

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

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

中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示	高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康	(1141)
2013年1月北京市PM _{2.5} 区域来源解析	李璇,聂滕,齐珺,周震,孙雪松	(1148)
2013年1月北京市一次空气重污染成因分析	程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅	(1154)
上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征	常燕,冯冲,瞿建国,张经	(1164)
厦门春季PM ₁₀ 中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析	张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成	(1173)
硫氧同位素示踪南京北郊大气PM _{2.5} 中硫酸盐来源	魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝	(1182)
结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程	包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠	(1187)
春季华东高山背景区域PM _{2.5} 和PM _{2.5-10} 中水溶性无机离子特征	苏彬彬,张智胜,陶俊,许梹洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇	(1195)
落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究	杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹	(1202)
四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征	何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪	(1208)
深圳市船舶排放清单与时空特征研究	杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏	(1217)
超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性	孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗	(1227)
空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征	张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹	(1234)
基于氢氧稳定同位素的黄土高原下二次蒸发效应	靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽	(1241)
黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响	张永领,王明仕,董玉龙	(1249)
调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响	王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远	(1256)
春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响	于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚	(1263)
降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析	任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春	(1270)
北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价	钟惠舟,韦朝海	(1277)
丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析	李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏	(1285)
三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例	操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺	(1293)
营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响	王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖雪	(1301)
一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究	杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏	(1309)
昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析	梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明	(1317)
河道曝气提升河流水质的WASP模型研究	朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽	(1326)
γ辐射降解水中的盐酸丙沙星的研究	祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静	(1332)
电化学氢化物发生法处理含锑废水及对锑的回收	陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼	(1338)
Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水	孙文静,王亚旻,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳	(1345)
生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素	孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪	(1352)
308 nm光作用下α-Fe ₂ O ₃ 表面HNO ₃ 的光解	陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强	(1359)
L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚	何家洪,徐强,丁武泉,李强	(1365)
酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究	许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博	(1374)
枯草芽孢杆菌对土霉素和2-甲基异冰片的降解动力学特性	马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用	(1379)
嗜碱降解菌筛选及其对焦化废水强化处理	李静,李文英	(1385)
Fe ³⁺ 对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N ₂ O释放的影响	李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建	(1392)
内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究	赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉	(1399)
利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻	王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东	(1406)
进水渗滤液总氮和BOD ₅ /TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响	杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰	(1412)
重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析	师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先	(1417)
湖南攸县典型煤矿和工矿区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析	张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰	(1425)
沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响	苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春	(1431)
施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响	王秀丽,梁成华,马子惠,韩月	(1437)
不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复	邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提	(1445)
陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价	齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞	(1453)
有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响	王菲,袁婷,谷守宽,王正银	(1461)
玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究	程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云	(1468)
硼锑交互作用对水稻吸收积累锑和硼的影响	向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐	(1474)
丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响	郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新	(1481)
滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究	陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁	(1489)
不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系	吴静,陈书涛,胡正华,张旭	(1497)
工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析	王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮	(1507)
《环境科学》征订启事		(1216)
《环境科学》征稿简则		(1248)
信息		(1163,1194,1248,1424)

降雨期间岩溶城镇区地下河水重金属变化特征及来源解析

任坤^{1,2}, 杨平恒^{1,2*}, 江泽利¹, 王尊波¹, 师阳¹, 王凤康¹, 李晓春³

(1. 西南大学地理科学学院, 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; 3. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127)

摘要: 2014年6月降雨期间对重庆城镇区南山老龙洞流域地下河出口处的流量及Mn、Pb、Cu、As等重金属质量浓度进行观测, 研究了流量的变化特征及岩溶水文系统内部结构, 探讨了4种重金属对降雨的响应, 用主成分分析法和实际测试值来解译降雨期间地下河水的重金属来源。结果表明, 地下河流量、Mn、Pb、Cu和As对降雨响应迅速, 推断研究区属于一个管道与裂隙组合的岩溶水文系统; 非渗透地表产流迅速, 其携带的地表污染物质Mn、Pb、Cu通过落水洞、竖井及岩溶天窗进入地下河, 使这些污染物质在最大降雨量峰值的6 h后达到最大质量浓度峰值, 较流量最大峰值提前到来; 城市地表径流、水土流失是老龙洞地下河Mn、Pb、Cu、As的主要来源, 洞穴滴水雨水也会输入一定量的Mn、Pb和As; 岩溶区的城镇建设要进行合理规划, 完善相关基础设施, 做到从源头上防止地下水遭受污染。

关键词: 岩溶城镇区; 降雨; 地下河; 重金属; 来源解析; 南山老龙洞

中图分类号: X142; X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1270-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.04.018

Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event

REN Kun^{1,2}, YANG Ping-heng^{1,2*}, JIANG Ze-li¹, WANG Zun-bo¹, SHI Yang¹, WANG Feng-kang¹, LI Xiao-chun³

