

重庆雪玉洞岩溶地下河地球化学敏感性研究

徐尚全 杨平恒 殷建军 毛海红 王鹏 周小萍

(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)

摘要: 引用地球化学敏感指数与敏感等值线的概念, 对重庆雪玉洞地下河 2010 年 9 月~2011 年 8 月的水化学数据进行分析, 发现地下河水的化学成分受上覆基岩的控制, 表现出高 Ca^{2+} 、低 Mg^{2+} 的特征, 但受季风降雨的影响, 水化学在旱、雨季存在较大差异: 雨季各监测点 $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{Ca}^{2+}]$ (摩尔比) 为 0.018~0.051, 旱季 $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{Ca}^{2+}]$ 为 0.038~0.064, 雨季要小于旱季; $[\text{HCO}_3^-]/[\text{SO}_4^{2-}]$ (摩尔比) 雨季为 4.86~36.62, 旱季为 6.23~46.67, 表现出高 HCO_3^- 、低 SO_4^{2-} 的特点. 岩溶作用的季节性变化使得 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 成为最敏感的阴阳离子. 由于岩溶区特殊的水文地质结构, 雨水、地表水、地下水转化迅速, 致使地下河对农业活动较为敏感, 其中以 Cl^- 、 NO_3^- 最为突出, 敏感指数分别为 0.286、0.022. 在保护岩溶水资源时应引起重视. 旅游活动对地下河的影响较小, 主要与景区良好的管理有关, 应提倡相关景区向其学习管理经验. 做好地下河补给区的岩溶生态系统的管理工作, 可发挥岩溶区地下河最大的经济与环境效益.

关键词: 地下河; 地球化学; 敏感性; 雪玉洞; 岩溶区

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)01-0077-07

Research on the Sensitivity of Geochemical of Underground River in Chongqing Xueyu Cave

XU Shang-quan, YANG Ping-heng, YIN Jian-jun, MAO Hai-hong, WANG Peng, ZHOU Xiao-ping

(Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir, Ministry of Education, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Quoted geochemical susceptibility index and isosensitive line on geochemical susceptibility, analyzed the data of underground rivers of Xueyu Cave in Chongqing from September 2010 to August 2011, we found that the chemical composition of the underground river was controlled by the bedrock, due to the composition of high concentration of Ca^{2+} and low concentration of Mg^{2+} . Owing to the effects of the monsoon, water chemistry was different between drought season and rainy season: the value of $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{Ca}^{2+}]$ was 0.018~0.051 in the rainy season, but in dry season the value was 0.038~0.064. The value of $[\text{HCO}_3^-]/[\text{SO}_4^{2-}]$ was 4.86~36.62 in the rainy season, and 6.23~46.67 in the dry season. The seasonal change of Karstification made Ca^{2+} and HCO_3^- become the most sensitive ion. As a result of the special hydrogeological structure in Karst area, rain, surface water and groundwater transformed rapidly, which caused the underground river was sensitive to agricultural activities, especially for Cl^- and NO_3^- , and their sensitive indices were 0.286 and 0.022 respectively. The influence of tourism activities on the underground river was less than the management. The management work of ecological system should be strengthen in the recharge area, thus the largest economic and environmental benefits in the Karst area could be achieved.

Key words: underground river; geochemistry; sensitivity; Xueyu Cave; karst area

我国南方岩溶水天然资源量为 1 847 亿 $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ ^[1], 储量极为丰富. 据杨立铮^[2]的统计, 我国南方枯季流量 $> 50 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ 的地下河有 2 836 条, 总长为 13 919 km, 流量达 $1 482 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. 但在我国南方岩溶区, 由于碳酸盐岩裂隙、管道等岩溶含水介质十分发育, 加之地表土壤覆盖层薄甚至缺失, 渗透性急剧增强, 致使地表水漏失严重, 以及新生代以来地壳的大幅度间歇性抬升, 形成“土在楼上, 水在楼下”的水土资源不配套格局^[3,4], 岩溶区地下水系统中的雨水、地表水与地下水之间的转化迅速^[5,6], 洪涝灾害极易发生. 因此, 与非岩溶含水层相比, 岩溶系统更具开放性, 岩溶含水系统

对外界环境更具敏感性^[7~10]和脆弱性^[11~13], 更易受到人类活动的影响.

