

降雨条件下典型岩溶流域地下水中的物质运移

杨平恒^{1,2}, 旷颖仑¹, 袁文昊¹, 贾鹏¹, 贺秋芳¹, 林玉石³

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2. 西南大学地球化学与同位素实验室, 重庆 400715; 3. 中国地质科学院岩溶地质研究所国土资源部岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004)

摘要:通过对2008年4月下旬降雨期间, 重庆青木关地下河系统出口姜家泉泉水的水文过程、浊度、悬浮颗粒物、主要阳离子和TOC浓度的监测, 结合悬浮颗粒物的扫描电镜和能谱分析图, 来研究岩溶流域地下水中悬浮颗粒物浓度、浊度、主要阳离子和TOC等物质的运移特征. 结果表明, 在单一岩溶管道较发育的地下河出口, 泉水流量、浊度、悬浮颗粒物浓度、主要阳离子和TOC等物质对降雨事件响应迅速; 与碳酸盐岩溶解有关的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Sr^{2+} 等在流量上升的过程中表现为稀释效应; 降雨期间, 地下河中受雨水侵蚀的土壤输入量增大, 引起泉水中浊度和悬浮颗粒物浓度的增大; 泉水中 Al^{3+} 、Fe、Mn、 Ba^{2+} 和TOC等物质是悬浮颗粒物的伴生物, 其浓度随浊度的增大而增大; 在研究的2场降雨期间, 地下水携带悬浮颗粒物($>0.45\ \mu\text{m}$)的总量约为9.7t; 在泉水流量的上升和衰减的过程中, 水质较差或极差; 降雨期间流域内土壤侵蚀和养分的流失, 不但严重破坏了脆弱的岩溶生态环境, 而且极易造成地下水由土壤侵蚀引起的非点源污染, 对当地居民的饮水安全造成严重的威胁.

关键词: 降雨; 悬浮颗粒物; 浊度; 主要阳离子; 运移; 地下河; 青木关

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)11-3249-07

Substances Transport in an Underground River of Typical Karst Watershed During Storm Events

YANG Ping-heng^{1,2}, KUANG Ying-lun¹, YUAN Wen-hao¹, JIA Peng¹, HE Qiu-fang¹, LIN Yu-shi³

(1. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Laboratory of Geochemistry and Isotope, Southwest University, Chongqing 400715, China; 3. The Karst Dynamics Laboratory, Ministry of Land and Resources, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China)

Abstract: Hydrologic process, turbidity, suspended particles matters (SPM), major cations and TOC concentrations during two storm events in late April 2008 were monitored at Jiangjia Spring which is the outlet of Qingmu Guan underground river system. Scanning electron microscopy (SEM) and energy disperse spectroscopy (EDS) analyses of SPM were also performed in order to investigate the transport characteristics of substances, such as SPM, turbidity and major cations in the underground river of typical karst watershed. The results show that at a single and well-developed karst conduit of Jiangjia Spring, discharge, turbidity, and concentrations of SPM, major cations and TOC respond promptly to the rainfall. The carbonate-derived cations including Ca^{2+} , Mg^{2+} and Sr^{2+} are subject to dilution effect during the rising limb of discharge. The elevation in turbidity and SPM concentration is a result of the gradual increase of allochthonous substances (soil) flux input from the surface. Al^{3+} , Fe, Mn, Ba^{2+} and TOC are concomitant substances of SPM. And their concentrations are ascending with turbid rise. The flux of SPM in diameter $>0.45\ \mu\text{m}$ in the underground river is about 9.7 tons during the events. The bad water quality suggests us that the spring water is unfit to drink without purification during the period of rising and recession time of discharge at Jiangjia Spring. Thus, soil erosion and nutrient losing not only strongly destroy the fragile karst ecological environment, but also lead to non-point source pollution, and seriously threaten the drinking water safety of locals.

Key words: rainfall; suspended particle matters (SPM); turbidity; major cations; transport; underground river; Qingmu Guan

地下水是重要的资源, 是水文循环的组成部分, 是工业、农业和人畜用水的重要水源, 在国民经济建设和可持续发展中扮演着极其重要的角色. 西南岩溶区蕴藏着丰富的地下水资源, 初步查明西南地区分布地下河3 066条, 岩溶地下水天然资源量为每年1 808亿 m^3 , 可开采资源量每年620亿 m^3 , 但目前每年仅开发利用总量的15%, 尚有500多亿 m^3 的岩溶水可供开发利用.

由于岩溶含水介质具有内在结构不均一的特性, 加之地表土被不连续、或土壤层较薄, 导致其渗

透性能急剧增强, 对地表污染物质的过滤作用极弱, 因而地表水和污染物质容易通过落水洞、竖井、裂隙等通道直接进入岩溶含水层或地下河, 在降雨期间表现得尤为明显^[1~4]. 正因为岩溶含水层具有高度

收稿日期: 2008-12-18; 修订日期: 2009-03-23

基金项目: 重庆市科技项目(CSTC2007BC7001, CSTC2009BA0002); 科技部“十一五”科技支撑计划项目(2006BAC01A16); 国家自然科学基金项目(40672165); 三峡库区森林生态保护与恢复重庆市重点实验室开放基金项目(CKL200802); 西南大学研究生科技创新基金项目(ky2008001)

作者简介: 杨平恒(1983~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为岩溶水文水资源学、岩溶生态环境学, E-mail: balance@swu.edu.cn

复杂性和脆弱性^[5],需要充分而又完善的保护策略和措施^[6,7],需要加强对含水层中沉积物运移的模拟与物质运移过程、机制的研究^[8].

