

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第1期

Vol.35 No.1

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

雾霾重污染期间北京居民对高浓度 PM _{2.5} 持续暴露的健康风险及其损害价值评估	谢元博, 陈娟, 李巍 (1)
长白山 PM _{2.5} 中水溶性离子季节变化特征研究	赵亚南, 王跃思, 温天雪, 戴冠华 (9)
青岛大气颗粒物数浓度变化及对能见度的影响	柯馨姝, 盛立芳, 孔君, 郝泽彤, 屈文军 (15)
重庆市大气二噁英污染水平及季节变化	张晓岭, 卢益, 朱明吉, 蹇川, 郭志顺, 邓力, 孙静, 张芹, 罗财红 (22)
西南地区再生铝冶炼行业二噁英大气排放	卢益, 张晓岭, 郭志顺, 蹇川, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 (30)
西南地区新型干法水泥生产中的二噁英大气排放	张晓岭, 卢益, 蹇川, 郭志顺, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 (35)
杭州市办公场所室内空气中 PBDEs 的污染现状与特征	蒋欣慰, 孙鑫, 裴小强, 金漫彤, 李云龙, 沈学优 (41)
模拟不同排放源排放颗粒及多环芳烃的粒径分布研究	符海欢, 田娜, 商惠斌, 张彬, 叶素芬, 陈晓秋, 吴水平 (46)
川东北地区元素大气沉降通量及其季节变化	童晓宁, 周厚云, 游镇烽, 汤静, 刘厚均, 黄颖, 贺海波 (53)
重庆市铁山坪 2001 ~ 2010 年酸沉降变化	余德祥, 马萧萧, 谭炳全, 赵大为, 张冬保, 段雷 (60)
汉江上游金水河流域氮湿沉降	王金杰, 张克荣, 吴川, 张全发 (66)
麦秸及其烟尘中正构脂肪酸的组成	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (73)
兰州市室内大气降尘环境磁学特征及其随高度变化研究	吴铨, 魏海涛, 赵瑞瑞, 张蕊, 刘建宝 (79)
中亚热带针阔混交林土壤-大气界面释汞通量研究	马明, 王定勇, 申源源, 孙荣国, 黄礼昕 (85)
水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO ₂ 释放的影响	柯跃进, 胡学玉, 易卿, 余忠 (93)
黄海和东海海域溶解铋地球化学分布特征	吴晓丹, 宋金明, 吴斌, 李学刚 (100)
浑河上游(清原段)水环境中重金属时空分布及污染评价	马迎群, 时瑶, 秦延文, 郑丙辉, 赵艳民, 张雷 (108)
POCIS 采样技术应用于九龙江流域水环境中雌激素的检测	张利鹏, 王新红, 李永玉, 吴玉玲, 张祖麟 (117)
降雨条件下岩溶地下水微量元素变化特征及其环境意义	陈雪彬, 杨平恒, 蓝家程, 莫雪, 师麟 (123)
锡林河流域地表水水化学主离子特征及控制因素	唐玺雯, 吴锦奎, 薛丽洋, 张明泉, Frauke Barthold, Lutz Breuer, Hans-Georg Frede (131)
子牙河水系河流氮素组成及空间分布特征	赵钰, 单保庆, 张文强, 王超 (143)
水稻种植对中亚热带红壤丘陵区小流域氮磷养分输出的影响	宋立芳, 王毅, 吴金水, 李勇, 李裕元, 孟岑, 李航, 张满意 (150)
黄东海表层沉积物中磷的分布特征	宋国栋, 刘素美, 张国玲 (157)
河流沉积物中有机磷提取剂 (NaOH-EDTA) 提取比例与机制研究	张文强, 单保庆, 张洪, 唐文忠 (163)
沉积物短期扰动下 BAPP 再生和转化机制	武晓飞, 李大鹏, 汪明 (171)
三峡库区典型农村型消落带沉积物风险评价与重金属来源解析	敖亮, 雷波, 王业春, 周谐, 张晟 (179)
太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价	毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 曾庆飞, 谷先坤, 李旭光 (186)
滇池沉积物中主要污染物含量时间分异特征研究	王心宇, 周丰, 伊旋, 郭怀成 (194)
浓度层析荧光光谱局部匹配溢油鉴别技术	王春艳, 史晓凤, 李文东, 张金亮 (202)
光电 Fenton 技术处理污泥深度脱水液研究	王现丽, 王世峰, 吴俊峰, 濮文虹, 杨昌柱, 张敬东, 杨家宽 (208)
同步脱氮除磷颗粒污泥硝化反硝化特性试验研究	刘小英, 林慧, 马兆瑞, 王磊, 刘静伟, 郭超, 姜应和 (214)
垃圾填埋场渗滤液短程生物脱氮的长期稳定性实验研究	孙洪伟, 郭英, 彭永臻 (221)
油田区土壤石油烃组分残留特性研究	胡迪, 李川, 董倩倩, 李立明, 李广贺 (227)
水稻光合同化碳在土壤中的矿化和转化动态	谭立敏, 彭佩钦, 李科林, 李宝珍, 聂三安, 葛体达, 童成立, 吴金水 (233)
土地利用及退耕对喀斯特山区土壤活性有机碳的影响	廖洪凯, 李娟, 龙健, 张文娟, 刘云飞 (240)
水稻土团聚体 Cu ²⁺ 吸附过程中铝的溶出及土壤溶液 pH 变化	许海波, 赵道远, 秦超, 李玉姣, 董长勋 (248)
Cr(VI) 对两种黏土矿物在单一及复合溶液中 Cu(II) 吸附的影响	刘娟娟, 梁东丽, 吴小龙, 屈广周, 钱勋 (254)
淹水时长对 3 种丛枝菌根 (AM) 真菌感染 2 种湿地植物的影响	马雷猛, 王鹏腾, 王曙光 (263)
太湖水质与水生生物健康的关联性初探	周笑白, 张宁红, 张咏, 牛志春, 刘雷, 于红霞 (271)
3 种典型污染物对水生生物的急性毒性效应及其水质基准比较	姜东生, 石小荣, 崔益斌, 李梅 (279)
某制药废水对发光细菌急性毒性的评价研究	杜丽娜, 杨帆, 穆玉峰, 余若祯, 左剑恶, 高俊发, 余忻, 滕丽君, 汤薪瑶 (286)
异丙甲草胺与锌共存对斜生栅藻毒性手性差异影响	胡晓娜, 张淑娟, 陈彩东, 刘惠君 (292)
Biotic Ligand Model 的简化模型及预测性能评价	王万宾, 陈莎, 吴敏, 苏德丽, 赵婧 (299)
基于 USEtox 的焦化行业优先污染物筛选排序研究	郝天, 杜鹏飞, 杜斌, 曾思育 (304)
微囊藻毒素降解菌 <i>Paucibacter</i> sp. CH 菌的分离鉴定及其降解特性	游狄杰, 陈晓国, 向荟圯, 欧阳溱, 杨冰 (313)
硝酸盐抑制油田采出水中硫酸盐还原菌活性研究	杨德玉, 张颖, 史荣久, 韩斯琴, 李光哲, 李国桥, 赵劲毅 (319)
降解纤维素产甲烷的四菌复合系	吴俊妹, 马安周, 崔萌萌, 于清, 齐鸿雁, 庄绪亮, 庄国强 (327)
中国陆地生态系统土壤异养呼吸变异的影响因素	谢薇, 陈书涛, 胡正华 (334)
内蒙古羊草草原根呼吸和土壤微生物呼吸区分的研究	史晶晶, 耿元波 (341)
南京河流夏季水-气界面 N ₂ O 排放通量	韩洋, 郑有飞, 吴荣军, 尹继福, 孙霞 (348)
杀菌剂对湖泊水体温室气体浓度分析的影响	肖启涛, 胡正华, James Deng, 肖薇, 刘寿东, 李旭辉 (356)
生物表面活性剂强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性研究	彭海利, 张植平, 李小明, 杨麒, 罗琨, 易欣 (365)
不同硅铝比 Fe-ZSM-5 催化剂对氧化亚氮催化分解性能的研究	卢仁杰, 张新艳, 郝郑平 (371)
硫酸铵和尿素对废物焚烧过程中多种途径生成氯苯类的抑制作用	严密, 祁志福, 李晓东, 胡艳军, 陈彤 (380)
县域尺度的京津冀都市圈 CO ₂ 排放时空演变特征	汪浩, 陈操操, 潘涛, 刘春兰, 陈龙, 孙莉 (385)
保水剂性能及其农用安全性评价研究进展	李希, 刘玉荣, 郑袁明, 贺纪正 (394)