南方岩溶水资源的问题一直受到政府和研究人员的高度关注. 2010 年温家宝总理在西南岩溶区指导抗旱时指出“西南旱区多是石灰岩地区, 都存在水多、水少和水脏的问题”^[14]. 岩溶地下河水对环境变化^[8,15]、人类活动^[16~18]的影响都表现出很强

收稿日期: 2012-03-22; 修订日期: 2012-05-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41072192, 41103068); 重庆市科委院士专项(CSTS, 2010BC7004); 中国地质调查局项目(1212011087119); 重庆市国土房管局科技项目; 西南大学博士基金项目(SWU111009)

作者简介: 徐尚全(1986~), 男, 硕士, 主要研究方向为岩溶环境, E-mail: xushangquan122313@163.com

的地球化学敏感性特征. 关于岩溶地下水的水文地球化学特征^[19-20]、污染物的运移^[21-24]和地下水脆弱性评价^[25-27]研究已有较多报道. 但对岩溶区突出的地球化学敏感性的定量表达研究较少^[28], 尤其是不同原因(如农业活动、城镇建设、旅游活动等)引起的外部环境变化对地下水系统的地球化学敏感指标的影响, 诸如地下水位、同位素、宏量组分、微量组分等地球化学敏感因子对环境变化所表现出的敏感性研究.

为此, 本研究选取西南岩溶区典型的地下河系统——重庆雪玉洞地下河. 从岩溶地下水系统对不同环境变化所表现出的特有地球化学属性出发, 引用地球化学敏感指数, 探讨了岩溶地下水化学特征及其对人类活动所表现出的地球化学敏感差异性, 以期对岩溶区旅游资源的合理开发和水资源的保护提供科学依据.

1 研究区概况

雪玉洞位于重庆市丰都县长江南岸的龙河下游峡谷内, 地理坐标 $29^{\circ}47'00''N$, $107^{\circ}47'13''E$, 洞口海拔 233 m, 高出龙河水平面 55.5 m^[29]. 距丰都新县

城 12 km(图 1), 因洞内次生沉积物种类丰富且色泽雪白如玉而得名. 区内多年平均气温 $16.5^{\circ}C$, 多年平均降水量 1 072 mm, 属典型亚热带湿润季风气候^[30]. 雪玉洞发育在川东平行岭谷方斗山背斜北西翼的三叠系飞仙关组(T_1f)薄至中厚层灰岩中, 岩层产状为 $310^{\circ}\angle 43^{\circ}$. 洞穴顶板岩层厚 150~250 m, 上覆植被以常绿阔叶林和灌丛为主, 土壤厚度 0~50 cm^[31]. 大气降水是洞内地下河唯一补给源, 受西南季风和东南季风的双重影响, 降水主要集中在每年的 4~10 月.

雪玉洞属峡谷型洞穴, 洞道狭窄, 没有发育大的洞厅, 空间较小, 因其中下层发育地下河, 使得洞内相对湿度较高(一般 $\geq 100\%$). 洞内气温较稳定, 但受灯光和游客的影响, 各层略有差异, 上层 $17.7\sim 18.3^{\circ}C$, 中层 $17.4\sim 18.1^{\circ}C$, 下层 $16.6\sim 17.6^{\circ}C$, 地下河水温 $16.3\sim 16.7^{\circ}C$. 洞口采用双开门封闭, 地下河出口被约束在较小的空间内, 洞口附近也接近无风, 洞内外气流的交换现象不明显^[30]. 此次研究自洞内地下河最上游到洞口选取 5 个监测点(NO1~NO5)(图 1)对地下河水的水化学成分进行测试分析.

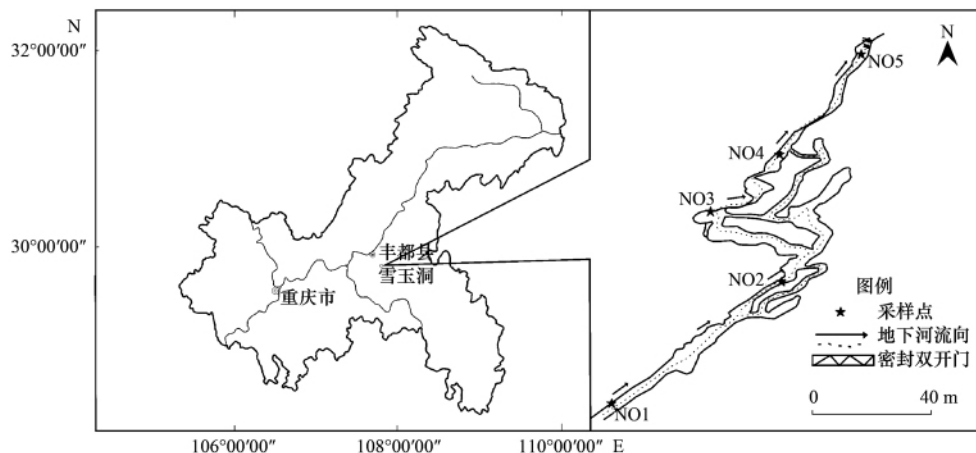


图 1 雪玉洞地理位置及监测点位置示意

Fig. 1 Location of Xueyu Cave and sampling sites

2 材料与方法

2.1 样品采集及测试

野外现场监测工作在每月中旬进行. 使用德国产的多参数水质分析仪(WTW350i)测定地下河水的水温、pH 值和电导率, 精度分别为 $0.1^{\circ}C$ 、0.01 和 $1\mu S\cdot cm^{-1}$. 使用德国 Merck 公司产的碱度计现场滴定水中 HCO_3^- , 测量精度为 $0.01\text{ mmol}\cdot L^{-1}$. 阳离子水样, 用去离子水清洗过的 50 mL 高密度聚乙

