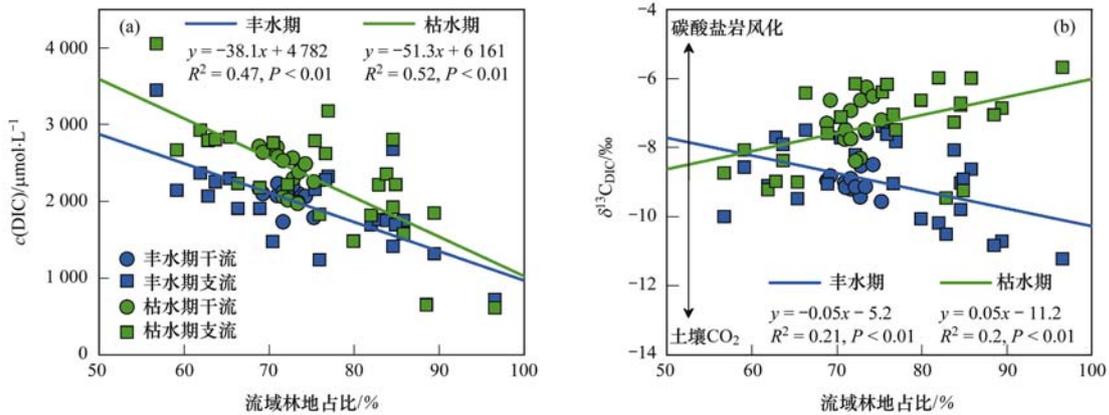


图 8 流域林地面积占比与 DIC 和  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  关系

Fig. 8 Relationships between forest distribution ratio and DIC and between forest distribution ratio and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  in the Chishui River basin

#### 4 结论

(1) 赤水河水化学主要受碳酸盐岩风化作用控制, 丰水期和枯水期  $c(\text{DIC})$  平均值分别为  $(1940 \pm 493) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $(2334 \pm 626) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  平均值分别为  $(-9 \pm 1)\text{‰}$  和  $(-7.3 \pm 1)\text{‰}$ , 与众多流经中国西南喀斯特地区的河流相比, 河水 DIC 更富集  $^{13}\text{C}$ .

(2)  $c(\text{DIC})$  与  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值的季节变化表明, 气候、水文和生物作用同时控制 DIC 的来源和生物地球化学过程. 丰水期受生物碳贡献增加的影响,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值更偏负, 枯水期由于地表径流减少, 流速变缓, DIC 受水生植物新陈代谢作用和地下水的汇入的影响较显著. 外源酸溶解碳酸盐岩的季节变化也可能影响河流  $c(\text{DIC})$  和  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值.

(3) 流域碳酸盐岩面积占比和丰水期 ( $R^2 = 0.52$ ,  $P < 0.01$ ) 以及枯水期 ( $R^2 = 0.58$ ,  $P < 0.01$ ) 的  $c(\text{DIC})$  均具有较好的正相关关系, 且和丰水期  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  具有正相关关系 ( $R^2 = 0.35$ ,  $P < 0.01$ ). 在气候条件相似的背景下, 流经非碳酸盐岩地区的河段的  $c(\text{DIC})$  要显著低于流经碳酸盐岩地区的河段, 流经碳酸盐岩地区的河段在丰水期具有比枯水期低的  $c(\text{DIC})$  和偏负的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值.

(4) 流域林地面积占比和丰水期 ( $R^2 = 0.47$ ,  $P$

基于以上分析可见, 岩性是控制河水  $c(\text{DIC})$  的主要因素, 在气候条件相似的背景下, 流经非碳酸盐岩地区的河段的  $c(\text{DIC})$  要显著低于流经碳酸盐岩地区的河段. 流经碳酸盐岩地区的河段, 丰水期具有比枯水期低的  $c(\text{DIC})$  和偏负的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值. 而对于流经林地面积占比高、植被覆盖较好的非碳酸盐岩地区的河段, 丰水期具有比枯水期高的  $c(\text{DIC})$  和显著偏负的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值, 表明 DIC 和  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  在受岩性影响较小的情况下, 受土地利用影响较大.