降雨条件下岩溶地下水微量元素变化特征及其环境意义

陈雪彬^{1,2}, 杨平恒^{1,2*}, 蓝家程^{1,2}, 莫雪^{1,2}, 师阳^{1,2}

(1. 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; 2. 国土资源部岩溶生态环境-重庆南川野外基地, 重庆 408435)

摘要: 对降雨期间青木关岩溶地下河水的化学特征进行连续监测, 获取了 Ba、Sr、Fe、Mn、Al 这 5 种微量元素及其他常量元素质量浓度的高分辨率数据. 运用相关性分析和浓度变化曲线分析微量元素来源及其迁移路径, 并结合流域地质背景探讨地下河微量元素变化特征的形成过程. 研究发现, Ba 和 Sr 元素为碳酸盐岩溶解的产物, 储存于岩石裂隙、孔隙等介质中, 经扩散作用进入地下河, 质量浓度变化较小; 而 Fe、Mn、Al 均来源于土壤, 其中 Fe、Al 元素主要通过落水洞直接进入地下河, 而 Mn 则通过土壤-岩石多孔介质补给地下河, 三者浓度变化很大, 对降雨响应强烈. 结果表明, 5 种微量元素质量浓度均低于 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Fe、Mn、Al 元素最高质量浓度均超过饮用水限值. 地下河 Al、Fe 元素质量浓度变化在一定程度上指示着水土流失和水质变化状况, 因此有必要加强落水洞附近的环境保护和治理, 从源头控制污染源.

关键词: 微量元素; 降雨; 岩溶地下水; 土壤流失; 水质

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)01-0123-08

Variation Characteristics and Environmental Significant of Trace Elements Under Rainfall Condition in Karst Groundwater

CHEN Xue-bin^{1,2}, YANG Ping-heng^{1,2}, LAN Jia-cheng^{1,2}, MO Xue^{1,2}, SHI Yang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir, Ministry of Education, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Field Scientific Observation & Research Base of Karst Eco-environments at Nanchuan in Chongqing, Ministry of Land and Resources, Chongqing 408435, China)

Abstract: Chemical dynamics of Qingmuguan karst groundwater system were continuously monitored during the rainfall events. A series of high-resolution concentrations data on trace elements, such as barium, strontium, iron, manganese, aluminum, and other major elements were acquired. Correlation analysis and analysis of concentration curve were employed to identify the sources and migration path of the trace elements. And the formation process of trace elements in groundwater was discussed with the geological background of underground river basin. Research shows that barium and strontium derived from carbonate dissolution appeared to be stored in features such as fissures and pores. These two ions were recharged into the underground river by diffusion during precipitation, which resulted in small changes in the their concentration. However total iron, total manganese and aluminum derived from soil erosion varied relatively widely with strong response to rainfall, attributing to the migration of total iron and aluminum with overland flow to recharge the subterranean river directly via sinkholes while total manganese via soil-rock porous media. The results showed that concentrations of all the five trace elements were below $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and the highest concentrations of total iron, total manganese and aluminum exceeded the limit of drinking water. To some extent, the concentrations of total iron and aluminum may be an indicator for soil erosion and water quality.

Key words: trace element; rainfall; karst groundwater; soil erosion; water quality

岩溶地下水资源是我国西南岩溶地区重要的引用水资源, 但岩溶水资源存在着易漏失、易污染等特点^[1], 使其开发、利用难度加大. 岩溶地下水化学组分常被用来研究地下水成因、补给来源、水力联系、水-岩相互作用等, 它是地下水资源评价的重要内容, 对流域地下水资源利用和管理及与其有关的生态环境保护与建设都具有重要意义^[2-5]. 尤其是在降雨期间, 由于岩溶区地表、地下双层结构等特殊的水文地质特点, 造成地下水对降雨比较敏感, 因此降雨期间是了解表层岩溶

泉对降雨反映和水化学变化主要过程的至关重要时段. 作为岩溶地下水不可或缺的化学组分, 微量元素虽然含量很少, 但在作为生物圈循环主要载体的水中, 它具有很大的水文地球化学和环境生

收稿日期: 2013-04-15; 修订日期: 2013-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41072192, 41103068); 2011 年度重庆市国土房管局科技计划项目; 重庆市基础与前沿研究计划院士专项项目(cstc2013jcyjys20001); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2012B005); 岩溶动力学重点实验室开放基金项目(KDL2012-08)

作者简介: 陈雪彬(1987~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为岩溶水文地质与地理信息系统, E-mail: jiaju-forever@163.com

* 通讯联系人, E-mail: balance@swu.edu.cn

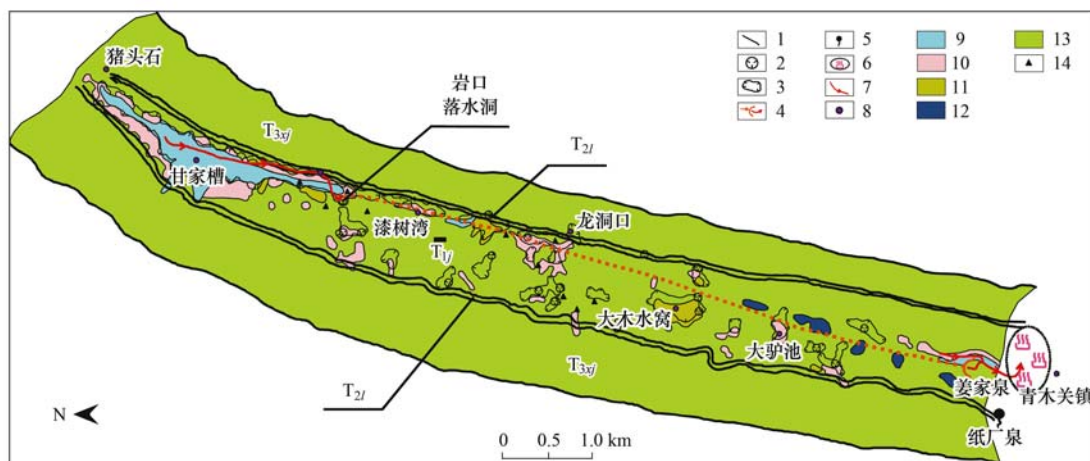
态意义^[6~8]。随着微量元素测定技术的发展^[9,10],微量元素开始被广泛地应用于水文学的研究中。目前学者们已对水体中微量元素的含量、分布特征等进行了研究^[11~13],同时利用微量元素对水源^[14~16]、水动力与水-岩作用的影响^[14,17]以及人类活动与地下水污染^[15,18]做了较为深入的探讨,然而有关岩溶地下水微量元素的水化学形成报道和研究甚少。青木关地下河是西南岩溶区典型的岩溶地下河,近年来,岩溶水文工作者对青木关岩溶地下水的水化学特征从暴雨^[19~21]、日变化^[22,23]、月变化^[24]、季节变化^[25]等不同时间分辨率下做了较为深入的研究,同时探讨了人类活动^[26,27]等对水化学的影响,但对微量元素研究较少。杨平等^[20,21,28]利用主成分分析法探讨了降雨期间青木关地下水化学形成过程,分析了悬浮颗粒物的来源及运移特征。本研究在降雨条件下青木关岩溶地下水高分辨率微量元素监测数据的基础上,探寻地下水微量元素的变化规律,利用相关性分析、浓度变化曲线分析探讨微量元素来源,并通过物质来源、单管道流下物质的扩散运移特点,结合研究区的地质状况,系统分析了微量元素变化特征的形成过程,同时探讨了微量元素所指示的环境生态意义,以期为岩溶地下水资源的合理开发、利用及污染防治提供科学依据。