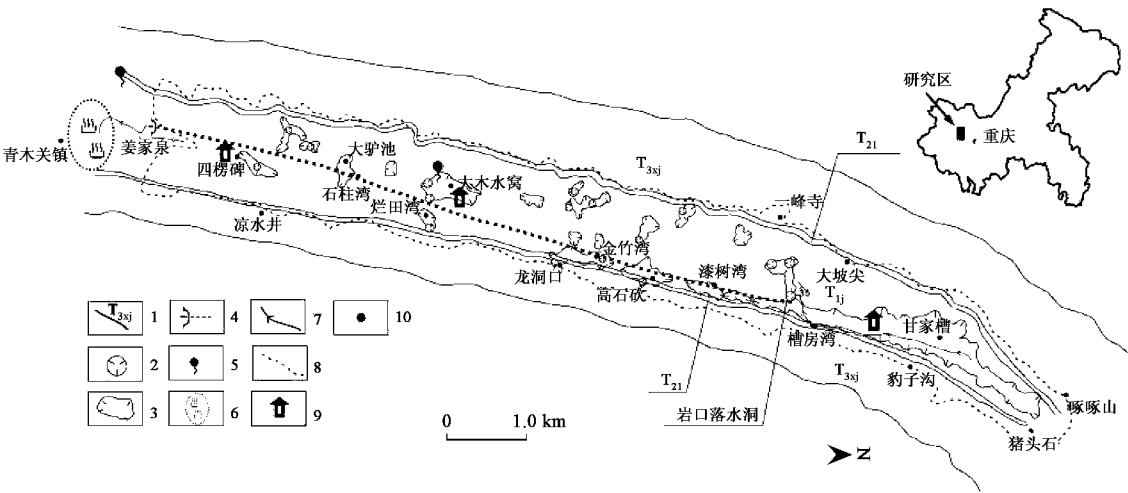
目前国内大多数学者只注重于岩溶区中长时间尺度土地利用方式对水质影响的研究^[9,10],或对短时间尺度(某场降雨)常规的岩溶水文地球化学指标进行较为深入的研究^[11~13],而对于降雨期间岩溶含水层中悬浮颗粒物、浊度、金属阳离子和 TOC 等物质运移的系统监测尚未见报道.为了更好地理解岩溶含水层中物质的运移过程和机制,本研究以单一管道介质为主的岩溶含水层为背景,以地下河出口泉水为载体,分析降雨条件下地下水中的物质运移特征,进而讨论小流域水土流失状况及其水质污染状况.对于脆弱的岩溶生态系统水土保持、地下水开

发和利用等方面都具有重要的现实意义.

1 研究区概况

1.1 自然地理、地质背景

研究区位于重庆市北碚区、沙坪坝区和璧山县的交界处,坐标为 106°16′48″ ~ 106°20′10″E 和 29°40′40″ ~ 29°47′N 之间,流域面积约 13.4 km².区内背斜成山,向斜成谷,呈现“一山二岭一槽”式的典型岩溶槽谷景观.槽谷呈狭长带状,NNE 向展布,南北长约 12 km,北部猪头石到岩口落水洞一带东西宽从 500 m 逐渐变至 1 km,岩口落水洞到研究区南部宽度基本保持在 1.1 km 左右(图 1).山脉走向与构造方向基本一致,地势总体表现为北高南低,山峰与谷地相对高差在 200 ~ 300 m 之间.



1. 地层界线及代号;2. 落水洞;3. 洼地;4. 青木关地下河及出口;5. 泉点;6. 温泉群;7. 地表水流向;8. 地表分水岭;9. 气象站;10. 地物名
图 1 研究区水文地质示意

Fig. 1 Hydrogeological map of Qingmu Guan underground river system

研究区多年平均降水量为 1 250 mm,多年平均气温为 16.5℃.区内土壤覆盖以地带性黄壤和非地带性石灰土为主.植被主要为亚热带常绿阔叶林、灌木丛,具有旱生、喜钙的特点.研究区地下岩溶形态发育以单一岩溶管道为主^[14].地下河伏流入口为岩口落水洞,而上游甘家槽洼地的农灌回水主要通过岩口落水洞进入地下河,地下河在姜家泉出露后注入青木关盆地的青木溪,最终流入嘉陵江.

1.2 姜家泉泉水地球化学特征

受地层和岩性的控制,以及受农业用地的影响,姜家泉泉水偏中性至弱碱性,电导率较高,为 444 ~ 639 μS/cm,水温稳定在 18.3 ~ 20.1℃之间,阳离子含量中 Ca²⁺ 最高, Mg²⁺ 次之,阴离子含量以 HCO₃⁻ 最高, SO₄²⁻、NO₃⁻ 次之(表 1).

