

典型岩溶地下水系统地球化学敏感性研究

何守阳^{1,2}, 朱立军³, 董志芬³, 张熠⁴, 于晓红⁵

(1. 中国科学院地球化学研究所地球深部物质与流体作用地球化学研究室, 贵阳 550002; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 喀斯特环境与地质灾害防治教育部重点实验室(贵州大学), 贵阳 550003; 4. 贵州省节能监测中心, 贵阳 550002; 5. 贵州省地质环境监测院, 贵阳 550004)

摘要:通过研究典型岩溶地下水系统地球化学敏感性表明,地下水系统水化学阳离子以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主,平均敏感指数分别为 0.73 和 0.19;阴离子以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主,平均敏感指数分别为 0.92 和 0.37;主量元素表现出明显的地球化学敏感性特征.研究区主量元素的地球化学敏感性依次为: $\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Mg}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{NO}_3^- > \text{K}^+$.运用敏感性最强的 HCO_3^- 敏感指数($\text{GSI}_{\text{HCO}_3^-}$)对地下水系统进行敏感区域区划, $\text{GSI}_{\text{HCO}_3^-} < 0.5$ 的区域为低敏感区, $0.5 < \text{GSI}_{\text{HCO}_3^-} < 1$ 的区域为中度敏感区, $\text{GSI}_{\text{HCO}_3^-} > 1$ 的区域为高敏感区.高敏感区域地下水系统可能成为污染物的汇和源,地下水与地表水之间的频繁快速转化和相互补给可能形成两者交叉污染和叠加污染的恶性循环.

关键词:地下水;敏感性;地球化学;岩溶;贵阳

中图分类号:X523; X142 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)05-1176-07

Study on Geochemical Susceptivity of Groundwater System in Representative Karstic Regions

HE Shou-yang^{1,2}, ZHU Li-jun³, DONG Zhi-fen³, ZHANG Yi⁴, YU Xiao-hong⁵

(1. Laboratory of Earth's Interior and Geofluids, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Karst Environment and Geohazard Prevention(Guizhou University), Ministry of Education, Guiyang 550003, China; 4. Guizhou Center of Energy-Saving, Guiyang 550002, China; 5. Guizhou Institute of Geo-Environment Monitoring, Guiyang 550004, China)

Abstract: We investigated geochemical susceptibility of groundwater in representative karst groundwater system. The results indicated that Ca^{2+} and Mg^{2+} , correlative the average values of geochemical susceptibility index (GSI) were 0.73 and 0.19; HCO_3^- and SO_4^{2-} , interrelated the average values of geochemical susceptibility index were 0.92 and 0.37, are the principal cations and anions in karstic groundwater system, respectively. And the major elements are obviously characterized by the geochemical susceptibility. The rank order of geochemical susceptibility for major elements in study region is $\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Mg}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{NO}_3^- > \text{K}^+$. The susceptible regions of groundwater system were zoned by the geochemical susceptibility index of HCO_3^- ($\text{GSI}_{\text{HCO}_3^-}$), which classified as $\text{GSI}_{\text{HCO}_3^-} < 0.5$ is low-susceptivity zone, $0.5 < \text{GSI}_{\text{HCO}_3^-} < 1$ is moderate-susceptivity zone and $\text{GSI}_{\text{HCO}_3^-} > 1$ is high-susceptivity zone, respectively. The groundwater systems in high-susceptivity zone may become as a collected and genetic room for pollutants. Furthermore, both continual or active exchange and mutual recharge between surface water and groundwater in high-susceptivity zones might induce intersectant pollution and serious cycle.

Key words: groundwater; susceptibility; geochemistry; karst; Guiyang

贵州省是全球岩溶地貌集中连片分布面积最大、岩溶类型最齐全和发育最复杂的东亚岩溶典型区域中心,贵阳市地处该中心区域的中心地带.独特的地质构造和地形地貌造就其地下水系统的复杂性、水文地球化学特征的独特性和地下水环境脆弱性等特点,在全球岩溶地下水系统中具有代表性和典型性特征.岩溶地下水系统中的岩溶作用是在一种“三相”(气-液-固)不平衡的开放系统中客观存在和发生发展的,岩溶系统的开放性、脆弱性以及岩溶作用的多样性等特征,使其对环境变化或人类活动的影响表现出突出的地球化学敏感性特征^[1-4].

