

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第12期

Vol.36 No.12

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(卷终)

2014年APEC前后北京城区PM _{2.5} 中水溶性离子特征分析	杨懂艳,刘保献,张大伟,石爱军,周健楠,景宽,富佳明	(4325)
2013年北京市不同方位PM _{2.5} 背景浓度研究	李云婷,程念亮,张大伟,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨	(4331)
APEC期间北京空气质量改善对比分析	李文涛,高庆先,刘俊蓉,李亮,高文康,苏布达	(4340)
嘉兴市春季PM ₁₀ 、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应	沈利娟,王红磊,吕升,李莉,张孝寒,章国骏,王翥	(4348)
烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响	赵伟,范绍佳,谢文彰,孙家仁	(4358)
典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡	张雅惠,张成,王定勇,罗程钟,杨熹,徐凤	(4366)
上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应	刘飞,褚慧敏,郑祥民	(4374)
重庆金佛山降雪中飞灰单颗粒特征及来源解析	于正良,杨平恒,景伟力,袁道先,任坤,李林立	(4381)
利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究	梅瑜,成卓韦,王家德,陆胤	(4389)
低浓度CO ₂ 在聚苯胺/Y分子筛复合材料上的吸附	刘凤玲,卢霞,张慧,葛鑫,刘杰,张泳真	(4396)
红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制	郝卓,高扬,张进忠,于贵瑞	(4403)
中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征	安思危,孙涛,马明,王定勇	(4414)
基于Landsat 8影像估算新安江水库光合有效辐射衰减系数	张毅博,张运林,查勇,施坤,周永强,刘明亮	(4420)
白石水库颗粒有机物及沉积物中碳、氮稳定同位素的空间分布特征	郭凯,赵文,王珊,戴玉新,张荣坤,李东明	(4430)
小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应	李磊,李秋华,焦树林,李钥,肖晶,邓龙,孙荣国,高永春,骆兰	(4436)
湖泊基质客土改良的环境效应:对芦苇生长及光合荧光特性的影响	余居华,钟继承,范成新,黄蔚,商景阁,古小治	(4444)
贵州纳朵洞洞穴水水文地球化学变化特征及其环境意义	沈蔚,王建力,王家录,蒋先淑,毛庆亚,陈挚秋,刘肖	(4455)
碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析	邹艳娥,蒋萍萍,张强,汤庆佳,康志强,龚晓萍,陈长杰,俞建国	(4464)
钱塘江(杭州段)表层水中全氟化化合物的残留水平及分布特征	张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,李华,吴敏华,张伟,潘见阳	(4471)
长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价	田奇昌,唐洪波,夏丹,王莎莎,高丽荣	(4479)
城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例	齐鹏,余树全,张超,梁立成,车继鲁	(4486)
柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响	覃蔡清,梁丽,游蕊,邓晗,王定勇	(4494)
微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响	左乐,吕昌伟,何江,王伟颖,颜道浩	(4501)
扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律	陈俊,李大鹏,朱培颖,黄勇,王忍	(4509)
生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应	张树楠,肖润林,刘锋,吴金水	(4516)
开放系统下方解石对磷的去除	李振炫,刁家勇,黄利东,陈艳芳,刘大刚,许正文	(4523)
铜在壳核结构磁性颗粒上的吸附:效能与表面性质的关系	李秋梅,陈静,李海宁,张晓蕾,张高生	(4531)
基于优质碳源提供的CABR复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究	程继辉,吴鹏,程朝阳,沈耀良	(4539)
ANAMMOX菌利用零价铁转化氨和硝酸盐实验	周健,黄勇,袁怡,刘忻,李祥,沈杰,杨朋兵	(4546)
基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价	符刚,曾强,赵亮,张玥,冯宝佳,王睿,张磊,王洋,侯常春	(4553)
北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析	张灿,刘文君,敖澍,史云,安代志,刘治平	(4561)
广州市小学生多环芳烃内暴露水平	苏慧,赵波,张素坤,刘珊,任明忠,李杰,石小霞	(4567)
构建三元混合污染物的三维等效图	刘雪,刘树深,刘海玲	(4574)
化学提取法表征污染土壤中PAHs老化规律和蚯蚓富集特征	张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,刘总堂,李娇,王代长,蒋新	(4582)
不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性	严俊霞,梁雅南,李洪建,李君剑	(4591)
基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图	施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩	(4600)
土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究	谢伟强,李小明,陈灿,陈寻峰,钟宇,钟振宇,万勇,王琰	(4609)
纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响	李帅,刘雪琴,王发园,苗艳芳	(4615)
蜈蚣草中砷与磷的赋存特征及其相互作用	张玉秀,马旭,廖晓勇,阎秀兰,马栋,龚雪刚	(4623)
纳米沸石对土壤Cd形态及大白菜Cd吸收的影响	熊仕娟,徐卫红,谢文文,陈蓉,陈永勤,迟苏琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体	(4630)
黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响	陈永勤,江玲,徐卫红,迟苏琳,陈序根,谢文文,熊仕娟,张进忠,熊治庭	(4642)
耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌MH-B5的降解特性、降解途径及其固定化	马聪,秦丹,孙倩,于昌平	(4651)
浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征	李虎,黄福义,苏建强,洪有为,俞慎	(4659)
缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化	曾清苹,何丙辉,毛巧芝,吴耀鹏,黄祺,李源	(4667)
华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响	张静,刘平,刘春,陈晓轩,张磊	(4676)
再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估	田亚静,姜晨,吴广龙,丁琼,王铁宇,吕永龙	(4682)
《环境科学》第36卷(2015年)总目录		(4690)
《环境科学》征订启事(4347)	《环境科学》征稿简则(4454)	信息(4463,4530,4573,4581)

碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析

邹艳娥^{1,2}, 蒋萍萍^{2,3}, 张强^{2,4*}, 汤庆佳², 康志强⁵, 龚晓萍², 陈长杰², 俞建国²

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 国土资源部/广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004; 3. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541004; 4. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074; 5. 广西壮族自治区地质调查院, 南宁 530023)

