

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, 冉靛, 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)	

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^{1,2,3}, 熊康宁^{1,3*}, 蓝家程^{1,3}, 张晖^{1,3}, 杨龙^{1,3}

(1. 贵州师范大学中国南方喀斯特研究院, 贵阳 550001; 2. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 3. 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001)

摘要:以贵州关岭-贞丰花江岩溶石漠化综合治理示范区不同土地利用类型和不同石漠化治理模式的5个泉点为研究对象, 分析泉水水化学特征及溶解无机碳(DIC)稳定同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$)的分布和变化, 揭示石漠化治理的岩溶效应和水质效应。结果表明, 研究区地下水水化学类型为重碳酸-钙型($\text{HCO}_3\text{-Ca}$), 人类活动干预相对较少的水井湾、戈贝和毛家湾泉水的水质较好, 而受农业活动影响较多的吊井和谭家寨泉水主要离子浓度和电导率都较高, 水质相对较差; 泉水pH值、方解石饱和度(SIc)和二氧化碳分压($p\text{CO}_2$)对土地利用或石漠化治理反应敏感, 表现为水井湾、吊井、谭家寨和戈贝泉水中的pH值和SIc小于毛家湾泉水, 相反 $p\text{CO}_2$ 明显大于毛家湾泉水; 水井湾、毛家湾、戈贝泉水中的 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 当量比接近1:1, 以碳酸风化碳酸盐岩为主, 吊井和谭家寨泉水中 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 相对 HCO_3^- 明显偏高, 主要是因为受到农业活动强烈影响, 可能有硫酸和硝酸参与了碳酸盐岩的溶蚀; 此外, 雨季由于生物旺盛, 泉水中的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值较早季偏轻; 不同泉水中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 平均值大小顺序为吊井(-12.79‰) < 水井湾(-12.48‰) < 戈贝(-10.76‰) < 毛家湾(-10.30‰) < 谭家寨(-6.70‰), 反映了石漠化和农业施肥影响下的地下水的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值偏重, 石漠化治理后泉水的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值则偏轻。

关键词:石漠化治理; 岩溶; 水化学; 溶解无机碳; 土地利用

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1590-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2015.05.011

Impact of Rocky Desertification Treatment on Underground Water Chemistry and Dissolved Inorganic Carbon Isotope in Karst Areas

XIAO Shi-zhen^{1,2,3}, XIONG Kang-ning^{1,3*}, LAN Jia-cheng^{1,3}, ZHANG Hui^{1,3}, YANG Long^{1,3}

(1. Institute of South China Karst, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 3. State Key Engineering Technology Research Center for Karst Rocky Desertification Rehabilitation of China, Guiyang 550001, China)

Abstract: Five springs representing different land-use types and different karst rocky desertification treatment models were chosen at the Huajiang Karst Rocky Desertification Treatment Demonstration Site in Guanling-Zhenfeng Counties in Guizhou, to analyze the features of underground water chemistry and dissolved inorganic carbon isotopes ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) and reveal the effect of rocky desertification treatment on karstification and water quality. It was found that, the underground water type of the research area was $\text{HCO}_3\text{-Ca}$; the water quality of the springs which were relatively less affected by human activities including Shuijingwan Spring (SJW), Gebei Spring (GB), and Maojiawan Spring (MJW) was better than those relatively more affected by human activities including Diaojing Spring (DJ) and Tanjiazhai Spring (TJZ), the main ion concentrations and electrical conductivity of which were higher; pH, SIc and $p\text{CO}_2$ were sensitive to land-use types and rocky desertification treatment, which could be shown by the higher pH and SIc and lower $p\text{CO}_2$ in MJW than those in the other four springs; $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ of SJW, MJW and GB were nearly 1:1, dominated by carbonate rock weathering by carbon acid, while the $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ of DJ and TJZ was much higher than HCO_3^- , suggesting that sulfate and nitrate might also dissolve carbonate rock because of the agricultural activities; $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ was lighter in wet season because of the higher biological activities; the average $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ was in the order of DJ (-12.79‰) < SJW (-12.48‰) < GB (-10.76‰) < MJW (-10.30‰) < TJZ (-6.70‰), which demonstrated that $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ would be heavier after rocky desertification and lighter after the rocky desertification are treated and controlled.

Key words: rocky desertification treatment; karst; water chemistry; dissolved inorganic carbon; land use

岩溶环境被视为同沙漠边缘一样的脆弱环境^[1]。岩溶石漠化问题是中国三大生态问题之一,

收稿日期: 2014-11-10; 修订日期: 2014-11-30

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划重大项目(2011BAC09B01); 国家自然科学基金项目(41201565, 41302220); 贵州省科技计划课题项目(黔科合SY字[2011]3087)

作者简介: 肖时珍(1981~), 女, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为岩溶环境与地质生态, E-mail: xiaoshizhen@gznu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: xiongkn@163.com

更是岩溶地区首要的生态问题. 2008 年, 国务院批复了《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲(2006-2015 年)》, 提出石漠化建设的许多内容, 并指出到 2015 年要完成石漠化治理面积约 7 万 km^2 的总目标^[2]. 为此, 以贵州岩溶石漠化地区为核心, 全国各地展开了大规模的石漠化治理工程. 这些生态环境治理工程除了能增加森林覆盖率、减少水土流失、改善生态环境、促进地区经济发展外, 又是如何影响岩溶地下水水质和岩溶作用的运行需要深入研究.

