

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第5期

Vol.36 No.5

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

深圳大气颗粒物中卤代多环芳烃污染研究	孙建林, 常文静, 陈正侠, 曾辉 (1513)
北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究	崔彤, 程婧晨, 何万清, 任培芳, 聂磊, 徐东耀, 潘涛 (1523)
2006~2010 年珠三角地区 SO ₂ 特征分析	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邓涛, 徐婉筠, 冉靓, 赵春生 (1530)
环境空气 PM _{2.5} 连续监测系统手工采样比对测试	王强, 钟琪, 迟颖, 张杨, 杨凯 (1538)
燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放	裴冰 (1544)
南海水域不同深度非光合微生物的固碳潜能及其对不同电子供体的响应	方峰, 王磊, 席雪飞, 胡佳俊, 付小花, 陆兵, 徐殿胜 (1550)
基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算	冯驰, 金琦, 王艳楠, 赵丽娜, 吕恒, 李云梅 (1557)
贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析	吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 罗进, 蒋浩 (1565)
东莞石马河流域水化学特征时空差异及来源辨析	高磊, 陈建耀, 王江, 柯志庭, 朱爱萍, 许凯 (1573)
河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究	刘肖, 杨琰, 彭涛, 赵景耀, 任小凤, 张银环, 聂旭东, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (1582)
石漠化治理对岩溶地下水水化学和溶解无机碳稳定同位素的影响	肖时珍, 熊康宁, 蓝家程, 张晖, 杨龙 (1590)
旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异	赵瑞一, 梁作兵, 王尊波, 于正良, 江泽利 (1598)
有机氯农药在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移特征及对地下水的影响	孙玉川, 王永启, 梁作兵, 袁道先 (1605)
山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究	曹霏霏, 杨丽原, 庞绪贵, 王炳华, 王云倩 (1615)
摇蚊幼虫扰动下沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应	史晓丹, 李勇, 李大鹏, 王忍, 邓猛, 黄勇 (1622)
南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响	郝卓, 高扬, 张进忠, 徐亚娟, 于贵瑞 (1630)
不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响	黄雪娇, 刘晓晨, 李振轮, 石纹豪, 杨珊 (1639)
荔枝落叶对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响	汪小雄, 姜成春, 李锦卫, 汪晓军 (1648)
黄连根茎浸提物对绿藻的毒理作用	陈亚楠, 袁玲 (1655)
饮用水中消毒副产物 1,1-二氯丙酮的形成机制	丁春生, 孟壮, 徐洋洋, 缪佳 (1662)
水中利谷隆氯化降解动力学和消毒副产物生成特性	凌晓, 胡晨燕, 程明, 谷建 (1668)
化学消毒的中和剂对水中内毒素活性检测的影响	张灿, 刘文君, 史云, 安代志, 白森, 徐稳 (1674)
牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性	马锋锋, 赵保卫, 刁静茹, 钟金魁, 李安邦 (1678)
丁二酸改性茶油树木屑吸附铅的研究	张晓峰, 陈迪云, 彭燕, 刘永胜, 熊雪莹 (1686)
SPG 膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响	张静, 肖太民, 张晶, 曹丽亚, 杜亚威, 刘春, 张磊 (1694)
TiO ₂ 诱导下左旋氧氟沙星的可见光降解及其机制	郭宏生, 刘亚楠, 乔琪, 魏红, 董呈幸, 薛洁, 李克斌 (1700)
新型高分子絮凝剂对废水中 Cr(VI) 的捕集性能	王刚, 杜凤龄, 常青, 徐敏 (1707)
基于 OUR-HPR 测量在线估计活性污泥合成 PHA 量	曾善文, 王泽宇, 高敬, 刘东, 张代钧, 卢培利 (1713)
分离高浓度污泥产酸发酵液的自生动态膜形成机制	黄帅, 刘宏波, 殷波, 马惠君, 符波, 刘和, 白洁 (1720)
通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响	张喻, 韩融, 陆文静, 王洪涛, 明中远, 王强, 夏伟 (1727)
生物可降解螯合剂谷氨酸 N,N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究	吴青, 崔延瑞, 汤晓晓, 杨慧娟, 孙剑辉 (1733)
百乐克 (BIOLAK) 活性污泥宏基因组的生物多样性及功能分析	田美, 刘汉湖, 申欣, 赵方庆, 陈帅, 姚永佳 (1739)
异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性	梁贤, 任勇翔, 杨垒, 赵思琪, 夏志红 (1749)
菌株 <i>Arthrobacter</i> sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学	任磊, 史延华, 贾阳, 姚雪松, Ruth Nahurira, 弥春霞, 闫艳春 (1757)
短短芽孢杆菌及其芽孢对苣的降解	刘芷辰, 叶锦韶, 彭辉, 刘则华, 邓庭进, 尹华, 廖丽萍 (1763)
垃圾填埋场抗生素抗性基因初探	李蕾, 徐晶, 赵由才, 宋立岩 (1769)
不同构型人工湿地基质中土著菌的耐药性及整合子丰度调查	麦晓蓓, 陶然, 杨扬, 张敏, 林剑华, 满滢 (1776)
硝酸盐和甲烷对覆土中苯系物厌氧氧化的影响	柳蓉, 龙焰, 王立立, 何婷, 叶锦韶 (1785)
山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 李洪建, 李君剑, 武江星 (1793)
施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响	姜继韶, 郭胜利, 王蕊, 刘庆芳, 王志齐, 张彦军, 李娜娜, 李如剑, 吴得峰, 孙棋棋 (1802)
宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估	张文超, 吕森林, 刘丁戎, 刘品威, 米持真一, 王效举, 王青耀 (1810)
宝鸡市街道尘埃磁学特征空间分布及环境意义	张俊辉, 王瑾, 张健, 房妮, 夏敦胜 (1818)
长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征	毛霞丽, 陆扣萍, 孙涛, 张小凯, 何丽芝, 王海龙 (1827)
矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响	李君剑, 刘峰, 周小梅 (1836)
三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究	肖烨, 黄志刚, 武海涛, 吕宪国 (1842)
钠盐类型对表面活性剂清洗煤油污染土壤的强化效应	黄昭露, 陈泉源, 周娟, 谢墨函 (1849)
石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应	杨茜, 吴蔓莉, 聂麦茜, 王婷婷, 张明辉 (1856)
可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究	卫泽斌, 陈晓红, 吴启堂, 谭蒙 (1864)
绿洲土 Pb-Zn 复合胁迫下重金属形态特征和生物有效性	金诚, 赵转军, 南忠仁, 王胜利, 武文飞, 王厚成 (1870)
硫素对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收的影响	王丹, 李鑫, 王代长, 饶伟, 杜光辉, 杨军, 化党领 (1877)
臭氧对几种楠木气体交换参数的影响	李苗苗 (1888)
某货车侧翻水污染事件的环境损害评估方法探索	蔡锋, 赵士波, 陈刚才, 鲜思淑, 杨清玲, 周贤杰, 余海 (1902)
《环境科学》征订启事 (1543) 《环境科学》征稿简则 (1756) 信息 (1667, 1726, 1809, 1848)	

旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异

赵瑞一, 梁作兵, 王尊波, 于正良, 江泽利

(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: 为研究不同土地利用类型下碳酸盐岩溶蚀对土壤 CO_2 消耗量的差异, 在2013年11月至2014年5月选取了柏树湾泉、兰花沟泉和后沟泉这3个岩溶泉进行水化学分析及野外监测。结果表明, 在上覆植被为林地的柏树湾泉域, 泉水的 HCO_3^- 浓度最高, 草地与耕地下的兰花沟泉次之, 耕地为主的后沟泉最低。柏树湾泉的 HCO_3^- 主要来自于碳酸对碳酸盐岩的溶蚀, $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 与 HCO_3^- 的摩尔比接近0.5, 而兰花沟泉和后沟泉的 HCO_3^- 则主要来源于硫酸和硝酸对碳酸盐岩的溶蚀, $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 与 HCO_3^- 的摩尔比远远大于0.5。柏树湾泉域由于凋落物的输入以及土壤透气性差, 土壤 CO_2 更容易溶于下渗水并与碳酸盐岩反应, 而兰花沟泉和后沟泉的耕地由于土壤疏松, 土壤 CO_2 更容易以土壤呼吸的形式返回到大气中。因此, 为准确评估岩溶碳汇作用, 需要研究不同土地利用类型下碳酸盐岩对 CO_2 消耗量的差异。

关键词: 土地利用; 岩溶泉; 水化学性质; 土壤 CO_2 ; 岩溶碳汇

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1598-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.05.012

Difference of Karst Carbon Sink Under Different Land Use and Land Cover Areas in Dry Season

ZHAO Rui-yi, LIANG Zuo-bing, WANG Zun-bo, YU Zheng-liang, JIANG Ze-li

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

Abstract: In order to identify the distinction of soil CO_2 consumed by carbonate rock dissolution, Baishuwan spring, Lanhuagou spring and Hougou spring were selected as objects to monitor the hydrochemistry from November 2013 to May 2014. The results showed that the highest HCO_3^- concentration was observed in Baishuwan spring which is covered by pine forest, while the lowest HCO_3^- concentration was observed in Hougou spring which is mainly covered by cultivated land. In Baishuwan spring, HCO_3^- was mainly derived from carbonic acid dissolving carbonate rock and the molar ratio between $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ and HCO_3^- was close to 0.5; while the molar ratio between $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ and HCO_3^- exceeded 0.5 because the carbonate rock in Lanhuagou spring and Hougou spring was mainly dissolved by nitric acid and sulfuric acid. Because of the input of litter and the fact that gas-permeability of soil was limited in Baishuwan spring catchment, most of soil CO_2 was dissolved in infiltrated water and reacted with bedrock. However, in Lanhuagou spring catchment and Hougou spring catchment, porous soil made soil CO_2 easier to return to the atmosphere in the form of soil respiration. Therefore, in order to accurately estimate karst carbon sink, it was required to clarify the distinction of CO_2 consumption by carbonate rock dissolution under different land use and land cover areas.

Key words: land use; karst spring; hydrochemistry; soil CO_2 ; karst carbon sink

温室气体(尤其是 CO_2)带来的全球环境变化使碳循环日益受到重视。每年通过河流运输到海洋中的碳可达 $1 \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$, 其中溶解无机碳(DIC)大约占40%^[1,2]。大气 CO_2 、土壤中植物根部呼吸以及有机质分解产生的 CO_2 、碳酸盐岩的溶解是DIC的3个主要来源^[3]。快速的岩溶作用使碳酸盐岩积极地参与到了全球碳循环中^[4-6], 而且水生植物光合作用能够将水中DIC转化为有机碳的形式并形成稳定的碳汇^[7-10], 因此岩溶碳汇效应的研究不容忽视^[11]。

世界范围内, 土壤储存的有机碳达1500 Pg ^[12], 这是大气中碳含量的3倍, 陆地生物量的2.5倍^[13]。土壤有机质的矿化以及植物根部呼吸

使土壤 CO_2 浓度远远大于大气^[14], 而土壤 CO_2 又是控制岩溶作用的重要因素并与岩溶泉水化学性质有密切联系^[15]。不同土地利用类型下土壤 CO_2 的产生与运移并不相同, 其土下溶蚀碳酸盐岩的能力也不同。在地质、气候相似条件下, 与基岩裸露流域相比, 土壤和植被覆盖较好流域由于有更多的土壤 CO_2 参与到岩溶作用中, 其土下溶蚀速率加快, 岩溶碳汇效应也更强^[16,17]。另外, 岩溶泉水的水化学性质与土地利用方式和植被覆盖状

收稿日期: 2014-10-15; 修订日期: 2014-11-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41072192, 41103068); 重庆市院士专项(cstc2013jcyjys20001); 岩溶动力学重点实验室开放课题基金项目(KDL2011-04)

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

况呈现很好的相关性,并且随着土地由灌草丛地向耕地的转变以及石漠化的发展,岩溶作用消耗的 CO_2 也随之减少^[18,19],说明土地利用类型对岩溶碳汇效应有重要影响。然而由于氮肥的使用、大气中酸沉降、富含硫的工业废弃物堆放等活动, H_2SO_4 与 HNO_3 也积极地参与到了岩溶作用中。虽然 H_2SO_4 与 HNO_3 溶蚀碳酸盐岩也会产生 HCO_3^- ,但其不仅没有消耗大气或土壤中的 CO_2 ,而且还会成为大气 CO_2 的源。Jiang^[20]认为受 H_2SO_4 与 HNO_3 的干扰,之前的研究可能高估了岩溶的碳汇效应。因此,本研究选择不同土地利用下的泉水作为对象,分析其岩溶碳汇效应的差异并排除 H_2SO_4 与 HNO_3 带来的影响,以期为准确估算岩溶碳汇效应提供依据。