烯塑料瓶采集, 现场加入 1:1 的 HNO_3 酸化, 用美国 Perkin-Elmer 公司产 Optima-2100DV 全谱直读型 ICP-OES 测定, 检测精度 $0.001\text{ mg}\cdot L^{-1}$ (相对标准偏差 $< 2\%$). 用于阴离子测试的水样采集方法与阳离子水样采样方法相同(不加 HNO_3), 用瑞士 Metrohm 公司产 761 型离子色谱仪测定主要阴离子, 其检测限至 $1\mu g\cdot L^{-1}$, 绝对误差 $< 1\%$.

2.2 分析方法

据文献[28], 引入地球化学敏感性指数

(geochemical susceptibility index ,GSI) 和地球化学敏感等值线 (isosensitive line on geochemical susceptibility) 的概念(图 2) ,对研究区农耕期与休耕期、旅游旺季与非旅游旺季 ,人类活动对地下河水地球化学敏感性的影响进行分析. 其中 GSI 的计算公式为:

$$GSI_i = | c_{li} - c_{hi} | \tag{1}$$

式中 c_{li} 和 c_{hi} 为不同时期地下河 i 元素的摩尔浓度值.

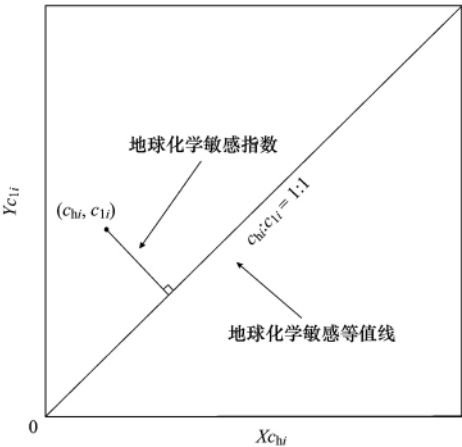


图 2 地球化学敏感性指数及敏感等值线定义示意^[28]

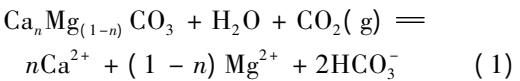
Fig. 2 Plot shows the definition of geochemical susceptibility index and isosensitive line on geochemical susceptibility

3 结果与讨论

3.1 水化学特征

控制水体中主元素化学组成变化的主要因素首先是物质来源 ,其次是不同的化学反应过程^[32]. 因此不同岩性的含水层中水化学组分具有明显的差异性. 通过分析 2010 年 9 月~2011 年 8 月水化学数据(表 1) 可知 ,研究区地表和地下河水中阳离子以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主 ,阴离子以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主 ,其

水化学特征主要受水所流经地层岩性的控制. 各监测点 $[Mg^{2+}]/[Ca^{2+}]$ (摩尔比) 为 0.018~0.064 ,表现出低 Mg^{2+} 高 Ca^{2+} 的特点. 石灰岩和白云岩中不同造岩矿物的风化溶解或水岩相互作用控制着水中的 $[Mg^{2+}]/[Ca^{2+}]$ ^[33] ,水岩作用过程可表示为:



式中 n 和 $(1-n)$ 表示灰岩或白云岩中钙镁比例 ,当 $0 < n \leq 1/2$ 时 ,矿物的溶解或水岩相互作用以白云岩中白云石 ($CaMgCO_3$) 为主; 当 $1/2 < n < 1$ 时 ,矿物的溶解表现出以石灰岩和白云岩中的方解石和白云石共同作用特征; 当 $n = 1$ 时 ,矿物的溶解或水岩相互作用以石灰岩中的方解石 ($CaCO_3$) 为主^[28]. 通过计算得出 ,本研究区 $[Mg^{2+}]/[Ca^{2+}]$ 的比值为 0.018~0.064 ,表现为高 Ca^{2+} 低 Mg^{2+} 的特征. 因此 ,可以认为 ,雪玉洞地区的水岩作用过程更接近于 $n = 1$ 时的情况 ,表明区内造岩层岩矿物以方解石为主 ,这与野外实际调查结果相吻合. 此外 ,雨季各监测点 $[Mg^{2+}]/[Ca^{2+}]$ 为 0.018~0.051 ,旱季 $[Mg^{2+}]/[Ca^{2+}]$ 为 0.038~0.064 ,雨季要小于旱季 [图 3(a)]. 这是由于岩溶区大气降水和地表水转化为地下水迅速 ,在降水量较大的雨季 ,一方面地表化学溶蚀作用强度会发生变化 ,导致地表水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量发生变化; 另一方面 ,大气降水和地表水入渗混合作用的影响 ,会导致洞内地下河水中的 $[Mg^{2+}]/[Ca^{2+}]$ 比值减小^[31,34~36] , Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量较旱季发生明显的变化.