岩溶动力系统是一个脆弱的生态系统, 受制于岩溶环境^[3], 岩溶地下水对外界环境变化非常敏感^[4]. 受自然或人为因素的影响, 岩溶地下水水化学和岩溶作用的方式及强度也会发生改变. 岩溶地下水对土地利用变化敏感, 已有不少学者研究了土地利用对岩溶地下水水化学和水质的影响^[5~9], 主要是考虑农业活动或居民点对水质或水化学的影响进行研究, 关于区域水质的变化大多是利用遥感技术对土地利用前后短期或长期的水化学数据进行对比分析. 而关于土地利用变化对溶解无机碳稳定同位素的影响研究相对不多^[10,11], 侧重从土地利用的角度谈影响. 不同的土地利用方式能够改变岩溶作用的方式和强度^[12,13], 农业活动对岩溶作用的影响本质上就是土地利用的影响, 农业活动不利于岩溶作用^[11], 施用农肥会降低碳酸盐岩溶蚀速率, 减少

岩溶 CO_2 汇^[14]. 可见, 从石漠化治理的角度或者石漠化治理过程对地下水的影响的研究并不多见, 石漠化治理会改变土地利用方式, 改善生态环境. 刘再华^[15]指出, 经过石漠化综合治理后的岩溶地区将为全球 CO_2 增汇减排做出重要贡献. 袁道先^[16]也指出: 我国西南石漠化综合治理可增强地质碳汇的成果有可能为我国应对全球变化的有些措施提供科学依据. 因此, 本研究从石漠化综合治理为切入点, 以空间代替时间, 探讨石漠化治理过程对岩溶地下水水化学和溶解无机碳稳定碳同位素的影响, 揭示石漠化治理过程的水质效应和岩溶效应.

1 研究区概况

贵州关岭-贞丰花江喀斯特峡谷石漠化综合治理示范区位于贵州省安顺市关岭县与黔西南自治州贞丰县交界处的北盘江峡谷花江段, 总面积 51.62 km^2 , 喀斯特面积占 88.07%, 涉及北盘江镇的水淹坝、查尔岩、云洞湾和板贵乡的木工、坝山、三家寨、孔落箐以及花江镇的五里村共 8 个行政村(图 1). 示范区大部分地区海拔 500 ~ 1 200 m, 气候冬春温暖干旱, 夏秋湿热, 热量资源丰富, 年均温 18.4 $^{\circ}\text{C}$, 年均极端最高气温为 32.4 $^{\circ}\text{C}$, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 6 542 $^{\circ}\text{C}$, 年降水量 1 100 mm. 2012 年植被覆盖度 48.30%, 土壤侵蚀模数 14.64 $\text{t}\cdot(\text{km}^2\cdot\text{a})^{-1}$, 潜在、轻度、中度、强度(含极强度)石漠化面积分别占示范区总面积的 21.60%、34.87%、10.80%、

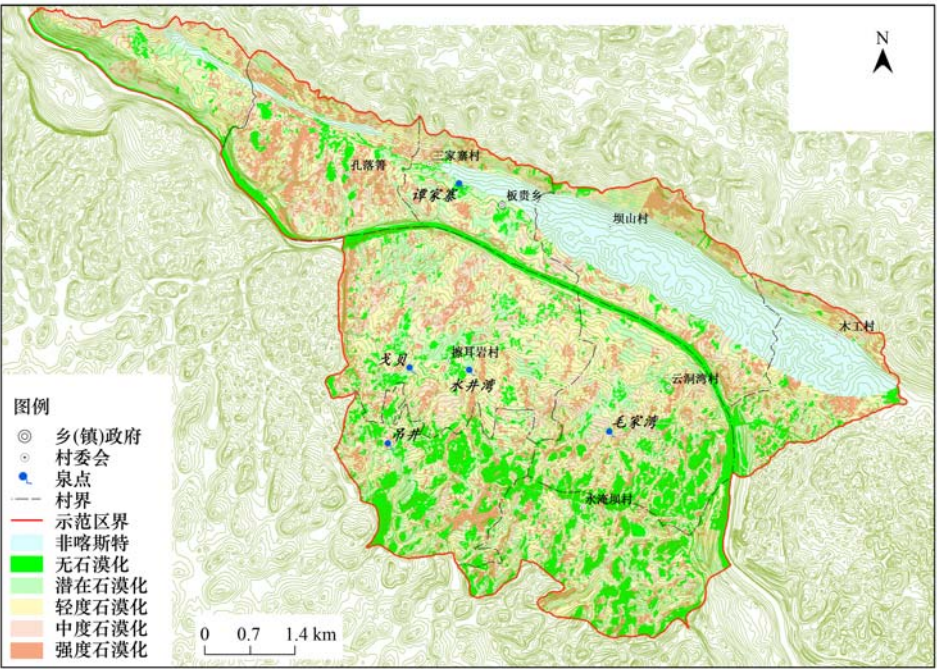


图 1 关岭-贞丰花江石漠化治理示范区石漠化

Fig. 1 Rocky Desertification of Huajiang Karst Rocky Desertification Treatment Demonstration Site