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 ,年降雨量为 $1\,185\text{ mm}$ 。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。两泉域土地利用类型主要为农业用地,但后沟泉域以玉米-油菜轮作为主,兰花沟泉域有一部分农田为玉米-油菜轮作外,另一部分则为金银花地。柏树湾泉、兰花沟泉和后沟泉域的基岩裸露率分别 0.67% 、 18.13% 和 35.3% 。

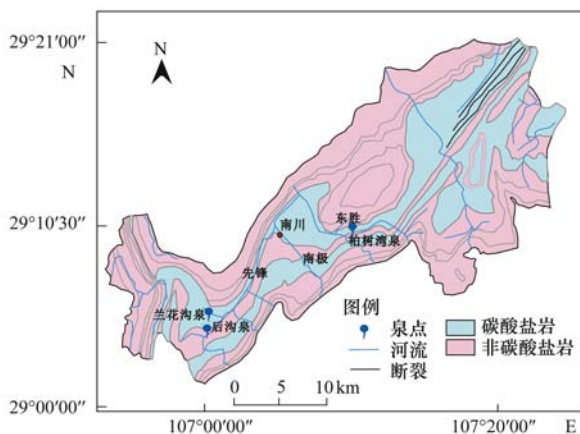


图1 研究区概况示意

Fig. 1 Location map of the study site

2 野外取样与监测

在2013年11月、12月以及2014年1月、4月、5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。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 $1:1$ 优级纯硝酸酸化至 $\text{pH} < 2$,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 $0.1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

3 结果与讨论

3.1 水化学性质

柏树湾泉、兰花沟泉、后沟泉阳离子均以 Ca^{2+} 为主(图2): 柏树湾泉为 $112.4 \sim 125.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 兰花沟泉为 $103.9 \sim 126.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 后沟泉为 $125.1 \sim 141\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。 Mg^{2+} 质量浓度为兰花沟泉 $>$ 柏树湾泉 $>$ 后沟泉: 柏树湾泉为 $4.65 \sim 9.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 兰花沟泉为 $20.61 \sim 24.92\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 后沟泉为 $2.66 \sim 3.31\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其差异可能主要由基岩化学成分的不同造成的。3个岩溶泉泉水的阴离子浓度差异比较明显。 HCO_3^- 浓度为柏树湾泉 $>$ 兰花沟泉 $>$ 后沟泉[图3(a)]。兰花沟泉和后沟泉的 SO_4^{2-} 浓度和 NO_3^- 浓度则明显大于柏树湾[图3(b)]。柏树湾泉 SO_4^{2-} 质量浓度为 $49.11 \sim 53.87\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 兰花沟泉为 $149.43 \sim 157.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 后沟泉为 $139.9 \sim 149.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。柏树湾泉 NO_3^- 质量浓度为 $3.85 \sim 5.41\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 兰花沟泉为 $16.52 \sim 26.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 后沟泉为 $38.3 \sim 41.18\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。3个泉泉水 SO_4^{2-} 浓度表现出的差异性主要是因为3个泉域硫的来源不同。兰花沟泉和后沟泉泉水中的 SO_4^{2-} 主要是由于土壤中富含硫的煤铁残渣氧化后形成 H_2SO_4 造成的。室内模拟实验已经证实煤铁残渣的堆放导致了泉水中 SO_4^{2-} 浓度的上升^[21]。而柏树湾泉域的硫可能主要

来自于酸雨沉降, Perrin 等^[22]发现在没有污染的流域河水中也具有较高浓度的 H_2SO_4 浓度, 并认为是由于大气污染造成 H_2SO_4 输入量增加造成的. 我国酸雨污染严重并且 SO_4^{2-} 是酸性的主要贡献者^[23], 柏树湾泉域虽然没有煤铁残渣的输入, 但酸雨可使大气中的 H_2SO_4 沉降. 李林立^[24]发现该泉域的穿透雨中 SO_4^{2-} 含量可达 $27.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 从而导致泉水中出现了较高浓度的 SO_4^{2-} . 农田区施肥后, 肥料中的 NH_4^+ 被自养菌氧化, 产生 NO_2^- 和 H^+ , NO_2^- 又被其它菌类氧化成 NO_3^- , 从而使其能被植物吸收并导致地下水中 NO_3^- 浓度升高^[25~27]. 由于兰花沟泉和后沟泉这 2 个泉域土地利用类型主要为农用地, 因此施加氮肥后硝化作用形成的 NO_3^- 很可能是泉水 NO_3^- 较高的原因. HCO_3^- 浓度为柏树湾泉 > 兰花沟泉 > 后沟泉, 由于 HCO_3^- 一部分来源于碳酸盐岩, 另一部分来源于土壤或大气中的 CO_2 , 并且二者所占的比例会因 H_2SO_4 与 HNO_3 的参与而发生改变, 所以需要深入研究 3 个泉泉水中 H_2SO_4 和 HNO_3 溶蚀碳酸盐岩对 HCO_3^- 的贡献量.

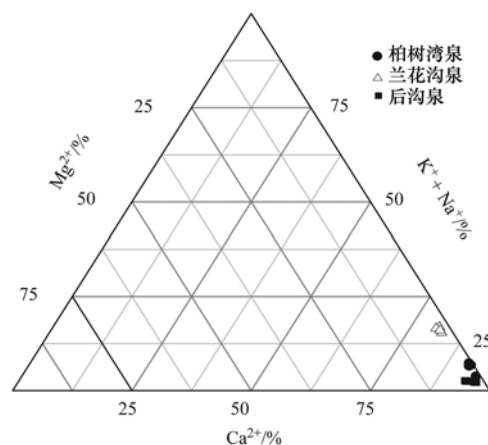


图 2 岩溶泉水化学组成

Fig. 2 Ternary diagram for major cations composition in karst springs

3.2 H_2SO_4 和 HNO_3 对 HCO_3^- 的影响

已有研究指出 H_2SO_4 与 HNO_3 对碳酸盐岩的溶蚀不容忽视, Perrin 等^[22]计算出由于农田区氮肥的使用, 碳酸盐岩溶蚀消耗的 CO_2 量减少了 $1.4 \sim 3.47 \text{ g} \cdot \text{a}^{-1}$ (只考虑碳酸盐) 或 $3.2 \sim 7.97 \text{ g} \cdot \text{a}^{-1}$ (将