与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 一样 ,各监测点水中的主要阴离子 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 在雨季同样会发生变化 [图 3(b)]. 通常情况下 ,地下水中的 SO_4^{2-} 可能来源于黄铁矿风化和石膏矿物溶解^[33]. 由于研究区内并

表 1 各采样点旱季和雨季水化学指标平均值

Table 1 Mean value of hydrochemical indicators during dry and wet seasons

项目	NO1		NO2		NO3		NO4		NO5	
	雨季	旱季	雨季	旱季	雨季	旱季	雨季	旱季	雨季	旱季
pH 值	7.46	7.77	7.47	7.82	7.43	7.80	7.44	7.72	7.46	7.70
t/℃	16.49	16.36	16.44	16.46	16.39	16.44	16.31	16.44	16.26	16.30
EC/ $\mu S \cdot cm^{-1}$	404.14	373.20	403.43	356.20	404.00	359.80	403.43	364.00	404.00	367.80
$HCO_3^- /mg \cdot L^{-1}$	236.16	213.50	236.59	214.72	235.72	217.16	242.00	223.26	240.51	212.28
$Cl^- /mg \cdot L^{-1}$	7.45	3.75	9.06	2.76	8.34	3.25	8.83	4.16	8.60	3.54
$NO_3^- /mg \cdot L^{-1}$	9.28	7.58	9.28	8.09	8.02	8.78	9.35	7.79	9.15	8.60
$SO_4^{2-} /mg \cdot L^{-1}$	14.10	18.40	14.26	18.90	13.65	18.95	14.66	18.93	14.85	19.50
$Ca^{2+} /mg \cdot L^{-1}$	85.75	78.69	86.26	68.66	89.88	80.79	87.64	76.00	90.69	69.48
$K^+ /mg \cdot L^{-1}$	0.51	0.57	0.48	0.48	0.46	0.53	0.46	0.51	0.66	0.36
$Na^+ /mg \cdot L^{-1}$	0.75	1.22	0.81	1.01	0.74	1.16	0.80	1.05	0.95	1.06
$Mg^{2+} /mg \cdot L^{-1}$	2.14	2.49	2.13	2.23	2.20	2.48	2.22	2.32	2.22	2.38

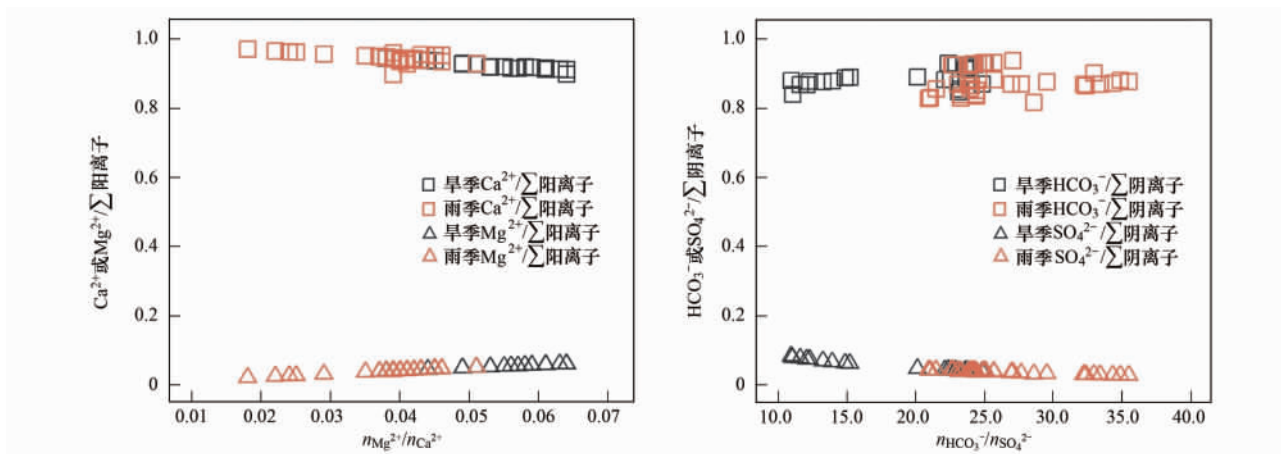


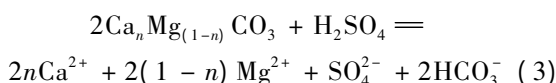
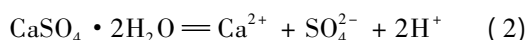
图3 监测点水中 $n_{Ca^{2+}}/\sum$ 阳离子和 $n_{Mg^{2+}}/\sum$ 阳离子与 $n_{Mg^{2+}}/n_{Ca^{2+}}$ 关系及 $n_{HCO_3^-}/\sum$ 阴离子和