摘要: 在降雨条件下, 利用自动采样器对广西碧水岩地下河出口进行高频采样, 分析了碧水岩地下河出口水体中 Cu、Pb、Zn、Cd 等微量金属元素的水化学动态变化特征, 探讨了地下河水中微量金属来源及其对降雨的响应机制。结果表明, 地下河水化学组分表现出了较明显的规律, 其中主要元素 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 等在降雨过程中稀释作用明显, 而 Al、Mn、TFe、Cu、Pb、Zn、Cd 等金属元素对降雨响应敏感, 其质量浓度在降雨过程中有所升高, 相应质量浓度曲线均表现出多峰值特点, 且在最大降雨发生后第 9 h 达到最大峰值。推断水岩作用、河底沉积物再释放和水土流失是导致河水金属元素浓度增高的原因, 金属元素不同来源及地下河双入口的结构特征是形成金属元素质量浓度曲线多峰值的原因, 其中水岩作用引起的水化学变化较河底沉积物再释放和水土流失更敏感, 而后者是导致河水重金属元素增加的主要原因。监测期间, 溶质在地下河中的平均迁移速度约为 $0.47 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 污染物运移速度较快, 因此, 通过对岩溶地下水水化学动态的监测, 掌握微量金属组分来源及迁移特性, 对于地下河水环境污染治理具有重要意义。

关键词: 岩溶地下河; 降雨; 微量金属; 响应; 来源

中图分类号: P641.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4464-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.12.018

Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis

ZOU Yan-e^{1,2}, JIANG Ping-ping^{2,3}, ZHANG Qiang^{2,4*}, TANG Qing-jia², KANG Zhi-qiang⁵, GONG Xiao-ping², CHEN Chang-jie², YU Jian-guo²

(1. School of Water Resources & Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Land and Resources & Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 4. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 5. Guangxi Geological Survey, Nanning 530023, China)

Abstract: High-frequency sampling was conducted at the outlet of Guangxi Bishuiyan karst subterranean river using an automatic sampler during the rainfall events. The hydrochemical dynamic variation characteristics of trace metals (Cu, Pb, Zn, Cd) at the outlet of Guangxi Bishuiyan karst subterranean river were analyzed, and the sources of the trace metals in the subterranean river as well as their response to rainfall were explored. The results showed that the rainfall provoked a sharp decrease in the major elements (Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , etc.) due to dilution and precipitation, while it also caused an increase in the concentrations of dissolved metals including Al, Mn, Cu, Zn and Cd, due to water-rock reaction, sediment remobilization, and soil erosion. The water-rock reaction was more sensitive to rainfall than the others, while the sediment remobilization and soil erosion took the main responsibility for the chemical change of the heavy metals. The curves of the heavy metal concentrations presented multiple peaks, of which the maximum was reached at 9 hours later after the largest precipitation. Different metal sources and the double-inlet structure of the subterranean river were supposed to be the reasons for the formation of multiple peaks. During the monitoring period, the average speed of the solute in the river reached about $0.47 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, indicating fast migration of the pollutants. Therefore, monitoring the chemical dynamics of the karst subterranean river, mastering the sources and migration characteristics of trace metal components have great significance for the subterranean river environment pollution treatment.

Key words: karst subterranean river; rainfall; trace metals; response; source

收稿日期: 2015-06-23; 修订日期: 2015-08-16

基金项目: 中国地质调查局工作项目(12120113006700, 12120114069001-03, 1212011220953); 国家自然科学基金项目(41202184); 广西自然科学基金青年基金项目(2013GXNSFBA019216)

作者简介: 邹艳娥(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水文地球化学, E-mail: yanezou@sohu.com

* 通讯联系人, E-mail: zhangq198203@163.com

我国西南地区岩溶分布面积约 100 万 km^2 , 其中裸露岩溶面积约 62 万 km^2 [1~2]。由于水热条件较好, 岩溶区溶孔、溶隙、落水洞及管道等强烈发育, 并相互连通, 形成岩溶地区特有的地表、地下“双层空间结构体系” [3]。地下河作为岩溶地区重要的含水系统, 与外界物质能量交换迅速, 其水化学特征能快速地反映外界环境的变化 [3~5]。地下水的地球化学动态变化取决于外界环境物质能量的输入及其地质背景条件。降雨作为重要的环境输入端元, 对研究短时间尺度上地下河与外界环境物质能量转化具有重要意义 [4,5]。在水化学研究指标中, 微量金属元素的化学性质相对稳定, 在地下水中的含量较低, 不易达到饱和, 其水文地球化学过程能够良好地指示水文地质条件 [6,7], 因而被广泛应用于地下水环境特征 [7~9]、水岩作用 [9~11]、污染物来源 [12~15] 及迁移转化 [11~14] 等方面的研究。然而, 目前针对岩溶地下水微量金属的研究还相对较少, 且已有的研究多集中于自然条件或者人类活动影响下的地下河重金属迁移转变 [15,16], 而对于特殊地质构造带区域地下河中重金属的迁移规律研究甚少。本研究借助自动采样设备, 以花岗岩和碳酸盐岩接触构造带处碧水岩地下河为对象, 在整个降雨期间对地下河出口进行每小时 1 次的高频取样, 分析水样中微量元素浓度对降雨的响应规律, 用相关性分析、浓度变化曲线探讨微量元素来源, 并结合研究区特殊的地下河结构特征及地质背景条件, 系统分析微量元素变化特征的形成过程, 以期对岩溶地下河的合理开发、利用及环境保护提供参考依据。

1 研究区概况

碧水岩地下河系统位于广西壮族自治区东部贺州市市望高镇, 地处湘、粤、桂三省(区)交界地。在地质构造上属姑婆山花岗岩体与岩溶区接触带, 地势东高西低(见图 1)。该区东北部出露燕山中、晚期多次侵入形成的花岗岩复式岩体, 中西部主要为碳酸盐岩区, 地层出露有泥盆系中统东岗岭组(D_2d)、泥盆系上统桂林组(D_3g)和融县组(D_3r), 石炭系下统岩关阶(C_1y)和大塘阶黄金段(C_1d), 以及第四系沉积物, 其中以泥盆系上统碳酸盐岩地层为主。受地形、地层、水文条件等影响, 区内岩溶发育强烈, 形成中部峰丛洼地的地貌格局。且该区处于扬子板块和华南板块的碰撞拼合带, 属扬子板块东南陆缘的湘桂活动带, 区内构造作用强烈, 岩浆活动频繁, 岩体与围岩的接触带形成后, 又受到晚期断

