

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第7期

Vol.36 No.7

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年12月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析	李莉, 蔡蓓琳, 周敏 (2327)
长三角冬季一次霾过程气溶胶及其水溶性离子的区域分布特征	王曼婷, 朱彬, 王红磊, 薛国强, 何俊, 徐宏辉, 曹锦飞 (2337)
北京城区大气 PM _{2.5} 主要化学组分构成研究	刘保献, 杨懂艳, 张大伟, 陈添, 赵红帅, 陈圆圆, 陆皓昀 (2346)
2014年春季山东省 PM _{2.5} 跨界输送研究	贾海鹰, 程念亮, 何友江, 陈云波, 杜晓惠, 单晓丽 (2353)
燃煤电厂产生和排放的 PM _{2.5} 中水溶性离子特征	马子珍, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥, 邓建国, 段雷 (2361)
南京夏季城市冠层大气 CO ₂ 浓度时空分布规律的观测	高韵秋, 刘寿东, 胡凝, 王淑敏, 邓力琛, 于洲, 张圳, 李旭辉 (2367)
北京市机动车尾气排放因子研究	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2374)
北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力	张维康, 王兵, 牛香 (2381)
长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算	丁青青, 魏伟, 沈群, 孙予罕 (2389)
基于区域循环模型 IAP-N 的安徽省农用地 N ₂ O 排放量估算	韩云芳, 韩圣慧, 严平 (2395)
不同源汇信息提取方法对区域 CO ₂ 源汇估算及其季节变化的影响评估	张芳, 周凌晔, 王玉诏 (2405)
实测/预测辽河铬(VI)水生生物基准与风险评估	王晓南, 闫振广, 刘征涛, 张聪, 王伟莉 (2414)
博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价	张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清 (2422)
岩溶泉水化学性质及 δ ¹³ C _{DIC} 影响因素	赵瑞一, 吕现福, 刘子琦, 吕春艳 (2430)
柳江流域柳州断面水化学特征及无机碳汇通量分析	原雅琼, 何师意, 于爽, 孙平安, 王艳雪, 武招云, 李新桂, 谢明鲜, 刘文, 李瑞, 张华生 (2437)
重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价	庆旭瑶, 任玉芬, 吕志强, 王效科, 庞容, 邓睿, 孟龄, 马慧雅 (2446)
三峡库区消落带土壤邻苯二甲酸二丁酯静态释放特征	王法, 王强, 木志坚, 杨志丹, 宋娇艳 (2453)
干湿循环对三峡支流消落带沉积物中可转化态氮及其形态分布的影响	林俊杰, 张帅, 杨振宇, 何立平, 周依, 张倩茹 (2459)
天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究	王斌, 马健, 王银亚, 尹湘江 (2465)
西大海湖沉积物营养盐垂直分布特征变化分析	段木春, 肖海丰, 臧淑英 (2472)
草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价	杨敏, 张晟, 刘朔孺 (2480)
宁波三江口水域原核生物群落结构分析	胡安谊, 李姜维, 杨晓永, 王弘杰, 于昌平 (2487)
全氟化合物对表层沉积物中细菌群落结构的影响	孙雅君, 王铁宇, 彭霞薇, 王佩 (2496)
菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质及植物生长的影响	马月, 王国祥, 曹勤, 王小云, 马杰 (2504)
生物滞留设施对城市地表径流低浓度磷吸附基质研究	李立青, 龚燕芳, 颜子钦, 单保庆 (2511)
复合填料生物渗滤系统处理城市雨水径流的研究	王晓璐, 左剑恶, 千里里, 邢薇, 缪恒峰, 阮文权 (2518)
3种典型消毒副产物对细菌抗生素抗性的影响	吕露, 张梦露, 王春明, 林惠荣, 于鑫 (2525)
基于透射光法探讨水流流速对 DNAPL 运移分布的影响	高燕维, 郑菲, 施小清, 孙媛媛, 徐红霞, 吴吉春 (2532)
BDD 和 PbO ₂ 电极电化学氧化苯并三氮唑的对比研究	伍娟丽, 张佳维, 王婷, 倪晋仁 (2540)
开放系统下方解石对邻苯二甲酸的吸附	李振炫, 黄利东, 陈艳芳, 缪晔, 刘大刚, 许正文 (2547)
碳纳米管-羟磷灰石对铅的吸附特性研究	张金利, 李宇 (2554)
刚果红分子印迹聚合物纳米微球的合成及吸附性能	常自强, 陈复彬, 张玉, 时作龙, 杨春艳, 章竹君 (2564)
碱热-酸热法合成二氧化钛-钛酸纳米管复合纳米材料对 Cd(II) 和苯酚的同步去除	雷立, 晋银佳, 王婷, 赵泉, 晏友, 刘文 (2573)
固定化菌剂对污水和牛粪中雌二醇和己烯雌酚的去除作用	李欣, 凌婉婷, 刘静娴, 孙敏霞, 高彦征, 刘娟 (2581)
PN-ANAMMOX 一体化反应器处理电子行业 PCB 废水	袁琬, 李祥, 周呈, 陈宗姮 (2591)
Fenton 氧化深度处理石化废水厂二级出水研究	王翼, 吴昌永, 周岳溪, 张雪, 董波, 陈学民 (2597)
制革废水和印染废水的综合毒性评估及鉴别	黄利, 陈文艳, 万玉山, 郑国娟, 赵远, 蔡强 (2604)
不同溶解氧条件下 A/O 系统的除碳脱氮效果和细菌群落结构变化	陈燕, 刘国华, 范强, 汪俊妍, 齐鲁, 王洪臣 (2610)
利用主要缺氧段 ORP 作为连续流单污泥污水脱氮除磷系统调控参数	王晓玲, 宋铁红, 殷宝勇, 李静文, 李紫棋, 余勇 (2617)
连续流态下以实际低基质生活污水培养好氧颗粒污泥及其脱氮性能	姚力, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建 (2626)
广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价	张金莲, 丁疆峰, 卢桂宇, 党志, 易筱筠 (2633)
山东省临沂市土壤有机氯农药滴滴涕残留量与空间分布特征	喻超, 王增辉, 王红晋, 代杰瑞, 庞绪贵, 赵西强, 刘华峰 (2641)
金华市萤石矿区土壤氟污染评价	叶群峰, 周小玲 (2648)
土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制	侯亚红, 王磊, 付小花, 乐毅全 (2655)
黄土区果园和刺槐林生态系统土壤有机碳变化及影响因素	李如剑, 王蕊, 李娜娜, 姜继韶, 张彦军, 王志齐, 刘庆芳, 吴得峰, 郭胜利 (2662)
缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响	雷利国, 江长胜, 郝庆菊 (2669)
塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析	朱美玲, 贡璐, 张龙龙 (2678)
不同部位玉米秸秆对两种质地黑土 CO ₂ 排放和微生物量的影响	刘四义, 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 贾淑霞, 陈学文, 张士秀, 孙冰洁, 陈升龙 (2686)
1株对叔丁基邻苯二酚降解菌的筛选鉴定及响应面法优化其降解	贺强礼, 刘文斌, 杨海君, 彭晓霞, 关向杰, 黄水娥 (2695)
耐高浓度沼液产油小球藻的分离鉴定与特征分析	杨周, 王文国, 马丹炜, 汤晓玉, 胡启春 (2707)
水介质中 C ₆₀ 纳米晶体颗粒与 Cu ²⁺ 对小鼠腹腔巨噬细胞的复合毒性研究	于叶, 卞为林, 张慧敏, 张波, 何义亮 (2713)
地表水体中同时分析 18 种糖皮质激素方法的建立	郭文景, 常红, 孙德智, 吴丰昌, 杨浩 (2719)
《环境科学》征订启事 (2553) 《环境科学》征稿简则 (2640) 信息 (2546, 2609, 2616, 2647)	