表 1 姜家泉泉水的地球化学特征(2007-03 ~ 2008-02)

Table 1 Geochemical characteristic at Jiangjia Spring (from March, 2007 to February, 2008)

指标	范围	指标	范围
pH 值	7.05 ~ 8.20	SO ₄ ²⁻ /mg·L ⁻¹	30.9 ~ 72.7
电导率/μS·cm ⁻¹	444 ~ 639	Ca ²⁺ /mg·L ⁻¹	80 ~ 140
温度/℃	18.3 ~ 20.1	Mg ²⁺ /mg·L ⁻¹	15.1 ~ 15.5
HCO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	131 ~ 242	Na ⁺ /mg·L ⁻¹	4.77 ~ 6.89
NO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	16.4 ~ 36.3	K ⁺ /mg·L ⁻¹	3.08 ~ 4.69
NO ₂ ⁻ /μg·L ⁻¹	15.0 ~ 187	Ba ²⁺ /mg·L ⁻¹	0.034 ~ 0.051
Cl ⁻ /mg·L ⁻¹	0.33 ~ 4.90	Si ²⁺ /mg·L ⁻¹	0.147 ~ 0.263

2 研究方法

使用 WGZ-1 型光电数字水位计(重庆华正水文仪器有限公司)测量泉口实时水位,其分辨率为 1

mm,再将水位换算成流量.通过安装在研究区上游虎头村、中游大木水窝洼地和下游四楞碑村(图 1)的 HOBO 小型自动气象站(美国 ONSET 公司),观测降雨量,仪器精度为 0.2 mm.采用瑞士 Neuchâtel 大学水文地质研究所生产的野外自动化荧光仪(flow-through field flourometer)测定浊度,测定时间间隔为 4 min.降雨期间根据水位变化情况,每 1~2 h 取 1 次泉水样,取样项目包括:①主要阳离子:将水样(未经 0.45 μm 聚碳酸酯膜过滤)装于 60 mL PVC 样瓶中,加 1/1 硝酸若干滴,调 pH<2,运至实验室,使用 ICP-OES Optima 2100(美国 PerkinElmer 公司)检测,仪器稳定性:1 h RSD<1%,相对标准偏差 RSD $\leq$ 0.5%;②TOC:将水样装于 300 mL PVC 取样瓶中,迅速冷藏,保持温度<4 $^{\circ}\text{C}$,在 12 h 内运至实验室分析,使用 1010 型号 TOC 测定仪(美国 OI 公司)测定,仪器精度为 $\pm$ 2%;③悬浮颗粒物:现场用 0.45 μm 聚碳酸酯膜过滤 500 mL 水样(本研究讨论的悬浮颗粒物不包括推移质泥沙和直径<0.45 μm 的颗粒物),悬浮颗粒物过滤在滤膜上,用过滤器封装,送至实验室,60 $^{\circ}\text{C}$ 烘干 12 h 后称重,计算获得泉水中的悬浮颗粒物浓度;悬浮颗粒物送至中国科学院上海硅酸盐研究所做扫描电镜(SEM)和能谱分析(EDS),测试仪器为 JXA-8100 型电子探针仪(日本电子)与 INCA 系列能谱组合仪(牛津仪器).

3 结果与分析

3.1 水文过程对降雨的响应

3 个气象站的降雨记录数据显示,2008 年 4 月下旬研究区有 2 场比较集中的降雨(storm1 和 storm 2),虎头村气象站记录 stom1 期间降雨量为 28.8 mm(2008-04-21T05:15~2008-04-22T02:15),storm2 期间的降雨量为 20.6 mm(2008-04-22T22:15~2008-04-23T07:10);大木水窝气象站记录 storm1 期间的降雨量为 24.6 mm(2008-04-21T04:39~2008-04-22T02:19),storm2 期间降雨量为 22.0 mm(2008-04-22T22:14~2008-04-23T07:19);四楞碑气象站记录 storm1 期间的降雨量为 22.0 mm(2008-04-21T04:47~2008-04-22T02:32),storm2 期间的降雨量为 18.6 mm(2008-04-22T22:22~2008-04-23T07:22),皆为中雨.研究区内降雨总体上是同时发生的,且总降雨量相差不大,但局部也有区别,具体表现为上游降雨量最大,中游次之,下游最小.storm1 期间,在降雨约 7 h 后姜家泉流量开始上升响应,在降雨开始约 30 h 后流量达到峰值;storm2 期间,在降雨开始约 8 h 后流

量得到响应,并在降雨开始约 12 h 后流量达到峰值(图 2).以上结果从侧面反映了单一岩溶管道发育,验证了示踪试验^[14]的结果.姜家泉水文对降雨响应迅速,为地下河中悬浮颗粒物、浊度、主要阳离子和 TOC 等物质的运移奠定了良好的基础.