裂构造的叠加, 形成复合的侵入接触-断裂带 [17~19]。区域内构造以断裂为主, 褶皱次之。断裂以近 SN 向区域性断裂为主, 并伴随有多个次级断裂 [18]。有利的地质条件, 使得该区域岩溶地下河、天窗、脚洞等强烈发育。碧水岩地下河系统是该区主要岩溶管道系统, 流域面积约 50 km^2 , 其主要河道沿东西向发育, 主要受降雨和花岗岩山前径流补给。地下河上游主要有两个入口, 分别为太平地下河入口(R1)及下官冲地下河入口(R2), 至地下河出口出水壁距离分别为 4.2 km 和 2.8 km, 且在川岩采矿场处存在伏流出入口, 长度约 10 m。地下河水沿主河道自东向西径流, 在地质构造、地形等多方面因素的控制下, 于出水壁出露地表成为明流, 最终汇入贺江。

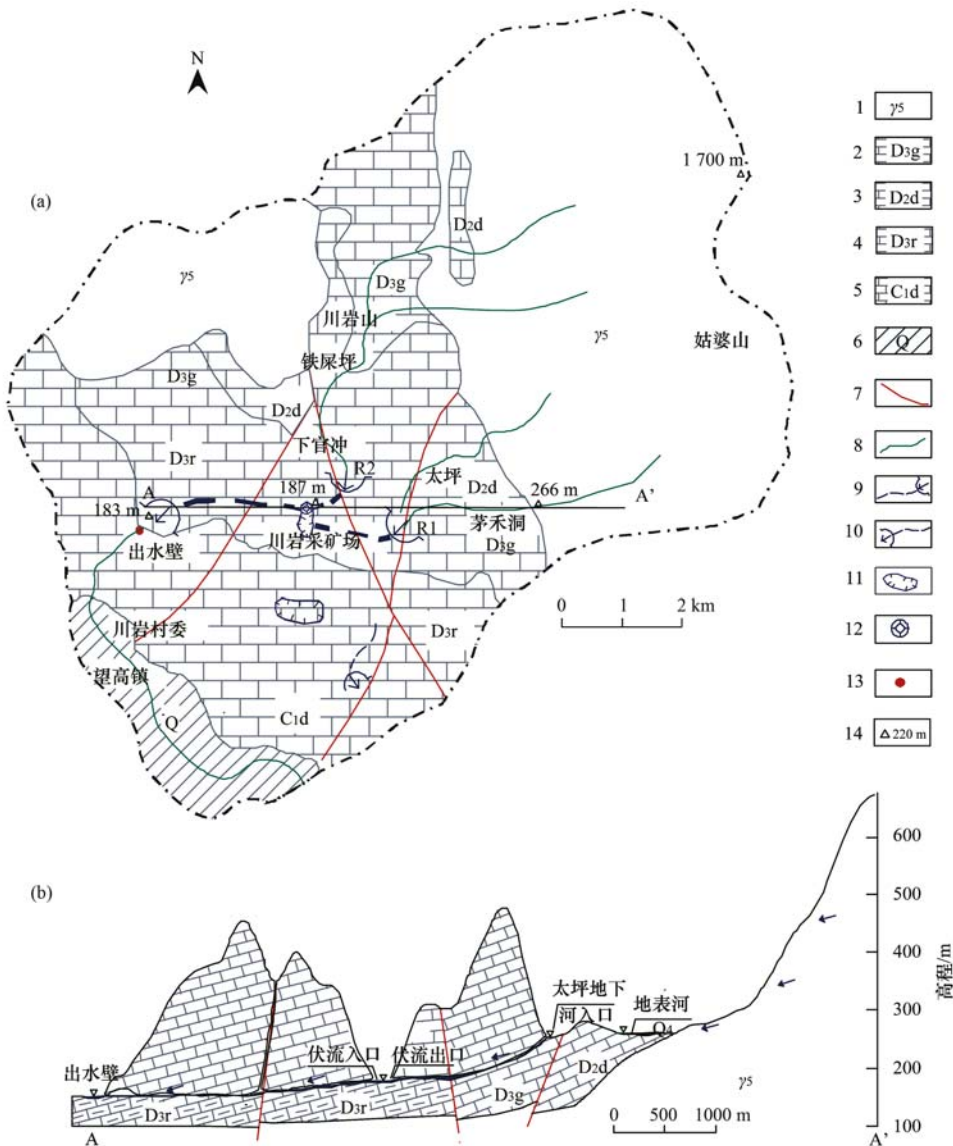
研究区紧邻北回归线, 属亚热带季风气候, 四季分明。年平均气温为 19.9℃, 年均降雨量 1 533.3 mm。由于季风影响雨量变化大且不稳定, 雨水多集中在 4~8 月, 一般占全年降雨量的 60%~80%。区内土地利用类型主要为林地, 以灌木丛为主, 田地极少, 因此地下河受农业活动影响较小。但研究区特殊的侵入接触构造系统使得区内钨、锡等金属矿产富集 [19]。因此在花岗岩和碳酸盐岩的接触蚀变带附近, 小型砂锡矿采矿点较多。

2 数据获取方法

降水量数据引自广西水利信息网 [20]。根据统计, 2014 年的 8 月 12 日 10:00~8 月 16 日 13:00 期间出现两次较强降雨, 单次降雨量分别为 33.00 mm (8 月 12 日 19:00~8 月 13 日 00:00) 和 13.30 mm (8 月 13 日 19:00~8 月 14 日 00:00), 整个过程累计降雨总量为 65.53 mm。

