

典型喀斯特表层岩溶带地下水化学特征 ——以贵州清镇王家寨喀斯特小流域为例

陈生华^{1,2,3}, 王世杰^{1,2}, 肖德安^{1,3,4}, 杨涛^{1,2,3}

1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院普定喀斯特生态与石漠化试验研究站, 贵州 普定 562100; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 4. 贵州省环境监测中心站, 贵州 贵阳 550002

摘要:以喀斯特小流域为研究尺度,对清镇市王家寨退耕还林(草)示范区内的9个表层岩溶泉进行了一个水文年的系统监测,并借助SPSS统计软件开展了泉点的聚类分析研究,旨在从常规水化学角度为流域退化生态环境的恢复与重建提供科学依据。从结果来看,虽然所有泉点的水化学类型均为HCO₃-Ca型,但是根据K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、F⁻、Cl⁻、NO₃⁻、HCO₃⁻、SO₄²⁻等指标的具体差异,还是可以将9个泉点分为3组:(1)位于流域上游分水岭处的S8、S9泉点,由于远离居民集聚区,受到人类活动的影响程度弱,泉水中EC和各主要离子的质量浓度均很低,[Ca²⁺]*与[HCO₃⁻]*的关系说明泉水流经地区的岩石类型主要为白云岩;(2)位于流域中部的S2、S3、S4、S5、S6和S7泉点,靠近居民点,受到人类活动的影响程度明显增强,泉水中EC和各主要离子的质量浓度也相应增大,[Ca²⁺]*与[HCO₃⁻]*具有与第一组泉水完全不同的特征,表明此组泉水流经地区的岩石类型为白云质灰岩;(3)位于流域下游的S1泉点,处于村寨下游,受到人类活动的影响最大,泉水中EC和各主要离子的质量浓度也很高,[Ca²⁺]*与[HCO₃⁻]*的关系与第二组泉点相似,但是[SO₄²⁻]*和[F⁻]*远高于前2组泉点,这可能是由于在泉水的运移路径上有富含石膏和氟的岩石存在。

关键词:表层岩溶带;喀斯特小流域;水化学特征;R型聚类分析

中图分类号: X142

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906(2010)09-2130-06

表层岩溶带是发育于浅层地表的一种岩溶现象,20世纪70年代由法国的Mangin在研究薄层泥质灰岩时提出,80年代中后期开展的“中国桂林岩溶水文地质研究”证明这一现象在我国南方巨厚纯碳酸盐岩地区也有普遍发育^[1]。它的存在会使典型的岩溶水文地质结构发生改变,在浅地表形成一个表层带岩溶水浅循环^[2]。大量的研究表明,这个浅循环中的岩溶动力学过程非常活跃,对环境的变化极其敏感。刘再华、袁道先等^[3]在广西桂林丫吉试验场利用自动仪器监测发现,表层岩溶水的pH值、电导率、水温、HCO₃⁻和Ca²⁺等地球化学指标具有明显的年季变化,甚至日变化。这种短时间尺度的变化规律对全球变化研究的碳循环模型中把一切地质作用(包括岩溶作用)列为长时间尺度作用提出了质疑^[2]。章程、曹建华^[4]在广西马山弄拉试验场的研究则发现,不同植被条件对表层岩溶泉的影响不同,与次生林区相比,灌丛区的表层岩溶泉更易受到地表环境变化的影响,物化指标的日变化幅度更大,具有较低的电导率,总体上岩溶作用强度也较弱。目前,我国西南喀斯特地区正在开展大规模的石漠化生态恢复治理,表层岩溶带所具有的这

种生态环境敏感性和短时间尺度的变化规律对于及时准确地评价阶段性石漠化治理恢复工作的成效和影响具有十分重要的意义。

因此,本文以清镇市退耕还林(草)示范区王家寨小流域为研究区,在杜学莲^[5]、余海等^[6]研究植被、土壤、小气候条件等环境因子的同时,系统监测了在流域内出露的表层岩溶泉的常规物化指标,以期通过对泉水化学组成的分析来确定影响泉水的主要因素,为下一步评价生态恢复治理效果、全面研究生态恢复过程中流域内环境因子的变化提供基础。