(1. 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; 3. College of Urban and Environment, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: The groundwater discharge and heavy metal concentrations (Mn, Pb, Cu and As) at the outlet of Nanshan Laolongdong karst subterranean river, located at the urban region in Chongqing, were observed during the rainfall events. Analysis of flow and concentrations curves was employed to study their responses to the rainfall events and explore the internal structure of karst hydrological system. Principal component analysis (PCA) and measurements were used to identify the sources of heavy metals during rainfall. The result showed that the discharge and concentrations of the heavy metals responded promptly to the rainfall event. The variation characteristics of flow indicated that Laolongdong subterranean river system belonged to a karst hydrological system including fractures together with conduits. Urban surface runoff containing large amounts of Mn, Pb and Cu went directly to subterranean river via sinkholes, shafts and karst windows. As a result, the peak concentrations of contaminants (Mn, Pb and Cu) flowed faster than those of discharge. The major sources of water pollution were derived from urban surface runoff, soil and water loss. Cave dripwater and rainwater could also bring a certain amount of Mn, Pb and As into the subterranean river. Urban construction in karst areas needs scientific and rational design, perfect facilities and well-educated population to prevent groundwater pollution from the source.

Key words: karst urban areas; rainfall; subterranean river; heavy metal; source apportion; Laolongdong in Nanshan

岩溶地下河系统是岩溶地区重要的地下水水源, 全世界有20%~25%的人口把岩溶地下水作为饮用水源^[1]。岩溶区土层普遍较薄, 且存在地表地下双层结构^[2-4], 污染物可通过薄的土壤层和落水洞、天窗及岩溶裂隙等进入地下含水层, 加之岩溶含水系统自净能力较差, 使得岩溶地下水极易受到污染^[5]。研究表明, 岩溶地下水中重金属主要来源于垃圾露天堆积^[6,7]、农业废弃物^[8]、矿山开采^[9]等人类活动, 流域内基岩也是其中一个来源^[10]。郎

赟超等^[11]、李思亮等^[12]利用同位素示踪技术, 有效识别了贵阳市岩溶地下水污染物的来源。郭芳等^[13]对广西里湖地下河污染物运移特征及自净能

收稿日期: 2014-08-27; 修订日期: 2014-11-18

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2015D003, XDJK2014A016); 重庆市国土房管科技项目(CQGT-KJ-2014056); 重庆市基础与前沿研究计划院士专项项目(cstc2013jcyjys20001); 国家自然科学基金项目(41103068)

作者简介: 任坤(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为岩溶水文地质与全球变化, E-mail: rkhlhk@163.com

* 通讯联系人, E-mail: balance@swu.edu.cn

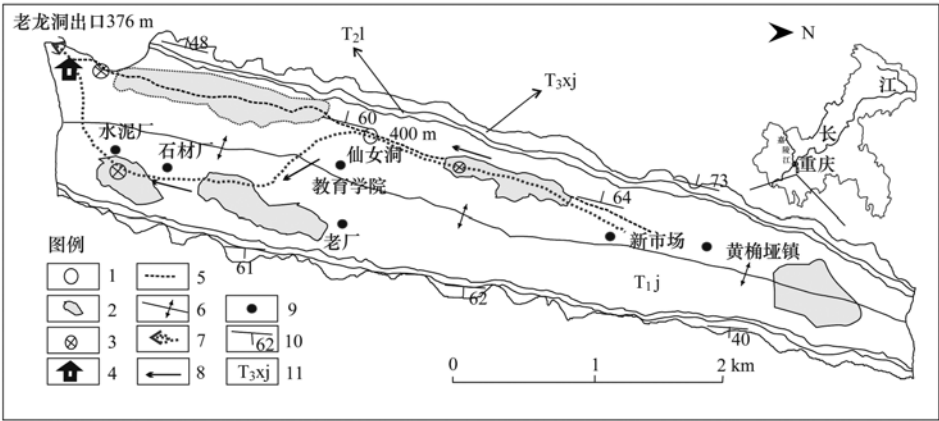
力进行了研究,表明岩溶地下河对 As、Cd、Hg、Mn 具有一定自净能力,Zn 进入岩溶含水层后全部衰减. 降雨期间,坡面漫流携带的 Fe、全 Mn、 Al^{3+} 等通过落水洞、岩溶天窗、竖井等直接灌入地下河^[14],加上雨水的“稀释作用”^[15],岩溶地下水呈现出“高铝低钙”的特点^[16]. 地下河流量及重金属质量浓度在降雨期间的变化特征能够有效地反映人为因素和自然因素对岩溶地下河系统的影响. 因此,本文选取处于城镇区的南山老龙洞地下河作为研究对象,分析降雨期间重金属质量浓度对降雨的响应,并探讨降雨期间污染物质的来源,以期对岩溶区城镇的合理发展和地下水资源的开发与保护提供科学依据.

1 研究区概况

南山老龙洞地下河流域位于重庆市南岸区, $29^{\circ}28'30''N \sim 29^{\circ}33'25''N, 106^{\circ}34'56''E \sim 106^{\circ}36'58''E$,属亚热带湿润性季风气候,降雨集中在 4~9 月,

多年平均降雨量 1 180 mm. 植被为亚热带常绿阔叶林,土壤为黄壤和石灰土. 研究区在地质构造上属于川黔南北构造体系长江南岸南温泉背斜,老龙洞地下河流域处于背斜核部,主要地层为三叠系下统嘉陵江组(T_1j)碳酸盐岩,背斜东西两翼为三叠系中统雷口坡组(T_2l)碳酸盐岩和三叠系上统须家河组(T_3xj)长石石英砂岩、泥岩并夹有煤层. 该研究区属于裸露型岩溶环境,区内有岩溶洼地、落水洞、岩溶天窗等岩溶地貌类型发育. 由于碳酸盐岩的条带状展布和差异溶蚀,该区构成一个典型的地下水系统,形成了典型的岩溶槽谷型地下河.