1 研究区概况

青木关岩溶地下河发育于川东南弧形结构带岩溶槽谷区内,地处重庆市北碚区、沙坪坝区和璧山县的交界处,面积约为 13.4 km²。该区气候属于亚热带湿润季风气候,温暖湿润,雨量充沛,多年平均气温 16.5℃,年均降雨量 1 250 mm。

槽谷形成于川东平行岭谷华蓥山帚状褶皱束温塘峡背斜中段的青木关背斜轴部^[29~31],背斜两翼岩层呈 NNE 向展布。区内岩溶广泛发育,形成“一山二岭一槽”式的典型岩溶槽谷景观。背斜轴部出露地层为下三叠统嘉陵江组碳酸盐岩(T_{1j}),两翼为中三叠统雷口坡组(T_{2l})白云质灰岩、白云岩及泥灰岩、夹角砾状灰岩及灰绿、黄绿色页岩和上三叠统须家河组(T_{3xj})长石石英砂岩、泥质粉砂岩、泥岩,并夹有煤层。槽谷区地势北高南低,降雨经北部甘家槽洼地汇流从岩口落水洞(标高 524 m)进入地下河,成为地下河水的一个重要来源。地下河水从距岩口 7.4 km 的主要出口姜家泉^[32](标高 320 m)流出注入青木溪,最终汇流到嘉陵江。

研究区内的土地利用类型主要为林地、水田和旱地,分别占研究区总面积的 65.09%、10.93%、23.98%(图 1)。水田主要分布在流域上游甘家槽洼地,旱地主要分布在中游地区。



1. 地层界限及代号; 2. 落水洞; 3. 岩溶洼地; 4. 地下河及出口; 5. 泉点; 6. 温泉群; 7. 地表水及流向;
8. 地名; 9. 水田; 10. 旱地; 11. 撂荒草地; 12. 采石场; 13. 林地; 14. 土壤采样点

图 1 研究区水文地质及土地利用简图(据杨平等^[20]修改)

Fig. 1 Schematic of hydrogeology and land use of test sites

2 研究方法

2.1 样品采集

本次研究选取 2011 年 5 月的一场降雨为试验

期,从降雨开始到降雨结束后 5 d 内每隔 2 h 在青木关地下河水进行取一次样。采样瓶为 60 mL 的纯净聚乙烯瓶,采样前先将取样瓶及其瓶盖用地下河水润洗 3 次,取样后立即加 1:1 的纯硝酸数滴,调节其

pH < 2, 然后放入便携式冰袋保存, 12 h 内运至室内 4℃ 冷藏。同时, 本次研究还对河水阴离子进行采样, 除采样瓶选取 500 mL 聚乙烯瓶和不加硝酸外, 采样方法与阳离子相同。

2.2 样品分析

Ba、Sr、Fe、Mn、Al 等微量元素在西南大学地球化学与同位素试验室运用美国 Perkin-Elmer 公司生产的 Optima-2100DV 全谱直读型电感耦合等离子体原子发射仪 (ICP-OES) 进行测定, 检测精度可达 $0.001 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 相对偏差 < 2%; NO_3^- 测定采用紫外分光光度法, SO_4^{2-} 测定采用硫酸钡比浊法, PO_4^{3-} 测定采用钼酸铵比色法, 在西南大学岩溶水环境实验室使用 Shimadzu 公司生产的 UV2450 紫外-可见分光光度计进行测定。经过阴阳离子平衡检验^[33], 其相对误差皆 < 5%, 表明数据可靠。

3 结果

3.1 地下河微量元素质量浓度

表 1 为 Ba、Sr、Mn、Fe、Al 等 5 种微量元素质量浓度统计特征, 从中可以看出青木关地下河水微量元素的均值浓度表现为: $\text{Sr} > \text{Fe} > \text{Ba} > \text{Mn} > \text{Al}$, 浓度均值均小于 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。Ba 元素质量浓度变化范围是 $0.031 \sim 0.049 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Sr 元素质量浓度在 $0.119 \sim 0.216 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, Mn、Fe、Al 分别在 $0.006 \sim 0.133 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.009 \sim 0.345 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.000 \sim 0.521 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间。降雨过程中各微量元素质量浓度极大值表现为: $\text{Al} > \text{Fe} > \text{Sr} > \text{Mn} > \text{Ba}$; Al、Fe、Mn 的监测初始质量浓度较低, 均小于等于 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而 Sr 的初始质量浓度最高, 为 $0.119 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。变异系数体现了数据的变异程度, 由表 1 可知, Sr、Ba 质量浓度变异系数 < 0.1, 变异程度较小; Fe、Mn 质量浓度变异系数均为 0.1, 属于中等变异; 而 Al 质量浓度变异系数 > 1, 变异程度较大。

表 1 青木关地下河水微量元素质量浓度统计特征/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 1 Statistical characteristics of trace element concentrations in Qingmuguan underground river system/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

元素	初始浓度	极小值	极大值	均值	标准差	变异系数
Ba	0.046	0.031	0.049	0.043	0.003	0.076
Sr	0.216	0.119	0.216	0.191	0.015	0.080
Fe	0.011	0.009	0.345	0.077	0.062	0.810
Mn	0.006	0.006	0.133	0.034	0.034	0.998
Al	0	0	0.521	0.026	0.092	3.564

3.2 微量元素质量浓度对降雨的响应

此次降雨从 5 月 1 日 22:00 开始, 到 5 月 2 日

16:00 结束, 持续时间为 18 h, 地下河出口姜家泉水位从 5 月 2 日 06:00 时开始缓慢上升, 09:00 达到最高水位。从图 2 中可以看出, 随着地下河出口水位的上升, 除 Sr 外各微量元素质量浓度逐渐开始升高, 达到一个明显峰值, 其中以 Al、Fe 浓度变化幅度最大。峰值过后, Sr、Ba 质量浓度变化较为一致, 均有小幅上升后趋于平稳, 其中均出现一个降低的异常值; Fe、Mn 质量浓度则出现多次起伏后趋于平稳, 其中 Mn 的起伏变化时间要迟于 Fe, 但起伏变化程度大于 Fe; Al 则表现为出现第一次峰值后便趋于平稳。

由图 3 可知 Al、Fe、Mn 质量浓度的异常值较多, 表明这 3 种微量元素质量浓度对降雨响应非常显著, 而 Ba、Sr 浓度异常值较少, 其质量浓度受降雨影响较小。

4 分析及讨论

4.1 微量元素来源

青木关岩溶地下水属于典型的岩溶管道流, 其水源来自于大气降水。地下河水中富含 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 等离子, 同时含有微量的 Ba、Sr、Mn、Fe、Al 等元素, 这些物质可能来源有: 基岩、土壤、降雨以及人类活动输入。而地下河流域内并无工业生产, 当地居民以农业生产为主, 因此人类活动对地下河水或土壤并无金属元素的输入影响。人类活动对土壤和地下河水造成的影响主要表现在 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 等离子的增多, 尤其是农耕地。研究区以往的研究表明, 地下河水中常见的 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 等阴离子主要来源于农业活动^[34], 而且本研究期为 5 月, 正是研究区耕地施肥期, 经调查当地农户所使用化肥以氮肥和磷肥为主, 因此农田土壤中赋存的 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 质量浓度较高。表 2、表 3 分别为流域内土壤金属元素平均含量^[35]和雨水的水化学特征, 从中可以看出土壤和雨水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 质量浓度较低, 不足以对地下河中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 质量浓度造成决定性影响。且研究区地下河发育于以灰岩和白云质灰岩为主的地层中, 同时图 2 中 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 质量浓度变化趋势较为一致, 因此可以断定地下河水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 主要来源于岩溶作用, 是碳酸盐岩溶解的产物。