1 研究区概况

研究区为清镇市红枫湖镇王家寨小流域,位于贵州高原二级台面,地理坐标为东经106°02'05"—106°02'18",北纬26°31'45"—26°30'27",总面积2.21 km²(图1)。据1995至2004年清镇市红枫湖气象站资料统计:年平均气温14.4℃,年平均降水量1205.6 mm,典型的亚热带湿润季风气候。流域海拔1275~1460 m,整体地势中低周高,峰丛与洼地的面积比为1.65:1^[7],为典型的喀斯特浅碟状峰丛洼地。出露地层为中三叠统关岭组白云岩、灰岩、

基金项目:中国科学院科技支黔工程项目

作者简介:陈生华(1979年生),男,博士研究生,主要从事石漠化退化过程中表层岩溶带地下水化学演化特征研究。E-mail: peanutcd2005@yahoo.com.cn

收稿日期:2010-07-03

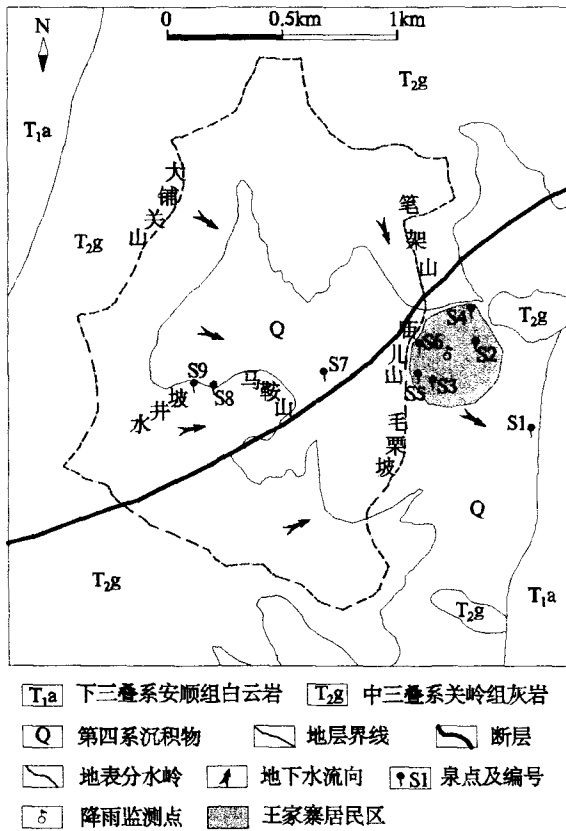


图1 水文地质略图及样点位置

Fig. 1 Hydro-geological map and location of the sampling points

泥质白云岩、泥质灰岩夹少量页岩、溶塌角砾岩和石膏，主要受南北向斜控制，西翼地层倾向 $106^{\circ}\sim 120^{\circ}$ ，倾角 $34^{\circ}\sim 43^{\circ}$ ；东翼地层倾向 $275^{\circ}\sim 290^{\circ}$ ，倾角 $32^{\circ}\sim 38^{\circ}$ 。发育有北东向次级断层。流域北、西、南3面形成封闭的地表分水岭，东部为出水断面，一般5—11月出现的季节性地表径流与以泉的方式排泄的地下水（岩溶裂隙水和管道水）汇合后向东流入红枫湖。土壤类型有黑色石灰土与黄壤2类^[6]。洼地以耕地为主，种植有水稻、玉米、西红柿等农作物；峰丛以灌木林和草地为主，生长有小叶鼠李(*Rhamnus davurica*)、过路黄(*Lysimachia christinae*)、小果蔷薇(*Rosa cymosa tratt*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)、竹叶椒(*Zanthoxylum planispinum*)、月月青(*Itea ilicifolia*)、粉枝玫(*Rubus biflorus*)、黄茅(*Heteropogon contortus*)、蒿(*Artemisia carvifolia*)、荩草(*Arthraxon hispidus*)等灌草类^[5]。由于距离村寨远近不同，人类活动的影响也相应地有强有弱，使得流域内各个部位的石漠化发育程度有较大差异。