老龙洞地下河流域约 5 万人,人口密度 $3\,751\text{ 人}\cdot\text{km}^{-2}$,流域内分布有黄桷垭街区、重庆邮电大学、老厂社区、重庆第二师范学院等人口聚集区,另外还有水泥厂、石材厂、汽修厂、机械厂、电焊厂及塑胶厂等. 流域面积约 13.0 km^2 ,居民建设用地约 4.5 km^2 ,厂矿用地约 2.5 km^2 ,农业用地约 2.0 km^2 ,其余为未利用地(图 1).



1. 岩溶天窗; 2. 岩溶洼地; 3. 落水洞; 4. 气象站; 5. 污水渠; 6. 背斜轴线; 7. 地下河;
8. 流向; 9. 地物名; 10. 岩层倾向及倾角; 11. 地层代号

图 1 老龙洞地下河流域水文地质示意

Fig. 1 Hydrogeological map of Laolongdong subterranean river basin

2 研究方法

2.1 采样点布置

在地下河出口进行暴雨观测,滴水样点主要分布在中下游的仙女洞天窗和老龙洞内,其中老龙洞内有 2 个滴水样点,只有降雨时才能采集到滴水;仙女洞内 1 个采样点,滴水长年不断. 雨水采样点设在老龙洞景区 7 楼顶气象站旁.

2.2 野外实时监测

通过安装在研究区的 Davis 气象站(美国 DAVIS 公司)获得降雨量,分辨率 0.2 mm,测量精

度为 $\pm 4\%$. 使用直尺量取地下河出口矩形堰中水的深度,每 2 h 量一次,每次在堰口左中右各测 3 次,然后取 9 次的平均值代入经验公式换算成流量.

2.3 样品采集与测试

雨水: 把 2 L 烧杯放置在距地面 1 m 的高度上采集雨水,然后装入 60 mL 塑料瓶. 滴水: 用烧杯接取一定量的滴水,倒入塑料瓶中. 地下河水: 降雨开始前 1 d 进行采样,每 2 h 取一个水样,到降雨结束后 2 d 内按流量变化 2~4 h 取一次样. 城市地表径流: 产流后 30 min 内取样,所采集的径流能够

通过落水洞、竖井及岩溶天窗等进入地下河. 采集水样所需的烧杯、聚乙烯塑料瓶事先经酸浸泡 24 h 以上,用超纯水洗净、烘干,用预采水涮洗 3 次后正式采样. 所采水样现场加入 1:1 优级纯 HNO_3 至 $\text{pH} < 2$,用便携式冰袋运回实验室测试,如不能及时测试则于 4°C 条件下冷藏保存. 重金属元素 Mn、Cu、Pb 和 As 用 ICP-OES Optima 2100DV (美国 Perkin Elmer 公司) 检测,检测下限 $0.001 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,仪器稳定性: 1 h 内 $\text{RSD} < 1\%$. 以上分析工作在西南大学地球化学与同位素实验室和岩溶环境微生物实验室完成.

3 结果与分析

3.1 地下河流量对降雨的响应

降雨观测前一周研究区没有降雨,此次观测期间总降雨量为 40.96 mm. 监测期间主要有 3 场比较集中的降雨时段,Storm-1、Storm-2 和 Storm-3 (图 2). Storm-1 降雨量为 1.1 mm (2014-06-08T15:00 ~ 2014-06-08T16:00),雨强为 $1.10 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$; Storm-2 的降雨量为 37.83 mm (2014-06-09T03:30 ~ 2014-06-10T02:00),占总降雨量的 92.4%,雨强为 $1.80 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$; Storm-3 的降雨量为 2.03 mm (2014-06-10T07:00 ~ 2014-06-10T11:00),雨强为 $0.51 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$. 其中,在 2014-06-09T04:00 ~ 11:00 (Storm-2a) 7 h 内降雨量达到 23.36 mm,占 Storm-2 降雨量的 61.7%,总降雨量的 57.6%,雨强为 3.15

$\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$,居 3 场之首.