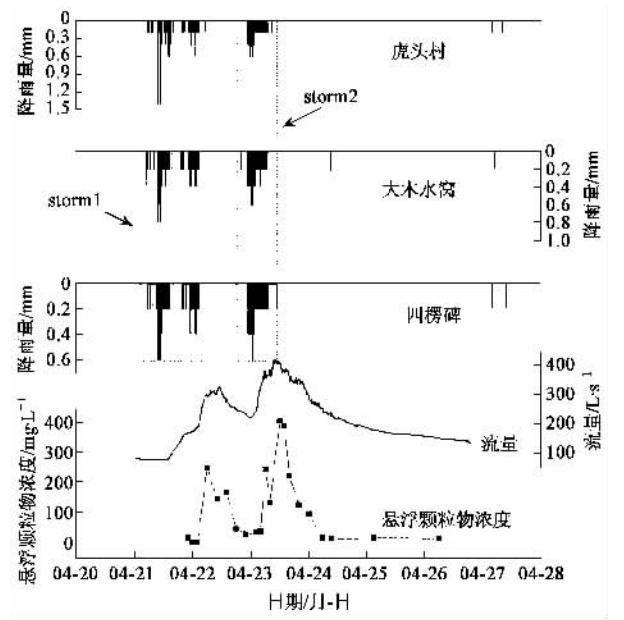


图 2 2008 年 4 月下旬青木关地下河系统降雨量及姜家泉流量、悬浮颗粒物浓度动态变化

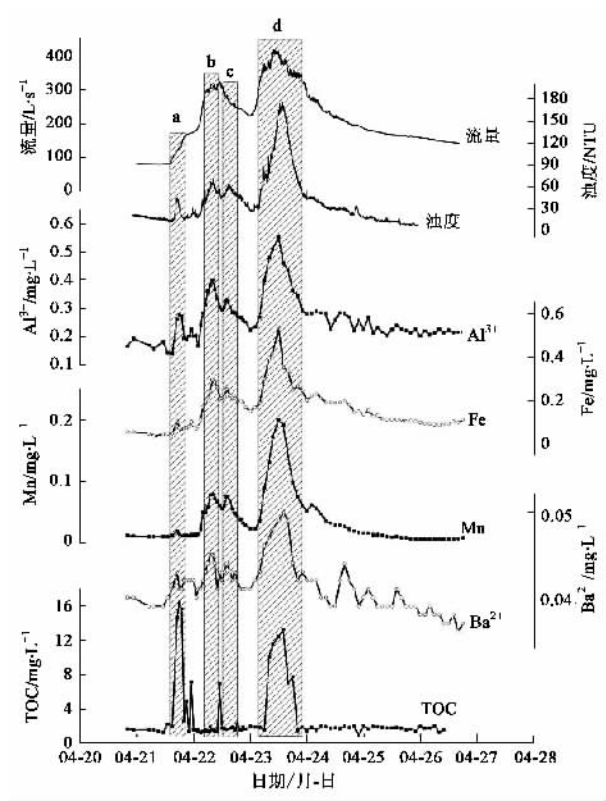
Fig.2 Rainfall volume in Qingmu Guan underground river system, discharge and SPM concentration at Jiangjia Spring in late April 2008

3.2 浊度、悬浮颗粒物浓度变化及悬浮颗粒物成分分析

水的浊度是指由于水中不溶性物质的存在而引起透明度降低的量度.从图 3 可知,在 storm1 期间,浊度在泉水流量升高后,于 1.8 h 内到达峰值,并迅速下降(a 阶段),随后浊度对应流量峰值出现 2 个波峰(分别为 b 阶段和 c 阶段).在 storm2 期间,浊度出现 1 个峰值(d 阶段),该峰值滞后于流量峰值约 2.8 h.

悬浮颗粒物是指以悬浮态存在于水体中的颗粒物.由图 2、图 3 可知,悬浮颗粒物浓度和浊度的变化趋势基本一致,且与流量存在极为密切的关系,通过对悬浮颗粒物浓度和浊度的线性拟合,发现二者之间具有极高的线性关系(相关系数 $R=0.92$, $n=21$).

选取 c 阶段的悬浮颗粒物样品做 SEM 和 EDS 分析,结果如图 4 和图 5.从中可见,颗粒大小不一,粗颗粒磨圆度较好,细颗粒多呈碎屑状,粗细颗粒



a.a 阶段;b.b 阶段;c.c 阶段;d.d 阶段

图 3 2008 年 4 月下旬姜家泉水中部分阳离子、TOC 浓度变化

Fig.3 Concentrations variation of partial cations and TOC at Jiangjia Spring in late April 2008

混合较为均匀.通过 EDS 分析(图 4),可以发现悬浮颗粒物中 Si 的含量最高,Al 次之,Fe、Ca、Mg 也占一定的比例,另外存在一定比例的 K,很可能表明有高岭土和伊利石等粘土矿物的存在,尽管 SEM 图中的微形态看得不明显.通过对悬浮颗粒物样品中大颗粒物质的分析可知,其成分主要为 Si,其次是 Al、Fe 和 K 等物质(图 5).综上所述,可以推断这些含 Si 极高的悬浮颗粒主要是来自碳酸盐岩及山坡两侧的上三叠统须家河组(T_{3nj})富含长石石英砂岩、泥岩的风化产物——粘土矿物,在长期的坡面流水侵蚀搬运作用下,碎屑物在岩溶洼地低洼处堆积.随着降雨的持续和雨强的增大,地表受侵蚀的土壤物质随坡面流,通过落水洞、竖井、裂隙等通道进入地下河的量逐渐增大.雨水、地表水迅速转化为地下水,并在管道中形成高速的紊流,携带着侵蚀物质,引起地下水中悬浮颗粒物浓度和浊度的增大,最终在姜家泉排泄.