< 0.01) 以及枯水期 ( $R^2 = 0.52$ ,  $P < 0.01$ ) 的  $c(\text{DIC})$  均具有负相关关系. 流经林地面积占比高、植被覆盖较好的非碳酸盐岩地区的河段, 在丰水期具有比在枯水期高的  $c(\text{DIC})$  和显著偏负的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值, 表明 DIC 和  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  在受岩性影响较小的情况下, 受土地利用影响较大.

#### 参考文献:

- [1] 刘丛强. 生物地球化学过程与地表物质循环: 西南喀斯特流域侵蚀与生源要素循环[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] Berner R A. The long-term carbon cycle, fossil fuels and atmospheric composition[J]. Nature, 2003, 426(6964): 323-326.
- [3] Wehrli B. Conduits of the carbon cycle[J]. Nature, 2013, 503(7476): 346-347.
- [4] 钟君. 长江上游流域化学风化和碳生物地球化学过程——水文条件影响机制[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2017.
- [5] 李思亮, 钟君, 李彩, 等. 中国西南河流碳、氮运移机制及其对水文条件变化的响应: 以西江为例[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2019, 38(3): 499-507.
- [6] Li S L, Zhong J, Li C, et al. The transport processes of carbon and nitrogen under various hydrological conditions in the carbonate-rich areas, southwest China: example from the Xijiang River[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2019, 38(3): 499-507.
- [7] Zhong J, Li S L, Tao F X, et al. Sensitivity of chemical