2 研究方法

2006年3月至2007年8月，以月为周期，系统地采集了9个泉点的水样(图1)，共获得162个样

品，分析测定样品的pH、电导率(EC)、水温(*t*)和主要溶解态元素(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-})的质量浓度。现场采样时，用法国制Radiometer便携式多参数仪(pIONner 65)测定pH、EC和水温，精度分别为0.01 pH、 $0.1 \mu S \cdot cm^{-1}$ 和 $0.01^{\circ}C$ ；用HCl滴定法分析了泉水中 HCO_3^- 的质量浓度；用 $\varnothing=50 \text{ mm}$ Millipore滤头、 $0.45 \mu m$ 醋酸纤维滤膜过滤水样后装入100 mL高致密聚乙烯瓶密封于暗箱中保存。用于测定阳离子的水样还需立即加入超纯 HNO_3 ，将样品酸化至 $pH < 2$ 。每次降雨时，均在降雨量监测点采集了氢氧同位素水样，最终测定时，仅按月随机选取其中的12个。泉水的氢氧同位素样品只采集了2006年8月的样品。氢氧同位素样品不过滤直接装入5 mL聚乙烯瓶中，用parafilm封口后放入暗箱保存。水样带回实验室后，用AAS(原子吸收光谱PE-601)测定阳离子的质量浓度，用离子色谱(ICS-90)测定阴离子的质量浓度，用连续流质谱(Isoprime-GC)测定氢氧同位素组成。

3 数据分析与讨论

3.1 氢氧同位素特征

在地下水循环过程中，除土壤、岩石等含水介质的影响外，补给来源对地下水的化学组成有着极其重要的意义，它赋予地下水最初的化学特征，是后续演化的物质基础。因此，确保补给来源相同是开展地下水化学对比研究、推测地下水化学演化过程的前提条件，这通常可利用氢、氧同位素来判断。从图2中可以看到，研究区的氢、氧同位素特征与中国大陆和西南地区的特征有些不同，其大气降水线的斜率和截距均高于二者^[8-9]，更接近于全球大气降水线。此外，泉水样品与当地大气降水的氢氧同

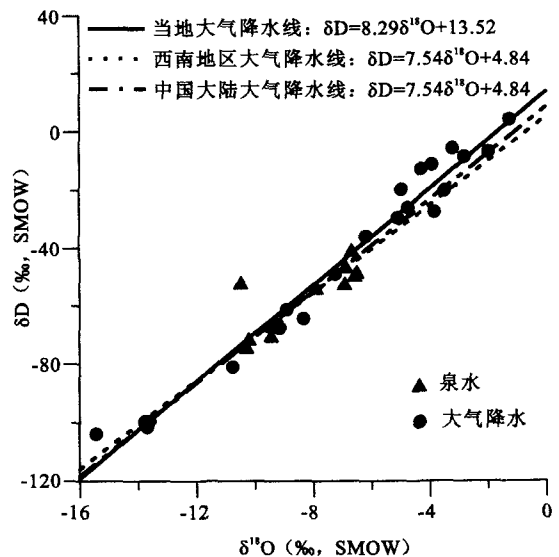


图2 研究区大气降水氢氧同位素关系

Fig. 2 Relationship between $\delta^{18}O$ and δD of precipitation in study area

位素特征一致,说明 9 个泉点的补给方式相同,均为大气降水补给。

3.2 水化学特征

阳离子的总物质的量浓度变化范围为 2.07~5.40 mol·L⁻¹,以 Ca²⁺和 Mg²⁺为主,分别占总阳离子浓度的 68%和 30%;阴离子的总物质的量浓度变化范围为 3.58~9.86 mol·L⁻¹,以 HCO₃⁻和 SO₄²⁻为主,分别占总阳离子浓度的 83%和 11%。整体上离子的浓度具有 Ca²⁺>Mg²⁺>K⁺>Na⁺和 HCO₃⁻>SO₄²⁻>NO₃⁻>Cl⁻>F⁻的特征。