3.3 主要阳离子和 TOC 浓度的变化

由图 6 可以看出,伴随着流量的上升,Ca²⁺、Mg²⁺和 Sr²⁺等 3 种离子浓度逐渐降低,而随着流量的衰退,其离子浓度逐渐升高.这主要是因为这 3 种离子是碳酸盐岩溶解的产物,流量越大,其稀释作用也越强^[11],与文献[15,16]的研究结论基本一致.

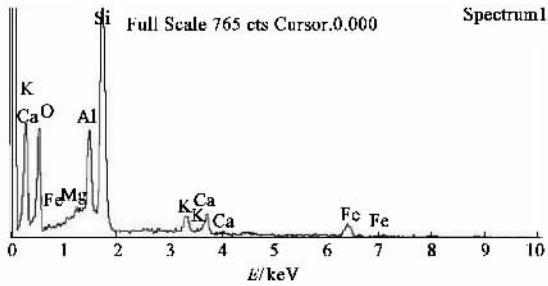
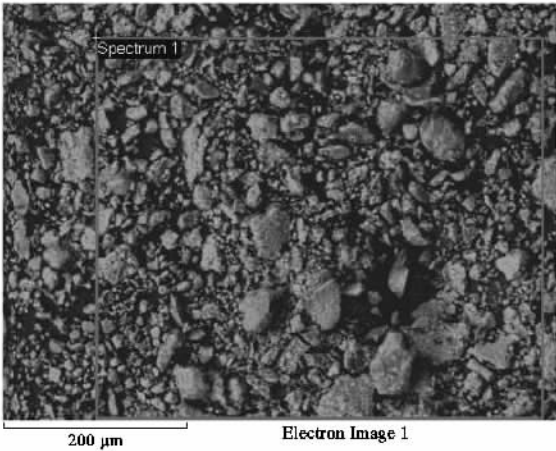


图 4 c 阶段姜家泉水中悬浮颗粒物 SEM 和 EDS 图

Fig.4 SEM micrograph and EDS of the SPM during the c phase at Jiangjia Spring

从图 3 可以看出,Al³⁺、Fe、Mn 和 Ba²⁺ 浓度的高低变化与浊度升降基本同步,在 a、b、c 和 d 阶段存在明显的峰值.

storm1 期间 TOC 浓度在 a 阶段表现出与浊度变化一致的趋势,在此过程持续 9 h 后,TOC 浓度恢复至雨前的水平;在 b、c 阶段略有起伏;storm2 期间

TOC 浓度的变化趋势和浊度的变化趋势基本一致(图 3).

表 2 为 2 场降雨期间姜家泉水中主要阳离子浓度、浊度和流量的相关矩阵.从中可以看出,Mn 浓度与浊度的相关系数最高,为 0.932,Ba²⁺ 浓度与浊度的相关系数次之,为 0.847,Al³⁺ 浓度与浊度的相

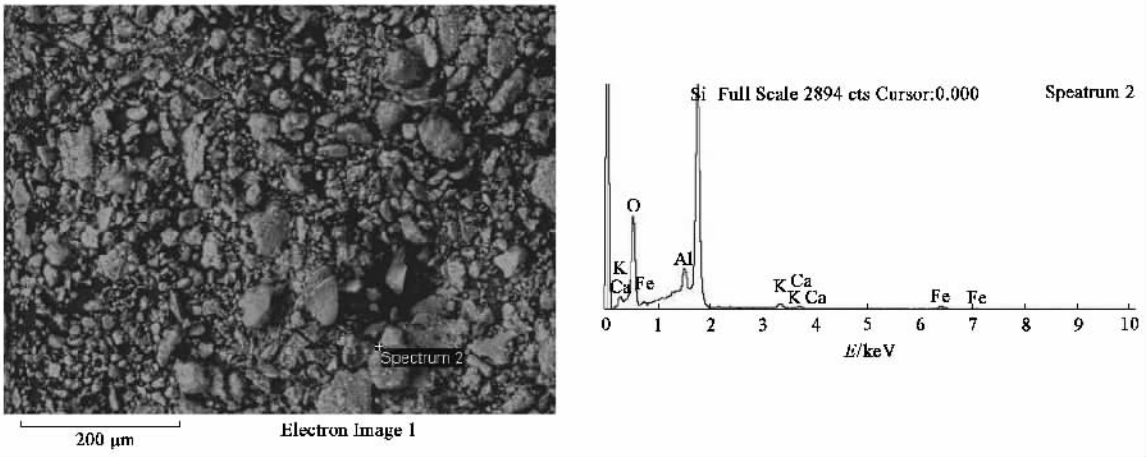


图 5 c 阶段姜家泉水中悬浮颗粒物(大颗粒)SEM 和 EDS 图

Fig.5 SEM micrograph and EDS of the large-size particle SPM during the c phase at Jiangjia Spring