但岩溶地区突出的地球化学敏感性和脆弱性的定量表达一直缺少必要的研究,尤其是作为全球水循环重要环节之一的地下水系统中地下水及其所携带沉积物的物理、地球化学敏感指标,诸如地下水水位、宏量组分、微量组分、同位素、惰性气体等地球化学敏感因子对环境变化或人类活动影响所表现出的敏

收稿日期:2009-07-14;修订日期:2009-11-02

基金项目:国家自然科学基金项目(40463001);国家重点基础研究发展规划(973)项目(2006CB403202);贵州大学博士点矿床学基金项目

作者简介:何守阳(1982~),男,博士研究生,主要研究方向为岩溶环境地质,E-mail: hesy813@126.com

* 通讯联系人,E-mail: ljzhu@gzu.edu.cn

感性研究^[5, 6]. 过去,岩溶地下水的水文地球化学特征研究、污染物迁移和污染的敏感性及脆弱性评价等方面研究受到国内外研究者的广泛关注^[7~17],然而在地下水系统特有的地球化学敏感性和敏感参数定量表达以及运用方面研究却处于相当薄弱的环节.

岩溶地区大量存在的喀斯特地下空间及排水网致使岩、土、水、气的界面组合模糊复杂. 地表水、大气降水与地下水联系密切, 转换迅速, 易发生干扰, 地下水容易受污染. 地下水对地表水季节性地球化学组成变化响应明显, 地下水系统易受到大气降水、地表水和人为活动影响而表现较强的地球化学敏感性^[18, 19]. 研究者利用层次分析法和模型对岩溶地下水污染敏感性进行研究和评价以及污染风险预测, 涉及多项指标因子和较多参数^[20, 21]. 由于岩溶地下水系统复杂性及岩溶地区环境条件的特殊性, 加之地下水敏感性评价模型所涉及的参数较多, 敏感因子识别和权重的差异性受主观因素影响等原因, 运用模型评价岩溶地区地下水敏感性可能会影响研究结果甚至会出现失真的情况.

为此, 本研究选取典型而具有代表性岩溶地下水系统, 从地下水系统对人类活动和自然影响响应的敏感程度而表现出特有的地球化学属性出发, 探讨岩溶地下水系统的敏感性及其敏感因子、水环境演化规律和敏感区区划以及污染物的运移特征, 探索出适合岩溶地下水系统和环境演化研究的科学方法与评价指标. 利用岩溶地下水系统地球化学敏感因子及其敏感指数对岩溶地下水环境敏感区域进行区划, 以期为区域地下水环境保护和区划提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贵阳市位于贵州省中部, 位于东经 $106^{\circ}27' \sim 107^{\circ}03'$, 北纬 $26^{\circ}11' \sim 27^{\circ}55'$. 平均海拔 1 000 m. 地理上呈现低纬度、高海拔、地形多样特点. 地形、地貌走势自西向东延伸, 地势起伏较大, 南北高, 中部低. 岩溶地貌广泛分布, 地貌组合多样, 既有高原山地和丘陵, 又有盆地和河谷、台地. 研究区位于盆地中心, 区内地层出露以三叠系最广, 其次为二叠系, 岩石类型以碳酸盐岩为主 (石灰岩和白云岩), 零星分布碎屑地层. 区内岩层褶皱明显, 断层裂隙构造十分发育, 断层裂隙纵横交错, 地下岩溶裂隙及管道密布. 地下水围岩岩系主要为碳酸盐岩 (石灰岩和白云

岩) 和碎屑岩, 部分碎屑岩含水层为砂页岩含煤岩系或夹含硫酸盐类岩 (石膏和硬石膏). 地下水流向盆地中心而形成富水地带, 在研究区富水地带有 2 个构造不同的水文地质单元. 即研究区西侧水文地质单元 I, 呈条带状分布. 另外一个复合富水地段位于研究区东侧向斜构造水文地质单元 II, 该水文地质单元具有多层含水岩组 (石灰岩和白云岩)^[22]. 区内河流主要为南明河, 其余大多为流量小、流程短的地表河流或溪流, 丰水期和枯水期水位差距悬殊, 多为季节性、雨源性河流, 阿哈水库为贵阳市主要供水水源地之一 (图 1).