地下河水流量对降雨的响应主要分为 3 阶段 (图 2): A 阶段 (2014-06-08T00:00 ~ 2014-06-09T08:00),流量比较稳定; B 阶段 (2014-06-09T08:00 ~ 2014-06-10T06:00),流量总体呈上升趋势; C 阶段 (2014-06-10T06:00 ~ 2014-06-12T00:00),流量总体呈下降趋势. A 阶段有 Storm-1,但降雨量和雨强都太小,不足以产流和汇流,流量未对 Storm-1 有响应. B 阶段从 2014-06-09T08:00 开始地下河流量对降雨开始响应,2014-06-09T08:00 ~ 14:00 (B-1) 6 h 内流量由 $127.5 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 骤升至 $297.4 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, Storm-2a 对流量上升贡献比例为 133.1%,且 B-1 段的流量峰值仅滞后于 Storm-2a 雨峰 6 h,说明地下河流量对降雨响应十分迅速. B-2 段流量上升也较快,其原因与 B-1 相同,而 B-1 与 B-2 之间流量稍有回落 ($284.1 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$),是 Storm-2 有降雨间断造成的. B-3 阶段的流量缓慢上升,到 2014-06-10T06:00 达到最大值,滞后最大降雨量约 20 h,与 Storm-2 中后期雨强变小、雨量减少有关; Storm-2 带来的降水使得地下河流量自最初的 $127.5 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 上升至 $482.1 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$,其对流量上升贡献比例为 278.0%,Storm-2 对地下河流量具有重要影响. C 阶段流量呈缓慢下降趋势,在 2014-06-11T04:00 流量略有上升,是流量对 Storm-3 的响应. 总的来看,地下河水流量最大峰滞后于雨峰仅 20 h,说明地下河流量对降雨响应迅速.

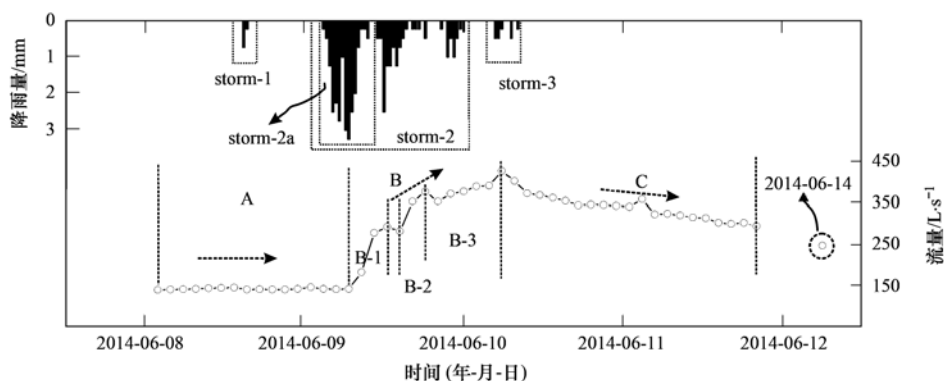


图 2 地下河流量对降雨的响应

Fig. 2 Response of flow to rainfall in Laolongdong subterranean river system

岩溶水文系统是一个三维实体,表现为裂隙、管道及洞穴的复杂组合,可以分为以管道为主的结构,以裂隙为主的结构,管道与裂隙组合的结构,不同的结构对岩溶水文的调节功能也不相同^[3]. 当岩溶水文系统以管道为主时,流量快涨快落 [图 3 (a)]; 以裂隙为主时,流量变化不明显 [图 3 (b)];

两者结合时,流量陡涨,但退峰时间较长 [图 3 (c)]. 研究区落水洞较多,当雨强较大时 (如 Storm-2a),迅速形成城市地表径流通过落水洞灌入地下河,流量表现陡涨的特点 (如 B-1). 当水文系统受到土层、深部溶隙、裂隙、网状管道和洞穴调节时,退峰过程则比较缓慢 (C 段). 由此推断研究区属于

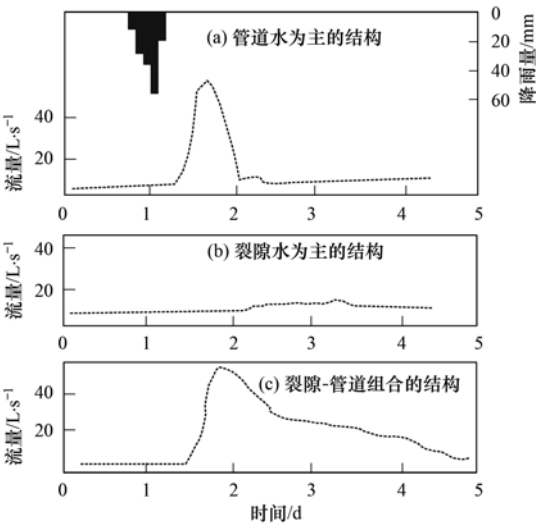


图3 岩溶水文系统内部结构同洪水过程的关系
(据文献[3]修改)

Fig. 3 Flood hydrographs for different types of internal structure of karst system

表 1 老龙洞地下河水重金属元素质量浓度统计特征/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Statistical characteristics of heavy metal concentrations in subterranean river system/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

项目	初始浓度	最小值	最大值	均值	CV ¹⁾
Mn	0.200	0.001	0.337	0.109 ± 0.095	0.872
Pb	0.012	0.009	0.024	0.014 ± 0.003	0.216
Cu	0.005	0.003	0.017	0.005 ± 0.002	0.411
As	0.080	0.073	0.152	0.084 ± 0.012	0.143

1) CV 为无量纲

元素质量浓度对降雨都有响应.