- weathering and dissolved carbon dynamics to hydrological conditions in a typical karst river[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1), doi: 10.1038/srep42944.
- [ 7 ] Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, *et al.* Global silicate weathering and CO<sub>2</sub> consumption rates deduced from the chemistry of large rivers[J]. *Chemical Geology*, 1999, **159**(1-4): 3-30.
- [ 8 ] 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.
- [ 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 ] 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.
- [ 11 ] Spence J, Telmer K. The role of sulfur in chemical weathering and atmospheric CO<sub>2</sub> fluxes: evidence from major ions,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ , and  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  in rivers of the Canadian Cordillera[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, **69**(23): 5441-5458.
- [ 12 ] Xu S, Li S L, Su J, *et al.* Oxidation of pyrite and reducing nitrogen fertilizer enhanced the carbon cycle by driving terrestrial chemical weathering [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **768**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144343.
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] Raymond P A, Oh N H, Turner R E, *et al.* Anthropogenically enhanced fluxes of water and carbon from the Mississippi River [J]. *Nature*, 2008, **451**(7177): 449-452.
- [ 15 ] Zhong J, Li S L, Liu J, *et al.* Climate variability controls on CO<sub>2</sub> consumption fluxes and carbon dynamics for monsoonal rivers: evidence from Xijiang River, southwest China [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, **123**(8): 2553-2567.
- [ 16 ] Romero-Mujalli G, Hartmann J, Börker J. Temperature and CO<sub>2</sub> dependency of global carbonate weathering fluxes-Implications for future carbonate weathering research [J]. *Chemical Geology*, 2019, **527**, doi: 10.1016/j.chemgeo.2018.08.010.
- [ 17 ] Gaillardet J, Calmels D, Romero-Mujalli G, *et al.* Global climate control on carbonate weathering intensity[J]. *Chemical Geology*, 2019, **527**, doi: 10.1016/j.chemgeo.2018.05.009.
- [ 18 ] Tipper E T, Bickle M J, Galy A, *et al.* The short term climatic sensitivity of carbonate and silicate weathering fluxes: insight from seasonal variations in river chemistry [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, **70**(11): 2737-2754.
- [ 19 ] West A J, Galy A, Bickle M. Tectonic and climatic controls on silicate weathering [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, **235**(1-2): 211-228.
- [ 20 ] Xu S, Li S L, Zhong J, *et al.* Spatial scale effects of the variable relationships between landscape pattern and water quality: example from an agricultural karst river basin, Southwestern China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, **300**, doi: 10.1016/j.agee.2020.106999.
- [ 21 ] Allan J D. Landscapes and riverscapes: the influence of land use on stream ecosystems[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2004, **35**: 257-284.
- [ 22 ] Zhao M, Liu Z H, Li H C, *et al.* Response of dissolved inorganic carbon (DIC) and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  to changes in climate and land cover in SW China karst catchments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015, **165**: 123-136.
- [ 23 ] 翟红娟, 邱凉. 赤水河流域水资源保护与开发利用[J]. *环境科学与管理*, 2011, **36**(8): 38-40.  
Zhai H J, Qiu L. Water resources protection and development of Chishui River region [J]. *Environmental Science and Management*, 2011, **36**(8): 38-40.
- [ 24 ] 耿金, 陈建生, 张时音. 赤水河上游流域水化学变化与离子成因分析[J]. *水文*, 2013, **33**(1): 44-50.  
Geng J, Chen J S, Zhang S Y. Analysis of hydro-chemical changes and genesis of major ions in upper reach of Chishui River [J]. *Journal of China Hydrology*, 2013, **33**(1): 44-50.
- [ 25 ] 罗进, 安艳玲, 吴起鑫, 等. 赤水河中下游冬季河水化学空间分布特征分析 [J]. *地球与环境*, 2014, **42**(3): 297-305.  
Luo J, An Y L, Wu Q X, *et al.* Spatial distribution of surface water chemical components in the middle and lower reaches of the Chishui River Basin [J]. *Earth and Environment*, 2014, **42**(3): 297-305.
- [ 26 ] Xu S, Lang Y C, Zhong J, *et al.* Coupled controls of climate, lithology and land use on dissolved trace elements in a karst river system[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, **591**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125328.
- [ 27 ] Wigley T M. WATSPEC: a computer program for determining the equilibrium speciation of aqueous solutions, F, 1977 [C]. *Geo-Abstracts for the British Geomorphological Research Group*.
- [ 28 ] 徐森, 李思亮, 钟君, 等. 赤水河流域水化学特征与岩石风化机制[J]. *生态学杂志*, 2018, **37**(3): 667-678.  
Xu S, Li S L, Zhong J, *et al.* Hydrochemical characteristics and chemical weathering processes in Chishui River Basin [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(3): 667-678.
- [ 29 ] Raymond P A, Hartmann J, Lauerwald R, *et al.* Global carbon dioxide emissions from inland waters [J]. *Nature*, 2013, **503**(7476): 355-359.
- [ 30 ] 史婷婷. 岩溶流域水循环过程碳汇效应研究——以湖北香溪河流域为例[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2012.  
Shi T T. The carbon sequestration effect of water cycle in a karst basin: A case study of Xiangxi River Basin, Hubei [D]. Wuhan: China University of Geosciences, Wuhan, 2012.
- [ 31 ] Zhong J, Wallin M B, Wang W F, *et al.* Synchronous evaporation and aquatic primary production in tropical river networks [J]. *Water Research*, 2021, **200**, doi: 10.1016/j.watres.2021.117272.
- [ 32 ] Doctor D H, Kendall C, Sebestyen S D, *et al.* Carbon isotope fractionation of dissolved inorganic carbon (DIC) due to outgassing of carbon dioxide from a headwater stream [J]. *Hydrological Processes*, 2008, **22**(14): 2410-2423.
- [ 33 ] Zhang J, Quay P D, Wilbur D O. Carbon isotope fractionation during gas-water exchange and dissolution of CO<sub>2</sub> [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, **59**(1): 107-114.
- [ 34 ] 李思亮, 刘从强, 陶发祥, 等. 碳同位素和水化学在示踪贵阳地下水碳的生物地球化学循环及污染中的应用[J]. *地球化学*, 2004, **33**(2): 165-170.  
Li S L, Liu C Q, Tao F X, *et al.* Chemical and stable carbon isotopic compositions of the ground waters of Guiyang City, China: implications for biogeochemical cycle of carbon and contamination[J]. *Geochimica*, 2004, **33**(2): 165-170.
- [ 35 ] Aucour A M, Sheppard S M F, Guyomar O, *et al.* Use of <sup>13</sup>C to trace origin and cycling of inorganic carbon in the Rhône river