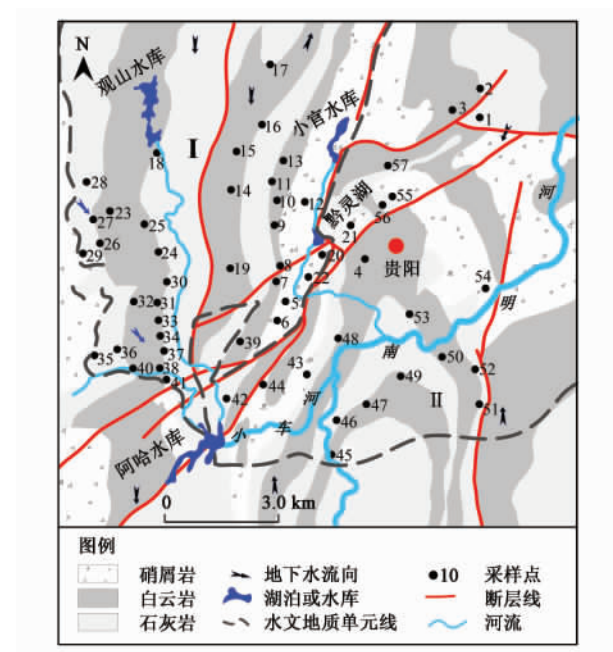


图 1 研究区域水文地质及采样点分布示意

Fig. 1 Hydrogeological map and the distribution of sampling site in study region

1.2 样品采集及分析

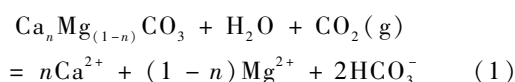
为探讨贵阳市岩溶地下水系统的地球化学敏感性, 本研究采集研究区内具有代表性的地下水样品. 分别于 2003 年 1 月 (枯水期) 和 7 月 (丰水期) 在研究区 56 个采样点各采集 56 个样品, 枯水期和丰水期共采集样品 112 个, 采样点分布见图 1. 现场测定水温 (T)、溶解氧 (DO) 和电导率 (EC) 等水化学参数, 利用 HCl 滴定法分析重碳酸根 (HCO_3^-) 离子. 用于测定主量阳离子的样品经洗净的 $0.22 \mu m$ 混合纤维素滤膜现场过滤后, 将滤液装入采样前洗净的聚乙烯瓶中, 然后用超纯 HCl 酸化滤液至 $pH < 2$ 后封装, 所有样品存于暗箱中冷藏带回实验室分析测试. 用原子吸收光谱 (AAS) 测定地下水系统中阳离

子含量,阴离子含量利用高效液相色谱进行分析测试.所有样品分析测试数据见文献[23].

2 结果与讨论

2.1 地下水系统水化学特征

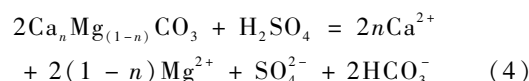
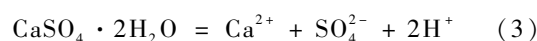
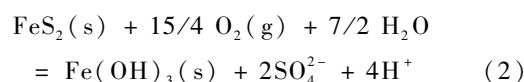
研究区地下水系统水化学中阳离子以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主,阴离子以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主,其水化学特征明显受围岩及地下水所流经地层岩性的控制,岩溶地下水系统由于围岩中造岩矿物的差异性,不同岩性的含水层中水化学组分具有明显的差异性.在研究区石灰岩和碎屑岩含水层中 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ (摩尔比) < 0.4 ,石灰岩与白云岩共同控制的混合含水层中 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ (摩尔比) 在 $0.4 \sim 1.14$ 之间,而 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ (摩尔比) ≥ 1.14 则为白云岩含水层.就枯水期地下水系统中的阳离子而言,石灰岩含水层具有高 Ca^{2+} 低 Mg^{2+} 特征, $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ (摩尔比) < 0.4 ;石灰岩与白云岩控制的混合含水层 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量相当, $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ (摩尔比) 在 $0.4 \sim 1.14$ 之间;而在 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ (摩尔比) > 1.14 的白云岩含水层单元中表现出 Mg^{2+} 含量高于 Ca^{2+} 的特征.这主要是由于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作用的结果^[24].其溶解或水岩相互作用过程可表示为:



式中, n 和 $(1-n)$ 表示石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 (MgCO_3) 为主.

此外,研究区内局部出露的二叠系上统煤系地层和三叠系下统白云岩中的石膏夹层,由于其中的黄铁矿的风化和石膏的溶解产生的硫酸 (H_2SO_4) 可以导致硫酸参与下的白云岩或石灰岩的风化溶解速度加快^[24],导致地下水系统中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值的变化,其过程可表示为:



但在丰水期由于地下水系统受大气降水和地表水入渗混合作用的影响,其中的 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值减小, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量较枯水期发生明显的变化(见图2和图3),这表明岩溶地区地下水、地表水和大气降水之间交换频繁,地下水系统易受外部环境变化和人类活动的影响.同时也表明如果岩溶地区地表水环境受污染后将通过较为发育的岩溶裂隙管道很快进入地下水系统而使其遭受污染,表现出潜在被污染的威胁.