以地下河出口下游 100 m 处的控制断面为采样点, 使用美国 ISCO3700 自动取样器, 采样精度设置为每小时 1 次。每采集 24 个水样后, 从自动采样器中取出样品, 水样用 50 mL 高密度聚乙烯塑料瓶采集, 进行阴阳离子及金属元素水样预处理。阳离子及金属水样取样方法: 用 50 mL 聚乙烯瓶, 先用水样润洗 2~3 次, 再取样, 现场加入 1:1 的 HNO_3 酸化至 pH 值 <2; 阴离子水样取样方法: 取 50 mL 聚乙烯瓶, 先用水样润洗 2~3 次, 再取样。将水样带回实验室, 置于 4℃ 的冰箱冷藏保存直至测试。

水样测试是在中国地质科学院岩溶地质研究所测试中心进行。TFe、Al、Mn、Cu、Pb、Zn、Cd 等金属元素运用 ICP-OES (Optima-2100DV 全谱直读型电



1. 花岗岩; 2. 上泥盆系桂林组灰岩; 3. 中泥盆系东岗岭阶灰岩; 4. 上泥盆系融县组灰岩
5. 石炭系下统大塘阶黄金段; 6. 第四系; 7. 断裂带; 8. 地表河; 9. 地下河入口; 10. 地下河出口
11. 岩溶洼地; 12. 天窗; 13. 采样点; 14. 高程; 据 1:200 000 贺州市区域水文地质普查图修改

图 1 研究区水文地质及 A-A' 断面地质剖面示意

Fig. 1 Sketched map of hydrogeology at the study area and A-A' geological profile section

感耦合等离子体原子发射仪)进行测定,检测精度可达 $0.001 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 相对偏差 $< 2\%$; 阳离子 (K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}) 用戴安 ICS1500 离子色谱仪分析; 阴离子 (Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^-) 用万通 MIC 离子色谱仪分析,测试精度均为 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, HCO_3^- 则采用德国 Merck 公司生产的碱度试剂盒现场滴定,精度为 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$. 阴阳离子电荷平衡之差小于 5% .

3 结果与分析

3.1 地下河中微量金属元素的降雨响应特征

碧水岩地下河发育于灰岩和白云质灰岩为主的

地层,属典型的岩溶管道流(示踪实验成果未发表),其补给来源主要为大气降水及上游花岗岩区的地表径流. 地下水的主要阳离子为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} , 阴离子主要为 HCO_3^- , 为 HCO_3^- -Ca 型水. 如图 2 所示,地下河出口所监测的指标均对此次降雨响应明显,但行为较复杂. 主要离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 及 HCO_3^- 质量浓度在降雨期间趋于降低,且呈现二级阶梯状递减趋势,而金属元素质量浓度在降雨期间趋于升高,其浓度对降雨的响应曲线表现出明显的多峰特征.

微量金属元素 Cu、Pb、Zn 和 Cd 在 8 月 12 日

19:00 时即降雨发生之初浓度有升高趋势,特别是 Cd、Zn 浓度变化较明显,在 20:00 出现整个降雨过程的第一次浓度峰值,此时降雨强度最大,之后浓度趋于降低(图 2,A~B 段)。至 22:00 时 Cu、Pb、Zn 和 Cd 浓度再次出现增大的趋势,且该过程浓度峰值均表现出双峰的特征,即在 8 月 13 日 02:00 达到第一个浓度峰值,05:00 达到第二个峰值,随后浓度趋于降低(图 2,B~C 段)。金属元素 Al、Mn、TFe、Cu、Pb、Zn、Cd 质量浓度最大峰值(双峰的第二峰值)基本在降雨发生后 9 h 出现,据此可得期间地下河水溶质的平均迁移速度为 $0.47\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。同时注意到双峰的第一个峰值出现在最大降雨后 6 h,根据平均速度反算物质输入端距离约 2.82 km,这与地下河出口至下官冲输入端(R2)距离一致,说明金属元素浓度响应曲线的双峰特点是由地下河双入口的结构特征造成。监测后期降雨量较小,微量组分浓度值后期均表现出较小的波动,最终趋于稳定。

表 1 为地下河出口金属元素质量浓度特征统计值,其中 Al 的浓度变化范围为 $247.00\sim2\,982.00\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,平均浓度为 $1\,025.92\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;Mn 的浓度变化范围为 $80.10\sim1\,766.00\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,平均浓度为 $401.21\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,超过地下水Ⅲ类水质质量标准 4 倍(GB/T 14848-1993,Ⅲ类地下水 Mn 限值为 $0.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)^[21];其他微量元素均低于 $0.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TFe、Cu、Pb、Zn 和 Cd 的浓度变化范围分别为 $0.09\sim3.88\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $7.24\sim65.70\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $1.44\sim95.70\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $3.77\sim92.40\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.08\sim1.35$

$\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。变异系数(coefficient of variation)代表各观测值离散程度的一个统计量,可以较准确地反映各元素质量浓度的变化程度。由表 1 可知,相比于惰性离子 Cl^{-} 及与碳酸盐岩溶蚀相关的主要离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 及 HCO_3^{-} ,金属元素的变异系数较大,大小序列为: $\text{Pb} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{TFe} > \text{Cd} > \text{Al} > \text{Cu}$ 。说明各元素质量浓度均受到降雨的影响,但影响程度存在一定差别,其中金属元素受影响较大,其对降雨响应更为敏感。

3.2 地下河水中微量金属组分的来源分析

碧水岩地下河水属于典型的岩溶管道流,其水源主要来自大气降水和花岗岩区地表径流补给。地下河水离子成分主要为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^{-} 等,同时含 Al、Mn、TFe,以及 Cu、Pb、Zn、Cd 等微量金属元素,这些物质可能来源于基岩^[7,11]、土壤^[4,15,16]、大气沉降^[22]以及人类活动的输入^[16,23~25]。微量金属元素在水体中的分布特征与水化学成分存在一定联系,分析微量金属与其他水化学组分之间的相关关系对于认识微量金属的来源及其迁移特征具有重要意义^[15,25]。由图 2 可以看出,河水中金属组分对降雨的响应规律存在一定程度的相似性,因此对 52 个样品的化学组分进行 Pearson 双侧相关性分析,结果见表 2。在裸露岩溶区,Al、Mn 和 TFe 元素变化一般被认为是土壤颗粒进入水体所致^[4,15,16],然而微量金属 Cu、Pb、Zn、Cd 均与 Al、Mn 和 TFe 之间的相关性较高,据此推断这 7 种金属元素具有共同的来源或赋存介质。