岩溶泉水化学性质及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 影响因素

赵瑞一, 吕现福, 刘子琦*, 吕春艳

(西南大学地理科学学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 为了深入研究岩溶泉水化学性质与溶解无机碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) 的变化特征及其影响因素, 在雨季 (2014 年 6 月 ~ 2014 年 10 月) 对柏树湾泉、兰花沟泉、后沟泉进行监测, 并与旱季进行对比分析. 结果表明, 3 个岩溶泉在雨季的碳酸盐岩溶蚀量大于旱季, 但消耗的 CO_2 量却小于旱季, 其中兰花沟泉和后沟泉的 CO_2 消耗量为负值. 相对于雨季其它月份, 7 月与旱季一样, 岩溶作用减弱但消耗的 CO_2 量增加. 因为受到水动力条件影响, 7 月 H_2CO_3 对碳酸盐岩溶蚀的贡献增加, 而 HNO_3 与 H_2SO_4 对碳酸盐岩溶蚀的贡献则降低. 另外, HNO_3 与 H_2SO_4 溶蚀碳酸盐岩及其对 HCO_3^- 产生的脱水作用都会导致 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 偏正, 因此 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 与 $\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 浓度呈现出正相关性, 而与 HCO_3^- 浓度呈现出负相关性. 这说明水动力条件以及 HNO_3 与 H_2SO_4 的参与对岩溶泉水化学性质及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的变化具有重要影响.

关键词: 岩溶泉; 水动力条件; HCO_3^- 脱水; 水化学性质; $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)07-2430-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.07.014

Influencing Factors for Hydrochemistry and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of Karst Springs

ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, LIU Zi-qi*, LÜ Chun-yan

(Key Laboratory of Eco-Environments in Three Gorges Reservoir, Ministry of Education, School of Geography Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: To gain more knowledge on the change of karst spring and its influencing factors, the hydrochemistry and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of Baishuwan spring, Lanhuagou spring and Hougou spring were monitored in rainy season (from June 2014 to October 2014) and contrasted with the results obtained in dry season. The results showed that more carbonate rock was dissolved and less CO_2 was consumed in rainy season. And for Lanhuagou spring and Hougou spring, the CO_2 consumption was less than the production. Compared to other months in rainy season, the least carbonate rock dissolution and the most CO_2 consumption were observed in July 2014. Influenced by hydrodynamic condition, carbonate rock dissolved by HNO_3 and H_2SO_4 increased while that dissolved by H_2CO_3 decreased during the rainy season. The $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ increased due to the HNO_3 and H_2SO_4 dissolution of carbonate rock and the dehydration of HCO_3^- . Therefore, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ correlated negatively to HCO_3^- concentration and positively to $\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ concentration. It was indicated that the hydrochemistry and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of karst springs were affected by the HNO_3 , H_2SO_4 and hydrodynamic condition.

Key words: karst spring; hydrodynamic condition; dehydration of HCO_3^- ; hydrochemistry; $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$

随着人类活动不断加强, 硫化物、氮化合物等污染物的排放不仅对生态环境造成破坏^[1,2], 而且其产生的 H_2SO_4 和 HNO_3 参与到岩溶作用中, 对岩溶地区的碳循环造成干扰^[3]. 对水化学性质及溶解无机碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) 的分析已经成为准确估算岩溶碳汇效应的有利方法^[4]. H_2CO_3 溶蚀碳酸盐岩, $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]_{\text{mol}}/[\text{HCO}_3^-]_{\text{mol}}$ (即 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 与 HCO_3^- 的摩尔比) 为 0.5, 而 HNO_3 与 H_2SO_4 溶蚀碳酸盐岩, $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]_{\text{mol}}/[\text{HCO}_3^-]_{\text{mol}}$ 为 1, 通过测试水化学性质就可以计算出 HNO_3 与 H_2SO_4 对碳酸盐岩溶蚀的贡献量. 如 Etchanchu 等^[5] 和 Semhi 等^[6] 通过对水化学性质进行分析, 估算了氮肥产生的 HNO_3 对碳酸盐岩溶解的贡献为 30% 和 12% ~ 26%. 由于各个碳源占总碳的比例以及 $\delta^{13}\text{C}$ 不同, HNO_3 与 H_2SO_4 溶蚀碳酸盐岩会导致水中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 发

生变化, 所以 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的变化也可以证明 HNO_3 与 H_2SO_4 对岩溶作用的影响^[7~9] 并示踪碳的运移^[10].

许多研究结果表明土下溶蚀速率与土壤 CO_2 浓度变化趋势一致^[11~13], 而土壤 CO_2 的产生又与土壤温度^[14~17] 和土壤湿度^[18~20] 有关, 所以温度和降水可通过土壤温湿度影响岩溶作用. 水动力条件同土壤 CO_2 一样, 也是控制岩溶作用的关键因子. 在西南亚热带气候背景下, 降水对土下溶蚀速率的贡献甚至要比气温更为重要, 尤其是在旱季, 土壤持

收稿日期: 2014-12-17; 修订日期: 2015-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41072192, 41103068); 重庆市院士专项 (cste2013jcyjys20001); 国家“十二五”科技支撑计划项目 (2011BAC09B01-17); 中央高校基本科研业务费专项 (XDJK2013C091)

作者简介: 赵瑞一 (1987 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为岩溶环境与地质生态, E-mail: swu506@163.com

* 通讯联系人, E-mail: michelle-lily@163.com

水能力与土壤的供水强度是决定溶蚀能力的关键因素^[21]. 前期通过对重庆市南川区 3 个岩溶泉水化学性质进行对比分析, 发现了旱季不同植被类型下的岩溶碳汇效应存在差异^[22], 而雨季气温和降水条件发生了较大变化, 岩溶碳汇也可能随之出现差异. 因此本研究在雨季继续监测 3 个岩溶泉的水化学性质并对 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 进行分析, 探讨不同条件下岩溶泉水化学性质及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响因素, 以期为更好地运用水化学及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 方法评估岩溶碳汇效应提供理论依据.