地下水系统中阴离子以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主,在枯水期,未受污染和未含煤系或石膏夹层的碳酸盐岩含水层表现出富含 HCO_3^- 和高 $\text{HCO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值特点,研究区部分地下水呈现低 $\text{HCO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值和高 SO_4^{2-} 含量特征,其主要原因为含煤系地层或含石膏夹层含水层中黄铁矿风化和石膏溶解的结果^[24],其过程如方程(2)和(3).丰水期同样受到大气降水

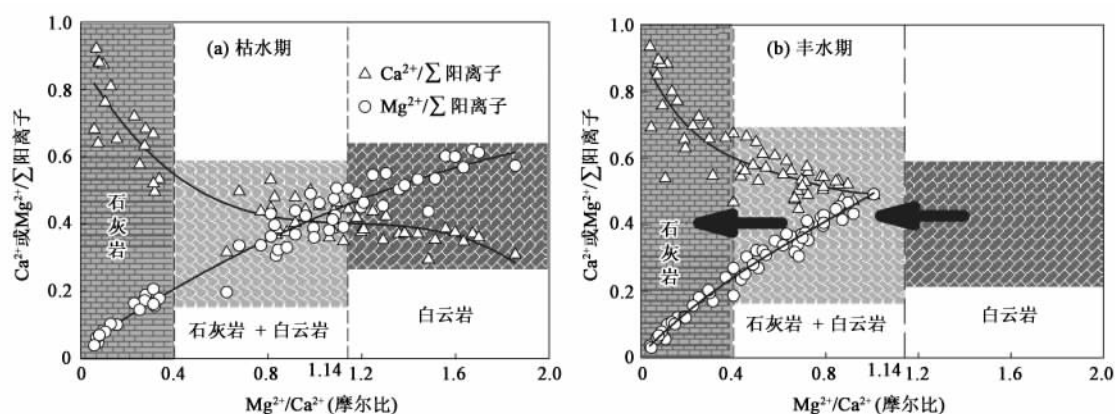


图2 $\text{Ca}^{2+}/\sum$ 阳离子和 $\text{Mg}^{2+}/\sum$ 阳离子与 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ (摩尔比)变化关系

Fig.2 Relationship between $\text{Ca}^{2+}/\sum$ cations, $\text{Mg}^{2+}/\sum$ cations and $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ (molar) in low-water period and high-water periods.

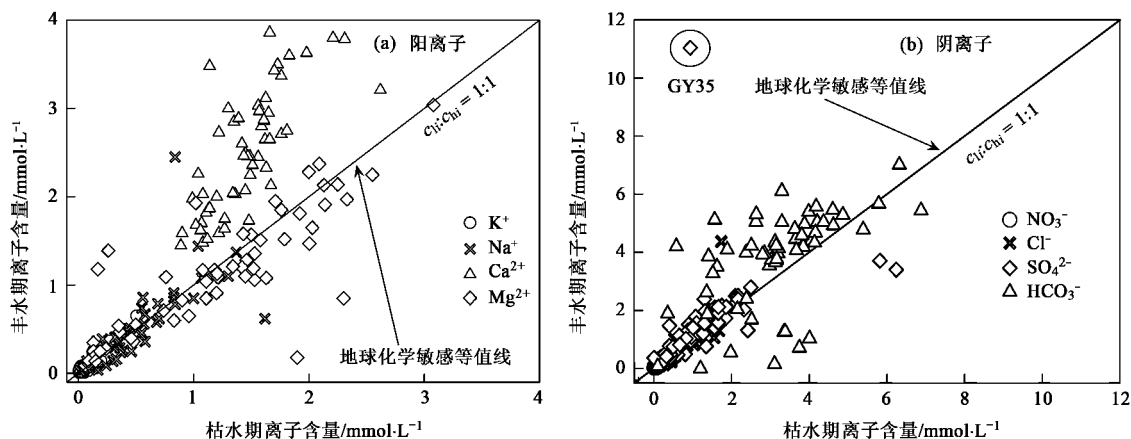
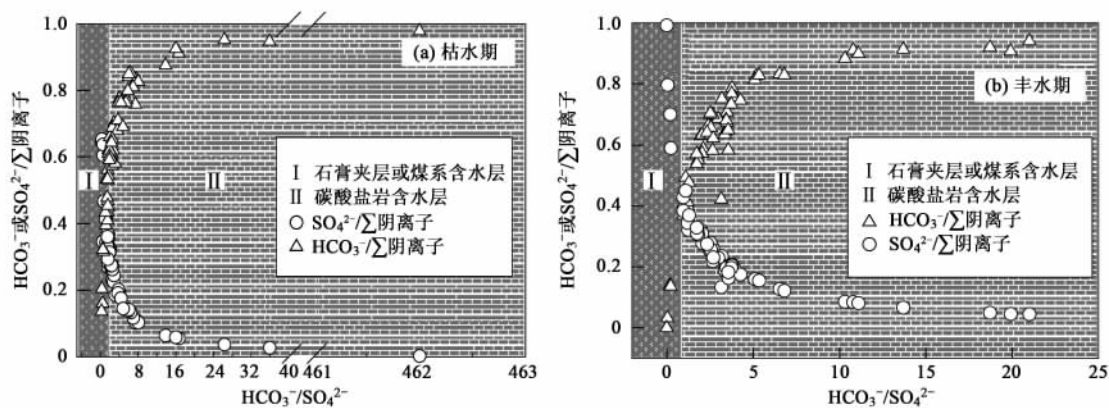