表 1 碧水岩地下河金属元素及主要离子质量浓度特征统计¹⁾

Table 1 Statistics characteristics of metal elements and the main ions concentrations in Bishuiyan subterranean river system

项目	Mn	Al	TFe	Cu	Pb	Zn	Cd	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^{-}	Cl^{-}
最小值	80.1	247	0.09	7.24	1.44	3.77	0.08	11.30	1.95	43.84	1.36
最大值	1 766	2 982	3.88	65.7	95.7	92.4	1.35	30.28	4.88	116.24	2.75
均值	401.21	1 025.92	1.01	19.83	20.65	23.91	0.35	17.51	2.95	63.65	1.45
标准差	398.03	689.37	0.9	14.3	20.96	21.43	0.31	6.72	1.04	26.72	0.20
Cv	0.99	0.67	0.89	0.72	1.02	0.9	0.88	0.38	0.35	0.42	0.14

1) 变异系数(Cv)无量纲, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^{-} 、 Cl^{-} 、TFe 单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其他单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

表 2 碧水岩地下河重金属组分相关性分析¹⁾($n=52$)

Table 2 Correlation analysis of heavy metal components in Bishuiyan subterranean river system

	Al	Mn	TFe	Cu	Pb	Zn	Cd
Al	1						
Mn	0.936 **	1					
TFe	0.987 **	0.972 **	1				
Cu	0.886 **	0.977 **	0.924 **	1			
Pb	0.956 **	0.982 **	0.990 **	0.935 **	1		
Zn	0.921 **	0.978 **	0.953 **	0.972 **	0.956 **	1	
Cd	0.804 **	0.891 **	0.851 **	0.899 **	0.872 **	0.932 **	1

1) ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

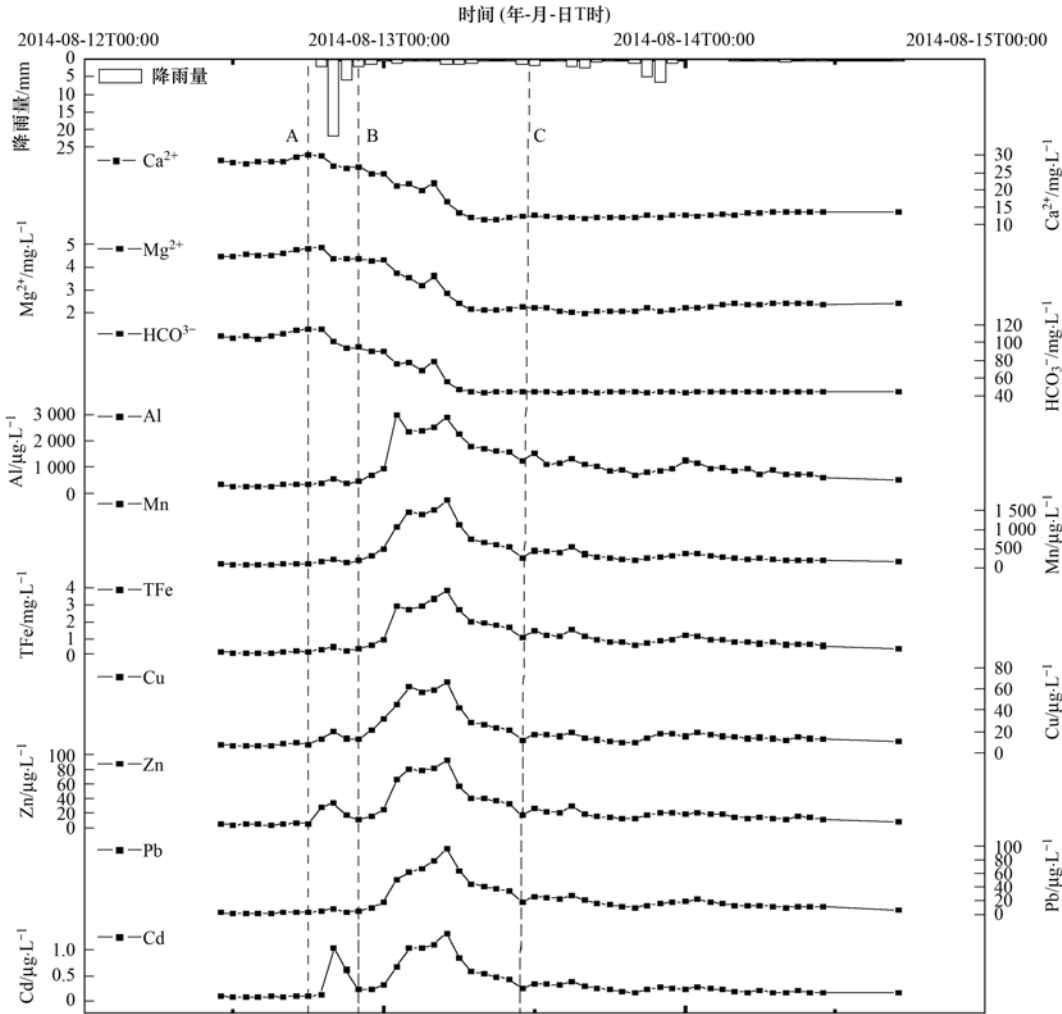


图 2 降雨期间碧水岩地下水化学组分对降雨的响应

Fig. 2 Response of chemical composition to rainfall in Bishuiyan subterranean river system during rainfall events

降雨作为地下河的物质能量输入端元,对地下河的影响主要体现在水体的物理侵蚀和搬运,以及降雨对地下河原有环境的改变.降雨初期地下河水的增加量主要来自岩溶裂隙水补给,在雨水下渗的压力水头作用下,裂隙中原滞留和沉积的土壤颗粒、泥沙、有机质等内源沉积物及间隙水进入地下河,使得地下河水化学成分浓度均出现不同程度的升高(图 2, A ~ B 段)^[7, 26].考虑到研究区特殊的地质条件,区内矿产储藏较丰富,且多存在于地下裂隙、管道、坑洞等之中,加之河道部分区段存在少许人为淘沙活动,使得泥沙淤积,因此在降雨初期水岩作用及内源沉积物淋溶作用使得赋存其中的微量元素进入水体中,从而导致地下河水中部分微量元素浓度明显增加,如 Zn、Cd.