1 研究区概况

柏树湾泉、兰花沟泉、后沟泉均位于重庆市南川区(图 1), 该区属亚热带湿润季风气候, 年均温为 16.6°C , 年降水量为 $1\,185\text{ mm}$. 受季风气候影响, 温度及降水量在不同季节变化明显. 柏树湾泉点出露地层为下三叠统嘉陵江组灰岩(T_{1j})、白云质灰岩、角砾状灰岩; 兰花沟泉点为下三叠统嘉陵江组灰岩(T_{1j})、白云质灰岩; 后沟泉点为下三叠统嘉陵江组白云质灰岩(T_{1j}). 其中柏树湾泉域由于近几十年没有受到人类活动的干预, 上覆植被发育良好, 主要为马尾松林. 受亚热带气候和出露地层的控制, 其上覆土壤为黄壤, 自下而上具有基岩-溶滤层-黄色黏土层. 兰花沟和后沟泉域的土壤为矿子黄泥, 成土母质多以轻度或强度的化学风化物为主, 并且受人类活动影响土壤中含有大量富含硫的煤铁残渣. 2 个泉域土地利用类型主要为农业用地, 在本研究期间, 后沟泉域的农作物主要为玉米, 而兰花沟泉域的农作物一部分为玉米, 另一部分为金银花.

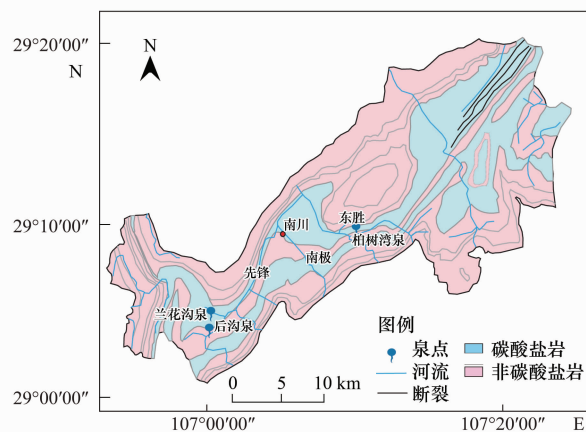


图 1 研究区概况示意

Fig. 1 Location of the study site

2 野外取样与监测

同旱季的取样与监测工作一样, 在 2014 年 6 月至 2014 年 10 月, 每月取一次水样并在现场测试水温、pH 值、电导率以及 HCO_3^- 浓度, 但雨季增加了泉水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的样品采集以及气象数据的收集工作. 用于测试阳离子浓度的水样用 50 mL 聚乙烯塑料瓶采集, 并加入 1:1 优级纯 HNO_3 酸化至 $\text{pH} < 2$, 以防止阳离子附着在瓶壁上. 用 500 mL 聚乙烯塑料瓶收集泉水测试阴离子浓度. 阳离子浓度的测试工作在西南大学地理科学学院地球化学与同位素实验室完成, 使用仪器为美国 Perkin-Elmer 公司生产的 Optima-2100DV 电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-OES), 测量相对误差 $< 5\%$. 阴离子浓度测试在西南大学地理科学学院水化学分析室和有机污染分析室进行. 使用的仪器为日本岛津公司生产的 UV2450 紫外分光光度计, 检测精度优于 $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 水温、电导率、pH 值采用德国 WTW 公司生产的 Multi350i 测定, 精度分别为 0.1°C 、 $1\text{ }\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和 0.01. HCO_3^- 浓度用德国产 Merck 碱度计测定, 精度为 $0.1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$. 用 10 mL 棕色玻璃瓶装满泉水样品, 并在现场滴入 2 滴饱和 HgCl_2 以避免微生物对其产生干扰, 带回实验室后保存在 4°C 的冰箱中, 用于测试 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$. 用连有 Gas Bench II 装置的 Delta V IRMS 分析水样碳同位素, 计算结果以 V-PDB 为标准, 绝对误差 $< 0.2\text{ ‰}$, 其测试工作在西南大学地理科学学院地球化学与同位素实验室进行. 除缺少 2014 年 6 月 30 日、2014 年 7 月 1 日、2014 年 7 月 14 日以及 2014 年 10 月 1 日的气温和降水数据外, 其它日期的气象根据中国气象网 (<http://www.weather.com.cn/>) 每天发布的整点天气实况进行统计.

3 结果与讨论

3.1 水化学性质

雨季 3 个岩溶泉泉水中 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度在 7 月突然降低, 达到雨季最低值[图 2(a)], 而 $\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 浓度和 HCO_3^- 浓度并没有出现此现象[图 2(b)、图 2(c)]. 并且与旱季相比, 3 个岩溶泉在雨季的 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度升高. 柏树湾泉 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度平均值从旱季的 $3.28\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 升高至 $3.88\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$; 兰花沟泉从 $3.74\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 升高至 $4.31\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$; 后沟泉从 $3.48\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 升高至 $4.28\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$. 同 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度变化相似, 3 个岩溶

泉的 $n[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/n[\text{HCO}_3^-]$ 表现为: 7 月 $n[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/n[\text{HCO}_3^-]$ 小于雨季其它月份[图 2(d)]; 雨季 $n[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/n[\text{HCO}_3^-]$ 大于旱季. 雨季柏树湾泉 $n[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/n[\text{HCO}_3^-]$ 的平均值从 0.57 增加到 0.7; 兰花沟泉从 0.89 增加到 1.04; 后沟泉从 0.97 升高到 1.25. 在对比旱季柏树湾泉域、兰花沟泉域及后沟泉域岩溶碳汇差异时, $n[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/n[\text{HCO}_3^-]$ 被认为是反映不同酸对碳酸盐岩溶蚀量及 CO_2 消耗量的重要指标^[22]. 雨季 3 个岩溶泉域 CO_2 消耗量小于旱季, 柏树湾泉 CO_2 消耗量的平均值从旱季的 $2.46 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到 $1.66 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$; 兰花沟泉从 $0.44 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到 $-0.15 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$; 后沟泉从 $0.12 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到 $-0.86 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$.

岩溶泉水中的 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐岩的溶蚀, 雨季 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度升高反映了岩溶作

用的增强, 而 CO_2 消耗量减少则说明 H_2CO_3 对碳酸盐岩的溶蚀量减少. 并且 $n[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/n[\text{HCO}_3^-]$ 升高, 说明岩溶作用增强主要是由于 HNO_3 与 H_2SO_4 对碳酸盐岩的溶蚀量增加造成的. 之前的研究已经证明 NO_3^- 主要来源于 N 肥硝化作用产生的 HNO_3 , 而研究区内的煤铁残渣以及大气中硫化物氧化后形成 H_2SO_4 则是泉水 SO_4^{2-} 的主要来源^[23,24]. 雨季柏树湾泉、兰花沟泉和后沟泉 $\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 浓度的平均值分别为 0.59、1.7 和 $2.14 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 旱季为 0.61、1.9 和 $2.14 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$. 雨季的 $\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 浓度与旱季相比并没有发生明显变化, 但其对碳酸盐岩的溶蚀量却大于旱季. $\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 的浓度并不能代表 HNO_3 与 H_2SO_4 对碳酸盐岩的溶蚀量, 这是因为 HNO_3 与 H_2SO_4 产生的 H^+ 既可以溶蚀碳酸盐岩, 也可以与 HCO_3^- 结合产生脱水作用^[25], 而二者的比例可能与水动力条件有关.