- system[J]. *Chemical Geology*, 1999, **159**(1-4): 87-105.
- [36] 郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [37] 朱书法. 贵州典型陆地生态系统土壤中有有机碳含量及碳同位素组成[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2006.
- Zhu S F. Organic carbon content and carbon isotope composition of soil from typical terrestrial ecosystem of Guizhou province[D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [38] 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.
- [39] Clark I D, Fritz P. Environmental isotopes in hydrogeology[M]. New York: CRC Press, 1997.

## 《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站([www.hjcx.ac.cn](http://www.hjcx.ac.cn))进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:  
期刊:作者(外文也要姓名列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:[hjcx@cees.ac.cn](mailto:hjcx@cees.ac.cn);网址:[www.hjcx.ac.cn](http://www.hjcx.ac.cn)

## CONTENTS

A Comparative Study of Soil Environmental Standards for Agricultural Land Among Different Countries and Its Implication for China	LI Xu-zhi, JIANG Rong, WANG Guo-qing, <i>et al.</i>	( 577 )
Evaluation Parameters and System for Reclaimed Water Quality Stability	ZHANG Xin-yi, WEI Dong-bin, DU Yu-guo	( 586 )
Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Atmospheric Deposition During Heating and Non-heating Period in Lanzhou	HUANG Wen, WANG Sheng-li	( 597 )
PM <sub>2.5</sub> Source Apportionment Based on a Variety of New Receptor Models	WANG Zhen-yu, LI Yong-bin, GUO Ling, <i>et al.</i>	( 608 )
Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Pollution in PM <sub>2.5</sub> During Summer in Central China	SU Ye-wang, LIU Wei-jie, MAO Yao, <i>et al.</i>	( 619 )
Pollution Characteristics of Water-soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> During the Lantern Festival of 2021 in Zibo City	CHEN Qiao, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i>	( 629 )
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Perfluorinated Compounds in PM <sub>2.5</sub> in Zhejiang Province	LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, <i>et al.</i>	( 639 )
Impact of Meteorological Conditions on PM <sub>2.5</sub> in Jiangsu Province from 2001 to 2019	PAN Chen, KANG Zhi-ming	( 649 )
Comparison and Analysis of PM <sub>2.5</sub> Forecast in Key Areas Based on the Neural Network Model and Numerical Model	GAO Yu-xiao, WANG Wei, HUANG Yong-hai, <i>et al.</i>	( 663 )
Temporal and Spatial Variations in Ozone and Its Causes over Hainan Province from 2015 to 2020	FU Chuan-bo, XU Wen-shuai, DAN Li, <i>et al.</i>	( 675 )
Ozone Formation and Key VOCs of a Continuous Summertime O <sub>3</sub> Pollution Event in Ji'nan	SUN Xiao-yan, ZHAO Min, SHEN Heng-qing, <i>et al.</i>	( 686 )
Pollution Characteristic and Control Factor Analysis of Atmospheric Ozone During Summer Typical Periods in Linyi, Shandong	YANG Xue, AN Xin-yue, LIU Yu-qi, <i>et al.</i>	( 696 )
Improved Performance of PMF Source Apportionment for Volatile Organic Compounds Based on Classification of VOCs' Aging Degree in Air Mass	ZHU Yu-fan, CHEN Qiang, LIU Xiao, <i>et al.</i>	( 707 )
Spatial Distribution Characteristics of VOCs and Its Impact on Ozone Formation Potential in Rizhao City in Summer	YAO Wei-jie, WANG Da-wei, XIE Fu-ying, <i>et al.</i>	( 714 )
Long-term Trends and Sources of Atmospheric Halocarbons at Mount Taishan, Northern China	ZHAO Feng, CHEN Tian-shu, DONG Can, <i>et al.</i>	( 723 )