流域上游为花岗岩山体,其高差大于 1 000 m,分布面积约占研究区总面积的 1/3,是地下河重要的集水区域.降雨往往会形成较大地表产流,沿途

冲刷土壤层,加之岩溶地区部分山体土壤覆盖较薄且疏松,易被雨水或地表径流携带通过地下河入口、天窗等进入地下管道,使得河水中 Al、Mn 和 TFe 元素浓度迅速增加,且质量浓度较大(图 2, B ~ C 段).此外,铝、铁和锰作为土壤中的重要元素,其氧化物结核、胶体物质及黏土矿物常为自然环境中良好的吸附剂^[26, 27].地下水中大多数微量元素,如 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg 等,多以阳离子形式存在,易被岩土中的吸附剂所吸附^[6].因此,雨水对土壤淋滤,一方面溶滤土壤中的微量组分,另一方面提供微量元素迁移载体,从而影响微量元素的迁移、释放.

研究区特殊的水文地质结构,使得降水、地表水、土壤水、地下水四水转换迅速^[1, 16, 26],降雨引起的水量变化,改变河流的动力特征及水化学特征,会导致赋存于河底泥沙中的重金属被释放而重新进入水体^[7, 14, 28 ~ 31].如表 3 所示,研究区地下河在人

类活动(淘沙)影响下,河流泥沙被扰动,使得流经地下河段水体中微量金属浓度增加. 同理,降雨过程地下河水动力条件改变会对地下河沉积物产生扰动甚至冲刷携带,从而影响河水金属元素浓度变化. 相关研究表明水流速度对沉积物、悬浮颗粒物以及上覆水中的迁移、传输与释放有影响,即随着流速的增加,水体中悬浮物浓度增加,溶解态重金属的浓度亦增加^[29,30]. 与此同时,随水量的增加及水体扰动的增强,地下河环境发生改变,如温度、pH、溶解氧、氧化还原电位及共存离子等,均会引起重金属元素形态的转化和浓度的增加^[7, 29]. 地下河的管道往往处于充水或者半充水状态. 当处于半充水状态时,有利于氧化作用的进行;当处于充水状态时,有

利于还原作用的进行^[32]. 降雨期间地下河部分管道处于充水状态,使其化学环境由氧化转变为还原,从而影响微量金属元素的迁移转化. 如铁锰氧化态最大的特点是在还原条件下稳定性较差,当环境处于低氧还原状态时,吸附于铁锰氧化物上的重金属元素会因铁锰的还原而被释放到水体中^[7, 33,34]. 因此,降雨作为外界环境输入往往会改变地下河动力条件和水化学条件,从而导致矿区河水中重金属元素浓度变化.

综上,地下河中金属元素对降雨迅速响应,一方面是雨水的物理侵蚀和搬运作用导致;另一方面则是降雨对地下河原有环境的改变,可能使得部分离子重新成为游离态.

表 3 在不同水力条件下地下河金属元素浓度变化对比¹⁾

Table 3 Changes of metal elements concentration of subterranean river in different hydraulic conditions

项目	位置	TFe	Al	Mn	Cu	Pb	Zn	Cd
丰水期淘沙	太坪入口	0.08	87.9	21.7	<0.09	0.16	<0.80	0.13
	伏流出入口	0.06	107.0	16.7	0.41	0.79	1.75	0.16
	下官冲入口	0.13	214.0	64.5	1.65	2.87	2.11	0.20
	出水壁	0.64	855.0	279.0	15.50	13.6	18.50	0.84
枯水期无淘沙	太坪入口	0.05	87.1	10.6	<0.09	<0.07	<0.80	<0.06
	伏流出入口	0.07	267.0	23.9	<0.09	0.38	<0.80	<0.06
	下官冲入口	0.01	26.4	2.6	<0.09	<0.07	<0.80	<0.06
	出水壁	0.12	452.0	87.4	10.00	0.60	<0.80	<0.06

1) TFe 单位 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其他单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

3.3 微量元素变化特征形成过程

地下河出口金属元素在降雨期间浓度增加主要由水岩作用、地下河底泥矿砂释放及水土流失导致. 图 2 中,降雨初期,雨水首先渗润土壤,此时水土不易淋失,地下河主要由裂隙水补给,因此降雨初期 Al、Mn、TFe 质量浓度变化较小,微量元素受水岩作用及内源沉积物淋溶释放影响其浓度有所增加. 之后受降雨持续影响,地下河水化学组分浓度开始出现较大变化, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 受雨水稀释作用,浓度均趋于降低; Al、Mn、TFe 质量浓度因非渗透性产流引起的物质输入而趋于升高;对于微量金属元素 Cu、Pb、Zn、Cd,12 日 20:00 之后水岩作用减弱而稀释作用占据主要,各组分浓度趋于降低,至 22:00 时,降雨引起的水土流失和矿区地下河泥沙释放能力增强,微量金属元素质量浓度因新的输入而再次趋于升高,至 8 月 13 日 05:00 即最大降雨发生后 9h 各金属组分浓度达到最大值. 同时受地下河结构的影响,不同地下河输入端由于距离及水力参数上的差异,各金属组分浓度变化出现明显的双峰特点,其中太坪输入端(R1)与出水壁距离相对下官冲输入端(R2)较远,因此太坪输入端(R1)

溶质浓度峰值较下官冲(R2)滞后. 降雨观测期间,8 月 13 日 05:00 以后降雨减弱且主要集中于下游,上游物质输入减弱甚至终止,下游持续降雨以致稀释作用增强,同时受地下河管道裂隙调控,河水化学组分浓度趋于降低. 随降雨过程结束,地下河水化学组分质量浓度也逐渐恢复稳定.