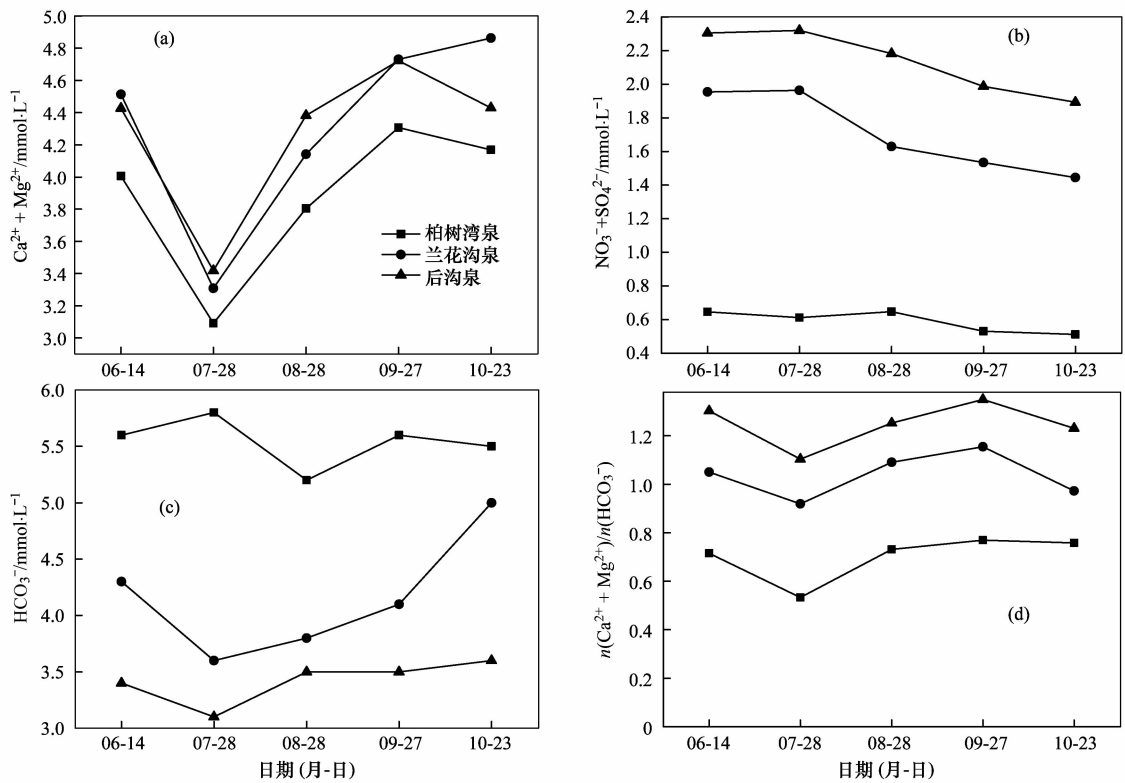


图 2 雨季水化学性质变化
Fig. 2 Change of hydrochemistry in rainy season

3.2 水动力对岩溶作用的影响

土壤 CO_2 与水动力条件被认为是影响岩溶作用的关键因子, 并且在不同的条件下二者对岩溶作用的影响会发生改变^[26,27]. 土壤温湿度增加促进植物根部呼吸作用增强并提高微生物活性^[28], 而导致土壤 CO_2 浓度增加及岩溶作用增强. 受季风

气候影响, 雨季 3 个岩溶泉域的温度及降水量要高于旱季, 但是参与到岩溶作用中的土壤 CO_2 量却小于旱季. 这说明水动力条件对 3 个岩溶泉水化学性质的影响可能要大于土壤 CO_2 .
降水不仅可以通过土壤湿度改变土壤 CO_2 浓度, 其水动力条件的变化更能直接导致不同酸对碳

酸盐岩的溶蚀量发生变化. 降水下渗速度快, 水岩接触时间变短, 会导致 H_2CO_3 对碳酸盐岩的溶蚀量降低. 而 HNO_3 与 H_2SO_4 溶蚀碳酸盐岩受水岩接触时间的影响可能较小, 因为 HNO_3 与 H_2SO_4 属于强酸, 其溶解碳酸盐岩的能力远远大于 H_2CO_3 , 如浓度为 $0.05\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 H_2SO_4 在 18°C 时电离度比同浓度的 H_2CO_3 水高 19 倍, 并且二者对碳酸盐岩溶蚀

的差异性还会因升温或加压表现得更加突出^[29]. 7 月降水量减少(图 3), 降水下渗速度减缓使更多的土壤 CO_2 溶于下渗水, 并且水岩接触时间增加, 因此 H_2CO_3 对碳酸盐岩的溶蚀量也随之增加. 同时, 降水下渗速率减缓也使得 HNO_3 与 H_2SO_4 中更多的 H^+ 在土壤中与 HCO_3^- 结合, 从而导致 HNO_3 与 H_2SO_4 溶蚀的碳酸盐岩量减少.