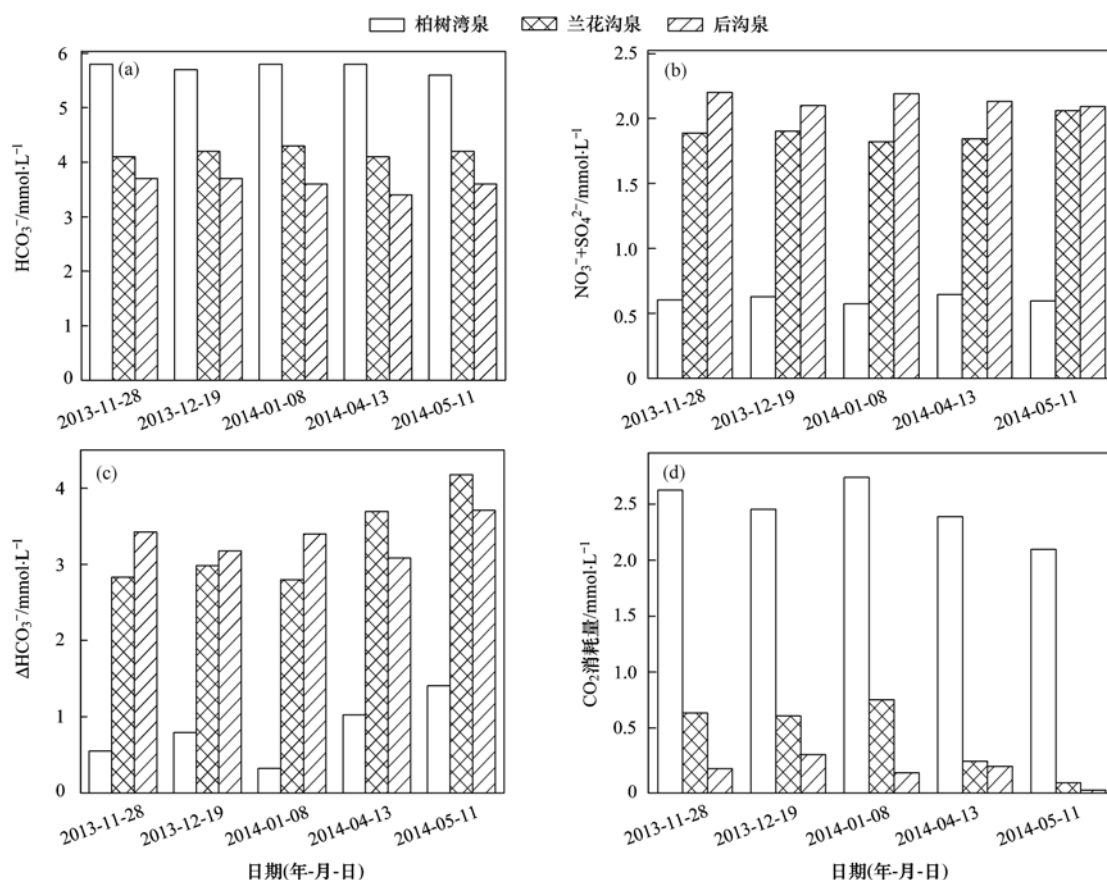


图 3 岩溶泉水主要阴离子浓度及 CO_2 消耗量

Fig. 3 Major anion concentrations and the consumption of CO_2 in karst springs

页岩考虑在内). 刘丛强等^[28]也指出我国西南岩溶区因 H_2SO_4 风化碳酸盐岩会向大气中释放 $4.4 \times 10^{14} \text{ g} \cdot \text{a}^{-1} \text{ CO}_2$, 这相当于每年西南碳酸盐岩风化消耗 CO_2 总通量的 33%. 由于 3 个泉域都有 H_2SO_4 和 HNO_3 的输入, 因此 CO_2 溶于水后形成的 H_2CO_3 并不是溶蚀碳酸盐岩唯一的酸.

由公式(1)可知, CO_2 溶于水后形成 H_2CO_3 溶蚀碳酸盐岩, 导致 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 与 HCO_3^- 的摩尔比为 0.5. 而根据公式(2)和公式(3)可知, H_2SO_4 和 HNO_3 溶蚀碳酸盐岩产生的 HCO_3^- 全部来自碳酸盐岩, 所以 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 与 HCO_3^- 的摩尔比为 1. 3 个泉泉水 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 与 HCO_3^- 的摩尔比为后沟泉 > 兰花沟泉 > 柏树湾泉, 其中柏树湾泉 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 与 HCO_3^- 的摩尔比平均值为 0.57; 兰花沟泉为 0.89; 后沟泉为 0.97, 说明 H_2SO_4 和 HNO_3 对碳酸盐岩溶蚀的贡献为后沟泉 > 兰花沟泉 > 柏树湾泉(图 4). 另外, ΔHCO_3^- 也用来表示除 H_2CO_3 外其它酸溶蚀碳酸盐岩产生 HCO_3^- 的量, 其计算方式见公式(4), 其中 $\text{HCO}_3^-_{\text{理论值}}$ 为 HCO_3^- 全部来自于 H_2CO_3 溶蚀碳酸盐岩时 HCO_3^- 的浓度, 其值为 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度的 2 倍, $\text{HCO}_3^-_{\text{测量值}}$ 为野外滴定的 HCO_3^- 浓度^[22]. 根据公式(4)可以计算出, ΔHCO_3^- 为后沟泉 > 兰花沟泉 > 柏树湾泉[图 3(c)]. 这说明后沟泉由于具有最高浓度的 H_2SO_4 和 HNO_3 参与到岩溶作用中, 其对 HCO_3^- 的贡献量最大, 而柏树湾泉相反, 由于 H_2SO_4 和 HNO_3 浓度最低, 其对 HCO_3^- 的贡献量也最小, 兰花沟则介于两者之间.