4 结论

(1)降雨期间,碧水岩地下河水化学组分表现出较明显的规律,其中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 等主要元素在降雨过程中受稀释作用明显,其质量浓度趋于降低;而 Al、Mn、TFe、Cu、Pb、Zn、Cd 等金属元素对降雨响应敏感,其质量浓度在降雨过程有所升高,相应质量浓度曲线均表现出多峰特点,最大峰值均发生在最大降雨发生后第 9 h.

(2)通过对碧水岩地下河水化学数据分析,认为河水中重金属的来源主要为:水岩作用、地下河泥沙、水土流失. 金属元素不同来源及地下河双入口的结构特征是形成金属元素质量浓度曲线多峰值的原因,其中水岩作用引起的水化学变化较河底沉积物再释放和水土流失更敏感,而后者是导致河水

重金属元素增加的主要原因. 金属元素 Al、Mn、TFe 主要来源于土壤淋滤, Cu、Pb、Zn、Cd 主要来自于基岩、地下河底泥和矿砂.

(3) 碧水岩流域集岩溶发育程度高, 岩溶管道畅通性良好. 强降雨形成的地表产流集中汇入、降雨入渗经裂隙的快速补给, 以及强降雨引起的河流水力条件的改变, 对地下河水质变化产生直接影响. 监测期间, 溶质在地下河中的平均迁移速度约为 $0.47 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 污染物运移速度较快, 因此, 应加强对岩溶地下水化学动态的监测, 注重对矿产区域岩溶地下水环境保护和治理.

致谢: 感谢殷建军、任坤、原雅琼在采样和论文写作过程提供帮助.

参考文献:

- [1] 袁道先, 朱德浩, 翁金桃, 等. 中国岩溶学[M]. 北京: 地质出版社, 1994. 1-13.
- [2] 覃政教, 林玉石, 袁道先, 等. 西南岩溶区矿山与水污染问题探讨及建议[J]. 地球学报, 2012, **33**(3): 341-348.
- [3] 袁道先, 蔡桂鸿. 岩溶环境学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988. 3-27.
- [4] 杨平恒, 袁道先, 叶许春, 等. 降雨期间岩溶地下水化学组分的来源及运移路径[J]. 科学通报, 2013, **58**(18): 1755-1763.
- [5] 苟鹏飞, 蒋勇军, 扈志勇, 等. 典型岩溶地下河系统暴雨条件下水文水化学动态变化研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, **37**(5): 20-25, 37.
- [6] 沈照理, 朱宛华, 钟佐荣. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1993. 141-143.
- [7] 于宇, 宋金明, 李学刚, 等. 沉积物微量金属元素在重建水体环境变化中的意义[J]. 地质论评, 2012, **58**(5): 911-922.
- [8] 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.
- [9] 高宗军, 徐军祥, 王世臣, 等. 济南岩溶水微量元素分布特征及其水文地质意义[J]. 地学前缘, 2014, **21**(4): 135-146.
- [10] Guo Q H, Wang Y X. Trace element hydrochemistry indicating water contamination in and around the Yangbajing geothermal field, Tibet, China[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2009, **83**(4): 608-613.
- [11] Gonnea M E, Charette M A, Liu Q, et al. Trace element geochemistry of groundwater in a karst subterranean estuary (Yucatan Peninsula, Mexico)[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2014, **132**: 31-49.
- [12] Smedley P L, Kinniburgh D G. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters[J]. Applied Geochemistry, 2002, **17**(5): 517-568.
- [13] Li J, Li F D, Liu Q, et al. Trace metal in surface water and groundwater and its transfer in a Yellow River alluvial fan: Evidence from isotopes and hydrochemistry[J]. Science of the Total Environment, 2014, **472**: 979-988.
- [14] 汪福顺, 刘丛强, 梁小兵, 等. 湖泊沉积物中微量金属二次迁移过程中微生物作用的实验研究[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(1): 49-56.
- [15] 陈雪彬, 杨平恒, 蓝家程, 等. 降雨条件下岩溶地下水微量元素变化特征及其环境意义[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 123-130.
- [16] 任坤, 杨平恒, 江泽利, 等. 降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析[J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1270-1276.
- [17] 余君鹏, 秦松贤. 湘南姑婆山岩体北西侧侵入接触带构造控矿研究[J]. 地质科技情报, 2007, **26**(2): 25-29.
- [18] 冯佐海. 广西姑婆山-花山花岗岩体侵位过程及构造解析[D]. 长沙: 中南大学, 2003. 11-13.
- [19] 陆小平, 陆孝赞, 龚名文. 广西姑婆山锡矿田矿床地质特征及矿床成因[J]. 华南地质与矿产, 2005, (2): 53-60.
- [20] 广西水利信息网[EB/OL]. [2014-08]. <http://www.gxwater.gov.cn>.
- [21] GB/T 14848-1993, 地下水质量标准[S].
- [22] 杨忠平, 卢文喜, 龙玉桥, 等. 长春市城区大气湿沉降中重金属及 pH 值调查[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, **39**(5): 887-892.
- [23] Gunawardena J, Ziyath A M, Egodawatta P, et al. Sources and transport pathways of common heavy metals to urban road surfaces[J]. Ecological Engineering, 2015, **77**: 98-102.
- [24] Choi M, Park J, Cho D J, et al. Tracing metal sources in core sediments of the artificial lake An-Dong, Korea: Concentration and metal association[J]. Science of the Total Environment, 2015, **527-258**: 384-392.
- [25] Guo Y Q, Huang C C, Pang J L, et al. Concentration of heavy metals in the modern flood slackwater deposits along the upper Hanjiang River valley, China[J]. Catena, 2014, **116**: 123-131.
- [26] 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.
- [27] 邹胜章, 于晓英, 张国臣, 等. Mn-Cr(VI)在岩溶水系统内的交互作用[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2012, **37**(2): 289-293.
- [28] 郭纯青, 方荣杰, 于映华. 中国南方岩溶区岩溶地下河系统复杂水流运动特征[J]. 桂林理工大学学报, 2010, **30**(4): 507-512.
- [29] 黄岁梁, 万兆惠. 河流泥沙吸附-解吸重金属污染物试验研究现状(二)[J]. 水利水电科技进展, 1995, **15**(2): 27-31.
- [30] 黄建枝, 葛小鹏, 杨晓芳, 等. 利用环流槽研究再悬浮条件下凉水河底泥沉积物中重金属的迁移与分布[J]. 科学通报, 2012, **57**(21): 2015-2021.
- [31] Wang J, Liu G J, Lu L L, et al. Geochemical normalization and assessment of heavy metals (Cu, Pb, Zn and Ni) in sediments from the Huaihe River, Anhui, China[J]. Catena, 2015, **129**: 30-38.
- [32] 郭芳, 王文科, 姜光辉, 等. 岩溶地下河污染物运移特征及自净能力——以广西里湖地下河为例[J]. 水科学进展, 2014, **25**(3): 414-419.
- [33] 汤艳杰, 贾建业, 谢先德. 铁锰氧化物在污染土壤修复中的作用[J]. 地球科学进展, 2002, **17**(4): 557-564.
- [34] 唐健生, 苏春田, 潘晓东, 等. 岩溶区土壤铁锰结核重金属元素形态分析[J]. 河南农业科学, 2011, **40**(5): 100-103.