微量元素在地下水中的分布与地下水化学成分之间的相关性, 对水中的微量元素成分的形成具有重要意义^[36], 且重金属元素之间的相关性可以有效

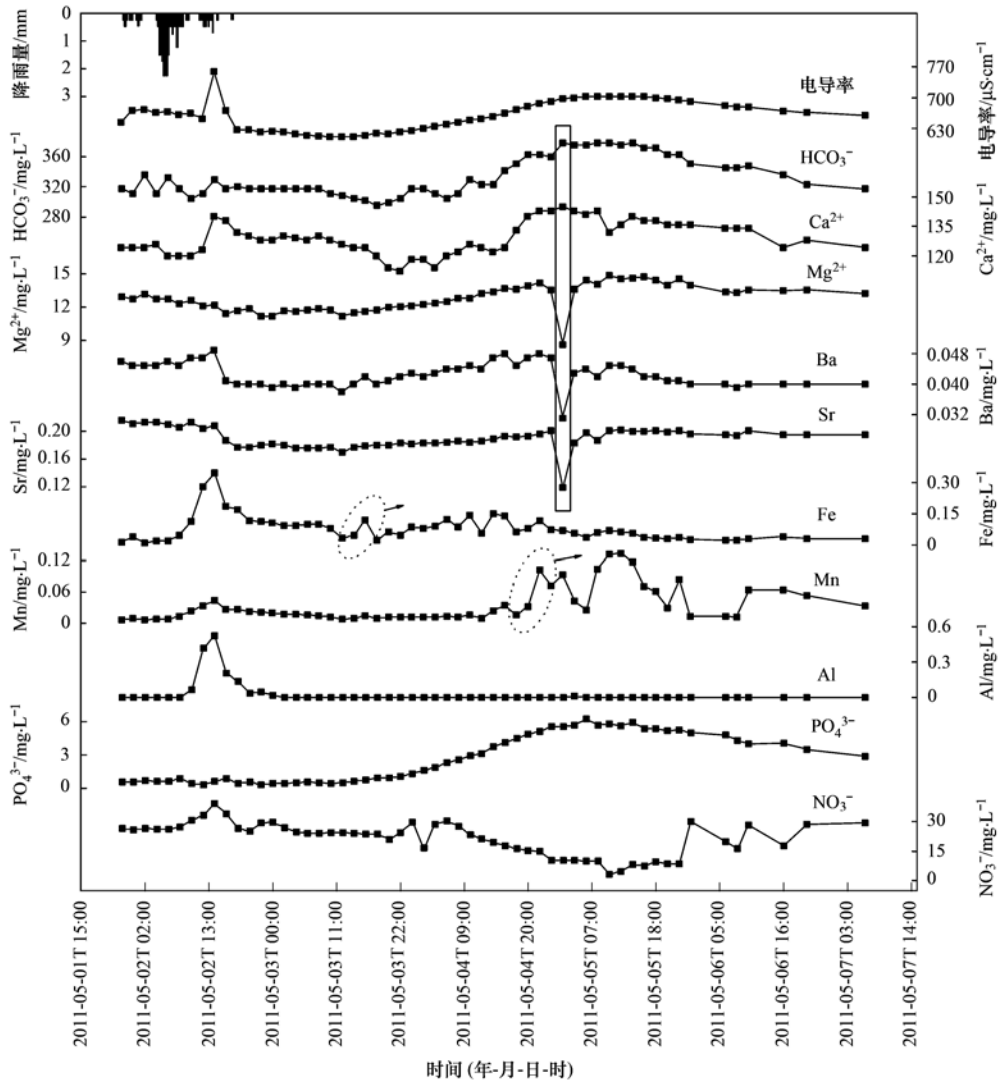


图 2 青木关地下河微量元素对降雨的响应

Fig. 2 Response of trace elements to rainfall in Qingmuguan underground river system

表 2 土壤金属元素平均含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 2 Total content of metallic elements in soil/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

类型	Ca	Mg	Ba	Sr	Fe	Mn	Al
水田	2.36	3.68	0.35	0.07	20.09	0.14	46.49
旱地	5.21	7.31	0.37	0.09	36.54	0.73	61.08
撂荒地	1.91	5.24	0.37	0.07	44.32	0.76	67.16
林地	4.75	7.79	0.33	0.07	45.80	0.79	71.41

表 3 雨水的水化学特征¹⁾

Table 3 Hydrochemical characteristics of rainwater

pH	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SO_4^{2-}	NO_3^-	PO_4^{3-}	Ba	Sr	Fe	Mn	Al
5.7	10	0.2	22.64	6.75	—	0.018	0.019	0.01	0	0

1) 离子、元素质量浓度单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

的指示重金属的相同物质来源或迁移路径^[37]. 由表 4 各微量元素间的相关性可以看出 Ba 的质量浓度和 Sr 的质量浓度显著相关, Fe 的质量浓度和 Al

的质量浓度显著相关, 因此可以初步判断 Ba、Sr 元素来源或迁移路径可能相同, Al、Fe 元素来源或迁移路径可能相同. 表 3 显示雨水中 5 种微量元素

含量很低,表明雨水并非地下河中这 5 种微量元素的主要来源. 因此这 5 种微量元素的主要可能来源为基岩溶解或来源于土壤. 为进一步探究地下河水中微量元素来源,分别选取主要来源于基岩溶解和土壤的地下河水常量离子与 5 种微量元素进行相关性分析. 由于来源于基岩溶解的离子属于化学反应过程,因而此来源的常量离子选择地下水含量相对较少 Mg^{2+} ,而来源土壤的离子则选择含量较高的 NO_3^- 来进行分析,分析结果如图 4 所示.

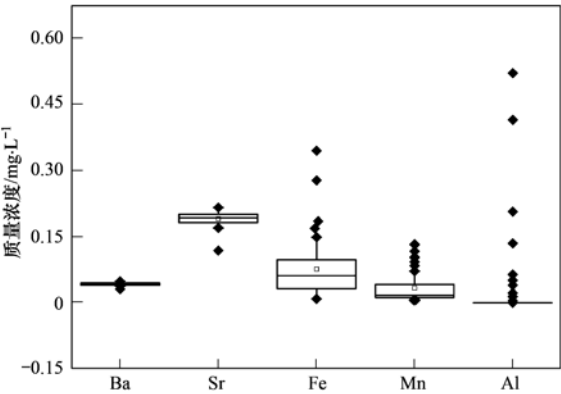


图 3 青木关地下河微量元素质量浓度变化特征
Fig. 3 Variation characteristics of trace elements concentrations in Qingmuguan underground river system

表 4 青木关地下河微量元素含量的相关矩阵¹⁾ ($n = 56$)

	Ba	Sr	Fe	Mn	Al
Ba	1				
Sr	0.702 **	1			
Fe	0.325	-0.098	1		
Mn	0.064	0.056	0.006	1	
Al	0.273	0.155	0.826 **	0.002	1

1) ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

经过检验,在 0.01 置信水平上 Ba、Sr 与 Mg^{2+} 呈显著相关关系,而 Al、Fe、Mn 与 Mg^{2+} 并无显著性相关关系; Al、Mn 在 0.01 置信水平上与 NO_3^- 呈显著相关关系,Fe 在 0.05 的置信水平上与 NO_3^- 显著相关,但 Ba、Sr 和 NO_3^- 无显著性相关关系. 而且地下河中 Al、Fe、Mn 元素质量浓度变异系数大,对降雨响应非常显著,图 3 显示这 3 种元素的异常值均分布在质量浓度变化幅度较大的时间段内,而此段时间为 14 h 左右,时间较短,表明这 3 种元素并非经过缓慢的化学反应形成. 综合分析可以判定 Al、Fe、Mn 元素与 NO_3^- 一样,来源于土壤;而 Ba、Sr 主要来源则与 Mg^{2+} 相同,均来源于碳酸盐岩的溶解.