Emission Characteristics of VOCs and <i>n</i> -alkanes from Diesel Forklifts	ZHOU Wen-qin, LI Cheng, LIU Jun-wen, <i>et al.</i>	( 735 )
Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020	TIAN Zhi-hui, REN Zu-guang, WEI Hai-tao	( 743 )
Effects of Land Use on Riverine Dissolved Inorganic Carbon (DIC) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in a Karst River Basin, Southwestern China	XU Sen, LI Si-liang, ZHONG Jun	( 752 )
Effects of Biochar Addition on Soil Nitrogen Mineralization and Leaching Characteristics in Riparian Zone of Taihu Lake	XIONG Yu-ting, YUAN Xu-yin, ZHOU Hui-hua, <i>et al.</i>	( 762 )
Impacts of Riparian Buffer Zone Type on Reduction in Runoff Pollution in the North Canal River Under Different Rainfall Events	ZHU Li-ying, ZHAO Kai, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i>	( 770 )
Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen	BI Ye-liang, WANG Hua-cai, XIA Bing, <i>et al.</i>	( 782 )
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Runoff Pollution in Langfang City	PAN Xin-rong, ZUO Jian-e, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	( 795 )
Analysis on Diversity of Plankton Microbial Community in the Beijing-Tianjin-Hebei Section of the North Canal River	GUO Zhi-zhi, SU Zhen-hua, DI Yan-ming, <i>et al.</i>	( 803 )
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Bacterial Community Structure from Landscape Water in Hebei Province: Taking Shijiazhuang as Example	CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i>	( 813 )
Source and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Watershed of Lake Qinghai	YU Xiao-qin, MENG Xian-qiang, WU Hua-wu, <i>et al.</i>	( 826 )
Influences of Hydrological Scenarios on the Bioavailability, Fate, and Balance of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Poyang	GUO Yan-ni, YAO Xiao-long, CHEN Hui-min, <i>et al.</i>	( 837 )
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Sediments from Poyang Lake	LUO Yan-qing, WAN Zhi-wei, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	( 847 )
Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Tangxun Lake	LI Xing-yu, LI Peng, SU Ye-wang, SHI Ming-ming, <i>et al.</i>	( 859 )
Identifying Relationship Between Nutrient Contents in Road-Deposited Sediment and Urban Basic Elements Based on Kernel Density Estimation	WANG Zi-qiao, LI Xu-yong	( 867 )
Pollution Characteristics and Risk Assessment of DBPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan Under the COVID-19 Pandemic	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, TU Xiang, <i>et al.</i>	( 878 )
Synergistic Control of Nitrogenous Disinfection By-products and Opportunistic Pathogens in Drinking Water by Iron-Modified Quartz Sand Filtration	QI Peng, HU Chun, XING Xue-ci, <i>et al.</i>	( 887 )
Degradation Characteristics and Mechanism of Ibuprofen by Ozone Catalyzed by Nitrogen-Doped Biochar	CHAI Cheng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	( 896 )
Adsorption Properties and Host-guest Effects of Porous Cyclodextrin Polymers for Dye Molecules in Water	ZHAO Chuan-liang, WANG Zi-jie, YAN Yi, <i>et al.</i>	( 907 )
Characterization of Sludge Morphology and Bacterial Community Evolution in the Rapid Activation of Freeze-stored PV/A Granular Sludge	HUANG Zi-heng, ZHANG Li, CUI Shu-hui, <i>et al.</i>	( 920 )
Effect of Different Cationic Polyacrylamide Organic Dehydrating Agents on Sludge Dewatering Performance	FENG Qi-yun, GAO Bao-yu, YUE Qin-yan, <i>et al.</i>	( 928 )