CONTENTS

Characterization of Water-soluble Ions in PM _{2.5} of Beijing During 2014 APEC	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)
PM _{2.5} Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013	LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4331)
Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC	LI Wen-tao, GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, <i>et al.</i> (4340)
Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaxing	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (4348)
Influence of Burning Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in the Pearl River Delta	ZHAO Wei, FAN Shao-jia, XIE Wen-zhang, <i>et al.</i> (4358)
Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry	ZHANG Ya-hui, ZHANG Cheng, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4366)
Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution	LIU Fei, CHU Hui-min, ZHENG Xiang-min (4374)
Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinpo Mountain, Chongqing	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, JING Wei-li, <i>et al.</i> (4381)
Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4389)
Low-Concentration CO ₂ Adsorption on Polyaniline/Zelite Y Composites	LIU Feng-ling, LU Xia, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4396)
Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4403)
Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem	AN Si-wei, SUN Tao, MA Ming, <i>et al.</i> (4414)
Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (4420)
Spatial Distribution of Stable Isotopes in Particle Organic Matters and Sediments from Baishi Reservoirs	GUO Kai, ZHAO Wen, WANG Shan, <i>et al.</i> (4430)
Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir	LI Lei, LI Qiu-hua, JIAO Shu-lin, <i>et al.</i> (4436)
Environmental Effect of Substrate Amelioration on Lake; Effects on <i>Phragmites communis</i> Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (4444)
Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research	SHEN Wei, WANG Jian-li, WANG Jia-lu, <i>et al.</i> (4455)
Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis	ZOU Yan-e, JIANG Ping-ping, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4464)
Residue Concentration and Distribution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Qiantang River in Hangzhou Section	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (4471)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River	TIAN Qi-chang, TANG Hong-bo, XIA Dan, <i>et al.</i> (4479)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang	QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4486)
Effects of Citric Acid on Activation and Methylation of Mercury in the Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	QIN Cai-qing, LIANG Li, YOU Rui, <i>et al.</i> (4494)
Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season	ZUO Le, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (4501)
Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake	CHEN Jun, LI Da-peng, ZHU Pei-ying, <i>et al.</i> (4509)
Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches	ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, <i>et al.</i> (4516)
Removal of Phosphate by Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, DIAO Jia-yong, HUANG Li-dong, <i>et al.</i> (4523)
Adsorption of Cu on Core-shell Structured Magnetic Particles: Relationship Between Adsorption Performance and Surface Properties	LI Qiu-mei, CHEN Jing, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4531)
Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR	CHENG Ji-hui, WU Peng, CHENG Chao-yang, <i>et al.</i> (4539)
Simultaneous Biotransformation of Ammonium and Nitrate via Zero-Valent Iron on Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4546)
Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS	FU Gang, ZENG Qiang, ZHAO Liang, <i>et al.</i> (4553)
Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing	ZHANG Can, LIU Wen-jun, AO Lu, <i>et al.</i> (4561)
Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou	SU Hui, ZHAO Bo, ZHANG Su-kun, <i>et al.</i> (4567)
Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures	LIU Xue, LIU Shu-shen, LIU Hai-ling (4574)
Aging Law of PAHs in Contaminated Soil and Their Enrichment in Earthworms Characterized by Chemical Extraction Techniques	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (4582)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales	YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (4591)
Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (4600)
Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies	XIE Wei-qiang, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (4609)
Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO ₄ and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize	LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, <i>et al.</i> (4615)
Occurrence Characteristics of Pyrene and Arsenate and Their Interaction in <i>Pteris vittata</i> L.	ZHANG Yu-xiu, MA Xu, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (4623)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Its Uptake by Cabbage	XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, XIE Wen-wen, <i>et al.</i> (4630)
Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil	CHEN Yong-qin, JIANG Ling, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4642)
Degradation of Steroidal Hormones by Salt-tolerant <i>Altererythrobacter</i> Strain MH-B5; Degradation Characteristics, Metabolites and Its Immobilization	MA Cong, QIN Dan, SUN Qian, <i>et al.</i> (4651)
Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River	LI Hu, HUANG Fu-yi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4659)
Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, MAO Qiao-zhi, <i>et al.</i> (4667)
Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain	ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun, <i>et al.</i> (4676)
Assessment of Emission and Co-Reduction of PCDD/Fs and PCNs in the Secondary Copper Production Sector	TIAN Ya-jing, JIANG Chen, WU Guang-long, <i>et al.</i> (4682)

《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12月15日 第36卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 12 Dec. 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