9.16%^[17](图1)。

在研究区内选择了毛家湾、吊井、水井湾、谭家寨、戈贝这5个泉点(图1、2),泉点的基本状况见表1。其中,毛家湾和戈贝泉域代表了石质为主的石漠化或石漠化治理区范畴,水井湾、谭家寨泉口附近和吊井泉域土层较厚,代表土质石漠化范畴或石漠化治理区范畴。毛家湾泉域补给区的植被主要为稀疏灌丛,岩石裸露率较高,属中度石漠化;戈贝泉域属于石漠化治理示范点,主要种植金银花、花椒和石榴,石漠化治理有14年,其周围还分布少量竹林和旱地。水井湾泉域也属于石漠化治理示范点,其上覆主要为封山育林地和退耕还林地,种植了连片花

椒、金银花,封山育林已有30余年,花椒、金银花等也种植了14年,石漠化治理效果明显;谭家寨和吊井泉域泉口附近土壤分布广泛,土层较厚,岩石裸露率低,良好的土壤条件为农业活动提供基础,使吊井和谭家寨受农业活动影响比较多,但泉域上游水土条件较差。吊井泉域土地利用类型为旱地、水田和封山育林地,以旱地为主,土层厚,种植玉米和水稻,封山育林地处于海拔稍高的地方,树木多长于裸露的碳酸盐岩上;谭家寨泉口附近主要种植甘蔗、玉米和少量花椒,海拔稍高的区域(泉域上游)坡度很陡,大于65°,植被生长困难,为裸岩石砾地和稀疏灌草地,石漠化比较严重,为强度石漠化地区。

表1 研究区不同泉点基本状况

Table 1 General information of the researched springs in the study area

泉点	土地利用类型	植被概况	石漠化治理模式	石漠化类型
毛家湾	灌木林地	稀疏灌丛	未治理	石质,中度石漠化
吊井	旱地、水田、林地	水稻、玉米、构树等	泉域上部封山育林	土质,轻度石漠化
水井湾	林地、果园	金银花、花椒、构树、任豆、香椿等	封山育林30年,退耕还林种植金银花和花椒14年	土质,轻度石漠化
谭家寨	旱地、荒草地	玉米、甘蔗、少量花椒等	未治理	土质,强度石漠化
戈贝	灌木林地、果园	金银花、花椒、石榴等	种植金银花和花椒等14年	石质,中度石漠化

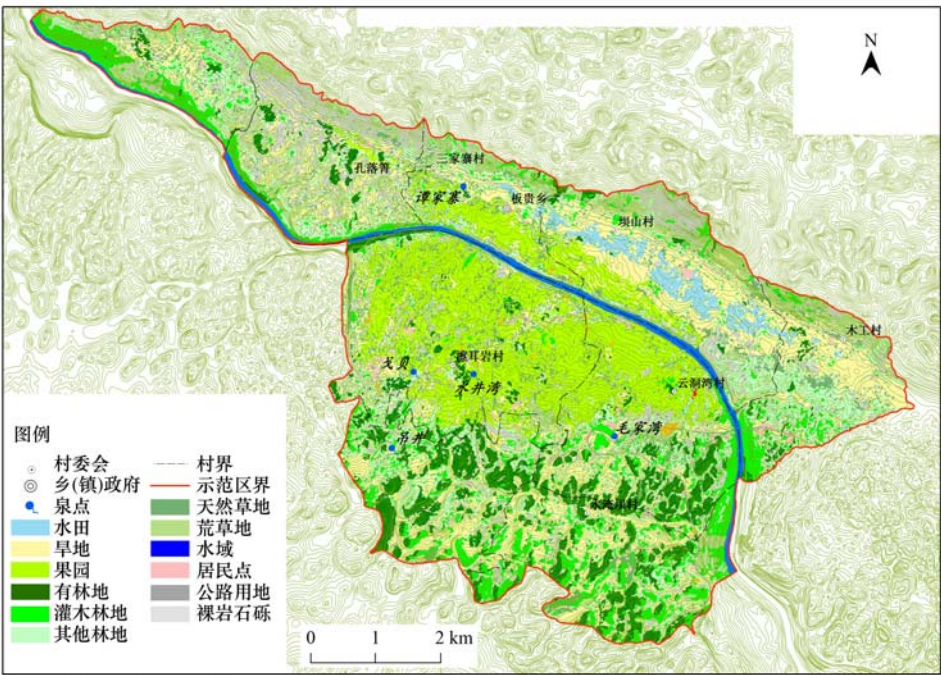


图2 关岭-贞丰花江石漠化治理示范区土地利用

Fig. 2 Land use of Huajiang Karst Rocky Desertification Treatment Demonstration Site