$n_{SO_4^{2-}}/\sum$ 阴离子与 $n_{HCO_3^-}/n_{SO_4^{2-}}$ 的关系

Fig. 3 Relationship between $n_{Ca^{2+}}/\sum$ cations, $n_{Mg^{2+}}/\sum$ cations and $n_{Mg^{2+}}/n_{Ca^{2+}}$, $n_{HCO_3^-}/\sum$ anions,

$n_{SO_4^{2-}}/\sum$ anions and $n_{HCO_3^-}/n_{SO_4^{2-}}$ in wet season and dry seasons

未见含煤系地层出露,因此研究区各监测点水中的 SO_4^{2-} 可能来源于碳酸盐岩地层中的石膏矿物溶解,同时,这一反应还可生成硫酸加速碳酸盐矿物的溶蚀,其水岩作用过程可表示为:



研究区各监测点水中 $[HCO_3^-]/[SO_4^{2-}]$ 为 4.86 ~ 42.67,雨季 $[HCO_3^-]/[SO_4^{2-}]$ 为 4.86 ~ 36.62,旱季 $[HCO_3^-]/[SO_4^{2-}]$ 为 6.23 ~ 46.67,表现出高 HCO_3^- 低 SO_4^{2-} 的特点, HCO_3^- 在水中浓度占有绝对优势。

3.2 农业活动对地下河敏感性分析

研究区的上覆植被以松柏等次生林为主,其次分布有农业用地,种植作物以红薯、蔬菜为主,以玉米、水稻、果树为辅。由于交通不便,种植作物以自给为主,很少用于买卖,因此,其耕作方式比较松散。每年的 4 ~ 6 月为耕作期(有施肥、喷农药等),12 月 ~ 次年 2 月为休耕期,较少有农业活动。为此,本研究取用 2011 年 4 ~ 6 月(耕作期间)和 2010 年 12 月 ~ 2011 年 2 月(休耕期间)的地下河水化学数据,对农业活动对雪玉洞地下河水地球化学敏感性进行探讨。

运用公式(1)对研究区地下河河水的地球化学敏感性进行计算(表 2)。选取的两个时间段 12 月 ~ 次年 2 月与 4 ~ 6 月和研究区旱雨季基本吻合,由

于降雨量、温度的变化致使岩溶作用存在明显的季节性差异^[37,38]。因此,雨水的稀释效应、 CO_2 效应和农业活动对地下水中的离子都有影响:在基岩一定的前提下, Ca^{2+} 、 HCO_3^- 主要受稀释效应和 CO_2 效应的影响;其它阴阳离子主要受稀释效应和农业活动的共同影响。稀释效应使离子含量降低, CO_2 效应、农业活动则使相应离子含量增高^[37,39]。

表 2 中地下河最敏感的阴阳离子分别为 HCO_3^- 和 Ca^{2+} ,敏感指数为 0.825 和 0.571,这与岩溶作用的季节性变化密不可分。研究区的水文地质条件、植被状况使得雨季 CO_2 效应的影响强于稀释效应,致使 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 含量雨季大于旱季(表 1)。 Cl^- 与 NO_3^- 也表现出较大的地球化学敏感性,敏感指数分别为 0.268、0.022(表 2)。 Cl^- 与 NO_3^- 的浓度值农耕期(雨季) > 休耕期(旱季),说明农业活动对地下河水的影响强于雨水的稀释效应。耕作期间对化肥和农药的使用会因岩溶区岩溶含水系统的持水性较差、入渗系数大而随降雨入渗到岩溶含水层^[40~42],虽有雨水的稀释效应但其浓度仍呈增高趋势;而休耕期没有农业活动的影响, Cl^- 与 NO_3^- 浓度较低,使得 Cl^- 与 NO_3^- 的地球化学敏感性较高。 SO_4^{2-} 也表现出较高的地球化学敏感性,敏感指数为 0.046。也有研究曾指出人类在施加农药中含硫化物会使地下水 SO_4^{2-} 含量增加^[18]。但是通过表 1 可知, SO_4^{2-} 含量农耕期(雨季)较休耕期(旱季)更小,这可能与农

业活动中使用的农药种类不含 SO_4^{2-} 有关 [经调查该区使用农药主要为敌敌畏 ($\text{C}_4\text{H}_7\text{O}_4\text{Cl}_2\text{P}$)、敌杀

死 ($\text{C}_{22}\text{H}_{19}\text{Br}_2\text{NO}_3$) 不含 SO_4^{2-}], 也可能是由于雨季雨水的稀释效应所致。

表 2 农业活动对地下水地球化学敏感性指数的影响

Table 2 Agricultural activities on the underground river geochemical sensitivity index effects