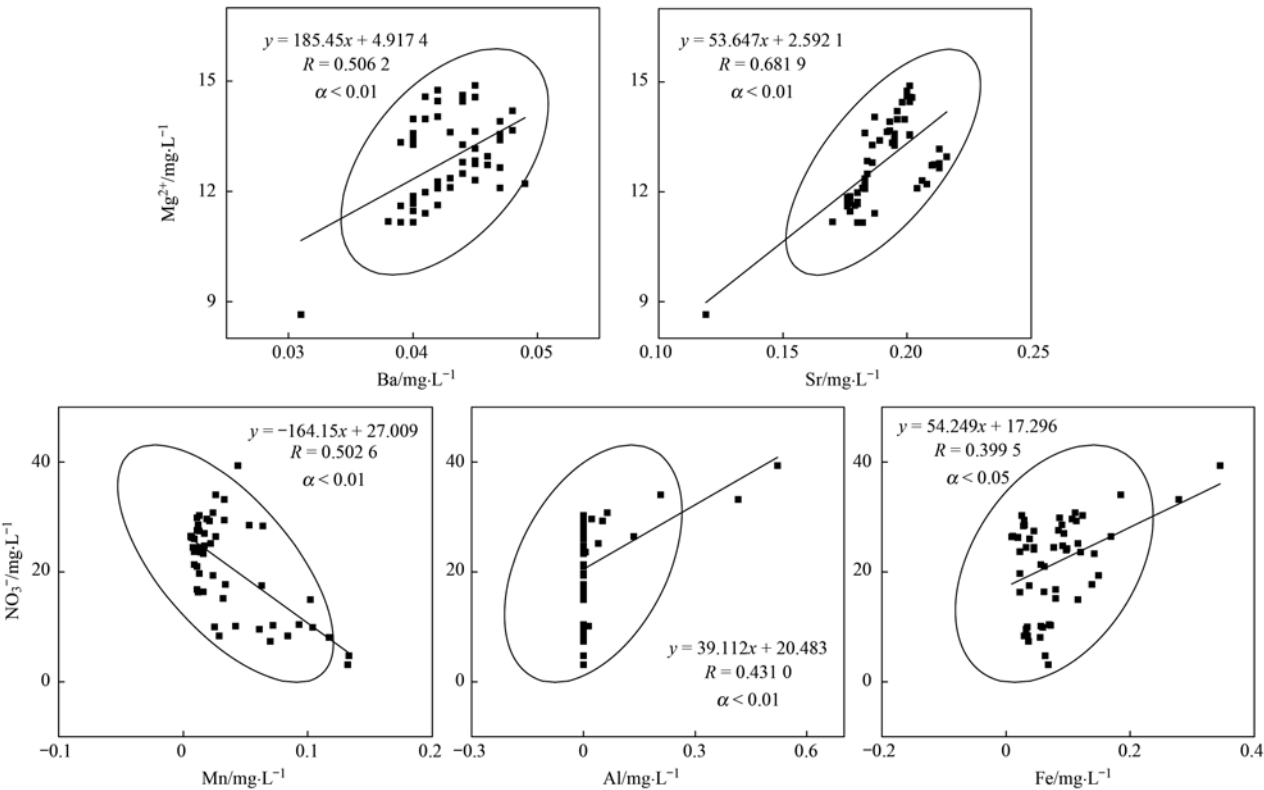


图 4 微量元素与常量离子间的相关关系
Fig. 4 Correlation between trace elements and major ions

4.2 微量元素变化特征形成过程

水循环带动了大部分微量元素的迁移. 在研究区, 地下河的补给途径主要有两个: 一个是经渗流作用通过多孔介质到达地下河, 一个是直接通过落水洞进入地下河. 前者主要以水头压力为驱动力, 流速较慢, 分布于整个地下河流域; 后者补给速度快, 瞬时补给流量大, 以点状零星分布于流域内. 由图 2 可知, Al 元素对降雨响应迅速, 表明其承载水体流动速度大, 而且 Al 元素变化特征曲线与同研究区域示踪试验得到的示踪剂历时浓度曲线^[32]类似, 同样为偏态分布, 均表现出点源注入的特征, 因此可以推断 Al 元素是随地表径流由落水洞直接注入地下河的. 研究区成土母质中的碳酸钙在亚热带湿润气候条件下大量淋失, 铁铝锰作为母岩中的副成分残留于土体. 而 5 月 2 日 04:15 ~ 07:45 瞬时降雨量较大, 在这段时间内, 土壤颗粒物受雨水击打脱离地表, 随地表水流由落水洞进入地下河, 从而使得 Al、Fe、Mn 元素表现出点源注入的特征, 即在此段降雨结束后 20 h 内 3 种元素质量浓度呈现如图 2 所示先升高后降低的孤峰形式的变化特征. 由于 Al 元素无论是在氧化环境还是还原环境下迁移能力均很弱, 因此孤峰过后地下河中 Al 元素质量浓度并未出现明显变化(图 2). 然而 Fe、Mn 则不同, 分别在降雨结束 16 h、42 h 后质量浓度再次出现起伏变化(图 2), 尤其是 Mn 元素质量浓度变化显著. 此段时间内 Fe、Mn 元素质量浓度呈高低起伏变化, 随机性较高, 且距离降雨结束时间较长, 表明 Fe、Mn 元素的承载水体流速慢, 故推断此段时间内 Fe、Mn 是在水的扩散作用下通过土壤孔隙、岩石裂隙等迁移至地下河, 但是由于流域内土壤性质不同, 渗透系数迥异以及岩石裂隙、孔隙等的不均一性, 导致不同时段水对 Fe、Mn 元素的运移量也不同, 从而使其质量浓度出现高低起伏的变化(图 2). 从质量浓度值上分析, 不同土壤中 Mn 元素含量相对 Al、Fe 元素都非常低(表 2), 因此 Mn 元素迁移至地下河, 地下水中的质量浓度也相对较低. 从质量浓度变化率上分析, 本次降雨初期 Mn 元素质量浓度变化幅度较小, 明显小于 Al、Fe 元素, 原因在于此段时间内三者均可能主要来源于甘家槽水田的土壤, 而从表 2 中可以看出, 甘家槽水田土壤中 Mn 元素含量相对 Al、Fe 元素极低, 所以导致此段时间内 Mn 元素质量浓度的变化率很小; 而后期 Fe、Mn 元素经由土壤-岩石多孔介质进入地下河, Mn 元素的质量浓度变化率要明显高于 Fe 元素, 表明 Mn 元素的迁移能力大于

Fe 元素的迁移能力.