2 材料与方法

2.1 样品的采集

自2012年1月至2013年2月对研究区5个泉点进行连续的水化学采样监测,2013年1月至2014

年5月对同位素采样监测。用事先清洗过的50 mL高密度聚乙烯塑料瓶采集阴、阳离子水样,其中阳离子加入1:1 HNO₃酸化至pH<2。使用去离子水清洗过的10 mL带盖离心管采集溶解无机碳(DIC)同位素样,排除空气后加2滴HgCl₂溶液,盖紧,用

胶布密封后带回室内低温保存。

2.2 实验方法

使用美国 HCAH 公司生产的 HQ340d 多参数水质分析仪野外现场监测水中 pH 值、水温、电导率 (EC), 其测量精度分别为 0.01pH 单位、0.1℃ 和 $1 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$; 用德国 Merck 公司产的碱度计和硬度计分别测量水中的 HCO_3^- 和 Ca^{2+} , 其精度分别为 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

NO_3^- 、 SO_4^{2-} 等阴离子的测试使用紫外分光光度计分析; Cl^- 用 AgNO_3 滴定法测定。阳离子水样采用美国 Perkin-Elmer 公司的 Optima 2100DV 全谱直读型 ICP-OES 测定, 检测精度 $0.001 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (相对标准偏差 $< 2\%$)。

$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的测试仪器为 Delta V Plus 气体稳定同位素质谱仪, 绝对误差 $< 0.2\text{‰}$ 。通过连接 Delta V Plus 气体质谱仪的 Gas Bench II 在线装置进行样品前处理, 处理生成的 CO_2 气体由 He 气载入质谱仪进行测定, 测定结果用国际标准 V-PDB 校准, 精度 $< 0.15\text{‰}$ 。

方解石饱和指数 (SIC) 和二氧化碳分压 ($p\text{CO}_2$) 的计算由 WATSPEC 软件完成。

以上测试均在西南大学水化学分析实验室和地球化学同位素实验室完成。

3 结果与讨论

3.1 水化学特征

从派帕三线图 (图 3) 可知, 研究区地下水水化学组成以 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 为主要的阴阳离子, 分别占阴阳离子的比例均在 60% 以上, 水化学类型为重碳酸-钙型 (HCO_3^- -Ca)。研究区属于碳酸盐岩区, 区内主要分布三叠系中统杨柳井组地层, 以灰岩和白云岩夹角砾状白云岩为主, 水化学特征充分反映了其受水-岩作用的控制。吊井泉水 Mg^{2+} 比例较高, 原因是包括了部分三叠系中统关岭组地层, 以泥质白云岩和泥质灰岩为主。

地下水主要成分中, Ca^{2+} 、 HCO_3^- 和 Mg^{2+} 来自于碳酸盐岩的溶蚀。一般来说, 岩溶地区 Na^+ 、 K^+ 含量比较低, 主要来自于硅酸盐岩矿物的溶解和水体对氯化物盐类的溶滤作用^[18]; 另外, 水的蒸发或与黏土矿物进行离子交换也可增加水中的 K^+ 和 Na^+ 含量^[19]。地下水中的硫酸盐通常来源于石膏溶解、硫化物氧化、大气降水及人为输入 (农业肥料、工矿废水)^[20]。因此 K^+ 、 Na^+ 和 SO_4^{2-} 既有岩石来源, 也可来源于污染物。地下水

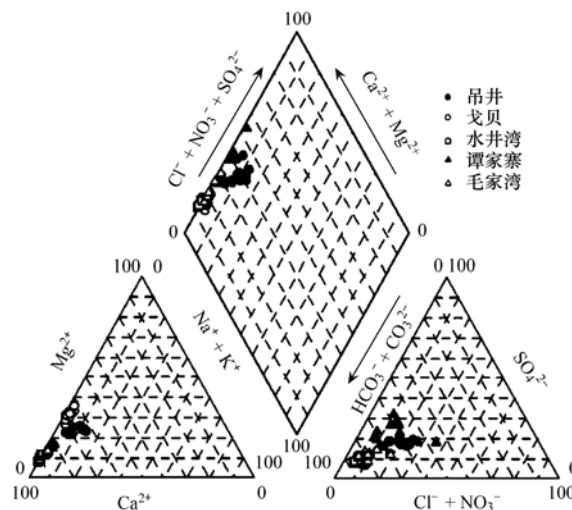


图 3 研究区各泉点地下水 Piper 图

Fig. 3 Piper diagram of the researched springs in the study area

中的 NO_3^- 主要来源于人为活动的输入, 例如农业施肥、大气输入、人类和动物排泄物、“三废”以及土壤有机氮矿化和消化作用转化而来^[21,22], 与人类活动密切相关的元素诸如与农业活动相关的 Cl^- 在受影响的地下水系统中表现出较强的地球化学敏感性特征^[23]。因此地下水中的 NO_3^- 和 Cl^- 主要来自污染物。