图4是老龙洞地下河水Mn、Pb、Cu和As的质量浓度变化曲线,Mn、Pb、Cu在观测期间先后出现了两次质量浓度比较一致的峰值(F1和F2),F1-Mn、F1-Pb和F1-Cu的峰值大于在F2处的值,较流量峰值提前到来.研究区水泥硬化路面、屋顶、庭院等非渗透表面面积占50%以上,Storm-2a带来的雨水降落非渗透性表面无需下渗,便可迅速形成城市地表径流,城市地表径流携带大量的污染物质由落水洞进入地下河^[17],从而使这4种元素的质量浓度在Storm-2a后流量较大时(B-1)出现了上升,并且Mn、Pb、Cu出现了最大峰.降雨落在非硬化表面上时,往往要先补充土壤水分,当土壤水含量达到田间持水量时才允许水分下渗或产流进入地下河,这部分水带来的污染物到达地下河出口的时间要晚于非渗透表面.所以Mn、Pb、Cu和As虽然在F2出现了质量浓度峰值,但滞后于F1峰值很多.岩溶区,雨强与地下水流量对降雨响应的速度呈负相关关系^[18],径流水质与雨强呈负相关性^[19],Storm-2a

一个管道与裂隙组合的岩溶水文系统.

3.2 地下河水重金属元素浓度变化特征

表1是降雨过程中老龙洞地下河水Mn、Pb、Cu和As等4种重金属元素的质量浓度统计特征,均值大小顺序为:Mn>As>Pb>Cu,除Mn外皆小于 $0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,Cu最小,仅为 $0.005\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.其中,Mn的均值要小于其初始值,Pb、Cu和As大于各自的初始值.Mn的质量浓度变化范围是 $0.001\sim0.337\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,Pb在 $0.009\sim0.024\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间变化,Cu、As分别是 $0.003\sim0.017\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.073\sim0.152\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.降雨期间这4种元素质量浓度最小值表现为:Mn<Cu<Pb<As,皆小于其初始值;最大值表现为Mn>As>Pb>Cu,都大于其初始值.变异系数(coefficient of variation, CV)是衡量各观测值变异程度的一个统计量,这4种元素的CV值Mn>Cu>Pb>As,Mn的变异程度最强,As最小,Cu、Pb居中.通过分析可知,Mn、Pb、Cu、As等4种金属

的雨强最大,Mn、Pb、Cu和As在4~6h就有了响应,由于降雨的“初期冲刷效应”^[20,21],带来了硬化表面上的大部分污染物质,加上地下河水量未达到最大值,“稀释效应”相对较弱,使得Mn、Pb、Cu的最大质量浓度峰值较地下河流量最大峰值提前到来.在F1与F2之间,与流量小峰值对应,Pb、Cu也出现了一个峰值,但皆小于各自F1处峰值,这次峰值可能是距离地下河出口较远的落水洞输入污染物引起的,但由于流量较大,峰值较F1处小.与Pb、Cu不同,Mn、As在F1与F2之间的流量出现小峰值时质量浓度却在下降,可能是这次落水洞输入的污染物Mn、As含量较少,“稀释效应”相对较强造成的.降雨结束后,随着流量下降,Pb和Cu恢复到雨前初始值,这与Vesper等^[16]的研究结果一致.As在降雨过程中随地表径流、流失的水土等进入地下河,使地下河As质量浓度较高;降雨结束后,仍有携带As的部分田间径流存在,此时流量减少,“稀释效应”减弱,因此雨后地下河水As的质量浓度略高于雨前.Mn在降雨结束后、流量下降时,质量浓

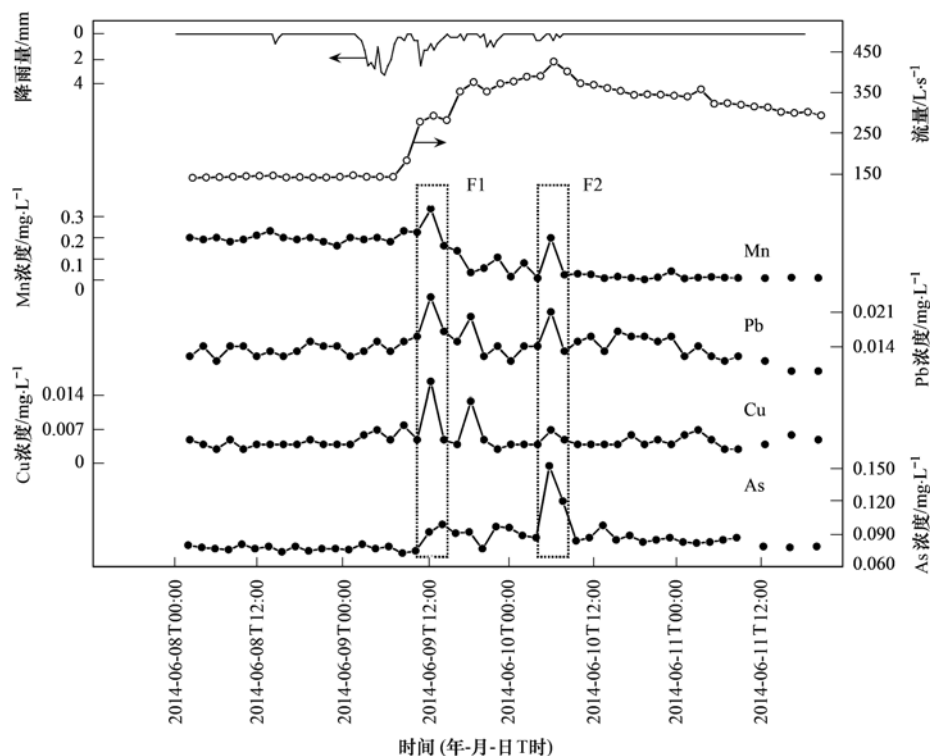


图4 老龙洞地下河重金属元素质量浓度对降雨的响应

Fig. 4 Response of concentrations of heavy metals in rainfall to subterranean river system

度比雨前降低很多,并没有回升的趋势,其机制有待进一步研究.