图3 贵阳市岩溶地下水系统枯水期和丰水期水化学特征变化对比

Fig. 3 Comparison variation of hydrochemistry in low-water with high-water periods in shallow karstic groundwater system in Guiyang City

图4 $\text{HCO}_3^-/\sum \text{阴离子}$ 和 $\text{SO}_4^{2-}/\sum \text{阴离子}$ 与 $\text{HCO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ (摩尔比) 关系Fig. 4 Relationship between $\text{HCO}_3^-/\sum \text{anions}$, $\text{SO}_4^{2-}/\sum \text{anions}$ and $\text{HCO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ (molar) in low-water period and high-water periods

和地表水入渗的影响, HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 含量和 $\text{HCO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值变化较为明显 (见图3和图4)。

2.2 地下水系统地球化学敏感性及其敏感因子

地下水的地球化学敏感性是地下水系统对自然和人类活动影响的敏感程度反映的固有属性。为更好地探讨岩溶地下水系统的地球化学敏感性及其敏感因子, 笔者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。地球化学敏感指数及敏感等值线概念类比于二维空间中点到直线距离, 笔者将枯水期和丰水期地下水系统中某元素的浓度值投影到二维坐标上, 将元素浓度的投影点 (c_{li} , c_{hi}) 偏离直线 $c_{li} = c_{hi}$ 的距离 (d_i) 可定量表征元素的地球化学敏感程度, 把 $d_i = 0$ 的也即是枯水期某元素含量 (c_{li}) 与丰水期某元素含量 (c_{hi}) 相同 (即 $c_{li} = c_{hi}$) 的直线定义为地球化学

敏感等值线。如图5, 即:

$$d_i = \frac{|c_{li} - c_{hi}|}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

式中, d_i 表示元素偏离直线 $c_{li} = c_{hi}$ 的距离, 亦表示元素的地球化学敏感性 (GSI_i); c_{li} 表示枯水期 (low-water period) 地下水系统中 i 元素含量; c_{hi} 表示丰水期 (high-water period) 地下水系统中 i 元素的含量。

将 $\frac{d_i}{\sqrt{2}}$ 定义为元素地球化学敏感指数 (GSI_i), 也

即地下水系统中元素相对浓度差表征元素地球化学的敏感程度, 将方程 (5) 改写成:

$$\text{GSI}_i = |c_{li} - c_{hi}| \quad (6)$$

式中, GSI_i 表示元素 i 地球化学敏感指数, 无量纲。

当 $\text{GSI}_i = 0$ 时表示枯水期和丰水期地下水系统中某元素含量相等, 即 $c_{li} = c_{hi}$, 元素表现出不敏感特征, GSI_i 值越大表示元素具有很强的地球化学敏感

性性. 研究区域地下水系统中元素的地球化学敏感性则用各元素的平均地球化学敏感指数表示.

根据贵阳市岩溶地下水系统中水化学特征及变化(图3),运用公式(5)计算出贵阳市不同岩性地下水系统中主量元素的地球化学敏感性指数,其结

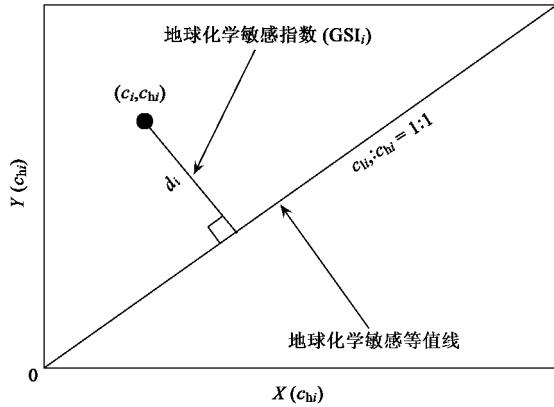


图5 地球化学敏感性指数及敏感等值线定义示意

Fig.5 Plot shows the definition of geochemical susceptibility index (GSI) and isosensitive line on geochemical susceptibility