由图 3 和表 2 可以看出, 水井湾、毛家湾和戈贝这 3 个泉点水中的 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 含量和比例均很低。相对于这 3 个泉点, 吊井和谭家寨泉点含有较高比例的 Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} , 平均占了阴离子的 30% 左右; K^+ 、 Na^+ 的含量也较高, 反映了土地利用对地下水的影响。水井湾为封山育林和退耕还林地, 退耕还林已有 14 余年。毛家湾虽然植被覆盖少, 但人类活动影响小。同样戈贝泉域属于石漠化治理地, 退耕种植金银花、石榴、花椒之后, 人类干预程度小, 而且已退耕还林 14 年。而吊井和谭家寨种植玉米、水稻和甘蔗等。从土地利用情况来看, 显然, 本研究区的吊井和谭家寨泉地下水的 Cl^- 、 NO_3^- 主要来自农业施肥。由于区内地层并无石膏层, 吊井和谭家寨两泉点的硫酸盐主要来自当地硫酸铵等肥料的输入。另外, 吊井和谭家寨虽然均受农业活动影响强烈, 但其离子浓度也有所差异, 主要是因为泉水的汇水范围、农作物种类和施肥程度不同所致^[24]。

电导率反映了水中离子浓度的大小, 其变化能够反映地下水的污染程度, 可以作为水质指标。研究区 5 个泉点水文地质条件相似, 因此, 电导率较高的泉点, 污染程度较重。以上分析发现主要离子中

吊井和谭家寨泉点的含量较高,这也导致了较高的电导率.从表1可知,5个泉点电导率的平均值从大到小为吊井($745\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)>谭家寨($709\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)>戈贝($605\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)>水井湾($513\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)>毛家湾($431\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$).

以上表明,土地利用类型对水质的影响是明显的,经过石漠化治理之后的土地,对水质影响小,或基本没有影响,而农业活动强烈的地区则影响较大.表明石漠化治理后,泉水水质变好,而其根本土地利用方式从农用地向灌木林地、林地转变;反之石漠化过程则是由林地和灌木林地转变为耕地的过程中,水质将变坏.

从表1可以看出,水井湾、吊井、谭家寨和戈贝的 HCO_3^- 和 $p\text{CO}_2$ 明显大于毛家湾,主要是这4个点的土壤和植被均优于毛家湾,因此能够产生更多的土壤 CO_2 ,土壤 CO_2 随水往下渗,导致泉水中的 HCO_3^- 和 $p\text{CO}_2$ 较高.与 $p\text{CO}_2$ 分布对应的是pH值和SIc,可以看出,水井湾、吊井、谭家寨和戈贝泉水中的pH值和SIc小于毛家湾泉水,主要是因为 $p\text{CO}_2$ 含量较高的缘故.此外,除了吊井外,其余泉点的 $p\text{CO}_2$ 均为雨季大于旱季,而且植被和土壤效果越好的,雨季和旱季差异越明显.研究区属于亚热带湿热河谷气候,雨热同期,雨季植被生长旺盛,微生物活动也旺盛,能够产生更多的土壤 CO_2 ,进而导致水中 $p\text{CO}_2$ 升高.

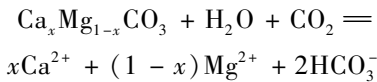
表2 研究区泉域地下水物理化学特征¹⁾

Table 2 Physical and chemical features of the spring waters in the study area														
采样点	平均值	水温 /℃	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	EC / $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	SIc	pCO ₂ /Pa
水井湾(n=14)	雨季	22.9	7.13	143	7.29	0.53	0.38	344	9.57	6.96	26.78	523	0.22	2 492
	旱季	16.4	7.54	114	7.95	0.47	0.34	337	9.31	4.47	25.28	502	0.50	1 122
吊井(n=13)	雨季	20.8	7.34	117	23.69	14.09	4.24	316	31.32	28.99	66.81	651	0.30	1 738
	旱季	17.4	7.31	134	30.37	23.40	6.51	385	40.21	40.06	88.82	838	0.36	1 853
谭家寨(n=14)	雨季	21.9	7.28	159	16.88	3.25	0.50	342	33.06	23.77	109.1	736	0.40	1 620
	旱季	16.4	7.68	145	16.58	3.86	0.49	328	13.30	21.07	99.44	685	0.69	716
戈贝(n=14)	雨季	22.9	7.45	94	26.94	3.41	1.27	340	14.46	8.95	33.41	553	0.42	1 486
	旱季	15.7	7.56	114	31.94	3.72	1.22	430	19.52	8.85	31.63	657	0.59	1 277
毛家湾(n=14)	雨季	21.3	7.70	88	7.49	0.81	0.78	252	12.91	6.38	28.21	434	0.51	496
	旱季	16.8	7.74	89	8.10	0.84	0.80	264	11.81	6.16	26.88	428	0.52	492

1) 离子单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

3.2 岩溶作用方式

纯粹的碳酸风化碳酸盐岩的化学方程式如下:



由上式可知,理论上地下水仅受控于碳酸盐岩的溶解, $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 的当量比等于或接近于1. 由图4可以看出,水井湾、毛家湾、戈贝泉水中的 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 的当量比在1:1等量线附近,结合前面水化学特征分析,说明碳酸盐岩主要受碳酸的风化作用. 然而吊井和谭家寨泉水中 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 明显偏高,主要是因为受到农业活动强烈影响,可能有硫酸和硝酸参与了碳酸盐岩的溶蚀. 研究表明硝酸和硫酸均能够参与碳酸盐岩的溶蚀^[25~27]. 由于戈贝和毛家湾均属于石质石漠化范畴,两者比较可以看出,戈贝泉水中 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 含量明显高于毛家湾,表明石漠化治理改变植被和土壤状况,使得水中 $p\text{CO}_2$ 升高,促进岩溶作用,有利于提高岩溶碳汇. 水井湾、吊井和谭家寨可以认为

属于土质石漠化范畴,通过比较发现水中的 HCO_3^- 含量相当,而水井湾($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$)含量偏低,说明受农业活动影响,吊井和谭家寨泉水中碳酸参与的岩溶作用减弱,即碳酸吸收大气 CO_2 减弱,不利于

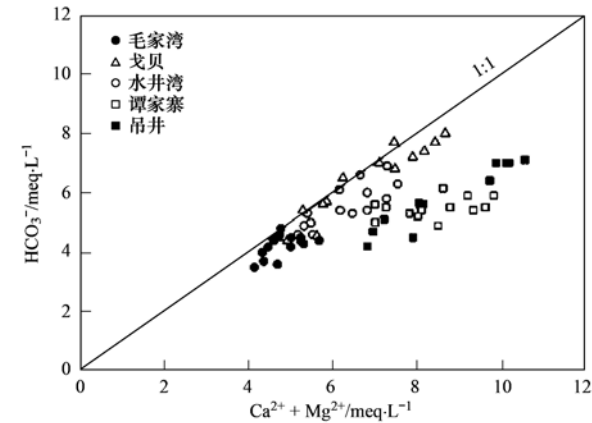


图4 地下水($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$)与 HCO_3^- 当量比
Fig. 4 Equivalent ratio of $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ to HCO_3^- in underground water

岩溶碳汇. 因此,岩溶石漠化区,通过治理之后,能够改变生态环境,能够增强岩溶碳汇.

3.3 溶解无机碳稳定同位素的变化

地下水中的溶解无机碳 (DIC) 包括 H_2CO_3 、 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} ,DIC 的存在形态取决于水中 pH 值范围. 研究区属于碳酸盐岩地区,地下水中 pH 值分布范围在 6.8 ~ 8.2 之间,因此,水中溶解无机碳以 HCO_3^- 为主,一般来说可以以水中 HCO_3^- 浓度来表征^[28~30].

水中 DIC 有 3 种来源: 大气 CO_2 、有机质分解产生的 CO_2 和碳酸盐岩的溶解^[31,32]. 贵州属于酸雨区,大气降水中 pH 值大部分低于 5.6,地下水中 CO_2 分压和土壤 CO_2 均远高于大气 CO_2 分压,因此可以忽略大气降水输入的 HCO_3^- ^[30,33]. 可以认为研究区地下水中 DIC 来源为有机质氧化分解和碳酸盐岩. 由表 3 可知,吊井、谭家寨、水井湾、戈贝和毛家湾泉水雨季 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 平均值分别为 -12.13‰ 、 -7.31‰ 、 -13.48‰ 、 -11.54‰ 和 -11.26‰ ; 旱季平均值分别为 -12.44‰ 、 -6.08‰ 、 -11.47‰ 、 -9.98‰ 和 -9.33‰ . 总体上,雨季 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值偏轻,旱季偏重(图 5),这与其它研究结果一致^[10,11,33]. 原因是雨季雨热同期,生物量旺盛,而旱季气温低,生物作用减弱,水-岩作用时间长,岩石来源的 DIC 较多,导致 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值升高.

从不同泉点来看(表 3), $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 平均值大小顺序为吊井(-12.79‰) < 水井湾(-12.48‰) < 戈

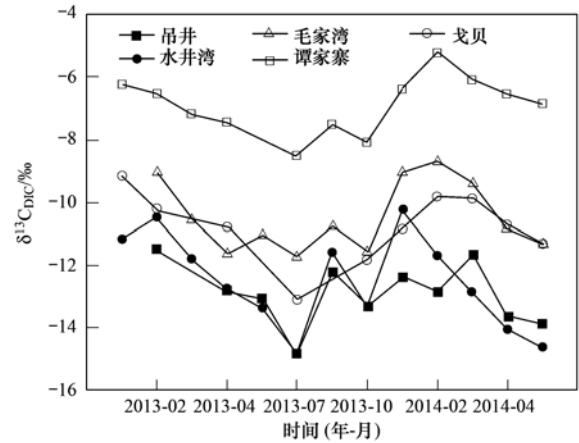


图 5 研究区不同泉域水中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值季节变化

Fig. 5 Seasonal variation of $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of the researched springs in the study area