3.3 地下河水重金属主要来源

3.3.1 城市地表径流

城市地表径流含有重金属、营养盐、细菌、多环芳烃等多种污染物^[22],美国 EPA 于 1993 年把城市地表径流列为导致全美河流与湖泊污染的第三大污染源^[23]. 已有研究指出^[24],城市表面径流中的重金属污染物主要来源于汽车尾气排放、轮胎和路面磨损、部件腐蚀、油脂渗漏及城市垃圾等. 研究区有大小几十家汽修厂、电焊厂、零部件加工厂,均为私人作坊,无标准的生产车间,其运营的过程中产生的废渣就地倾倒在附近的公路旁或洼地内;另外,研究区还有家具厂、床垫厂、石材厂和水泥厂,这些厂矿原料和成品的运输需要大量的重型车辆,车辆零部件腐蚀、轮胎磨损及汽油的渗漏带来的重金属污染物都会堆积于地表. 老龙洞地下河处于南温泉背斜槽谷区,两侧高中间低,夜晚易出现逆温层,白天由车流、工厂、垃圾焚烧等带来的含有重金属的粉尘颗粒物得不到有效自净,最终会就地沉降. 降雨产生的城市地表径流可以迅速将这些堆积于地表的重金属污染物质由落水洞或天窗带入地下河,而此时地下河流量未达到最大值,“稀释效应”

较弱,重金属元素 Mn、Pb 和 Cu 的质量浓度在 F1 处急剧上升(图 4),导致地下河水水质恶化. 城市地表径流中(表 2) Mn 的质量浓度超过观测期间地下河水平均值的 15.87 倍, Cu 超过 16.20 倍, Pb 则达 87.93 倍,而 As 只超过地下河水均值的 1.45 倍. 由此可以断定, Mn、Pb、Cu 主要来自城市地表径流.

3.3.2 水土流失

在岩溶区,降雨造成的水土流失会导致其中营养元素、Fe、Mn 等物质通过落水洞、竖井直接进入地下河^[25,26]. 研究区农业用地主要分布在两侧的山坡和洼地中,存在一定坡度. 这些土地多用来种植蔬菜,根系不发达,植被郁闭度较低,雨强较大时由于缺乏缓冲物,土壤直接遭到雨滴的撞击,很容易造成水土流失^[15,27]. 农田区土壤达到田间持水量后才能产流,因此由水土流失携带进入地下河造成重金属元素质量浓度上升的速度要小于城市地表径流(F2 慢于 F1). 研究区表层土壤 Mn、Pb、Cu 及 As 的含量都超过了重庆市土壤环境背景值^[28],当农田土壤达到田间持水量后产生的径流可以携带这些重金属元素进入地下河,使得 F2 处 Mn、Pb、Cu、As 的质量浓度都有上升(图 4). 由图 4 知,与其他 3 种元素不同, F2 处 As 的质量浓度大于 F1. 此次观测时期是 6 月上旬,正值蔬菜生长期,据考察,当地

居民在约 3 ~ 5 d 便会喷施一次含亚砷酸钠、亚砷酸钙成分的农药进行杀虫。这些频繁喷施的农药残留在土壤表层增加了其 As 的含量。As 元素能够随流失的水土通过区内的落水洞、天窗进入地下河。城市地表径流 As 质量浓度相对较低,对地下河水 As 含量增加贡献较小,因此 F1 处 As 质量浓度小于 F2。

表 2 雨水、洞穴滴水、城市地表径流及土壤
重金属含量¹⁾/mg·L⁻¹

Table 2 Heavy metal concentrations of rainwater, cave
dripwater, urban surface runoff and soil/mg·L⁻¹

项目	Mn	Pb	Cu	As
雨水	0.009	0.011	null	0.007
洞穴滴水	0.011	0.012	null	0.087
城市地表径流	1.730	1.231	0.821	0.092
老龙洞表层土壤	612.96	24.95	55.17	9.11
重庆市土壤背景值	454.40	22.20	21.96	6.76