果如表1.就研究区含水系统而言,不同岩性含水层中主量元素地球化学敏感性略有差别,但部分元素均表现出较强的地球化学敏感性.在碳酸盐岩含水层中,其中白云岩含水层元素地球化学敏感性为: $\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{NO}_3^- > \text{K}^+$;白云岩与石灰岩相间含水层元素地球化学敏感性为: $\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{K}^+$.由于丰水期石灰岩含水层中35号采样点(GY35)因受上游矿山废水污染而表现出 SO_4^{2-} 浓度异常特征[图3(b)],导致该含水层中 SO_4^{2-} 呈现极强的敏感性而与其他含水层有所不同,矿山废水的排放直接会导致地下水受到污染,该含水层元素地球化学敏感性则为: $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{NO}_3^-$.这也表明岩溶地区由于岩溶裂隙、管道和地下河发育、大气降水、地表水和地下水之间的快速转化和土层薄等特点,含水系统因缺乏必要保护层(土壤层或包气带)而易受到污染.

表1 贵阳市地下水系统中主量元素的地球化学敏感性指数

Table 1 Geochemical susceptibility index of major elements for shallow karstic groundwater system in Guiyang City

元素敏感指数	不同岩性的含水层/样品数				研究区下水系统/56
	白云岩/23	白云岩+石灰岩/15	石灰岩/9	碎屑岩/9	
阴离子	GSI_{Cl^-}	$\frac{0 \sim 0.35^{1)}}{0.07^{2)}}$	$\frac{0.01 \sim 0.48}{0.09}$	$\frac{0 \sim 0.16}{0.05}$	$\frac{0 \sim 1.86}{0.11}$
	$\text{GSI}_{\text{NO}_3^-}$	$\frac{0.01 \sim 0.10}{0.03}$	$\frac{0 \sim 0.09}{0.02}$	$\frac{0 \sim 0.06}{0.02}$	$\frac{0 \sim 0.12}{0.03}$
	$\text{GSI}_{\text{SO}_4^{2-}}$	$\frac{0 \sim 0.76}{0.17}$	$\frac{0 \sim 2.01}{0.32}$	$\frac{0.06 \sim 7.14}{1.16}$	$\frac{0.02 \sim 0.49}{0.19}$
	$\text{GSI}_{\text{HCO}_3^-}$	$\frac{0.08 \sim 2.13}{0.78}$	$\frac{0.01 \sim 2.51}{1.01}$	$\frac{0.08 \sim 2.09}{0.97}$	$\frac{0.02 \sim 2.56}{1.04}$
阳离子	GSI_{K^+}	$\frac{0.01 \sim 0.10}{0.02}$	$\frac{0 \sim 0.07}{0.02}$	$\frac{0 \sim 0.08}{0.03}$	$\frac{0 \sim 0.04}{0.01}$
	GSI_{Na^+}	$\frac{0 \sim 0.21}{0.05}$	$\frac{0 \sim 0.71}{0.12}$	$\frac{0.01 \sim 0.15}{0.05}$	$\frac{0.01 \sim 1.14}{0.16}$
	$\text{GSI}_{\text{Ca}^{2+}}$	$\frac{0.26 \sim 1.56}{0.67}$	$\frac{0.18 \sim 1.06}{0.68}$	$\frac{0.42 \sim 1.65}{0.83}$	$\frac{0.10 \sim 1.30}{0.80}$
	$\text{GSI}_{\text{Mg}^{2+}}$	$\frac{0 \sim 1.22}{0.21}$	$\frac{0.05 \sim 1.03}{0.24}$	$\frac{0.01 \sim 0.80}{0.20}$	$\frac{0 \sim 0.16}{0.07}$
主量元素地球化学敏感性	$\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{NO}_3^- > \text{K}^+$	$\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{K}^+$	$\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{NO}_3^-$	$\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{NO}_3^- > \text{K}^+$	$\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Mg}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{NO}_3^- > \text{K}^+$

1) 地球化学敏感指数变化范围; 2) 地球化学敏感指数均值

地表污染物未经土壤或包气带的自然净化作用直接通过岩溶裂隙管道进入而污染地下水系统或储存在地下空间中,从而表现出地球化学敏感性的异常.岩溶含水系统由于持水性较差,入渗系数大,地表和地下水水位季节性变化较大等特点,丰水期因

地表水位抬升而地表水补给地下水,受到污染的地表水体或污染物通过岩溶裂隙管道或地下河直接进入污染地下水系统,使得地下水系统在此时成为污染物的汇,然而在枯水期由于地表水位降低于地下水水位,地下水补给地表水,受污染和自然净化未

完全的地下水或携带储存在其中的污染物随着地下水补给排除地表后再次污染地表水,此时岩溶裂隙管道或地下水系统则成为污染的源,岩溶地区地下水与地表水交换频繁快速和相互补给的特征可能形成两者交叉污染或叠加污染的恶性循环.因此,岩溶地区地表水的保护及防止污染物直接排放将是防止地下水受到污染的有效途径,显得十分重要.