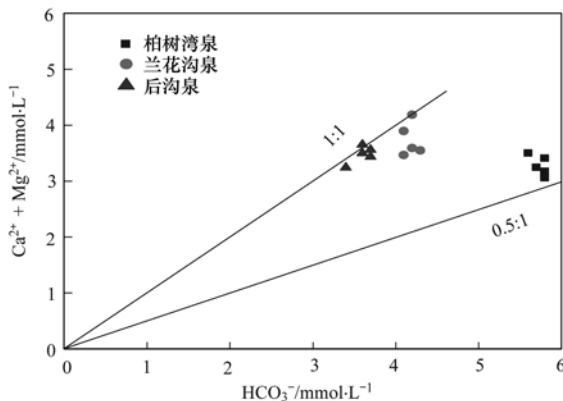
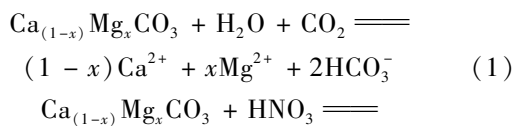
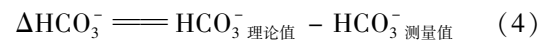
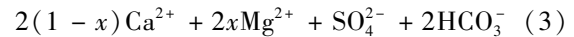
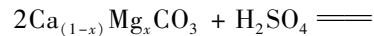
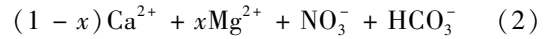


图 4 3 个泉点 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 与 HCO_3^- 的摩尔比

Fig. 4 Molar ratio between $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ and HCO_3^- in the three springs



然而, 3 个岩溶泉泉水中总的 HCO_3^- 浓度却与 $\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 浓度呈显著的反相关性(图 5). 通常 H_2SO_4 和 HNO_3 的参与会导致地下水或河水中 DIC 通量的增加, 这在模拟实验或野外监测中已被证实^[29~31]. 由于 3 个泉泉水的 pH 都呈弱碱性, HCO_3^- 是 DIC 的主要形式^[32]. 但是后沟泉虽然具有最大浓度的 $\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- 浓度却最小, 而且后沟泉在 2014 年 5 月 ΔHCO_3^- 比 $\text{HCO}_3^-_{\text{测量值}}$ 还要高, 说明一部分 HCO_3^- 并没有进入到泉水中, 而是以其它形式“损失”掉. H_2SO_4 和 HNO_3 释放的 H^+ 除一部分参与到岩溶作用中外, 另一部分可能会与 HCO_3^- 结合形成 H_2CO_3 . H_2CO_3 会与土壤 CO_2 保持平衡, 由于下渗水经过土壤后 $p\text{CO}_2$ 远大于土壤或空气, CO_2 会从水体中释放到土壤或大气中^[33], 这与 Ali 等^[31]的研究结果一致. Ali 等运用碳同位素技术在研究 H_2SO_4 对碳酸盐岩的溶蚀作用时, 也发现 H_2SO_4 产生的 H^+ 与 HCO_3^- 结合, 导致 HCO_3^- 脱水作用并向土壤中释放 CO_2 . 兰花沟泉与后沟泉上覆土壤中高浓度的 H_2SO_4 和 HNO_3 提供的 H^+ 不仅对碳酸盐岩进行溶蚀产生 HCO_3^- , 也会与水中的 HCO_3^- 结合并向土壤或大气中释放 CO_2 [公式(5)], 从而导致 HCO_3^- 浓度与 $\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 浓度呈负相关. 所以 Hamilton 等^[34]指出在高 pH 土壤下, CO_2 溶于水后形成的 H_2CO_3 溶蚀碳酸盐岩可认为是 CO_2 的汇; 而在低 pH 条件下, 由于 HCO_3^- 与 H^+ 结合释放 CO_2 , 碳酸盐岩的溶蚀可认为是 CO_2 的源.

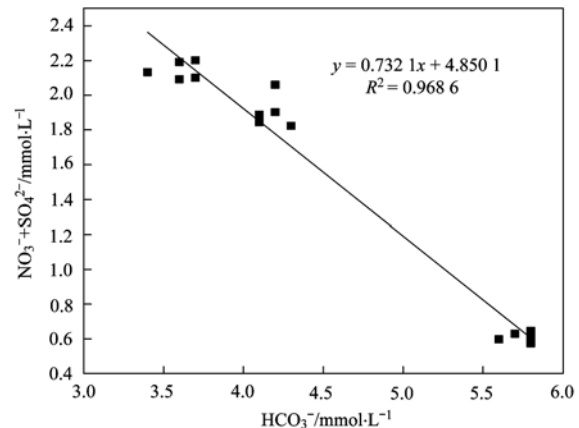
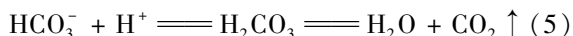


图 5 HCO_3^- 与 $\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 相关性

Fig. 5 Correlation between HCO_3^- and $\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$



3.3 不同土地利用下岩溶碳汇效应差异及影响因素

H_2CO_3 溶蚀碳酸盐岩使 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 与 HCO_3^- 的摩尔比为 0.5, 而 H_2SO_4 与 HNO_3 溶蚀碳酸盐岩导致 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 与 HCO_3^- 的摩尔比为 1, 所以根据 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度以及 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 与 HCO_3^- 的摩尔比可以排除 H_2SO_4 与 HNO_3 溶蚀碳酸盐岩产生的 HCO_3^- , 并计算出碳酸盐岩溶蚀过程中消耗土壤 CO_2 的量[公式(1)~(3)]. 3 个岩溶泉域岩溶作用消耗的 CO_2 量为柏树湾泉 > 兰花沟泉 > 后沟泉, 柏树湾泉消耗的 CO_2 量最大, 为 $2.1 \sim 2.74 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $2.46 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; 兰花沟泉其次, 为 $0.01 \sim 0.75 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $0.44 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; 后沟泉最小, 为 $-0.05 \sim 0.26 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $0.12 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ [图 3(d)]. 柏树湾泉的 HCO_3^- 浓度约为兰花沟泉的 1.37 倍, 为后沟泉的 1.59 倍. 但柏树湾泉消耗的土壤 CO_2 量却为兰花沟泉的 5.58 倍, 后沟泉的 20.46 倍. 这说明在 3 个岩溶泉域中, 土下岩溶作用产生的岩溶碳汇效应具有明显差异, 而这要取决于土壤 CO_2 的产生和土壤 CO_2 的运移方向.

3 个岩溶泉域土地利用类型的差异导致了土壤 CO_2 产生量的不同. 柏树湾泉域土地利用类型主要为马尾松林地, 其凋落物进入土壤后被微生物分解, 从而形成土壤 CO_2 的重要组成部分. 并且由于新鲜凋落物的输入, 使土壤中快速分解有机碳含量增加, 许多证据表明提高植物活性和地下碳输入会直接或间接导致土壤有机质分解加强^[35~37], 因此在马尾松林覆盖下的柏树湾泉域土壤矿化速率提高. 兰花沟泉域主要为金银花地(草地)和耕地, 后沟为耕地, 草地虽然也有凋落物进入到土壤中并补充土壤中的碳库, 但其凋落物量远远低于林地. 旱季农作物呼吸作用减弱, 加上植物残体在成熟后被移出土壤, 植物根部呼吸释放的 CO_2 减少并且土壤不能得到新鲜凋落物补充, 所以土壤 CO_2 的产生主要来自于慢速降解有机碳和稳定有机质, 而慢速降解有机碳和稳定有机质的矿化速度远远低于快速降解有机碳. Chen 等^[38]也已证明, 在森林土壤中有有机质转化速度快并且土壤有机质含量也大于草甸, 这导致林地来自土壤有机质的 CO_2 量高达灌丛草甸的 14 倍, 并且该区域土壤中的溶解有机碳含量以及土壤含水量表现为林地 > 草地 > 耕地^[39], 这些因素都可能导致柏树湾泉土壤 CO_2 的产生量要高于兰花沟泉和后沟泉.