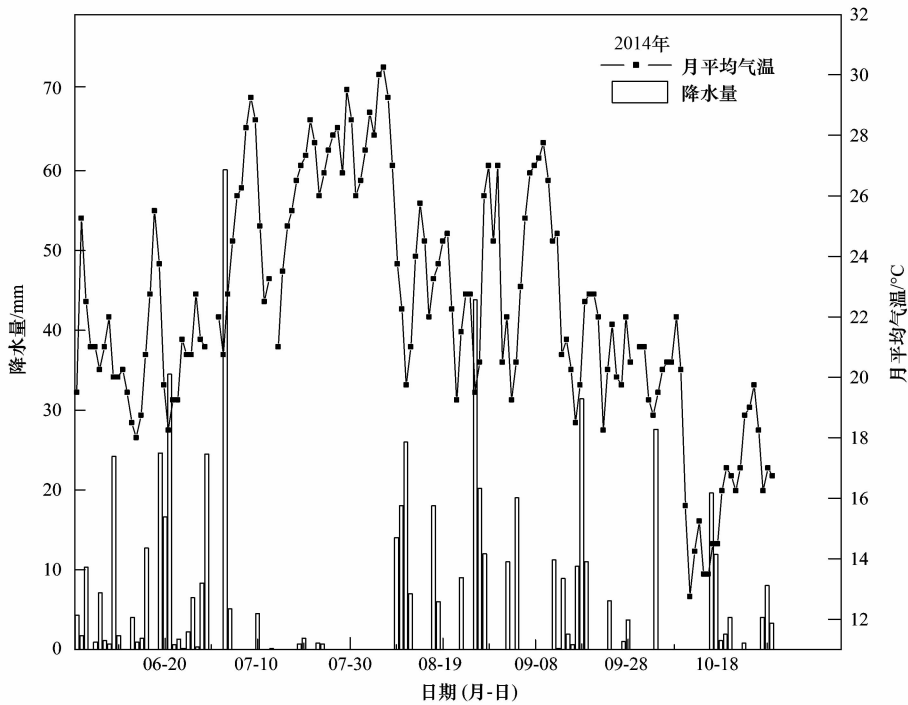


图 3 气温与降水量
Fig. 3 Temperature and precipitation

另外, HNO_3 与 H_2SO_4 溶蚀碳酸盐岩产生的 CO_2 可溶于水并再次对碳酸盐岩进行溶蚀, 其叠加溶蚀效应会增强 HNO_3 与 H_2SO_4 对碳酸盐岩的溶蚀能力^[29]. 7 月降水量减少导致土壤水分减少, 土壤 CO_2 的扩散率增加, HNO_3 与 H_2SO_4 溶蚀碳酸盐岩形成的 CO_2 更容易以气体的形式脱离水体, 叠加效应减弱, HNO_3 与 H_2SO_4 溶蚀碳酸盐岩的量也随之减少. 因此 3 个岩溶泉水在 7 月的 $n[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/n[\text{HCO}_3^-]$ 小于雨季其它月份. 同理, 雨季与旱季相比, 雨季降水量增加一方面导致水岩接触时间缩短, H_2CO_3 对碳酸盐岩的溶蚀量减少; 另一方面导致土壤水分增加, 土壤 CO_2 扩散率降低, HNO_3 与 H_2SO_4 溶蚀碳酸盐岩后形成的 CO_2 又返回到岩溶作用中, 叠加效应增强, HNO_3 与 H_2SO_4 对碳酸盐岩的溶蚀量增加, 所以雨季的 $n[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/n[\text{HCO}_3^-]$ 大于旱季.

3.3 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 变化特征及其影响因素

同水化学性质一样, 泉水的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 也是证明

HNO_3 与 H_2SO_4 参与岩溶作用的重要指标. 雨季 3 个岩溶泉水的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 为: 柏树湾泉最为偏负, 后沟泉最为偏正, 兰花沟泉介于二者之间(图 4). 开放岩溶动力系统中, 在只有 H_2CO_3 参与到岩溶作用的

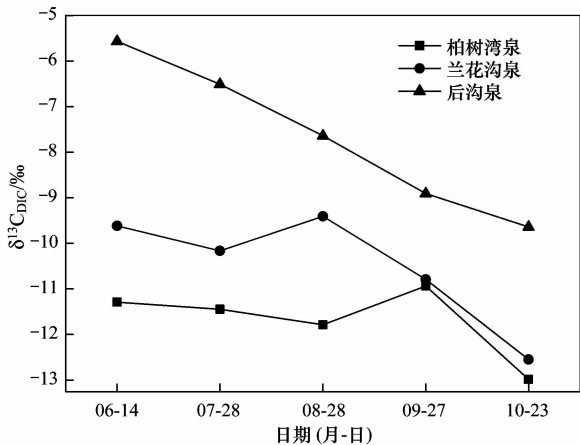


图 4 雨季岩溶泉水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$
Fig. 4 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of the springs in rainy season

情况下,岩溶泉水或地下水的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 主要受控于土壤 CO_2 或大气 CO_2 . 在覆盖型岩溶区,土壤 CO_2 对 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响远远大于大气,而土壤 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 与上覆植被的类型有关. C3 植物和 C4 植物分别遵循 Calvin 循环和 Hatch-Slack 循环,其 $\delta^{13}\text{C}$ 的平均值分别为 -27‰ 和 -13‰ ^[30],因此 C3 植物下土壤 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 要偏负于 C4 植物. 柏树湾泉域上覆植被为 C3 植物(马尾松林),而兰花沟泉域和后沟泉域种植玉米导致 C4 植物所占比例增加,植被类型的不同可能会导致柏树湾泉 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 最为偏负,后沟泉最为偏正. 但在研究期间 3 个岩溶泉的上覆植被并未发生变化,泉水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 却都出现了逐渐偏负的趋势,这说明除土壤 CO_2 外,还存在其它因素可以影响岩溶泉水的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$.

柏树湾泉域上覆植被在近 20 年变化不大且主要以马尾松林为主,土壤 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 应为 -27‰ 左右. 但有机质氧化以及植物根部呼吸会造成土壤 CO_2 偏正 4.4‰ ^[31],而且土壤 CO_2 溶于下渗水并与碳酸盐岩反应会导致碳同位素发生 9‰ 的分馏,柏树湾泉的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 应为 -14‰ 左右^[3,32],然而柏树湾泉的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 却偏正于其理论值(图 4). HNO_3 与 H_2SO_4 参与岩溶作用,其产生的 HCO_3^- 全部来自于碳酸盐

岩,从而导致泉水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 趋向于碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值^[8]. 而碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 通常为 $-3\text{‰} \sim 2\text{‰}$ ^[33],所以岩溶泉水受到 HNO_3 与 H_2SO_4 影响后,其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 偏正. 李军等^[34]在研究长江及其支流水化学和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 时就发现, H_2SO_4 溶解碳酸盐岩一方面导致 DIC 含量增加,另一方面也导致河水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 升高, DIC 含量与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 呈现明显的正相关性. 3 个岩溶泉水的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 与 $\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 浓度、 $n[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/n[\text{HCO}_3^-]$ 均呈现出正相关性[图 5(a)、图 5(b)],说明 HNO_3 与 H_2SO_4 参与岩溶作用导致了泉水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 偏正,但是 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 与 $n[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/n[\text{HCO}_3^-]$ 之间的相关系数要小于 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 与 $\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 浓度之间的相关系数. HCO_3^- 浓度与 $\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 浓度之间呈现出了很好的负相关性[图 5(c)],则说明 HNO_3 与 H_2SO_4 增加不但没有导致 3 个岩溶泉水的 DIC 含量增加(偏碱性条件下 DIC 的主要形式为 HCO_3^- ^[35]),反而使 DIC 含量的减少. 而且在 7 月,3 个岩溶泉的 $n[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/n[\text{HCO}_3^-]$ 最低, HNO_3 与 H_2SO_4 对碳酸盐岩的贡献量最小,但其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 并没有偏负于其它月份,这说明 HNO_3 与 H_2SO_4 对岩溶泉水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响并不完全是因其对碳酸盐岩溶蚀量的贡献发生改变所致.