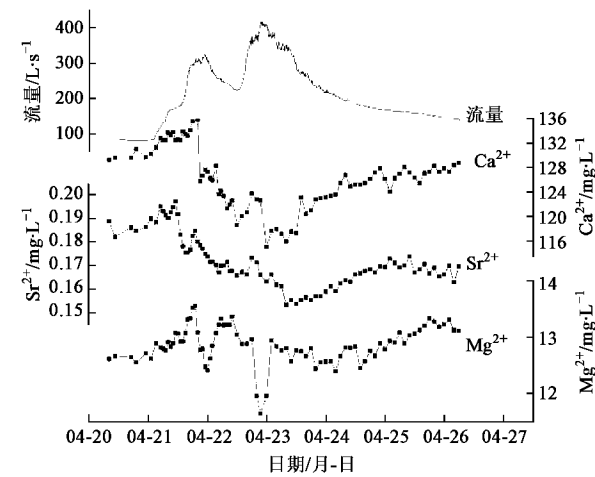


图 6 2008 年 4 月下旬姜家泉中与碳酸盐岩溶解有关的阳离子浓度变化趋势

Fig.6 Concentrations variation of carbonate-derived dissolution cations at Jiangjia Spring in late April 2008

关系数为 0.839, Fe 浓度与浊度也有较高的正相关性,其相关系数为 0.838. 这 4 种阳离子(Al^{3+} 、Fe、Mn、 Ba^{2+})浓度与流量也表现出极高的正相关性. 亚热带湿润气候条件下,研究区成土母质中的碳酸钙大量淋失,残留于土体中的主要成土物质则为母岩中的副成分——铝锰铁及粘土物质,而持续的降水将地表土壤堆积物通过地表地下的连接通道带入地下河,雨强越大,被带入地下河受侵蚀的土壤物质越多,浊度、Mn、 Al^{3+} 、Fe、 Ba^{2+} 以及 TOC 的浓度也越高. 因此可以推断,降雨期间姜家泉水中这些阳离子和 TOC 为悬浮颗粒物的伴生物.

Vesper 等^[1]通过研究发现,泉水中 Mn、 Al^{3+} 、Fe 浓度与 As、Cd、Cr 和 Pb 等重金属和微量元素浓度有非常好的线性关系. 因此无论在多大强度的降雨期间,都可用 Mn、 Al^{3+} 和 Fe 等元素的浓度来预测 As、Cd、Cr 和 Pb 等微量元素的浓度.

表 2 姜家泉主要阳离子浓度、浊度和流量间相关矩阵¹⁾($n = 82$)

Table 2 Correlation matrix for discharge, turbidity and concentrations of major cations at Jiangjia Spring ($n = 82$)

	流量	浊度	Al^{3+}	Fe	Mn	Ba^{2+}	Sr^{2+}	Mg^{2+}	Ca^{2+}
流量	1								
浊度	0.801 **	1							
Al^{3+}	0.883 **	0.839 **	1						
Fe	0.929 **	0.838 **	0.949 **	1					
Mn	0.864 **	0.932 **	0.932 **	0.931 **	1				
Ba^{2+}	0.769 **	0.847 **	0.834 **	0.798 **	0.871 **	1			
Sr^{2+}	-0.436 **	-0.217 *	-0.283 **	-0.447 **	-0.263 *	0.005	1		
Mg^{2+}	-0.207	-0.260 *	-0.309 **	-0.365 **	-0.371 **	-0.312 **	0.159	1	
Ca^{2+}	-0.501 **	-0.465 **	-0.399 **	-0.557 **	-0.458 **	-0.260 *	0.786 **	0.337 **	1

1) ** 表示 99%置信区间显著, * 表示 95%置信区间显著

3.4 水土流失及水质污染

影响水土流失的因素很多,主要有降雨、植被和坡度等。研究区土地利用方式复杂多样,洼地中土层深厚,坡度虽不大,但农用地广布,基本以水田和旱地为主,深受人类活动干扰。通过对泉水悬浮颗粒物浓度与流量的乘积算得,这2场降雨地下河携带悬浮颗粒物的总量约为9.7 t,这个数量还未包括直径 $<0.45\ \mu\text{m}$ 的颗粒、胶体物质以及推移质的泥沙等的通量。上文已表明降雨期间地下河 Al^{3+} 、 Mn 、 Fe 和 Ba^{2+} (还有 K^+ 、 Na^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^- 和 Cl^- ,文中未列)等物质浓度随流量上升而增大,而这些元素是构成土壤营养肥力的重要指标之一,这将会引起降雨期间流域内大量土壤营养元素的流失。TOC浓度在降雨过程中表现出来的动态变化,表明在土壤被侵蚀过程中,土壤中有机质大量流失,而有机质是土壤肥力和土壤质量的一个重要标志,是提高陆地生态系统生产力和保持系统稳定性的重要途径^[17]。因而,降雨期间水土流失不单是土壤颗粒的流失,也是土壤营养成分的流失,对于岩溶区脆弱的生态造成极大的影响。研究表明,合理调整土地利用结构可以改善土壤性状^[18],可以达到抑制或减轻水土流失的效果。因而改善研究区的土地利用方式,是防止地表水土流失的有效防治手段之一。