1) 洞穴滴水为 3 个滴水采样点均值,土壤重金属含量单位是 mg·kg⁻¹,null 表示未检出

3.3.3 洞穴滴水、雨水

洞穴滴水和雨水中 Mn 的质量浓度分别为 0.011 mg·L⁻¹ 和 0.009 mg·L⁻¹,远低于地下水 Mn 的平均值 0.109 mg·L⁻¹,Cu 均未检出(表 2),表明洞穴滴水和雨水对地下河中 Mn、Cu 的质量浓度影响较小。洞穴滴水和雨水中 Pb 的质量浓度分别为 0.012 mg·L⁻¹ 和 0.011 mg·L⁻¹(表 2),略低于地下水 Pb 均值 0.014 mg·L⁻¹,洞穴滴水和雨水的输入会带来一定量的 Pb。滴水中 As 的质量浓度是 0.087 mg·L⁻¹,略高于其在地下河水中的均值 0.084 mg·L⁻¹,滴水也会为地下河水输入一定量的 As; 雨水中 As 的质量浓度较小,对地下水影响不大。

3.4 生态环境意义

研究区处于一个城镇快速发展的区域,但是在城镇发展的过程中缺少统一的规划,私人作坊颇多,污水、废水未经处理经落水洞偷排入地下河、垃圾随意倾倒现象十分严重。区内仅有的一条排污明渠实行雨污合流,渗漏现象严重,虽于 2013 年铺建了地下排污管道,但只能满足上游排污,一旦遇到大的降雨,地表径流携带污染物直接通过落水洞、天窗、竖井等灌入地下河。流域中下游公路错综复杂,路面积满灰尘,无人清理。一些菜农为了获得更多收入,在斜坡上种植蔬菜,并且施肥喷药严重。当地仍有部分居民以地下河水为饮用水源,中国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)^[29]规定生活饮用水

Mn、Pb、Cu、As 的限制分别为 0.100、0.010、1.0、0.010 mg·L⁻¹,老龙洞地下河 Mn、Pb、As 的初始质量浓度(表 1)已超过限值,降雨期间更多 Mn、Pb、As 及 Cu 的输入进一步加重了地下水的污染,不可作为饮用水源。城镇建设的过程中要对厂矿区、居民区、交通等进行合理规划,修建一定量的污水处理池,雨污分流,完善基础设施,提高居民环保意识,做好清洁工作,从源头抓起,以使岩溶区城镇建设和地下水的开发保护相得益彰。

4 结论

(1)老龙洞地下河流量最大峰滞后于雨峰约 20 h,地下河流量对降雨响应迅速,降雨期间地下河水陡涨缓落的流量变化曲线说明老龙洞地下河属于一个管道与裂隙组合的岩溶水文系统。

(2)地下河重金属 Mn、Pb、Cu 和 As 的质量浓度对降雨响应迅速,研究区非渗透表面面积较大,降雨期间迅速产生的城市地表径流携带其表面上的污染物质由落水洞、竖井、岩溶天窗等直接灌入地下河,使 Mn、Pb、Cu 质量浓度峰值提前流量峰值到来。

(3)降雨期间地下河水重金属来源主要是城市地表径流和水土流失,洞穴滴水和雨水也会输入一定量的 Mn、Pb 和 As。在城镇发展的快速时代,合理规划,完善配套设施,提高居民素质十分重要,这样才能从源头上解决岩溶地下水污染的问题。

致谢：感谢于正良、梁作兵在野外采样和室内分析给予的帮助。

参考文献：

[1] Ford D, Williams P D. Karst hydrogeology and geomorphology [M]. New York: John Wiley & Sons, 2007.

[2] 杨明德. 论喀斯特环境的脆弱性[J]. 云南地理环境研究, 1990, 2(1): 21-29.

[3] 袁道先, 蔡桂鸿. 岩溶环境学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988. 23-126.

[4] 章程, 蒋勇军, Lettingue M, 等. 岩溶地下水脆弱性评价“二元法”及其在重庆金佛山的应用[J]. 中国岩溶, 2007, 26(4): 334-340.

[5] Ravbar N, Goldscheider N. Comparative application of four methods of groundwater vulnerability mapping in a Slovene karst catchment[J]. Hydrogeology Journal, 2009, 17(3): 725-733.

[6] 覃嘉铭, 裴建国, 郭慧霞, 等. 粉煤灰重金属铬的二次污染: 某电厂灰场周围地下水 Cr⁶⁺ 污染事例[J]. 中国岩溶, 2001, 20(3): 23-29.

[7] Kanmani S, Gandhimathi R. Investigation of physicochemical characteristics and heavy metal distribution profile in groundwater system around the open dump site[J]. Applied Water Science,