另外, 土壤 CO_2 是否参与到岩溶作用中还要受到土壤 CO_2 运移方向的影响. 因为土壤中由植物根部或微生物产生的 CO_2 一部分以土壤呼吸的方式进入大气中, 形成土壤与大气之间的碳循环; 而另一部分溶于地下水并形成碳酸与碳酸盐岩反应, 最后以 HCO_3^- 的形式进入地下水中^[40~42]. 柏树湾泉域上覆土壤较黏重, 土壤孔隙度小^[39], 土壤 CO_2 在土壤中的传导性受到制约, 因此土壤 CO_2 可能更容易溶于土壤下渗水中并参与到岩溶作用中. 而耕地受到人类活动干扰, 黏粒减少并且土壤疏松. 尽管土壤黏粒的减少会导致土壤有机质受到保护减弱, 土壤矿化速率可能会增加, 但是由于土壤疏松以及兰花沟泉和后沟泉域石漠化的发生导致了土壤透气性增强, 土壤矿化的 CO_2 更容易扩散到大气中. 因此兰花沟泉和后沟泉溶于土壤下渗水中的 CO_2 量减少, 土壤 CO_2 对泉水 HCO_3^- 的贡献量与柏树湾泉相比也较少.

4 结论

(1) H_2SO_4 与 HNO_3 参与到岩溶作用中, 一方面使碳酸盐岩对 HCO_3^- 的贡献量增加, 另一方面, 由于其提供的 H^+ 会与 HCO_3^- 结合形成 H_2CO_3 , 并以 CO_2 的形式释放到土壤或大气中, 使泉水中 HCO_3^- 浓度与 $\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 浓度呈反相关. 因此 H_2SO_4 与 HNO_3 溶蚀碳酸盐岩会降低岩溶碳汇效应, 甚至可能会使岩溶作用成为大气 CO_2 的源.

(2) 岩溶作用产生的岩溶碳汇效应受土地利用类型的影响. 在植被覆盖良好且土壤黏重的柏树湾泉域, 土壤 CO_2 更多地参与到岩溶作用中, CO_2 对泉水 HCO_3^- 的贡献量较大; 而在以耕地为主的后沟泉域, 土壤 CO_2 可能更多地以土壤呼吸的形式返回到大气中, 从而导致岩溶作用消耗的 CO_2 量较低. 然而本研究监测时期为旱季, 虽然可加强不同土地利用类型下土壤 CO_2 之间差异的对比, 但是为进一步研究岩溶区不同土地利用类型下岩溶碳汇效应的差异, 还需对土壤 CO_2 浓度进行长期监测并运用碳同位素等技术示踪碳在不同圈层之间的运移.

参考文献:

- [1] Suchet P A, Probst J L, Ludwig W. Worldwide distribution of continental rock lithology: Implications for the atmospheric/soil CO_2 uptake by continental weathering and alkalinity river transport to the oceans [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(2): 1038.
- [2] Ludwig W, Probst J L, Kempe S. Predicting the oceanic input of

- organic carbon by continental erosion[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, **10**(1): 23-41.
- [3] 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.
- [4] Yuan D X. Sensitivity of karst process to environmental change along the PEP II transect[J]. *Quaternary International*, 1997, **37**: 105-113.
- [5] Liu Z H, Dreybrodt W. Dissolution kinetics of calcium carbonate minerals in H_2O-CO_2 solutions in turbulent flow: The role of the diffusion boundary layer and the slow reaction $H_2O + CO_2 \rightarrow H^+ + HCO_3^-$ [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, **61**(14): 2879-2889.
- [6] Kump L R, Brantley S L, Arthur M A. Chemical weathering, atmospheric CO_2 , and climate[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, **28**(1): 611-667.
- [7] Jiang Y J, Hu Y J, Schirmer M. Biogeochemical controls on daily cycling of hydrochemistry and $\delta^{13}C$ of dissolved inorganic carbon in a karst spring-fed pool [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, **478**: 157-168.
- [8] Zhang C, Wang J L, Pu J B, *et al.* Bicarbonate daily variations in a karst River: the carbon sink effect of subaquatic vegetation photosynthesis[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2012, **86**(4): 973-979.
- [9] Liu Z H, Dreybrodt W, Wang H J. A new direction in effective accounting for the atmospheric CO_2 budget: Considering the combined action of carbonate dissolution, the global water cycle and photosynthetic uptake of DIC by aquatic organisms [J]. *Earth-Science Reviews*, 2010, **99**(3-4): 162-172.
- [10] 张陶, 蒲俊兵, 袁道先, 等. 亚热带典型岩溶区地表溪流水文地球化学昼夜变化及其影响因素研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 2944-2951.
- [11] Christina L. An unsung carbon sink[J]. *Science*, 2011, **334**(6058): 886-887.
- [12] Amundson R. The carbon budget in soils[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2001, **29**(1): 535-562.
- [13] Lal R. Soil management and restoration for C sequestration to mitigate the accelerated greenhouse effect [J]. *Progress in Environmental Science*, 1999, **1**(4): 307-326.
- [14] 万国江. 碳酸盐岩与环境[M]. 北京: 地震出版社, 1995. 90.
- [15] Yang R, Liu Z H, Zeng C, *et al.* Response of epikarst hydrochemical changes to soil CO_2 and weather conditions at Chenqi, Puding, SW China[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, **468-469**: 151-158.
- [16] 赵敏, 曾成, 刘再华. 土地利用变化对岩溶地下水溶解无机碳及其稳定同位素组成的影响[J]. *地球化学*, 2009, **38**(6): 565-572.
- [17] Zhao M, Zeng C, Liu Z H, *et al.* Effect of different land use/land cover on karst hydrogeochemistry: a paired catchment study of Chenqi and Dengzhanhe, Puding, Guizhou, SW China[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, **388**(1-2): 121-130.
- [18] 林明珠, 谢世友, 衡涛. 喀斯特山地不同土地利用对表层岩溶泉水化学特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, **25**(4): 212-216.
- [19] 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. 85-86.
- [20] Jiang Y J. The contribution of human activities to dissolved inorganic carbon fluxes in a karst underground river system: Evidence from major elements and $\delta^{13}C_{DIC}$ in Nandong, Southwest China[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2013, **152**: 1-11.
- [21] 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.
- [22] Perrin A S, Probst A, Probst J L. Impact of nitrogenous fertilizers on carbonate dissolution in small agricultural catchments: Implications for weathering CO_2 uptake at regional and global scales[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, **72**(13): 3105-3123.
- [23] 汪家权, 吴劲兵, 李如忠, 等. 酸雨研究进展与问题探讨[J]. *水科学进展*, 2004, **15**(4): 526-530.
- [24] 李林立. 西南典型岩溶区生态环境对表层岩溶水调蓄功能的影响研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009. 81-82.
- [25] Faurie G. Etude in vitro du rôle de la nitrification sur la lixiviation du calcium dans les sols calcaires[J]. *Science du Sol*, 1977, **4**: 204-218.
- [26] Berthelin J, Bonne M, Belgy G, *et al.* A major role for nitrification in the weathering of minerals of brown acid forest soils[J]. *Geomicrobiology Journal*, 1985, **4**(2): 175-190.
- [27] 蒲俊兵, 袁道先, 扈志勇, 等. 高分辨率监测岩溶地下水 NO_3^- 的动态变化及对外界环境的响应[J]. *环境科学*, 2011, **32**(3): 680-686.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Song C, Liu C L, Wang J K, *et al.* Impact of the addition of a compound fertilizer on the dissolution of carbonate rock tablets: A column experiment [J]. *Applied Geochemistry*, 2011, **26**(Supplement): S170-S173.
- [31] 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.
- [32] 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* (2005-2012), 2010, **115**(G2), doi: 10.1029/2009JG001100.
- [33] West T O, McBride A C. The contribution of agricultural lime to carbon dioxide emissions in the United States: dissolution,