图 3 给出了所有泉水样品的水化学分类特征。可以看到,除一个样品落在了 SO₄-Ca 区域内,其余样品均为 HCO₃-Ca 型,反映了碳酸盐岩对流域水化学特征的控制作用。

3.3 聚类分析

作为一种十分有效和便捷的统计方法,聚类分析已被学者们广泛地应用于水化学研究中,用于大量数据的分析以帮助寻找元素间的内在联系,从而为探讨土壤、植被、岩性等环境因素是如何影响地下水的化学组成,可确定控制因子的方向和提供依据^[10-11]。需要进一步指出的是,由于影响水化学特征的因素多种多样,应用聚类分析时需要将样品精心分组以减少干扰。从以往的研究来看,在区域性地下水化学研究中,当取样时间间隔较小时,通常不需要考虑时间因素对聚类结果的影响,可以选取所有样品直接聚类^[12]。但在本次研究中,由于流域狭小,岩性较均一,时间因素对水化学组成的影响

非常明显,如枯水期和丰水期的降雨量完全不同,植被特征也有显著差异等,这使得直接利用所有样品进行聚类分析的方法毫无意义。

因此,在实际应用时,本文按月为单位将所有样品分为 12 组,并利用 SPSS 17.0 统计软件对每组样品的 *t*、EC、pH、F⁻、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺数据做了 Z-score 标准化处理。最终 R 型聚类结果显示:除 2006 年 5 月、2007 年 1 月、2007 年 3 月各泉点间聚类结果差别较大外(枯水期),其余月份的结果均与 2007 年 7 月相似:所有样品均可分为 A、B、C 3 组(图 4)。

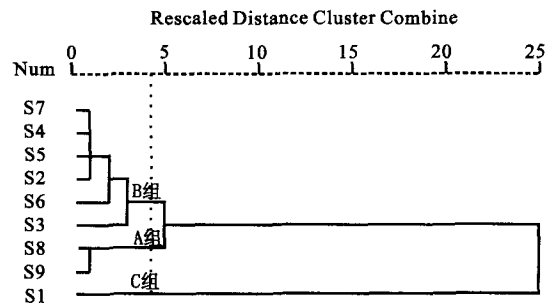


图 4 2007 年 7 月泉点聚类树状图

Fig. 4 Dendrogram of the spring samples collected in Jul. 2007

各组泉水样品的水化学参数统计结果见表 1。从表中数据来看,分组结果反映了 9 个泉点在水化学组成上的差异:(1) K⁺、Na⁺、Cl⁻、NO₃⁻的质量浓度: B、C 组>A 组;(2) Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻的质量浓度: Ca²⁺、Mg²⁺均为 C 组>B 组>A 组, HCO₃⁻为