- 2013, **3**(2): 387-399.
- [8] 贾亚男, 袁道先. 土地利用变化对水城盆地岩溶水水质的影响[J]. 地理学报, 2003, **58**(6): 831-838.
- [9] 林曼利, 桂和荣, 彭位华, 等. 典型矿区深层地下水重金属含量特征及健康风险评估——以皖北矿区为例[J]. 地球学报, 2014, **35**(5): 589-598.
- [10] Dautović J, Fiket Ž, Barešić J, *et al.* Sources, distribution and behavior of major and trace elements in a complex karst lake system[J]. *Aquatic Geochemistry*, 2014, **20**(1): 19-38.
- [11] 郎赞超, 刘丛强, 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, 2006, **16**(6): 826-832.
- [12] 李思亮, 刘丛强, 陶发祥, 等. 碳同位素和水化学在示踪贵阳地下水碳的生物地球化学循环及污染中的应用[J]. 地球化学, 2004, **33**(2): 165-170.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] White W B. *Geomorphology and hydrology of Karst Terrains* [M]. New York: Oxford University Press, 1988. 464.
- [16] Vesper D J, White W B. Metal transport to karst springs during storm flow: an example from Fort Campbell, Kentucky/Tennessee, USA[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, **276**(1): 20-36.
- [17] Gromaire-Mertz M C, Garnaud S, Gonzalez A, *et al.* Characterisation of urban runoff pollution in Paris[J]. *Water Science and Technology*, 1999, **39**(2): 1-8.
- [18] 杨平恒, 罗鉴银, 袁道先, 等. 降雨条件下岩溶槽谷泉水的水文地球化学特征[J]. 水利学报, 2009, **40**(1): 67-74.
- [19] 林莉峰, 李田, 李贺. 上海市城区非渗透性地面径流的污染特性研究[J]. 环境科学, 2005, **28**(7): 1430-1434.
- [20] Choe J S, Bang K W, Lee J H. Characterization of surface runoff in urban areas[J]. *Water Science & Technology*, 2002, **45**(9): 249-254.
- [21] Goonetilleke A, Thomas E, Ginn S, *et al.* Understanding the role of land use in urban stormwater quality management[J]. *Journal of Environmental Management*, 2005, **74**(1): 31-42.
- [22] Ichiki A, Ohnishi T, Yamada K. Estimation of urban nonpoint source pollution in Lake Biwa basin[J]. *Water Science and Technology*, 1998, **38**(10): 157-163.
- [23] US EPA. National Water Quality Inventory. Report to Congress Executive Summary[R]. Washington DC: USEPA, 1995. 497.
- [24] 常静, 刘敏, 许世远, 等. 上海城市降雨径流污染时空分布与初始冲刷效应[J]. 地理研究, 2006, **25**(6): 994-1002.
- [25] 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.
- [26] 杨平恒, 旷颖仑, 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.
- [27] 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.
- [28] 重庆市环境科研检测所, 西南农学院土化系, 西南师范学院环境科研组. 重庆地区土壤中11种元素背景值的调查研究[J]. 重庆环境科学, 1982, (4): 4-8.
- [29] GB 5749-2006, 生活饮用水卫生标准[S].

CONTENTS

Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, <i>et al.</i>	(1141)
Regional Source Apportionment of PM _{2.5} in Beijing in January 2013	LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, <i>et al.</i>	(1148)
Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	(1154)
Soluble of Metals within TSP in Shanghai	CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, <i>et al.</i>	(1164)
Analysis of Component Spectral Characteristics of PM ₁₀ -Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen	ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, <i>et al.</i>	(1173)
Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes	WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, <i>et al.</i>	(1182)
Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014	BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(1187)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM _{2.5-10} in Mountain Background Region of East China in Spring	SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, <i>et al.</i>	(1195)
Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves	YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i>	(1202)
Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province	HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, <i>et al.</i>	(1208)
Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen	YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, <i>et al.</i>	(1217)
Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes	SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, <i>et al.</i>	(1227)
Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards	ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1234)
Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen	JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i>	(1241)
Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport	ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long	(1249)
Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary	WANG Miao-miao, SUN Zhi-guo, LU Xiao-ning, <i>et al.</i>	(1256)
Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, <i>et al.</i>	(1263)
Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event	REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, <i>et al.</i>	(1270)
Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources	ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai	(1277)
Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period	LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, <i>et al.</i>	(1285)
Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary	CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, <i>et al.</i>	(1293)
Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake	WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, <i>et al.</i>	(1301)
Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond	YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, <i>et al.</i>	(1309)
Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer	LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, <i>et al.</i>	(1317)
Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study	ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, <i>et al.</i>	(1326)
Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using γ Irradiation	ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, <i>et al.</i>	(1332)
Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony	CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, <i>et al.</i>	(1338)
Degradation of <i>m</i> -Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation	SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, <i>et al.</i>	(1345)
Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol	KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, <i>et al.</i>	(1352)
Photolysis of Gaseous HNO ₃ on the α -Fe ₂ O ₃ Films Under 308 nm UV Light	LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, <i>et al.</i>	(1359)
Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode	HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i>	(1365)
Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis	XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, <i>et al.</i>	(1374)
Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by <i>Bacillus subtilis</i>	MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, <i>et al.</i>	(1379)
Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water	LI Jing, LI Wen-ying	(1385)
Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process	LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, <i>et al.</i>	(1392)
Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, <i>et al.</i>	(1399)
Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>	(1406)
Effects of Total Nitrogen and BOD ₅ /TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor	YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, <i>et al.</i>	(1412)
Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinpo Mountain, Chongqing	SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i>	(1417)
Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province	ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1425)
Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain	SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil	WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, <i>et al.</i>	(1437)
Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions	DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, <i>et al.</i>	(1445)
Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County	QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, <i>et al.</i>	(1453)
Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure	WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, <i>et al.</i>	(1461)
Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead	CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, <i>et al.</i>	(1468)
Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling	XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, <i>et al.</i>	(1474)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content	GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, <i>et al.</i>	(1481)
A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> in Coastal Estuary Area	CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i>	(1489)
Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase	WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>	(1497)
Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs	WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, <i>et al.</i>	(1507)

《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)

2015年4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 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