在整场降雨快要结束时, Ba 元素质量浓度和 Al、Fe、Mn 元素一样出现一个上升后下降的过程(图 2), 结合土壤中 Ba 元素含量分析, 认为这段时间内 Ba 元素也是来源于土壤经落水洞进入地下河的. 峰值过后 Ba 元素和 Sr 元素质量浓度出现下降, 且其后的质量浓度大体上均低于初始监测阶段的质量浓度, 即峰值过后主要表现为降雨的稀释作用, 而 Al、Fe、Mn 元素的质量浓度峰值过后的质量浓度均大于或等于初始监测阶段的质量浓度. 这也表明了 Ba、Sr 元素和 Al、Fe、Mn 元素主要来源并不相同. Sr 元素和 Ba 元素主要由碳酸盐岩溶解形成, 一并储存在岩石裂隙、孔隙等介质中. 在降雨结束 26 h 后, 地下河中 Ba、Sr 元素质量浓度开始升高, 这段时间内降雨经土壤下渗使得土壤-岩石多孔介质的水头压力增大, 使携带 Ba、Sr 元素的空隙、裂隙水等向地下河运移, 从而导致地下河水中 Ba、Sr 元素质量浓度升高. 然而在 5 月 5 日 02:00, 即降雨结束 58 h 后, Ba、Sr、 Mg^{2+} 质量浓度均突然大幅度降低, 达到最低值, 而后又升高到与降低之前相当的水平. 从图 1 中可以看出, 从大木水窝边缘, 水平距离姜家泉约 2.7 km 的地方开始一直到姜家泉附近(中下游), 分布有多个废弃的采石场. 由于先前的采石作业, 使得这些地方岩石裸露, 而且这段区域土壤层非常薄, 因此雨水经由土壤-岩石多孔介质对地下水源的补给, 这段区域比中上游地区要快. 5 月 5 日 02:00 Ba、Sr、 Mg^{2+} 质量浓度突降可能是由于降雨使土壤-岩石多孔介质水头压力增大, 中下游原先存储在岩石裂隙、空隙等空间里含有 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 以及 Ba、Sr 元素的老水在降雨结束 58 h 内已被全部运移至地下河, 且此段时间内雨水也经岩石裸露的采石场等土层较薄的区域快速补给了地下河. 而由于全部采石场均为石灰岩地层, 快速补给地下河的酸雨溶蚀基岩产生了 Ca^{2+} 和 HCO_3^- , 而没有大量生成 Ba、Sr、 Mg^{2+} , 雨水对 Ba、Sr、 Mg^{2+} 的稀释作用超过了雨水对基岩溶蚀产生三者的量, 因此使得地下河中 Mg^{2+} 以及 Ba、Sr 元素质量浓度降低, 而相应 Ca^{2+} 、和 HCO_3^- 质量浓度也达到最高(图 2). 5 月 5 日 02:00 过后, 中上游含有 Ba、Sr 元素的水运移至姜家泉, 从而使得 Ba、Sr 元素质量浓度达到最低后得以回升, 形成如图 2 所示的质量浓度变化特征.

4.3 水土流失

Al、Fe 作为亚热带土壤脱硅富铝化的产物, 以

大颗粒结核的形式赋存于地表^[20,35]。在降雨期间,土壤颗粒物受到雨水的冲刷,使其脱离地表,随水流运动,由落水洞进入地下河,使得地下河中 Al、Fe 元素质量浓度升高。因此 Al、Fe 元素在地下水含量的多寡代表着土壤颗粒物进入地下河的数量。由图 2 中 Fe 元素质量浓度变化规律可以看出,少量 Fe 元素可以经土壤-岩石多孔介质进入地下河,而 Al 元素则几乎没有这一迁移路径。因此 Al、Fe 元素,主要是 Al 元素在地下河水的中含量指示着地表土壤的流失量。然而土壤侵蚀也同时伴随着大量营养元素的搬运和流失^[38],故地下河中 Al、Fe 元素的含量在一定程度上也指示着土壤营养元素流失的状况。

4.4 水质

青木关地下河水作为姜家泉附近居民的重要用水,对居民的生活、生产起着至关重要的作用。水

质的好坏直接关系到当地群众的身体健康,而水中的微量元素虽然含量很少、不易测定,但往往对水质有重大的影响,因此应当加强对河水微量元素的重视程度。监测期间地下河水中微量元素质量浓度与饮用水相对元素限值如表 5 所示。水体中微量元素质量浓度最小值可以揭示流域内水中微量元素的本地组成特征^[39],由表 5 可以看出在不受降雨条件影响下,青木关地下河水中 Ba、Fe、Mn、Al 元素质量浓度远小于饮用水安全限值;但受到本次降雨的影响 Fe、Mn、Al 元素最高质量浓度均超过饮用水安全限值,伴随着这 3 种元素质量浓度的升高,土壤中的 N、P、K 等营养物质也会进入地下河系统,造成水质的恶化。而且此次降雨量仅为 25.5 mm,属于小雨,根据经验,在降雨量更大的条件下,水土流失会更加严重,地下水中的 Fe、Mn、Al 元素含量势必会更高,水质也将会更加恶化。

表 5 青木关地下河水微量元素质量浓度与饮用水限值浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 5 Trace element concentration of groundwater and the limit concentration of drinking water/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

编号	Ba	Sr	Fe	Mn	Al
青木关地下河水	0.03 ~ 0.05	0.12 ~ 0.22	0.01 ~ 0.35	0.01 ~ 0.13	0 ~ 0.52
饮用水限值 ^[40]	0.7	—	0.3	0.1	0.2

5 结论

(1)降雨对地下水地球化学特征的变化有着极为关键的作用,此次降雨期间青木关岩溶地下水河水中的 5 种微量元素质量浓度均小于 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其中 Fe、Mn、Al 元素质量浓度变化较大,对降雨响应强烈;Ba、Sr 元素变化平缓,对降雨响应微弱。在监测过程中,姜家泉水中 Ba、Sr 元素质量浓度在降雨过后整体呈现下降趋势,主要表现为降雨的稀释作用;而 Fe、Mn、Al 元素质量浓度在整个降雨过程表现为升高的趋势。

(2)通过对姜家泉水、雨水水化学以及流域内土壤金属元素数据的综合分析,认为青木关岩溶地下河水中 Ba、Sr 元素主要来源于基岩的溶解,Fe、Mn、Al 元素则主要来源于土壤,且它们之间的迁移路径并不相同。研究表明青木关岩溶地下水微量元素质量浓度在降雨条件下的变化特征不仅受到元素来源、迁移路径的控制,同时受到流域内不同水动力条件的影响。

(3)青木关地下河水中的 Al、Fe 元素质量浓度的变化在一定程度指示着上游水土流失状况及河水水质的变化,因此岩溶地下河外界输入的化学组分不容忽视,应加强落水洞周边的环境保护及治理,从

源头控制污染源。

参考文献:

[1] 袁道先. 对南方岩溶石山地区地下水资源及生态环境地质调查的一些意见[J]. 中国岩溶, 2000, 19(2): 103-108.

[2] Swarzenski P W, Reich C D, Spechler R M, et al. Using multiple geochemical tracers to characterize the hydrogeology of the submarine spring off Crescent Beach, Florida[J]. Chemical Geology, 2001, 179(1-4): 187-202.

[3] Bau M, Usui A, Pracejus B, et al. Geochemistry of low-temperature water-rock interaction: evidence from natural waters, andesite, and iron-oxyhydroxide precipitates at Nishiki-numa iron-spring, Hokkaido, Japan[J]. Chemical Geology, 1998, 151(1-4): 293-307.

[4] Lang Y C, Liu C Q, Zhao Z Q, et al. Geochemistry of surface and ground water in Guiyang, China: Water/rock interaction and pollution in a karst hydrological system [J]. Applied Geochemistry, 2006, 21(6): 887-903.

[5] Wicks C M, Engeln J F. Geochemical evolution of a karst stream in Devils Icebox Cave, Missouri, USA [J]. Journal of Hydrology, 1997, 198(1-4): 30-41.

[6] 蒋富清, 李安春. 冲绳海槽南部表层沉积物地球化学特征及其物源和环境指示意义[J]. 沉积学报, 2002, 20(4): 680-686.

[7] 李月芳, 田立德, 时晓兰, 等. 青藏高原南部枪勇冰川雪冰中痕量元素的组成特征及其环境意义[J]. 地球化学, 2012, 41(2): 181-187.