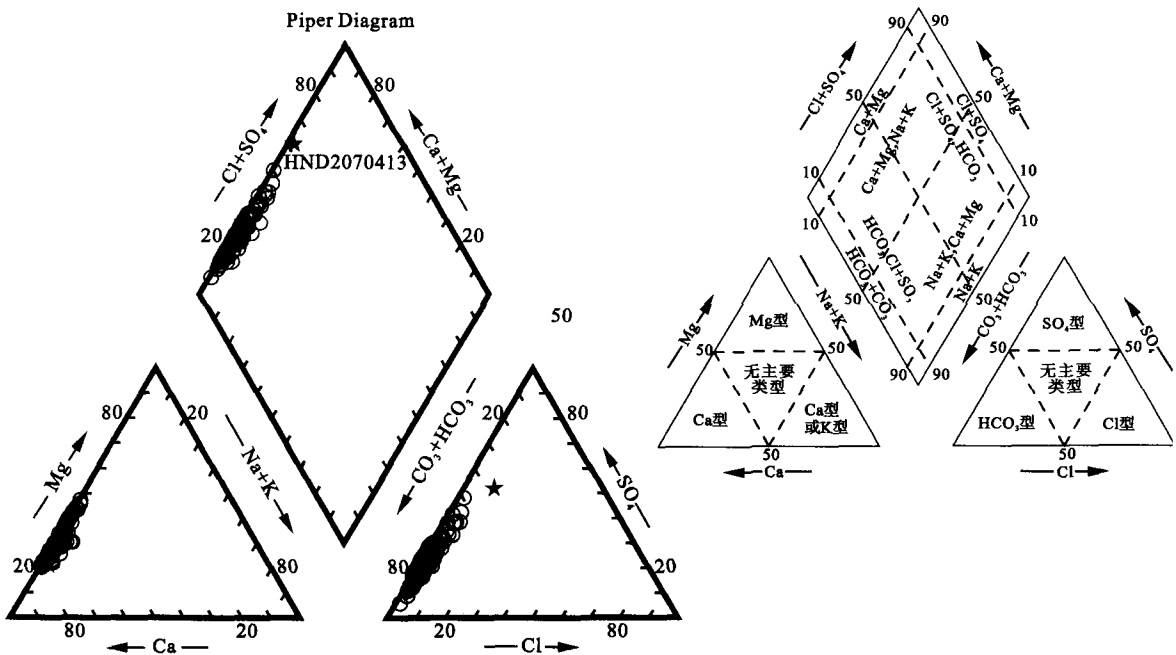


图 3 162 个泉水样的 piper 图

Fig. 3 Piper diagram of 162 spring samples^[10]

表 1 泉水化学组成统计表

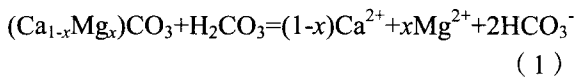
Table 1 Statistical table of chemical compositions of spring simples

分组指标	A 组(2 个泉点)		B 组(6 个泉点)		C 组(1 个泉点)
	范围	均值	范围	均值	真值
$t/^\circ\text{C}$	14.50~14.6	14.55	16.35~18.35	17.16	16.44
pH	7.43~7.47	7.45	7.06~7.56	7.31	6.97
$\gamma(\text{EC})/(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	380.3~384.6	382.5	403.0~579.0	465.8	885.5
$\rho(\text{F}^-)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.07~0.09	0.08	0.05~0.13	0.08	0.39
$\rho(\text{NO}_3^-)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.01~0.97	0.49	9.66~16.48	12.77	29.83
$\rho(\text{Cl}^-)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.10~0.18	0.14	1.63~5.74	3.14	11.19
$\rho(\text{SO}_4^{2-})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	52.81~58.99	55.9	22.77~61.62	42.83	160.2
$\rho(\text{HCO}_3^-)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	234.6~237.6	236.1	199.50~305.7	228.5	314.8
$\rho(\text{K}^+)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	-	-	0.06~0.47	0.19	1.19
$\rho(\text{Na}^+)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.34~0.36	0.35	0.48~1.34	0.73	4.88
$\rho(\text{Ca}^{2+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	72.85~74.17	73.51	73.84~110.40	89.44	132.2
$\rho(\text{Mg}^{2+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	25.91~26.29	26.1	14.00~21.75	17.83	33.67

C 组>A、B 组；(3) SO_4^{2-} 和 F^- 质量浓度：C 组>A、B 组。

韩贵琳^[13]、贾亚男等^[14]在贵州的研究表明，随着人类活动的加剧，地下水中 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- 的质量浓度也会随之增加。从空间位置来看，A 组泉点位于小流域上游分水岭处，远离居民聚居区，人类活动强度较轻，B、C 组泉点位于流域中、下部，沿途受到农田灌溉和居民生活用水影响，人类活动强度较重，反映到水化学组成上就表现为 B、C 组泉水中的 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- 的质量浓度远高于 A 组泉水。