地下水中的悬浮颗粒物本身可成为污染物,而更为重要的是它与微污染物相互作用,成为微污染物运移的载体。颗粒物具有十分广阔的微界面,大量研究已经表明悬浮颗粒物具有吸附微生物的能力^[19,20],而微生物一旦吸附在颗粒物表面,将大大增加病原微生物在含水层中生存和繁衍的几率^[4,21,22]。悬浮颗粒物也是痕量金属和有机物高度吸附的良好场所^[23~25]。在较快流速的紊流流态管道介质中,悬浮颗粒物的运移是一个伴随着沉积和释放的错综复杂过程^[26],将会引起吸附在固体表面微污染物的迁移更加复杂化^[27,28],引起岩溶泉水水质污染更为多重化。雨水将地表土壤及其携带的微生物、溶质及其它微污染物一并带入地下河,地下水体自净能力低,以较短的时间在泉口排泄并进入非岩溶区,形成一种物理污染,从而造成泉水和排泄区由土壤侵蚀引起的非点源污染。因而有必要重视降雨期间受侵蚀的土壤及吸附在其表面的微污染物对泉水和排泄区水质的影响。

按照文献[29]对降雨期间姜家泉的水质进行综合评价,得到实时水质综合评价值,并作图(图7)。从图7可以看出,在水位上升前,姜家泉水质综合评

价值都为2,表明水质良好,反映地下水化学组分的天然背景含量,适用于当地居民的饮用和其它用途;在姜家泉水位上升和衰减的过程中,水质综合评价值为4或5,表明水质较差和极差,适当处理后可作为生活饮用水或不宜饮用,其中极高的 NO_2^- 浓度和浊度是引起水质较差或极差的主要原因。然而据实地调查发现,在经济文化相对落后的研究区,姜家泉水作为当地大部分居民的生活用水,在降雨期间,泉水未经任何水质处理,直接成为生活和饮用水源,这将大大威胁当地百姓的健康和生命安全。

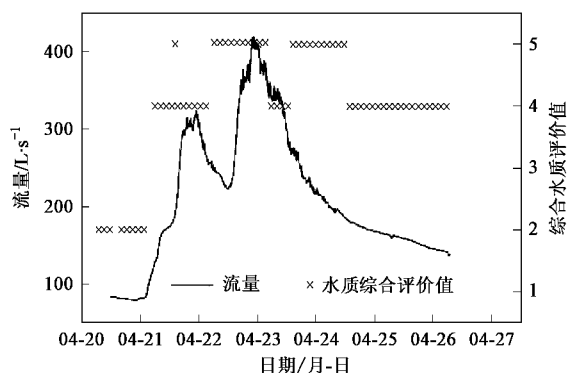


图7 2008年4月下旬姜家泉水质综合评价值与流量的关系

Fig.7 Relationship between assessment value of water quality and discharge at Jiangjia Spring in late April 2008

4 结论

(1)在单一岩溶管道较发育的研究区,降雨条件下岩溶泉水流量、悬浮颗粒物浓度、浊度、主要阳离子与TOC浓度对降雨事件响应迅速。

(2)泉水浊度和悬浮颗粒物浓度之间具有较高的相关性,二者的增大主要是由进入地下河的地表受侵蚀土壤量的增大而引起的, Al^{3+} 、 Fe 、 Mn 、 Ba^{2+} 和TOC等物质是悬浮颗粒物的伴生物,其浓度随悬浮颗粒物浓度的增大而增大。

(3)2008年4月下旬2场降雨,所造成青木关地下河系统中悬浮颗粒物的流失量约为9.7 t,同时导致土壤中大量营养组分的流失,这不但严重破坏了脆弱的岩溶生态环境,而且极易造成雨水侵蚀土壤形成的非点源污染对泉水和排泄区水质的影响。

(4)降雨形成的浑浊径流引起 NO_2^- 浓度和浊度的升高,从而导致泉水水质恶化,严重威胁着当地居民的饮水健康和安全。

致谢:本研究在野外采样过程中,得到西南大学地理科学学院张典、夏凯生、肖琼、刘仙、扈志勇、张强、杨梅、马振杰等研究生的帮助,西南大学地理科

学学院孙玉川老师做了样品的 TOC 浓度分析,中国科学院上海硅酸盐研究所电子探针组吴伟老师做了悬浮颗粒物样品的 SEM 和 EDS 分析,在此一并表示感谢!