此外,在部分碎屑岩含水层中,不同的土地利用方式及农业活动会影响岩溶地下水水质、水文地球化学特征和敏感性^[25, 26],如农业活动中含氯农药的使用使残留的农药随地表入渗进入地下水系统导致地下水中 Cl^- 表现出较强的地球化学敏感性,其元素地球化学敏感性依次为: $\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{NO}_3^- > \text{K}^+$. 依据地球化学敏感指数的计算公式所计算出贵阳市地下水系统中主量元素地球化学敏感指数的大小,研究区岩溶地下水系统敏感因子中阳离子以 Ca^{2+} 最为敏感,平均敏感指数为 0.73,其次为 Mg^{2+} ,平均敏感指数为 0.19;阴离子中敏感因子为 HCO_3^- ,平均敏感指数为 0.92,其次为 SO_4^{2-} ,平均敏感指数为 0.37. 就研究区地下水系统而言,主量元素地球化学敏感性顺序依次为: $\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Mg}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{NO}_3^- > \text{K}^+$.

2.3 贵阳市岩溶地下水系统敏感区域分布

依据贵阳市岩溶地下水系统中元素地球化学敏感指数,笔者初步尝试采用元素地球化学敏感性最强的敏感因子 HCO_3^- 对贵阳市岩溶地下水系统地球化学敏感区域进行区划,如图 6 所示. 结合野外调查、人类活动影响以及水文地质特征等因素,将 $\text{GSI}_{\text{HCO}_3^-} < 0.5$ 的区域划为低敏感区, $0.5 < \text{GSI}_{\text{HCO}_3^-} < 1$ 的区域为中度敏感区, $\text{GSI}_{\text{HCO}_3^-} > 1$ 的区域为高敏感区.

研究区低敏感区面积较小,绝大部分地区处于中~高敏感区域,中~高敏感区域是自然与人类活动共同影响的结果. 自然环境对地下水系统敏感性影响表现在构造上岩溶管道裂隙发育、含水系统上覆土层薄甚至缺失等使其对环境变化表现出较强的敏感性特征,而在自然与人类活动的共同影响下地下水表现出很高的地球化学敏感性,尤其是受到城市污水排放污染的地表水体地区,如图 6 中 $\text{GSI}_{\text{HCO}_3^-} > 1$ 的区域,该区域的人类活动影响地下水系统主要表现在城市生活污水的排放,人口较为密集的地区较为明显. 此外,局部地区矿业活动中的污水排水

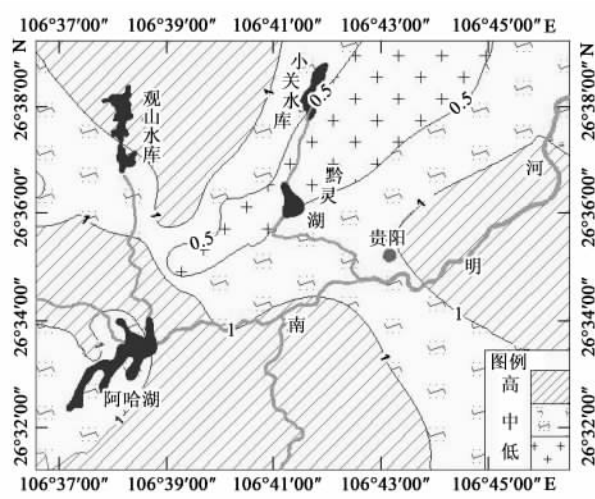


图 6 贵阳市岩溶地下水系统地球化学敏感区域分布

Fig. 6 Plot shows the distribution of geochemical-susceptibility zones of karstic groundwater system in Guiyang City

也是造成地下水系统地球化学敏感性增高的原因,如研究区西侧阿哈水库上游的矿业活动导致该地区地下水系统呈现高敏感性特征. 地球化学敏感区域分布图表明对该地区地表水及地下水的保护将显得十分重要且极为迫切. 且应加强地球敏感性较高区域的地表水、地下水保护和较少污染排放的直接排放. 对于地球化学敏感指数如何表征地下水系统敏感区域以及划分依据将是后续地下水系统地球化学敏感性研究关键的科学问题.