贝 (-10.76‰) < 毛家湾 (-10.30‰) < 谭家寨 (-6.70‰),这可能反映了土地利用类型的影响. 吊井泉域主要种植水稻以及封山育林,而且其泉口周围土层较厚,水中 $p\text{CO}_2$ 最高,导致其泉水中的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值最偏轻; 水井湾泉域上覆为长时间的封山育林和退耕还林地,种植大片花椒和金银花,主要以 C_3 植被为主,土层也比较好,因此泉水中的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值也比较偏轻; 戈贝和毛家湾泉域上覆主要为灌丛地,同属石质石漠化范畴,然而戈贝经过石漠化治理,且周围分布少数竹林和旱地,因而戈贝泉水中的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值相对毛家湾泉较轻; 谭家寨泉 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值最重,主要是因为其泉口附近种植了大片 C_4 植被如玉

表 3 研究区各点地下水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 分布和变化¹⁾

Table 3 Distribution and variation of the $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of the underground waters in the study area					
时间(年-月)	吊井	谭家寨	水井湾	戈贝	毛家湾
2013-01	—	-6.23	-11.13	-9.17	—
2013-02	-11.47	-6.52	-10.44	-10.22	-9.04
2013-03	—	-7.21	-11.79	—	-10.54
2013-04	-12.79	-7.43	-12.75	-10.79	-11.62
2013-05	-13.04	—	-13.33	—	-11.03
2013-07	-14.75	-8.52	-14.82	-13.07	-11.73
2013-09	-12.20	-7.52	-11.56	—	-10.74
2013-10	-13.32	-8.08	-13.32	-11.80	-11.53
2013-12	-12.37	-6.36	-10.20	-10.83	-9.04
2014-02	-12.86	-5.23	-11.69	-9.81	-8.67
2014-03	-11.67	-6.07	-12.82	-9.87	-9.37
2014-04	-13.61	-6.53	-14.02	-10.73	-10.83
2014-05	-13.87	-6.84	-14.58	-11.31	-11.34
雨季平均	-13.13	-7.31	-13.48	-11.54	-11.26
旱季平均	-12.44	-6.08	-11.47	-9.98	-9.33
平均值	-12.79	-6.70	-12.48	-10.76	-10.30

1) “—”为无数据

米、甘蔗等,因而对地下水中的碳同位素产生影响,另外,其泉水中 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 相对较高,硝酸和硫酸参与碳酸盐岩溶蚀并不消耗土壤 CO_2 ,导致地下水中 DIC 全部来自岩石部分^[33],故其碳同位素值相对于其他几个泉最重. 总体来说,石漠化和农业施肥影响下的地下水的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值偏重,且石漠化程度和石质程度越高, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值可能越偏重,相反石漠化治理之后,地下水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值则偏轻. 石漠化后,生物成因的土壤 CO_2 减少则导致地下水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值偏重^[10],相反石漠化治理后,土地利用方式转变,土壤层的恢复,导致生物成因而来源的碳增多,增强岩溶作用,相应的泉水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值偏轻. 总之,石漠化治理后,土地利用方式发生改变,地表植被覆盖得到改善,能够产生更多的土壤 CO_2 ,促进碳酸消耗大气 CO_2 风化碳酸盐岩,有利于提高岩溶碳汇. 反之,农业活动强烈或植被退化会抑制岩溶作用^[12]. 因此,为了提高岩溶作用的碳汇效应,在岩溶地区石漠化地区进行治理,要注意退耕还林还草,保持水土,提高植被覆盖率和恢复土壤.

4 结论

(1)研究区地下水受控于水-岩作用,水化学类型属于 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型,石漠化治理和土地利用类型对地下水水化学影响明显,石漠化的治理能够减少人类活动的影响,有利于地下水水质的恢复.

(2)石漠化治理和土地利用类型对岩溶作用方式产生影响. 吊井和谭家寨泉点,受农业活动影响硝酸和硫酸可能参与了碳酸盐岩的溶蚀,农业活动改变了岩溶作用的方式,不利于岩溶碳汇;而水井湾泉域和戈贝泉域分别经过退耕还林和种植经济作物后,主要是 H_2CO_3 参与碳酸盐岩的溶蚀,石漠化的治理,能有效增强岩溶作用.

(3)溶解无机碳同位素指标对土地利用或石漠化反应敏感, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值表现为石漠化治理后泉水中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值偏轻,石漠化地强度大的泉水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值偏重,石漠化治理有助于植被恢复,有利于岩溶碳汇.