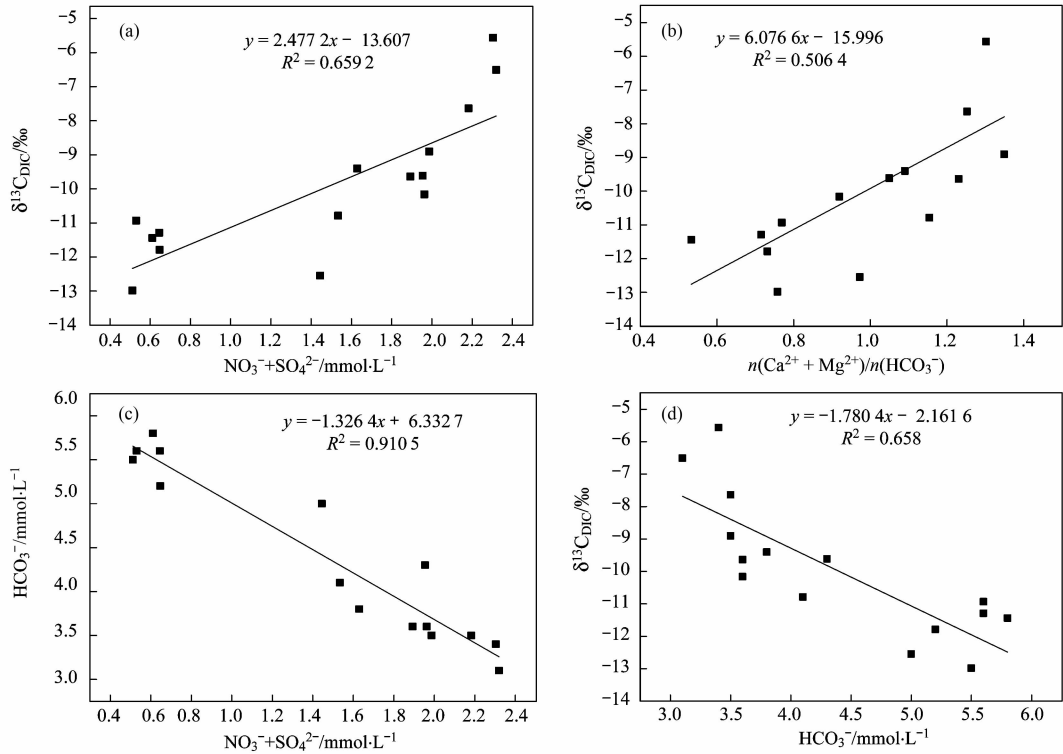


图 5 相关性分析
Fig. 5 Correlation analysis

Fonyuy 等^[36]通过室内实验发现,在 H_2SO_4 含量较高的污水中,水中 DIC 含量会随时间逐渐降低, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 逐渐偏正;而在未污染的水体中并未发现此现象. 这是由于 HNO_3 与 H_2SO_4 产生的 H^+ 与 HCO_3^- 结合,导致 HCO_3^- 发生脱水作用,从而导致水中 DIC 以 CO_2 的形式损失掉,此过程伴随着碳同位素的分馏并最终导致 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 偏正^[37]. 如 3.2 节中所述,3 个岩溶泉可能存在 HCO_3^- 脱水现象,兰花沟泉和后沟泉在雨季 CO_2 消耗量为负值,以及 HCO_3^- 浓度与 $\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 浓度之间表现出了很好的负相关性证明了这一观点. 而 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 与 HCO_3^- 浓度呈现出负相关性则说明 HNO_3 与 H_2SO_4 对 HCO_3^- 产生的脱水作用也是导致泉水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 偏正的重要因素 [图 5(d)]. 在 7 月, HNO_3 与 H_2SO_4 对碳酸盐岩的溶蚀量降低,碳酸盐岩对泉水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响减弱,但更多的 H^+ 在下渗过程中使 HCO_3^- 发生脱水作用,从而导致水中重碳富集,两种作用相互抵消,所以 7 月泉水的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 并没有偏负于雨季其它月份.

4 结论

(1)雨季 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度升高而 CO_2 的消耗量减少,说明岩溶作用增强主要是受 HNO_3 与 H_2SO_4 影响. 但岩溶系统中 HNO_3 与 H_2SO_4 的浓度并没有增加, HNO_3 与 H_2SO_4 对碳酸盐岩的溶蚀量发生变化是因水动力条件发生改变所致. 在降水量增加的情况下, HNO_3 与 H_2SO_4 对碳酸盐岩的溶蚀量增加,而 H_2CO_3 对碳酸盐岩的溶蚀量减少. 水动力条件对岩溶作用的影响要大于土壤 CO_2 浓度对岩溶作用的影响.

(2) HNO_3 与 H_2SO_4 不仅通过溶蚀碳酸盐岩直接降低岩溶碳汇效应,其释放的 H^+ 还会导致 HCO_3^- 产生脱水作用,影响碳在各个圈层中的运移. 3 个岩溶泉泉水的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 与 $\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 浓度呈现正相关性,而与 HCO_3^- 浓度呈现负相关性,说明泉水中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 同时受到这两种作用的共同影响.

参考文献：

[1] 郭宇宏,王自发,康宏,等. 机动车尾气排放对城市空气质量的影响研究——以乌鲁木齐市春节前后对比分析[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(5): 1109-1117.

[2] 李正泉 马浩,毛裕定. 临安本底站酸雨长期观测特征分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 481-489.

[3] Jiang Y J. The contribution of human activities to dissolved inorganic carbon fluxes in a karst underground river system: Evidence from major elements and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in Nandong,

Southwest China[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2013, **152**: 1-11.

[4] 刘文,蒲俊兵,于爽,等. 广西五里峡水库夏季溶解无机碳行为的初步研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(8): 2959-2966.

[5] Etchanchu D, Probst J L. Evolution of the chemical composition of the Garonne River water during the period 1971-1984[J]. Hydrological Sciences Journal, 1988, **33**(3): 243-256.

[6] Semhi K, Amiotte Suchet P, Clauer N, *et al.* Impact of nitrogen fertilizers on the natural weathering-erosion processes and fluvial transport in the Garonne basin [J]. Applied Geochemistry, 2000, **15**(6): 865-878.

[7] 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.

[8] 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.

[9] Brunet F, Potot C, Probst A, *et al.* Stable carbon isotope evidence for nitrogenous fertilizer impact on carbonate weathering in a small agricultural watershed[J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2011, **25**(19): 2682-2690.

[10] Laughrey C D, Baldassare F J. Some applications of isotope geochemistry for determining sources of stray carbon dioxide gas [J]. Environmental Geosciences, 2003, **10**(3): 107-122.

[11] 章程. 不同土地利用下的岩溶作用强度及其碳汇效应[J]. 科学通报, 2011, **56**(26): 2174-2180.

[12] Xu S Y, He S Y. The CO_2 regime in soil profile and its drive to dissolution in carbonate rock area[J]. Carsologica Sinica, 1996, **15**(1-2): 50-57.

[13] 章程,蒋忠诚,何师意,等. 垂直气候带岩溶动力系统特征研究——以重庆金佛山国家级自然保护区为例[J]. 地球学报, 2006, **27**(5): 510-514.

[14] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO_2 efflux on temperature[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, **33**(2): 155-165.

[15] Mielnick P C, Dugas W A. Soil CO_2 flux in a tallgrass prairie [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, **32**(2): 221-228.

[16] Wang W, Peng S S, Wang T, *et al.* Winter soil CO_2 efflux and its contribution to annual soil respiration in different ecosystems of a forest-steppe ecotone, north China [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, **42**(3): 451-458.

[17] Iqbal J, Hu R G, Du L J, *et al.* Differences in soil CO_2 flux between different land use types in mid-subtropical China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, **40**(9): 2324-2333.

[18] Jassal R, Black A, Novak M, *et al.* Relationship between soil CO_2 concentrations and forest-floor CO_2 effluxes[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, **130**(3-4): 176-192.