[8] 苏彦平, 杨健, 陈修报, 等. 太湖水华蓝藻中元素的组成及

- 其环境意义[J]. 生态与农村环境学报, 2010, **26**(6): 558-563.
- [9] 蔡述伟, 程青. 电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定地下水中痕量元素[J]. 净水技术, 2011, **30**(4): 56-58.
- [10] 张建中, 孙亦静. 电感耦合等离子体质谱法测定地下水中痕量元素[J]. 干旱环境监测, 2012, **26**(3): 133-157.
- [11] Jarvie H P, Neal C, Tappin A D, *et al.* Riverine inputs of major ions and trace elements to the tidal reaches of the River Tweed, UK[J]. *Science of the Total Environment*, 2000, **251-252**(5): 55-81.
- [12] Johannesson K H, Tang J W. Conservative behavior of arsenic and other oxyanion-forming trace elements in an oxic groundwater flow system[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, **378**(1-2): 13-28.
- [13] Heredia O S, Cirelli A F. Trace elements distribution in soil, pore water and groundwater in Buenos Aires, Argentina[J]. *Geoderma*, 2009, **149**(3-4): 409-414.
- [14] Bicalho C C, Batiot-Guilhe C, Seidel J L, *et al.* Geochemical evidence of water source characterization and hydrodynamic responses in a karst aquifer[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, **450-451**: 206-218.
- [15] Potot C, Féraud G, Schärer U, *et al.* Groundwater and river baseline quality using major, trace elements, organic carbon and Sr-Pb-O isotopes in a Mediterranean catchment: The case of the Lower Var Valley (south-eastern France) [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, **472-473**: 126-147.
- [16] Neal C, Smith C J, Jeffery H A, *et al.* Trace element concentrations in the major rivers entering the Humber estuary, NE England[J]. *Journal of Hydrology*, 1996, **182**(1-4): 37-64.
- [17] Négrel P, Lachassagne P. Geochemistry of the Maroni River (French Guiana) during the low water stage: implications for water-rock interaction and groundwater characteristics [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, **237**(3-4): 212-233.
- [18] Pape P L, Ayrault S, Quantin C. Trace element behavior and partition versus urbanization gradient in an urban river (Orge River, France)[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, **472-473**: 99-110.
- [19] 扈志勇, 杨平恒, 杨梅, 等. 川东槽谷区岩溶泉水物理化学动态特征及其环境效应研究——以重庆青木关岩溶槽谷姜家泉为例[J]. 现代地质, 2009, **2**(6): 1167-1173.
- [20] 杨平恒, 袁道先, 袁文昊, 等. 以 PCA 揭示降雨期间岩溶地下水水文地球化学的形成[J]. 科学通报, 2010, **55**(9): 788-797.
- [21] 杨平恒, 旷颖伦, 袁文昊, 等. 降雨条件下典型岩溶流域地下水中的物质运移[J]. 环境科学, 2009, **30**(11): 3249-3255.
- [22] 刘仙, 蒋勇军, 叶明阳, 等. 典型岩溶槽谷区地下河水文动态响应研究——以重庆青木关地下河为例[J]. 中国岩溶, 2009, **28**(2): 149-154.
- [23] 苟鹏飞, 蒋勇军, 林涛, 等. 典型岩溶地下河入、出口处强降雨过程中水动态变化[J]. 水资源保护, 2011, **27**(1): 6-14.
- [24] 袁文昊, 贺秋芳, 杨平恒, 等. 典型岩溶槽谷地下河水化学时空变化特征及影响因素初探——以重庆青木关地下河系统为例[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2009, **31**(6): 160-164.
- [25] 邱述兰. 利用多同位素($\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{15}\text{N}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$)方法示踪岩溶农业区地下水中硝酸盐和硫酸盐的污染——以重庆市青木关地下河系统为例[D]. 重庆: 西南大学, 2012. 21-27.
- [26] 邱述兰, 蒋勇军, 张兴波, 等. 重庆市青木关地下河水化学及其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 变化特征[J]. 中国岩溶, 2012, **31**(3): 279-288.
- [27] 贾鹏, 蒋勇军, 杨平恒. 典型岩溶槽谷区地下水质变化对农业活动的响应——以重庆市青木关地下河为例[J]. 水土保持通报, 2010, **30**(1): 205-209.
- [28] 杨平恒, 刘子琦, 贺秋芳. 降雨条件下岩溶泉水中悬浮颗粒物的运移特征及来源分析[J]. 环境科学, 2012, **33**(10): 3376-3381.
- [29] 西南师范学院地理系研究所. 青木关背斜地下水的分布规律及其利用[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 1960, (2): 105-112.
- [30] 成都地质学院水文地质 72 级联队. 观音峡、温塘峡两背斜青木关地区的暗河水及其开发[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 1975, (Z1): 68-78.
- [31] 汪泽成, 赵文智, 徐安娜, 等. 四川盆地北部大巴山前带构造样式与变形机制[J]. 现代地质, 2006, **20**(3): 429-435.
- [32] 杨平恒, 罗鉴银, 彭稳, 等. 在线技术在岩溶地下水示踪试验中的应用——以青木关地下河系统岩口落水洞至姜家泉段为例[J]. 中国岩溶, 2008, **27**(3): 215-220.
- [33] 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.
- [34] 邱述兰, 曹敏. 农业活动对岩溶槽谷地下河水水质变化研究——以重庆青木关地下河为例[J]. 西昌学院学报(自然科学版), 2012, **26**(1): 32-35.
- [35] 贺秋芳. 青木关地下河岩溶系统中的氮循环及其相关微生物作用与示踪研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009. 38.
- [36] 比契叶娃 K E. 彭立红, 译. 水文地球化学——地下水化学成分的形成[M]. 北京: 地质出版社, 1981. 213-214.
- [37] 崔邢涛, 栾文楼, 李随民, 等. 石家庄市大气降尘重金属元素来源分析[J]. 中国地质, 2012, **39**(4): 1108-1115.
- [38] Mahler B J, Valdes D, Musgrove M, *et al.* Nutrient dynamics as indicators of karst processes: Comparison of the Chalk aquifer (Normandy, France) and the Edwards aquifer (Texas, USA) [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2008, **98**(1-2): 36-49.
- [39] 李月芳, 王宁练, 姚檀栋, 等. 东昆仑山玉珠峰冰川雪坑中痕量元素的组成特征[J]. 冰川冻土, 2011, **33**(4): 752-759.
- [40] GB 5749-2006, 生活饮用水卫生标准[S].