- transport, and net emissions [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, **108**(2): 145-154.
- [34] Hamilton S K, Kurzman A L, Robertson G P. Liming of agricultural soils; a source or sink for CO₂ [EB/OL]. http://chamaecyparis.sgccp.ncsu.edu/carbon2002/2002pres/Hamilton_SStephen.pdf, html, 2002-11-19.
- [35] Subke J A, Hahn V, Battipaglia G, *et al.* Feedback interactions between needle litter decomposition and rhizosphere activity[J]. *Oecologia*, 2004, **139**(4): 551-559.
- [36] Trueman R J, Gonzalez-Meler M A. Accelerated belowground C cycling in a managed agriforest ecosystem exposed to elevated carbon dioxide concentrations [J]. *Global Change Biology*, 2005, **11**(8): 1258-1271.
- [37] Allard V, Robin C, Newton P C D, *et al.* Short and long-term effects of elevated CO₂ on *Lolium perenne* rhizodeposition and its consequences on soil organic matter turnover and plant N yield [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(6): 1178-1187.
- [38] Chen Q Q, Sun Y M, Shen C D, *et al.* Organic matter turnover rates and CO₂ flux from organic matter decomposition of mountain soil profiles in the subtropical area, south China [J]. *Catena*, 2002, **49**(3): 217-229.
- [39] 蓝家程, 傅瓦利, 彭景涛, 等. 不同土地利用方式土下岩溶溶蚀速率及影响因素[J]. *生态学报*, 2013, **33**(10): 3205-3212.
- [40] Brook G A, Folkoff M E, Box E O. A world model of soil carbon dioxide[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1983, **8**(1): 79-88.
- [41] Jassal R S, Black T A, Drewitt G B, *et al.* A model of the production and transport of CO₂ in soil: predicting soil CO₂ concentrations and CO₂ efflux from a forest floor[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, **124**(3-4): 219-236.
- [42] Liu Z H, Li Q, Sun H L, *et al.* Seasonal, diurnal and storm-scale hydrochemical variations of typical epikarst springs in subtropical karst areas of SW China: Soil CO₂ and dilution effects [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, **337**(1-2): 207-223.