项目	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
GSI	0.750 ~ 0.933 ¹⁾ 0.823 ²⁾	0.193 ~ 0.337 0.286	0.038 ~ 0.057 0.046	0.009 ~ 0.036 0.022	0.538 ~ 0.596 0.571	0.019 ~ 0.023 0.021	0.008 ~ 0.011 0.010	0.002 ~ 0.004 0.003
主量元素 GSI 比较	$\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$							

1) 5 个采样点地球化学敏感指数变化范围; 2) 5 个采样点地球化学敏感指数均值, 下同

3.3 旅游活动对地下河敏感性分析

雪玉洞因其洞内沉积物洁白如玉而著称, 2004 年被评为国家 4A 级旅游景区。每年都会有大批国内外游客前来旅游, 据 2011 年雪玉洞游客数据显示: 全年共接待游客 146 463 人, 但每月之间有较大差距: 由于“十一”黄金周的原因, 10 月游客最多达 18 178 人, 而 1 月人最少, 仅有 3 925 人。为讨论旅游活动对地下水地球化学敏感性的影响, 选取 2011 年 1 月和 10 月的地下水化学数据进行分析。为使分析客观、准确, 每种元素都用 NO1 的值分别与其他 4 个采样点相减, 即只考虑地下河在洞穴内水化学的敏感性, 再运用公式 (1) 进行计算。

表 3 为计算结果, 可看出受岩溶作用控制的 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 仍是敏感度最高的阳离子、阴离子, 敏感指数分别为 0.294 与 0.09, Cl^- 与 Na^+ 是除此之

外地球化学敏感性指数最高的阴阳离子, 敏感性指数分别为 0.021 与 0.04。笔者认为主要原因可能有两方面: 一是在修建旅游通道 (地下河与旅游通道接触) 时所用的材料中含有黏土, 而石盐 (NaCl) 是黏土的主要成分之一^[43], 可能会对地下水中的 Na^+ 、 Cl^- 离子含量有较大影响; 二是可能与游客的影响有关, 在景区无论散客或是旅游团, 都会在一定人数时由导游引领进洞参观, 时间为 1 h 左右, 由于洞内高差较大 (50 m), 游客比较累会有较多汗液 (主要成分即为 Na^+ 、 Cl^- 等离子), 通过空气的流通可能会影响到地下水中的离子含量。除此之外, 其他离子 (SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等) 表现出较低的地球化学敏感性, 笔者认为这主要得益于景区的良好管理, 没有其它人为因素 (如生活垃圾的排放) 对地下河造成不利影响。

表 3 旅游活动对地下水地球化学敏感性指数的影响

Table 3 Tourism activities on the underground river geochemical sensitivity index effects

项目	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
GSI	0 ~ 0.200 0.09	0.018 ~ 0.022 0.021	0.002 ~ 0.016 0.009	0.002 ~ 0.007 0.005	0.193 ~ 0.420 0.294	0.007 ~ 0.029 0.015	0.002 ~ 0.052 0.04	0.001 ~ 0.002 0.001 3
主量元素 GSI 比较	$\text{Ca}^{2+} > \text{HCO}_3^- > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{Mg}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{K}^+$							

岩溶作用对地下河敏感性的影响较农业活动与旅游活动更为明显, 这与基岩、气候与土壤 CO_2 含量有密切关系^[44~46]。农业活动与旅游活动对地下河敏感性的影响有所不同。首先, 农业活动较旅游活动对地下河的影响更大, 其原因主要为农业活动对地下河的影响面积大、范围广, 旅游活动仅对地下河洞穴可进入部分产生影响, 且由于管理秩序较好影响很小; 二是农业活动与旅游活动对地下河各离子的地球化学敏感性有所不同: 农业活动对地下河 Cl^- 、 NO_3^- 影响较大; 旅游活动对 Cl^- 、 Na^+ 影响较大。综上所述, 在保护旅游区岩溶水资源时, 应根据不同的影响因素实施对应的保护方案。

4 经济与环境效益

雪玉洞岩溶地下河不仅是景区重要的旅游资

源, 具有可观的经济效益; 更对洞穴环境具有很大的调节作用, 具体表现在对洞穴温度、湿度的调控和对空气中 CO_2 浓度的调节, 对洞穴景观的保护具有重要作用。通过此次研究发现, 景区内部对地下河的保护工作已做得比较到位; 但补给区不仅对地下河的影响更大而且由于对土地利用比较松散的管理, 很有可能会对地下河造成不可修复的“伤害”, 是景区较大的潜在威胁。因而要从污染物质的源头抓起, 对补给区的土地利用方式进行合理规划, 对农业用地科学施肥, 限制农业生态系统污染物质的输出, 做好岩溶生态系统的管理工作, 让岩溶地下河的经济与环境效益发挥到最大。