CONTENTS

An Assessment of PM _{2.5} Related Health Risks and Impaired Values of Beijing Residents in a Consecutive High-Level Exposure During Heavy Haze Days	XIE Yuan-bo, CHEN Juan, LI Wei (1)
Seasonal Variation of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} at Changbai Mountain	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (9)
Variation of Atmospheric Particle Number Concentrations in Qingdao and Its Impact on Visibility	KE Xin-shu, SHENG Li-fang, KONG Jun, <i>et al.</i> (15)
Concentrations of PCDD/Fs in the Atmosphere of Chongqing City and Its Seasonal Variation	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, ZHU Ming-ji, <i>et al.</i> (22)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Secondary Aluminum Metallurgy Industry in the Southwest Area, China	LU Yi, ZHANG Xiao-ling, GUO Zhi-shun, <i>et al.</i> (30)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Modern Dry Processing Cement Kilns with Preheating in the Southwest Area, China	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, JIAN Chuan, <i>et al.</i> (35)
Pollution Status and Characteristics of PBDEs in Indoor Air of Hangzhou	JIANG Xin-wei, SUN Xin, PEI Xiao-qiang, <i>et al.</i> (41)
Size Distribution of Particle and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Particle Emissions from Simulated Emission Sources	FU Hai-huan, TIAN Na, SHANG Hui-bin, <i>et al.</i> (46)
Atmospheric Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Elements in Northeast of Sichuan, Central China	TONG Xiao-ning, ZHOU Hou-yun, YOU Chen-feng, <i>et al.</i> (53)
Trend in Acid Deposition at Tieshanping, Chongqing During 2001-2010	YU De-xiang, MA Xiao-xiao, TAN Bing-quan, <i>et al.</i> (60)
Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen of the Jinshui Watershed in the Upper Hanjiang River	WANG Jin-jie, ZHANG Ke-rong, WU Chuan, <i>et al.</i> (66)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Wheat Straw and Its Smoke	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (73)
Magnetic Properties of Indoor Dustfall at Different Heights in Lanzhou	WU Duo, WEI Hai-tao, ZHAO Rui-rui, <i>et al.</i> (79)
Mercury Fluxes from Conifer-Broadleaf Forested Field in Central Subtropical Forest Zone	MA Ming, WANG Ding-yong, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (85)
Impacts of Rice Straw Biochar on Organic Carbon and CO ₂ Release in Arable Soil	KE Yue-jin, HU Xue-yu, YI Qing, <i>et al.</i> (93)
Geochemical Distribution of Dissolved Bismuth in the Yellow Sea and East China Sea	WU Xiao-dan, SONG Jin-ming, WU Bin, <i>et al.</i> (100)
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Upper Reaches of Hunhe River (Qingyuan Section), Northeast China	MA Ying-qun, SHI Yao, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (108)
Determination of Estrogenic Compounds in Water of Jiulong River Using Polar Organic Chemical Integrative Sampler	ZHANG Li-peng, WANG Xin-hong, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (117)
Variation Characteristics and Environmental Significant of Trace Elements Under Rainfall Condition in Karst Groundwater	CHEN Xue-bin, YANG Ping-heng, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (123)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Xilin River Basin and the Possible Controls	TANG Xi-wen, WU Jin-kui, XUE Li-yang, <i>et al.</i> (131)
Forms and Spatial Distribution Characteristics of Nitrogen in Ziya River Basin	ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (143)
Impact of Rice Agriculture on Nitrogen and Phosphorus Exports in Streams in Hilly Red Soil Earth Region of Central Subtropics	SONG Li-fang, WANG Yi, WU Jin-shui, <i>et al.</i> (150)
Study on Distribution of Phosphorus in Surface Sediments of the Yellow Sea and the East China Sea	SONG Guo-dong, LIU Su-mei, ZHANG Guo-ling (157)
Characterization and Optimization of the NaOH-EDTA Extracts for Solution ³¹ P-NMR Analysis of Organic Phosphorus in River Sediments	ZHANG Wen-qiang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (163)
Regeneration and Transformation of BAPP in Suspended Solids Under Short-term Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng, WANG Ming (171)
Sediment Risk Assessment and Heavy Metal Source Analysis in Typical Country Water Level Fluctuated Zone (WLFZ) of the Three Gorges	AO Liang, LEI Bo, WANG Ye-chun, <i>et al.</i> (179)
Pollution Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Different Eastern Dredging Regions of Lake Taihu	MAO Zhi-gang, GU Xiao-hong, LU Xiao-ming, <i>et al.</i> (186)
Study on the Stages of Major Sediments in Dianchi Lake	WANG Xin-yu, ZHOU Feng, YI Xuan, <i>et al.</i> (194)
Oil Spill Identification Using Partial Surface Fitting Method Based on Concentration-Synchronous-Matrix-Fluorescence Spectra	WANG Chun-yan, SHI Xiao-feng, LI Wen-dong, <i>et al.</i> (202)
Treatment of Sludge Liquor Produced in Deep Dehydration by Photoelectro-Fenton Process	WANG Xian-li, WANG Shi-feng, WU Jun-feng, <i>et al.</i> (208)
Characteristics of Nitrification and Denitrification for Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal by Granular Sludge	LIU Xiao-ying, LIN Hui, MA Zhao-rui, <i>et al.</i> (214)
Study on Long-Term Stability of Biological Nitrogen Removal via Nitrite from Real Landfill Leachate	SUN Hong-wei, GUO Ying, PENG Yong-zhen (221)
Compositions and Residual Properties of Petroleum Hydrocarbon in Contaminated Soil of the Oilfields	HU Di, LI Chuan, DONG Qian-qian, <i>et al.</i> (227)
Dynamics of the Mineralization and Transformation of Rice Photosynthesized Carbon in Paddy Soils - a Batch Incubation Experiment	TAN Li-min, PENG Pei-qin, LI Ke-lin, <i>et al.</i> (233)
Effects of Land Use and Abandonment on Soil Labile Organic Carbon in the Karst Region of Southwest China	LIAO Hong-kai, LI Juan, LONG Jian, <i>et al.</i> (240)
Aluminum Dissolution and Changes of pH in Soil Solution During Sorption of Copper by Aggregates of Paddy Soil	XU Hai-bo, ZHAO Dao-yuan, QIN Chao, <i>et al.</i> (248)
Effect of Cr(VI) Anions on the Cu(II) Adsorption Behavior of Two Kinds of Clay Minerals in Single and Binary Solution	LIU Juan-juan, LIANG Dong-li, WU Xiao-long, <i>et al.</i> (254)
Effect of Flooding Time Length on Mycorrhizal Colonization of Three AM Fungi in Two Wetland Plants	MA Lei-meng, WANG Peng-teng, WANG Shu-guang (263)
Preliminary Study on the Relationship Between the Water Quality and the Aquatic Biological Health Status of Taihu Lake	ZHOU Xiao-bai, ZHANG Ning-hong, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (271)
Acute Toxicity of Three Typical Pollutants to Aquatic Organisms and Their Water Quality Criteria	JIANG Dong-sheng, SHI Xiao-rong, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (279)
Evaluation of the Acute Toxicity of Pharmaceutical Wastewater to Luminescent Bacteria	DU Li-na, YANG Fan, MU Yu-feng, <i>et al.</i> (286)
Influence of the Coexistence of Zn ²⁺ on the Enantioselective Toxicity of Metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	HU Xiao-na, ZHANG Shu-xian, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (292)
Simplification of Biotic Ligand Model and Evaluation of Predicted Results	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (299)
Priority Pollutants Ranking and Screening of Coke Industry based on USEtox Model	HAO Tian, DU Peng-fei, DU Bin, <i>et al.</i> (304)
Isolation, Identification and Characterization of a Microcystin-degrading Bacterium <i>Paucibacter</i> sp. Strain CH	YOU Di-jie, CHEN Xiao-guo, XIANG Hui-yi, <i>et al.</i> (313)
Inhibition of the Activity of Sulfate-reducing Bacteria in Produced Water from Oil Reservoir by Nitrate	YANG De-yu, ZHANG Ying, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> (319)
Bioconversion of Cellulose to Methane by a Consortium Consisting of Four Microbial Strains	WU Jun-mei, MA An-zhou, CUI Meng-meng, <i>et al.</i> (327)
Factors Influencing the Variability in Soil Heterotrophic Respiration from Terrestrial Ecosystem in China	XIE Wei, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua (334)
Study on the Distinguishing of Root Respiration from Soil Microbial Respiration in a <i>Leymus chinensis</i> Steppe in Inner Mongolia, China	SHI Jing-jing, GENG Yuan-bo (341)
Nitrous Oxide Flux at the Water-Air Interface of the Rivers in Nanjing During Summer	HAN Yang, ZHENG You-fei, WU Rong-jun, <i>et al.</i> (348)
Effects of Antiseptic on the Analysis of Greenhouse Gases Concentrations in Lake Water	XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, James Deng, <i>et al.</i> (356)
Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cell Enhanced by Biosurfactant	PENG Hai-li, ZHANG Zhi-ping, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (365)
Fe-ZSM-5 Catalysts with Different Silica-Alumina Ratios for N ₂ O Catalytic Decomposition	LU Ren-jie, ZHANG Xin-yan, HAO Zheng-ping (371)
Inhibition of Chlorobenzene Formation via Various Routes During Waste Incineration by Ammonium Sulfate and Urea	YAN Mi, QI Zhi-fu, LI Xiao-dong, <i>et al.</i> (380)
County Scale Characteristics of CO ₂ Emission's Spatial-Temporal Evolution in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> (385)
Characterization and Soil Environmental Safety Assessment of Super Absorbent Polymers in Agricultural Application	LI Xi, LIU Yu-rong, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (394)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2014年1月15日 35卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 1 Jan. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行