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in a Small Watershed of a Mining Area in Yunnan	LIU Yang, HE Zhao-hui, NIU Xue-kui, <i>et al.</i>	( 936 )
Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain	ZHANG Ding, HUANG Rong, GAO Xue-song	( 946 )
Geo-accumulation Index Method to Optimize the Evaluation Method of Polymetallic Environment Quality: Taking Developed Agricultural Areas as an Example	JU Tie-nan, LEI Mei	( 957 )
Safety Production Threshold and Land Quality Classification of Vegetable Pb in High Geological Background Area of Southwest China	MU De-miao, SUN Yue-bing	( 965 )
Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area	HUANG Zhong-ting, YI Sheng-wei, CHEN Bei-bei, <i>et al.</i>	( 975 )
Characteristics of Plant Diversity and Heavy Metal Enrichment and Migration Under Different Ecological Restoration Modes in Abandoned Mining Areas	ZHOU Peng-fei, ZHANG Shi-wen, LUO Ming, <i>et al.</i>	( 985 )
Soil Properties, Heavy Metal Accumulation, and Ecological Risk in Vegetable Greenhouses of Different Planting Years	REN Qiang, SUN Rui-ling, ZHENG Kai-xuan, <i>et al.</i>	( 995 )
Effects of Greenhouse and Open-field Cultivation on Heavy Metal Uptake During Carrot Growth	CAO Chun, REN Dan, LÜ Zhen-ying, <i>et al.</i>	( 1004 )
Effects of Different Amendments on Cadmium Accumulation in Rice Safety in Cadmium-Contaminated Farmland Under Two Flooding Treatments	WANG Gang, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, <i>et al.</i>	( 1015 )
Effect of Composite Leaching on Cadmium Removal Efficiency in Plow Layer Soil of Agricultural Land and Its Functional Regulation	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i>	( 1023 )
Polyamine-producing Bacteria Regulated the Community Structure of Rhizosphere Bacteria and Reduced the Absorption of Cd in Wheat	LI Xiao-zhe, QIN Shan-mei, CHEN Zhao-jin, <i>et al.</i>	( 1031 )
Responses of Soil <i>PhoC</i> and <i>PhoD</i> Gene Microbial Communities to the Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	( 1040 )
Changes in Soil Microbial Carbon-Degrading Enzymes and Their Relationships with Carbon Pool Components During the Restoration Process of <i>Robinia pseudoacacia</i>	LI Wen-jie, ZHANG Zhen-jiao, ZHAO Ya-ping, <i>et al.</i>	( 1050 )
Soil Enzyme Stoichiometric Characteristics of <i>Pinus massoniana</i> Plantations at Different Stand Ages in Mid-subtropical Areas	JIAO Peng-yu, GUO Wen, CHEN Ze-long, <i>et al.</i>	( 1059 )
Characteristics of Microbial Utilization for Crop Residue-Derived C in Paddy and Upland Soils	DENG Shao-hong, ZHENG Xiao-dong, MAO Wan-qiong, <i>et al.</i>	( 1069 )
Influence of Artificial Root Exudates and Actual Root Exudates on the Microbial Community in Pyrene-contaminated Soil	HAN Bo-yuan, ZHANG Wen, HU Fang-yu, <i>et al.</i>	( 1077 )
Pollution Characteristics and Driving Factors of Antibiotic Resistance Genes in Dexing Copper Mine	HAN Liu, LOU Qian, QIAO Min, <i>et al.</i>	( 1089 )
Spatial Prediction Method of Farmland Soil Organic Matter in Weibei Dryland of Shaanxi Province	WEI Fang, LIU Jing, XIA Li-heng, <i>et al.</i>	( 1097 )
Emission Characteristics, Transformation Mechanism, and Reduction Potential of Ammonia Emissions from a Crop Rotation System in Yangtze River Delta	XU Chang, MIAO Wen-liang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	( 1108 )