[19] Fóti S, Balogh J, Nagy Z, *et al.* Soil moisture induced changes on fine-scale spatial pattern of soil respiration in a semi-arid sandy grassland[J]. Geoderma, 2014, **213**: 245-254.

[20] Sugihara S, Funakawa S, Kilasara M, *et al.* Effects of land management on CO_2 flux and soil C stock in two Tanzanian

croplands with contrasting soil texture [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, **46**: 1-9.

[21] 章程. 不同土地利用土下溶蚀速率季节差异及其影响因素——以重庆金佛山为例 [J]. 地质论评, 2010, **56** (1): 136-140.

[22] 赵瑞一, 梁作兵, 王尊波, 等. 旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异 [J]. 环境科学, 2015, **36** (5): 1598-1604.

[23] 张笑微. 煤铁残渣对表层岩溶泉水化学特征及其溶解无机碳的影响研究——以重庆市南川区柏树湾泉和后沟泉为例 [D]. 重庆: 西南大学, 2014. 17-20.

[24] 林明珠. 不同土地覆被下表层岩溶带水文地球化学特征及其碳汇效应研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2012. 71-76.

[25] Ali H N, Atekwana E A. The effect of sulfuric acid neutralization on carbonate and stable carbon isotope evolution of shallow groundwater [J]. Chemical Geology, 2011, **284** (3-4): 217-228.

[26] Yang R, Liu Z H, Zeng C, *et al.* Response of epikarst hydrochemical changes to soil CO₂ and weather conditions at Chenqi, Puding, SW China [J]. Journal of Hydrology, 2012, **468-469**: 151-158.

[27] 王凤康, 梁作兵, 于正良, 等. 岩溶地下河水文地球化学对降雨的响应: 以重庆雪玉洞地下河系统为例 [J]. 环境科学, 2014, **35** (10): 3716-3721.

[28] Manzoni S, Schimel J P, Porporato A. Responses of soil microbial communities to water stress: results from a meta-analysis [J]. Ecology, 2012, **93** (4): 930-938.

[29] 宋焕荣, 黄尚瑜. 碳酸盐岩化学溶蚀效应 [J]. 现代地质, 1993, **7** (3): 363-371.

[30] Marion G M, Introne D S, Van Cleve K. The stable isotope geochemistry of CaCO₃ on the Tanana River floodplain of interior Alaska, U. S. A. : Composition and mechanisms of formation [J]. Chemical Geology: Isotope Geoscience Section, 1991, **86** (2): 97-110.

[31] 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.

[32] Deines P. Carbon isotope effects in carbonate systems [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2004, **68** (12): 2659-2679.

[33] Telmer K, Veizer J. Carbon fluxes, pCO₂ and substrate weathering in a large northern river basin, Canada: carbon isotope perspectives [J]. Chemical Geology, 1999, **159** (1-4): 61-86.

[34] 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.

[35] Wallin M, Buffam I, Öquist M, *et al.* Temporal and spatial variability of dissolved inorganic carbon in a boreal stream network: Concentrations and downstream fluxes [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2010, **115**: G2014, doi: 10.1029/2009JG001100.

[36] Fonyuy E W, Atekwana E A. Dissolved inorganic carbon evolution and stable carbon isotope fractionation in acid mine drainage contaminated streams: Insights from a laboratory study [J]. Applied Geochemistry, 2008, **23** (9): 2634-2648.

[37] Fonyuy E W, Atekwana E A. Effects of acid mine drainage on dissolved inorganic carbon and stable carbon isotopes in receiving streams [J]. Applied Geochemistry, 2008, **23** (4): 743-764.