3 结论

(1) 岩溶地下水系统水化学阳离子以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主,阴离子以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主,元素表现出较高的地球化学敏感性. 岩溶地下水系统的敏感因子中阳离子以 Ca^{2+} 最为敏感,其次为 Mg^{2+} ,阴离子中敏感因子为 HCO_3^- ,其次为 SO_4^{2-} ,元素的地球化学敏感性大小依次为: $\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Mg}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{NO}_3^- > \text{K}^+$.

(2) 岩溶地下水系统易受到人类活动的影响,与人类活动密切相关的元素诸如与矿业活动相关的 SO_4^{2-} 和与农业活动相关的 Cl^- 在受影响的地下水系统中表现出较强的地球化学敏感性特征.

(3) 岩溶地下水系统地球化学敏感性研究表明:地表水和地下水之间频繁快速转换和相互补给,地下水系统可能成为地表水污染的汇和源,两者可形成交叉污染或叠加污染的恶性循环.

(4) 运用敏感性最强的敏感因子 HCO_3^- 对研究

区地下水系统地球化学敏感性进行区划, $GSI_{HCO_3^-} < 0.5$ 的区域为低敏感区, $0.5 < GSI_{HCO_3^-} < 1$ 的区域为中度敏感区, $GSI_{HCO_3^-} > 1$ 的区域为高敏感区. 研究区地球化学敏感区域分布显示该地区地表水和地下水保护工作的重要性和紧迫性. 对于地球化学敏感指数与地球化学敏感区域区划的关系尚需进一步研究.

致谢:本研究在样品采集过程中得到李明琴教授、李玲、穆启超、陶秀珍、龚超兵等同学的帮助,样品试验分析过程中得到中国科学院地球化学研究所赵志琦副研究员、黄荣贵高级工程师、安宁工程师等指导,在此一并表示感谢.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 万国江. 碳酸盐岩与环境(卷一)[M]. 北京: 地震出版社, 1995, 1-11.
- [4] 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.
- [5] 王焰新, 马腾, 郭清海, 等. 地下水与环境变化研究[J]. 地学前缘, 2005, **12**(4): 14-21.
- [6] 章程, 袁道先, 李强, 等. 典型表层岩溶动力系统的环敏感研究——以广西马山县弄拉峰丛洼地为例[J]. 水文地质工程地质, 2005, **32**(1): 78-80.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Mádl-Szőnyi J, Füle L. Groundwater vulnerability assessment of the SW Trans-Danubian central range, Hungary[J]. Environ Geol, 1998, **35**(1): 9-18.
- [10] 王焰新, 付素蓉. 武汉市第四系含水层地下水有机污染敏感性研究[J]. 中国地质大学学报, 2002, **27**(5): 616-620.
- [11] 姜志群. 地下水污染敏感性评价中 DRASTIC 法的应用[J]. 河海大学学报, 2001, **29**(2): 100-103.
- [12] Davis A, Long A, Wireman M. KARSTIC: a sensitivity method for carbonate aquifers in karst terrain[J]. Environ Geol, 2002, **42**(1): 65-72.
- [13] Doerfliger N, Jeannin P, Zwahlen F. Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools[J]. Environ Geol, 1999, **39**(2): 165-176.
- [14] Goldscheider N. Karst groundwater vulnerability mapping: application of a new method in the Swabian Alb, Germany[J]. Hydrogeol J, 2005, **13**(4): 555-564.
- [15] 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]. Sci Total Environ, 2006, **357**(1): 54-73.
- [16] 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.
- [17] 赵明华, 姜爱霞. 莱州湾南岸平原浅埋古河道带及冲积扇地下水水环境[J]. 环境科学, 2000, **21**(1): 57-61.
- [18] 郎赞超, 刘丛强, Satake H, 等. 贵阳地表水-地下水的硫和氯同位素组成特征及其污染物示踪意义[J]. 地球科学进展, 2008, **23**(2): 151-159.
- [19] 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, 2005, **16**(6): 826-832.
- [20] 杨桂芳, 姚长宏. 我国西南岩溶区地下水敏感性评价模型研究[J]. 自然杂志, 2003, **25**(2): 83-85.
- [21] 楚文海, 刘奇, 李江, 等. 基于 GIS 应用 DRASTIC 模型评价贵阳市地下水污染风险[J]. 地下水, 2007, **29**(1): 88-90.
- [22] 韩至均, 金占省. 贵州省水文地质志[M]. 北京: 地震出版社, 1996. 1-50.
- [23] 董志芬. 贵阳地区浅层岩溶地下水水文地球化学特征[D]. 贵阳: 贵州工业大学, 2005.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 章程, 袁道先. 典型岩溶地下河流域水质变化与土地利用的关系——以贵州普定后寨地下河流域为例[J]. 水土保持学报, 2004, **18**(5): 134-137.