5 结论

(1) 地下河水化学特征主要受水所流经地层岩

性的控制,表现为高 Ca^{2+} 低 Mg^{2+} 的特征。

(2) 监测点水化学指标均受到季风降水的影响,在雨季与旱季表现出较大的差异,雨季各监测点 $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{Ca}^{2+}]$ 在 0.018 ~ 0.051 之间,旱季 $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{Ca}^{2+}]$ 在 0.038 ~ 0.064 之间,雨季要小于旱季, $[\text{HCO}_3^-]/[\text{SO}_4^{2-}]$ 雨季在 4.86 ~ 36.62 之间,旱季在 6.23 ~ 46.67 之间,表现出高 HCO_3^- 低 SO_4^{2-} 的特点, HCO_3^- 在水中浓度占有绝对优势。

(3) 由降雨量、气温、土壤 CO_2 等季节变化引起的岩溶作用变化对地下河水的地球化学敏感性影响最大, HCO_3^- 、 Ca^{2+} 是最敏感的阴阳离子,敏感指数分别为 0.823、0.571。

(4) 虽然有雨水的稀释效应,但地下河对农业活动仍表现出一定的地球化学敏感性,以 Cl^- 、 NO_3^- 最为突出,敏感指数分别为 0.286、0.022; 在保护岩溶水资源时对农业活动应引起足够的重视; 由于景区管理秩序较好,旅游活动对地下河的影响较小。

(5) 岩溶地下河具有重要的经济与环境效益,应做好补给区土地利用的规划,农业生态系统污染物质的输出,使其经济与环境效益发挥到最大。

参考文献:

- [1] 袁道先,蔡桂鸿. 中国岩溶学[M]. 北京: 地质出版社, 1993. 158-164.
- [2] 杨立铮. 中国南方地下河分布特征[J]. 中国岩溶, 1985, 1(1-2): 92-100.
- [3] 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.
- [4] 袁道先,薛禹群,傅家谟,等. 防止我国西南岩溶地区地下河变成“下水道”的对策和建议[R]. 北京: 中国科学院院士建议, 2007. 1-16.
- [5] Long A J. Hydrograph separation for karst watersheds using a two-domain rainfall-discharge model[J]. Journal of Hydrology, 2009, 364(3-4): 249-256.
- [6] 袁道先. 岩溶水不均匀性程度差异的产生条件[A]. 见: 中国地质学会第二届岩溶学术会议论文选集编辑组. 中国地质学会第二届岩溶学术会议论文选集[C]. 北京: 科学出版社, 1982. 77-85.
- [7] 袁道先,刘再华,林玉石,等. 中国岩溶动力系统[M]. 北京: 地质出版社, 2002. 6-10.
- [8] 袁道先. 岩溶作用对环境变化的敏感性及其记录[J]. 科学通报, 1995, 40(13): 1210-1213.
- [9] Yuan D X. Sensitivity of karst process to environmental change along the PEP II transect[J]. Quaternary International, 1997, 37(1): 105-113.
- [10] 杨平恒,罗鉴银,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.
- [11] Witkowski A J, Rubin K, Kowalczyk A, et al. Groundwater vulnerability map of the Chrzanów karst-fissured Triassic aquifer (Poland) [J]. Environmental Geology, 2003, 44(1): 59-67.
- [12] Trček B, Veselič M, Pezdrič J. The vulnerability of karst springs—a case study of the Hubelj spring (SW Slovenia) [J]. Environmental Geology, 2006, 49(6): 865-874.
- [13] Bakalowicz M. Karst groundwater: a challenge for new resources [J]. Hydrogeology Journal, 2005, 13(1): 148-160.
- [14] 温家宝: 坚决打好抗旱救灾这场硬仗——在云南考察旱情和抗旱工作时的讲话[EB/OL]. http://www.gov.cn/lldh/2010-03/25/content_1564967.htm.
- [15] 白占国,万国江. 贵州碳酸盐岩区域的侵蚀速率及环境效应研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(1): 1-7.
- [16] 贾亚男,刁承泰,袁道先. 土地利用对埋藏型岩溶区岩溶水质的影响——以涪陵丛林岩溶槽谷区为例[J]. 自然资源学报, 2004, 19(4): 455-461.
- [17] 蒋勇军,吴月霞, Groves C, 等. 利用因子分析确定岩溶地下河系统水质的影响因素[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(4): 1-7.
- [18] 李俊云,李林立,谢世友,等. 人类活动对川东平行岭谷区岩溶地下水化学性质季节变化的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(4): 514-518.
- [19] 杨平恒,袁道先,袁文昊,等. 以 PCA 揭示降雨期间岩溶地下水文地球化学的形成[J]. 科学通报, 2010, 55(9): 788-797.
- [20] 姜光辉,郭芳. 我国西南岩溶区表层岩溶带的水文动态分析[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(5): 89-93.
- [21] 崔学慧,李炳华,陈鸿汉. 太湖平原城近郊区浅层地下水中多环芳烃污染特征及污染源分析[J]. 环境科学, 2008, 29(7): 1806-1810.
- [22] 何江涛,李烨,刘石,等. 浅层地下水氯代烃污染的天然生物降解[J]. 环境科学, 2005, 26(2): 121-125.
- [23] Gou F, Jiang G H. Nitrogen budget of a typical subterranean river in peak cluster karst area [J]. Environment Geology, 2009, 58(8): 1741-1748.
- [24] Panno S V, Hackley K C, Hwang H H, et al. Determination of the sources of nitrate contamination in karst springs using isotopic and chemical indicators [J]. Chemical Geology, 2001, 179(1-4): 113-128.
- [25] 章程,蒋勇军, Lettingues 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.
- [26] Goldscheider N. Karst groundwater vulnerability mapping: application of a new method in the Swabian Alb, Germany [J]. Hydrogeology Journal, 2005, 13(4): 555-564.
- [27] Andreo B, Goldscheider N, Vadillo I, et al. Karst groundwater protection: first application of a pan-european approach to vulnerability, hazard and risk mapping in the Sierra de Libar (Southern Spain) [J]. The Science of the Total Environment, 2006, 357(1-3): 54-73.
- [28] 何守阳,朱立军,董志芬,等. 典型岩溶地下水系统地球化学敏感性研究[J]. 环境科学, 2010, 31(5): 1176-1182.
- [29] 朱学稳. 张远海,韩道山,等. 重庆丰都雪玉洞群的洞穴特