CONTENTS

Potential Source Contribution Analysis of the Particulate Matters in Shanghai During the Heavy Haze Episode in Eastern and Middle China in December, 2013	LI Li, CAI Jun-lin, ZHOU Min (2327)
Composition and Regional Characteristics of Atmosphere Aerosol and Its Water Soluble Ions over the Yangtze River Delta Region in a Winter Haze Period	WANG Man-ting, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (2337)
Chemical Species of PM _{2.5} in the Urban Area of Beijing	LIU Bao-xian, YANG Dong-yan, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2346)
Numerical Study on the Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Shandong Province During Spring in 2014	JIA Hai-ying, CHENG Nian-liang, HE You-jiang, <i>et al.</i> (2353)
Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} Emitted from Coal-Fired Power Plants	MA Zi-zhen, LI Zhen, JIANG Jing-kun, <i>et al.</i> (2361)
Direct Observation on the Temporal and Spatial Patterns of the CO ₂ Concentration in the Atmospheric of Nanjing Urban Canyon in Summer	GAO Yun-qiu, LIU Shou-dong, HU Ning, <i>et al.</i> (2367)
Emission Factors of Vehicle Exhaust in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2374)
Adsorption Capacity of the Air Particulate Matter in Urban Landscape Plants in Different Polluted Regions of Beijing	ZHANG Wei-kang, WANG Bing, NIU Xiang (2381)
Major Air Pollutant Emissions of Coal-Fired Power Plant in Yangtze River Delta	DING Qing-qing, WEI Wei, SHEN Qun, <i>et al.</i> (2389)
Estimation of N ₂ O Emission from Anhui Croplands by Using a Regional Nitrogen Cycling Model IAP-N	HAN Yun-fang, HAN Sheng-hui, YAN Ping (2395)
Evaluation on the Impacts of Different Background Determination Methods on CO ₂ Sources and Sinks Estimation and Seasonal Variations	ZHANG Fang, ZHOU Ling-xi, WANG Yu-zhao (2405)
Measured and Predicted Aquatic Life Criteria and Risk Assessment of Chromium (VI) in Liaohe River	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao, <i>et al.</i> (2414)
Pollution and Potential Ecology Risk Evaluation of Heavy Metals in River Water, Top Sediments on Bed and Soils Along Banks of Bortala River, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwalili, JIANG Feng-qing (2422)
Influencing Factors for Hydrochemistry and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of Karst Springs	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, LIU Zi-qi, <i>et al.</i> (2430)
Hydrochemical Characteristics and the Dissolved Inorganic Carbon Flux in Liuzhou Section of Liujiang Basin	YUAN Ya-qiong, HE Shi-yi, YU Shi, <i>et al.</i> (2437)
Characteristics of Total Nitrogen and Total Phosphorus Pollution and Eutrophication Assessment of Secondary River in Urban Chongqing	QING Xu-yao, REN Yu-fen, LÜ Zhi-qiang, <i>et al.</i> (2446)
Static Migration and Release of Dibutyl-Phthalate in the Fluctuating Zone of Three Gorges Reservoir	WANG Fa, WANG Qiang, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (2453)
Effect of Drought and Subsequent Re-wetting Cycles on Transferable Nitrogen and Its Form Distribution in the Sediment of Water Level Fluctuating Zone in the Tributary of Three Gorge Reservoir Areas	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, YANG Zhen-yu, <i>et al.</i> (2459)
Distribution of Chlorophyll-a and Eutrophication State in Tianchi Lake of Tianshan Mountains in Summer	WANG Bin, MA Jian, WANG Yin-ya, <i>et al.</i> (2465)
Vertical Distribution Characteristics and Analysis in Sediments of Xidaihai Lake	DUAN Mu-chun, XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying (2472)
Phytoplankton Community Structure and Water Quality Assessment in Jialing River After the Impoundment of Caojie Reservoir	YANG Min, ZHANG Sheng, LIU Shuo-ru (2480)
Analysis of Prokaryotic Community Structure in River Waters of the Ningbo Sanjiang Mouth	HU An-yi, LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, <i>et al.</i> (2487)
Effects of Perfluoroalkyl Substances on the Microbial Community Structure in Surface Sediments of Typical River, China	SUN Ya-jun, WANG Tie-yu, PENG Xia-wei, <i>et al.</i> (2496)
Coupling Effects of Decomposed <i>Potamogeton crispus</i> and Growing <i>Ceratophyllum demersum</i> on Water Quality and Plant Growth	MA Yue, WANG Guo-xiang, CAO Xun, <i>et al.</i> (2504)
Bioretention Media Screening for the Removal of Phosphorus in Urban Stormwater	LI Li-qing, GONG Yan-fang, YAN Zi-qin, <i>et al.</i> (2511)
Treatment of Urban Runoff Pollutants by a Multilayer Biofiltration System	WANG Xiao-lu, ZUO Jian-e, GAN Li-li, <i>et al.</i> (2518)
Effect of Three Typical Disinfection Byproducts on Bacterial Antibiotic Resistance	LÜ Lu, ZHANG Meng-lu, WANG Chun-ming, <i>et al.</i> (2525)
Laboratory Investigation of DNAPL Migration Behavior and Distribution at Varying Flow Velocities Based on Light Transmission Method	GAO Yan-wei, ZHENG Fei, SHI Xiao-qing, <i>et al.</i> (2532)
Comparative Study of Benzotriazole Electrochemical Oxidation at Boron-doped Diamond and PbO ₂ Anodes	WU Juan-li, ZHANG Jia-wei, WANG Ting, <i>et al.</i> (2540)
Sorption of <i>o</i> -Phthalate onto Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, HUANG Li-dong, CHEN Yan-fang, <i>et al.</i> (2547)
Adsorption Behaviors of Lead on Multi-Walled Carbon Nanotube-Hydroxyapatite Composites	ZHANG Jin-li, LI Yu (2554)
Synthesis and Study on Adsorption Property of Congo Red Molecularly Imprinted Polymer Nanospheres	CHANG Zi-qiang, CHEN Fu-bin, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2564)
Simultaneous Removal of Cd(II) and Phenol by Titanium Dioxide-Titanate Nanotubes Composite Nanomaterial Synthesized Through Alkaline-Acid Hydrothermal Method	LEI Li, JIN Yin-jia, WANG Ting, <i>et al.</i> (2573)
Immobilization of Estrogen-degrading Bacteria to Remove the 17 β -estradiol and Diethylstilbestrol from Polluted Water and Cow Dung	LI Xin, LING Wan-ting, LIU Jing-xian, <i>et al.</i> (2581)
Optoelectronic PCB Wastewater Treatment by Partial Nitrification-ANAMMOX Integrative Reactor	YUAN Yan, LI Xiang, ZHOU Cheng, <i>et al.</i> (2591)
Treatment of Petrochemical Treatment Plant Secondary Effluent by Fenton Oxidation	WANG Yi, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (2597)
Comprehensive Toxicity Evaluation and Toxicity Identification Used in Tannery and Textile Wastewaters	HUANG Li, CHEN Wen-yan, WAN Yu-shan, <i>et al.</i> (2604)
Carbon/nitrogen Removal and Bacterial Community Structure Change in an A/O Activated Sludge System Under Different Dissolved Oxygen Conditions	CHEN Yan, LIU Guo-hua, FAN Qiang, <i>et al.</i> (2610)
ORP in the Main Anoxic Stage as the Control Parameter for Nitrogen and Phosphorus Removal in the Single Sludge System with a Continuous Flow	WANG Xiao-ling, SONG Tie-hong, YIN Bao-yong, <i>et al.</i> (2617)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Real Low Concentration Domestic Wastewater and Its Denitrification Performances Under the Continuous Flow	YAO Li, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2626)
Heavy Metal Contamination in Farmland Soils at an E-waste Disassembling Site in Qingyuan, Guangdong, South China	ZHANG Jin-lian, DING Jiang-feng, LU Gui-ning, <i>et al.</i> (2633)
Residues and Spatial Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides DDTs in Soil of Linyi City, Shandong Province	YU Chao, WANG Zeng-hui, WANG Hong-jin, <i>et al.</i> (2641)
Assessment of Soil Fluorine Pollution in Jinhua Fluorite Ore Areas	YE Qun-feng, ZHOU Xiao-ling (2648)
Response of Straw and Straw Biochar Returning to Soil Carbon Budget and Its Mechanism	HOU Ya-hong, WANG Lei, FU Xiao-hua, <i>et al.</i> (2655)
Changes of Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors of Apple Orchards and Black Locusts in the Small Watershed of Loess Plateau, China	LI Ru-jian, WANG Rui, LI Na-na, <i>et al.</i> (2662)
Impacts of Land Use Changes on Soil Light Fraction and Particulate Organic Carbon and Nitrogen in Jinyun Mountain	LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2669)
Soil Enzyme Activities and Their Relationships to Environmental Factors in a Typical Oasis in the Upper Reaches of the Tarim River	ZHU Mei-ling, GONG Lu, ZHANG Long-long (2678)
Effects of Different Residue Part Inputs of Corn Straws on CO ₂ Efflux and Microbial Biomass in Clay Loam and Sandy Loam Black Soils	LIU Si-yi, LIANG Ai-zhen, YANG Xue-ming, <i>et al.</i> (2686)
Isolation, Identification of a <i>p</i> - <i>tert</i> -Butylcatechol-Degrading Strains and Optimization for Its Degradation by Response Surface Methodology	HE Qiang-li, LIU Wen-bin, YANG Hai-jun, <i>et al.</i> (2695)
Isolation, Identification and Characteristic Analysis of an Oil-producing <i>Chlorella</i> sp. Tolerant to High-strength Anaerobic Digestion Effluent	YANG Chuang, WANG Wen-guo, MA Dan-wei, <i>et al.</i> (2707)
Coupled Cytotoxicity of C ₆₀ Nano-Crystal Particle with Cu ²⁺ to the Mouse Peritoneal Microphage RAW 264. 7	YU Ye, BIAN Wei-lin, ZHANG Hui-min, <i>et al.</i> (2713)
Simultaneous Analysis of 18 Glucocorticoids in Surface Water	GUO Wen-jing, CHANG Hong, SUN De-zhi, <i>et al.</i> (2719)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015 年 7 月 15 日 第 36 卷 第 7 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 7 Jul. 15, 2015

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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 国内邮发代号: 2-821
CN 11-1895/X

国 内 定 价: 120.00 元 国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行