参考文献:

- [1] 袁道先. 全球岩溶生态系统对比: 科学目标和执行计划[J]. 地球科学进展, 2001, **16**(4): 461-466.
- [2] 杜鹰. 与自然和谐相处——岩溶地区石漠化综合治理的探索与实践[M]. 北京: 中国林业出版社, 2011.
- [3] 章程, 袁道先. 典型岩溶地下河流域水质变化与土地利用的关系——以贵州普定后寨地下河流域为例[J]. 水土保持学报, 2004, **18**(5): 134-137.
- [4] 袁道先, 蔡桂鸿. 岩溶环境学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988.
- [5] 贾亚男, 刁承泰, 袁道先. 土地利用对埋藏型岩溶区岩溶水质的影响——以涪陵丛林岩溶槽谷区为例[J]. 自然资源学报, 2004, **19**(4): 455-461.
- [6] 蒋勇军, 袁道先, 谢世友, 等. 典型岩溶农业区地下水质与土地利用变化分析——以云南小江流域为例[J]. 地理学报, 2006, **61**(5): 471-481.
- [7] 郭芳, 姜光辉. 岩溶盆地中农业和村镇引起的地下水化学演变[J]. 地球与环境, 2008, **36**(1): 56-63.
- [8] 郭芳, 姜光辉, 夏青, 等. 土地利用影响下的岩溶地下水水化学变化特征[J]. 中国岩溶, 2007, **26**(3): 212-218.
- [9] 刘方, 罗海波, 刘元生, 等. 喀斯特石漠化区农业土地利用对浅层地下水质量的影响[J]. 中国农业科学, 2007, **40**(6): 1214-1221.
- [10] 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.
- [11] 张笑微, 周小萍, 徐尚全. 农业活动对表层岩溶泉溶解无机碳及稳定碳同位素的影响[J]. 水土保持学报, 2013, **27**(2): 218-227.
- [12] 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.
- [13] 曹建华, 潘根兴, 袁道先, 等. 岩溶地区土壤溶解有机碳的季节动态及环境效应[J]. 生态环境, 2005, **14**(2): 224-229.
- [14] 刘长礼, 张云, 宋超, 等. 施用农肥对岩溶溶蚀作用的影响及其生态环境意义[J]. 中国地质, 2009, **36**(6): 1395-1403.
- [15] 刘再华. 岩石风化碳汇研究的最新进展和展望[J]. 科学通报, 2012, **57**(2-3): 95-102.
- [16] 袁道先. 地质作用与碳循环研究的回顾和展望[J]. 科学通报, 2011, **56**(26): 2157.
- [17] 熊康宁, 陈永毕, 陈浒, 等. 点石成金——贵州石漠化治理技术与模式[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2011.
- [18] 朗赞超, 刘从强, 赵志琦, 等. 贵阳市地表水地下水化学组成: 喀斯特水文系统水-岩反应及污染特征[J]. 水科学进展, 2005, **16**(6): 826-832.
- [19] Ortega-Guerrero A. Origin and geochemical evolution of groundwater in a closed-basin clayey aquitard, Northern Mexico [J]. Journal of Hydrology, 2003, **284**(1-4): 26-44.
- [20] 沈照理, 朱宛华, 钟佐桑. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [21] Valdes D, Dupont J P, Laignel B, et al. A spatial analysis of structural controls on Karst groundwater geochemistry at a regional scale [J]. Journal of Hydrology, 2007, **340**(3-4): 244-255.
- [22] Jeong C H. Effect of land use and urbanization on hydrochemistry and contamination of groundwater from Taejon area, Korea [J]. Journal of Hydrology, 2001, **253**(1-4): 194-210.
- [23] 何守阳, 朱立军, 董志芬, 等. 典型岩溶地下水系统地球化学敏感性研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(5): 1176-1182.
- [24] 郭芳, 姜光辉, 裴建国, 等. 广西主要地下河水质评价及其变化趋势[J]. 中国岩溶, 2002, **21**(3): 195-201.
- [25] Han G L, Liu C Q. Water geochemistry controlled by carbonate

- dissolution: a study of the river waters draining karst-dominated terrain, Guizhou Province, China [J]. *Chemical Geology*, 2004, **204**(1-2): 1-21.
- [26] 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.
- [27] Perrin A S, Probst A, Prost 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.
- [28] 高全洲, 沈承德. 河流碳通量与陆地侵蚀研究[J]. *地球科学进展*, 1998, **13**(4): 369-375.
- [29] Das A, Krishnaswami S, Bhattacharya S K. Carbon isotope ratio of dissolved inorganic carbon (DIC) in rivers draining the Deccan Traps, India: Sources of DIC and their magnitudes [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, **236**(1-2): 419-429.
- [30] 姚冠荣, 高全洲, 王振刚, 等. 西江下游溶解无机碳含量的时空变异特征及其输出通量[J]. *地球化学*, 2008, **37**(3): 258-264.
- [31] Aucour A M, Sheppard S M F, Guyomar O, *et al.* Use of ^{13}C to trace origin and cycling of inorganic carbon in the Rhône river system [J]. *Chemical Geology*, 1999, **159**(1-4): 87-105.
- [32] Wachniew P. Isotopic composition of dissolved inorganic carbon in a large polluted river: the Vistula, Poland [J]. *Chemical Geology*, 2006, **233**(3-4): 293-308.
- [33] 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.

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 Phytoremediation 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