CONTENTS

Pollution of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Particulate Matters of Shenzhen	SUN Jian-lin, CHANG Wen-jing, CHEN Zheng-xia, <i>et al.</i> (1513)
Emission Characteristics of VOCs from Typical Restaurants in Beijing	CUI Tong, CHENG Jing-chen, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (1523)
Characteristics Analysis of Sulfur Dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (1530)
Comparison Test Between PM _{2.5} Continuous Monitoring System and Manual Sampling Analysis for PM _{2.5} in Ambient Air	WANG Qiang, ZHONG Qi, CHI Ying, <i>et al.</i> (1538)
Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	PEI Bing (1544)
Potential Carbon Fixation Capability of Non-photosynthetic Microbial Community at Different Depth of the South China Sea and Its Response to Different Electron Donors	FANG Feng, WANG Lei, XI Xue-fei, <i>et al.</i> (1550)
Remote Sensing Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland Lakes Based on GOCI Image and Optical Classification of Water Body	FENG Chi, JIN Qi, WANG Yan-nan, <i>et al.</i> (1557)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (1565)
Temporal-spatial Variation and Source Identification of Hydro-chemical Characteristics in Shima River Catchment, Dongguan City	GAO Lei, CHEN Jian-yao, WANG Jiang, <i>et al.</i> (1573)
Response and Control Factors of Groundwater to Extreme Weather, Jiguan Cave, Henan Province, China	LIU Xiao, YANG Yan, PENG Tao, <i>et al.</i> (1582)
Impact of Rocky Desertification Treatment on Underground Water Chemistry and Dissolved Inorganic Carbon Isotope in Karst Areas	XIAO Shi-zhen, XIONG Kang-ning, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (1590)
Difference of Karst Carbon Sink Under Different Land Use and Land Cover Areas in Dry Season	ZHAO Rui-yi, LIANG Zuo-bing, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (1598)
Vertical Migration Characteristics of Organochlorine Pesticides in Overlying Soil in Karst Terranes and Its Impact on Groundwater	SUN Yu-chuan, WANG Yong-qi, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i> (1605)
Pollution Status and Migration of Mercury in the Sediments of Nansi Lake in Shandong Province	CAO Fei-fei, YANG Li-yuan, PANG Xu-gui, <i>et al.</i> (1615)
Response of Sediment Micro Environment and Micro Interface to Physical Disturbance Intensity Under the Disturbance of <i>Chironomus plumosus</i>	SHI Xiao-dan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1622)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition and Associated Impact on N Transport in the Watershed of Red Soil Area in Southern China	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1630)
Effect of Different Purple Parent Rock on Removal Rates of Nitrogen, Phosphorus and Organics in Landscape Water	HUANG Xue-jiao, LIU Xiao-chen, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1639)
Effects of <i>Litchi chinensis</i> Defoliation on Growth and Photosynthesis of <i>Microcystis aeruginosa</i>	WANG Xiao-xiong, JIANG Chen-chun, LI Jin-wei, <i>et al.</i> (1648)
Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to Green Algae	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (1655)
Formation Mechanism of the Disinfection By-product 1,1-Dichloroacetone in Drinking Water	DING Chun-sheng, MENG Zhuang, XU Yang-yang, <i>et al.</i> (1662)
Degradation Kinetics and Formation of Disinfection By-products During Linuron Chlorination in Drinking Water	LING Xiao, HU Chen-yan, CHENG Ming, <i>et al.</i> (1668)
Interference for Various Quench Agents of Chemical Disinfectants on Detection of Endotoxin Activities in Water	ZHANG Can, LIU Wen-jun, SHI Yun, <i>et al.</i> (1674)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Dairy Manure Biochar	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, DIAO Jing-ru, <i>et al.</i> (1678)
Absorption of Uranium with Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid	ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG Yan, <i>et al.</i> (1686)
Effect of Membrane Wettability on Membrane Fouling and Chemical Durability of SPG Membranes	ZHANG Jing, XIAO Tai-min, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1694)
TiO ₂ -Induced Photodegradation of Levofloxacin by Visible Light and Its Mechanism	GUO Hong-sheng, LIU Ya-nan, QIAO Qi, <i>et al.</i> (1700)
Performance of Novel Macromolecule Flocculant in the Treatment of Wastewater Containing Cr(VI) Ions	WANG Gang, DU Feng-ling, CHANG Qing, <i>et al.</i> (1707)
On-line Estimation for the Amount of Stored PHA in Activated Sludge Based on OUR-HPR Measurements	ZENG Shan-wen, WANG Ze-yu, GAO Jing, <i>et al.</i> (1713)
Formation Mechanism of Self-forming Dynamic Membrane During Separation of High-concentration Sewage Sludge Fermented for Acid Production	HUANG Shuai, LIU Hong-bo, YIN Bo, <i>et al.</i> (1720)
Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test	ZHANG Yu, HAN Rong, LU Wen-jing, <i>et al.</i> (1727)
Extraction of Heavy Metals from Sludge Using Biodegradable Chelating Agent <i>N,N</i> -bis(carboxymethyl) Glutamic Acid Tetrasodium	WU Qing, CUI Yan-rui, TANG Xiao-xiao, <i>et al.</i> (1733)
Biodiversity and Function Analyses of BIOLAK Activated Sludge Metagenome	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin, <i>et al.</i> (1739)
Characteristics of Nitrogen Removal by a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium YL	LIANG Xian, REN Yong-xiang, YANG Lei, <i>et al.</i> (1749)
Biodegradation Characteristics and Kinetics of <i>p</i> -nitrophenol by Strain <i>Arthrobacter</i> sp. CN2	REN Lei, SHI Yan-hua, JIA Yang, <i>et al.</i> (1757)
Biodegradation of Pyrene by Intact Cells and Spores of <i>Brevibacillus brevis</i>	LIU Zhi-chen, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (1763)
Investigation of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Landfill	LI Lei, XU Jing, ZHAO You-cai, <i>et al.</i> (1769)
Investigation of Antibiotic Resistance of Indigenous Bacteria and Abundance of Class I Integron in Matrix of Constructed Wetlands of Different Configurations	MAI Xiao-bei, TAO Ran, YANG Yang, <i>et al.</i> (1776)
Effects of Nitrate and CH ₄ on Anaerobic Oxidation of BETX in Landfill Cover Soils	LIU Rong, LONG Yan, WANG Li-li, <i>et al.</i> (1785)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Planted Larch Forest in Shanxi Plateau	YAN Jun-xia, LI Hong-jian, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (1793)
Effects of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration and Temperature Sensitivity in Spring Maize Field in Semi-Arid Regions on Loess Plateau	JIANG Ji-shao, GUO Sheng-li, WANG Rui, <i>et al.</i> (1802)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Street Dusts in Xuanwei and Their Health Risk Assessment	ZHANG Wen-chao, LÜ Sen-lin, LIU Ding-yu, <i>et al.</i> (1810)
Spatial Distribution of Magnetic Properties of Street Dust in Baoji City and Its Implications of Environment	ZHANG Jun-hui, WANG Jin, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (1818)
Effect of Long-term Fertilizer Application on the Stability of Organic Carbon in Particle Size Fractions of a Paddy Soil in Zhejiang Province, China	MAO Xia-li, LU Kou-ping, SUN Tao, <i>et al.</i> (1827)
Effects of Different Reclaimed Scenarios on Soil Microbe and Enzyme Activities in Mining Areas	LI Jun-jian, LIU Feng, ZHOU Xiao-mei (1836)
Soil Microorganism Characteristics and Soil Nutrients of Different Wetlands in Sanjinag Plain, Northeast China	XIAO Ye, HUANG Zhi-gang, WU Hai-tao, <i>et al.</i> (1842)
Strengthening Effects of Sodium Salts on Washing Kerosene Contaminated Soil with Surfactants	HUANG Zhao-lu, CHEN Quan-yuan, ZHOU Juan, <i>et al.</i> (1849)
Effects and Biological Response on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil	YANG Qian, WU Man-li, NIE Mai-qian, <i>et al.</i> (1856)
Enhanced Phytoextraction of Heavy Metals from Contaminated Soils Using <i>Sedum alfredii</i> Hance with Biodegradable Chelate GLDA	WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (1864)
Speciation Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals in Oasis Soil Under Pb, Zn Combined Stress	JIN Cheng, ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (1870)
Influence of Sulfur on the Formation of Fe-Mn Plaque on Root and Uptake of Cd by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (1877)
Effects of Ozone on Photosynthesis of Several Plants	LI Miao-miao (1888)
A Method Research on Environmental Damage Assessment of a Truck Rollover Pollution Incident	CAI Feng, ZHAO Shi-bo, CHEN Gang-cai, <i>et al.</i> (1902)

《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5月15日 第36卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 5 May 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. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行