参考文献:

- [1] Vesper D J, White W B. Metal transport to karst springs during storm flow: an example from Fort Campbell, Kentucky/Tennessee, USA [J]. J Hydrol, 2003, **276**(1-4): 20-36.
- [2] Kilmchouk A. Towards defining, delimiting and classifying epikarst: Its origin, processes and variants of geomorphic evolution [J]. Spel Evol Karst Aquif, 2004, **2**(1): 1-13.
- [3] Göppert N, Goldscheider N. Solute and colloid transport in karst conduits under low- and high-flow conditions [J]. Ground Water, 2008, **46**(1): 61-8.
- [4] Mahler B J, Personné J C, Lods G F, *et al.* Transport of free and particulate-associated bacteria in karst [J]. J Hydrol, 2000, **238**(3-4): 179-193.
- [5] Escolero O A, Marin L E, Steinich B, *et al.* Development of a protection strategy of karst limestone aquifer: the Merida Yucatan, Mexico case study [J]. Water Resour Manag, 2002, **16**(5): 351-367.
- [6] Panno S V. Karst aquifers: Can they be protected? [J]. Ground Water, 2006, **44**(4): 494.
- [7] Renken R A, Cunningham K J, Zygnerski M R, *et al.* Assessing the vulnerability of a municipal well field to contamination in a karst aquifer [J]. E Environ Eng Geosci, 2005, **11**(4): 319-331.
- [8] White W B. Karst hydrology: Recent developments and open questions [J]. Eng Geol, 2002, **65**(2): 85-105.
- [9] 蒋勇军,袁道先,谢世友,等.岩溶流域土地利用变化对地下水水质的影响——以云南小江流域为例[J].地理学报,2006, **61**(5):471-481.
- [10] 贾亚男,袁道先.土地利用变化对水城盆地岩溶水质的影响[J].地理学报,2003, **58**(6):831-838.
- [11] 刘再华,Chris Groves,袁道先,等.水-岩-气相互作用引起的水化学动态变化研究——以桂林岩溶试验场为例[J].水文地质工程地质,2003, **30**(4):13-18.
- [12] 章程,蒋忠诚,何师意,等.垂直气候带岩溶动力系统特征研究——以重庆金佛山国家级自然保护区为例[J].地球学报,2006, **27**(5):510-514.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Ashton K. The analysis of flow data from karst drainage systems [J]. Trans Cave Res Group, G B, 1966, **7**(2): 161-203.
- [16] Hess J W, White W B. Strom response of the karstic carbonate aquifer of southcentral Kentucky [J]. J Hydrol, 1988, **99**(3-4): 235-252.
- [17] Li Z P, Zhang T L, Chen B Y, *et al.* Soil organic matter dynamics in a cultivation chronosequence of paddy fields in subtropical China [J]. Acta Pedol Sin, 2003, **40**(3): 344-352.
- [18] Fu B J, Chen L D, Ma K M, *et al.* The relationship between land use and soil conditions in the hilly area of the Loess Plateau in northern Shanxi, China [J]. Catena, 2000, **39**: 69-78.
- [19] Ryan M, Meiman J. An examination of short-term variations in water quality at a karst spring in Kentucky [J]. Ground Water, 1996, **34**(1): 23-30.
- [20] Pronk M, Goldscheider N, Zopfi J. Particle-size distribution as indicator for fecal bacteria contamination of drinking water from karst springs [J]. Environ Sci Technol, 2007, **41**(24): 8400-8405.
- [21] Palmateer G A, McLean D E, Kutas W L, *et al.* Investigations of suspended particulate-bacterial interaction in agricultural drains [A]. In: Rao S S (ed.). Particulate Matter and Aquatic Contaminants [C]. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993. 1-40.
- [22] Pommepuy M, Guillaud J F, Dupray E, *et al.* Enteric bacteria survival factors [J]. Water Sci Technol, 1992, **25**(12): 93-103.
- [23] Jenne E A, Zachara J M. Factors Influencing the Sorption of Metals [A]. In: Dickson K L, Maki A W, Brungs W A (eds.). Fate and Effects of Sediment-Bound Chemicals in Aquatic Systems [C]. New York: Pergamon Press, 1984. 83-98.
- [24] Horowitz A J. A Primer on Sediment-Tracer Element Chemistry (Second ed.) [M]. Michigan: Lewis Publishers, 1991. 136.
- [25] 张海平,朱宜平,陈玲,等.悬浮泥沙对酚类化合物的吸附特性研究[J].环境科学,2008, **29**(1):71-76.
- [26] Massei N, Wang, H Q, Dupont J P, *et al.* Assessment of direct transfer and resuspension of particle during turbid floods at a karstic spring [J]. J Hydro, 2003, **275**(1-2): 109-121.
- [27] Atteia O, Kozel R. Particle size distributions in water from a karstic aquifer: from particles to colloids [J]. J Hydro, 1997, **201**(1-4): 102-119.
- [28] Mahler B J, Lynch F L. Muddy water: temporal variation in sediment discharging from a karst spring [J]. J Hydro, 1999, **214**(1-4): 165-178.
- [29] GB/T 14848-1993,地下水质量标准[S].