- 征和洞穴沉积物[J]. 中国岩溶, 2004, **23**(2): 85-90.
- [30] 王翱宇. 洞穴岩溶动力系统运行规律与环境信息保存的研究——以重庆雪玉洞为例[D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [31] 蒲俊兵, 沈立成, 王翱宇, 等. 重庆丰都雪玉洞水文地球化学指标的时空变化研究[J]. 中国岩溶, 2009, **28**(1): 49-54.
- [32] 郎贇超, 刘从强, 赵志琦, 等. 贵阳地表水地下水化学组成: 喀斯特水文系统水-岩反应及污染特征[J]. 水科学进展, 2005, **16**(6): 826-832.
- [33] 刘丛强. 生物地球化学过程与地表物质循环——西南喀斯特流域侵蚀与生源要素循环[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 265-375.
- [34] Edmunds W M, Smedley P L, Residence time indicators in groundwater: the East Midlands Triassic sandstone aquifer[J]. Applied Geochemistry, 2000, **15**(6): 737-752.
- [35] Kloppmann W, Dever L, Edmunds W M. Residence time of Chalk groundwaters in the Paris Basin and the North German Basin: a geochemical approach[J]. Applied Geochemistry, 1998, **13**(5): 593-606.
- [36] Huang Y M, Fairchild I J, Borsato A, *et al.* Seasonal variation in Sr, Mg and P in modern speleothems: (Grotta di Ernesto, Italy) [J]. Chemical Geology, 2001, **175**(3-4): 429-448.
- [37] 刘再华, 袁道先, 何师意. 岩溶动力系统水化学动态变化规律分析[J]. 中国岩溶, 1999, **18**(2): 103-108.
- [38] 刘再华, 袁道先. 中国典型表层岩溶系统的地球化学动态特征及其环境意义[J]. 地质论评, 2000, **46**(3): 324-327.
- [39] 刘再华, Groves C, 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.
- [40] Yuan D X. Environmental change and human impact on karst in southern China[J]. Karst Terrains, Environmental Changes and Human Impact, 1993, **25**(suppl.): 99-107.
- [41] 蒲俊兵, 袁道先, 扈志勇, 等. 高分辨率监测岩溶地下水 NO_3^- 的动态变化及对外界环境的响应[J]. 环境科学, 2011, **32**(3): 680-686.
- [42] Vesper D J, Loop C M, White W B. Contaminant transport in karst aquifers[J]. Theoretical and Applied Karstology, 2001, **13**(14): 101-111.
- [43] 何幼斌, 王文广. 沉积岩与沉积相[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007. 84-91.
- [44] 刘再华, 何师意, 袁道先, 等. 土壤中的 CO_2 及其对岩溶作用的驱动[J]. 水文地质工程地质, 1998, **25**(4): 42-45.
- [45] 王冬银, 章程, 谢世友, 等. 山区岩溶作用对土地利用方式的响应——以金佛山碧潭泉和水房泉两区岩溶系统为例[J]. 地学前缘, 2007, **14**(4): 222-230.
- [46] 李恩香, 蒋忠诚, 曹建华, 等. 广西弄拉岩溶植被不同演替阶段的主要土壤因子及溶蚀率对比研究[J]. 生态学报, 2004, **24**(6): 1131-1139.