地下水 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 的质量浓度间关系与碳酸盐岩的种类有关。根据碳酸盐岩侵蚀方程：



由化学反应计量关系可知， $[\text{Ca}^{2+}]/[\text{HCO}_3^-]=1/2$

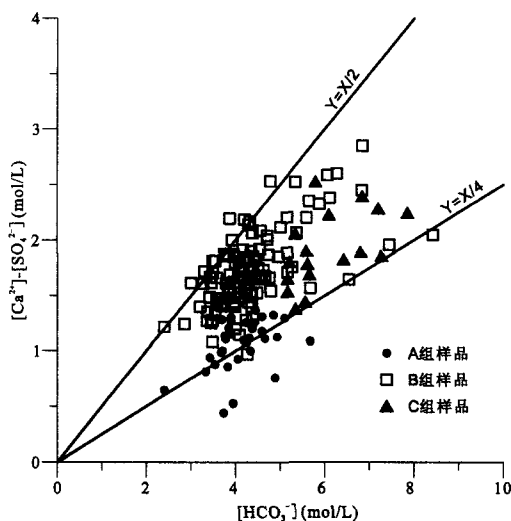


图 5 $[\text{Ca}^{2+}]-[\text{SO}_4^{2-}]$ 与 $[\text{HCO}_3^-]$ 关系图

Fig.5 Relationship between $[\text{Ca}^{2+}]-[\text{SO}_4^{2-}]$ and $[\text{HCO}_3^-]$

和 $[\text{Ca}^{2+}]/[\text{HCO}_3^-]=1/4$ 分别代表了方解石和白云石的碳酸侵蚀，二者之间的区域则反映了过渡岩性的碳酸侵蚀作用^[15]。考虑到硫酸盐矿物溶解的影响， $[\text{Ca}^{2+}]^*=[\text{Ca}^{2+}]-[\text{SO}_4^{2-}]$ ($\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)被单独求出。从图 5 可见，A、B 和 C 组样品具有明显不同的分布区：A 组样品分布在 $[\text{Ca}^{2+}]^*/[\text{HCO}_3^-]=1/4$ 两边，说明该组泉水主要受白云石侵蚀控制；而 B、C 组位于 $[\text{Ca}^{2+}]^*/[\text{HCO}_3^-]=1/2$ 和 $[\text{Ca}^{2+}]^*/[\text{HCO}_3^-]=1/4$ 之间，则可能与白云石和方解石溶解共同控制。

SO_4^{2-} 可能是来自酸沉降，也可能是由硫酸盐类矿物侵蚀产生。由于流域很小，大气输入的 SO_4^{2-} 在各泉点间不应出现显著差异，因此，C 组远高于 A、B 组可能与 C 组泉点的补给途径有关，反映出在 C 组泉点的补给路径上有富含石膏和氟的岩层。F 的来源与此类似。

4 结论

流域内的表层岩溶泉均具有 HCO_3-Ca 型水化学相，但在 R 型聚类分析的帮助下，仍然可根据 T、EC、pH、 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的具体差异将其分为 3 组。这主要是由于分布于流域不同位置的表层岩溶泉受到人类活动的影响程度有所不同，同时，也与地下水运移过程中所接触的岩石类型有关：

(1) A 类泉点：泉点 S8、S9，位于小流域上游分水岭处，远离居民聚集区，人类活动较弱，泉水中 EC 和各主要离子的质量浓度最低， $[\text{Ca}^{2+}]^*$ 与 $[\text{HCO}_3^-]$ 的关系说明泉水流经地区的岩石类型主要为白云岩；

(2) B 类泉点：泉点 S2、S3、S4、S5、S6 和 S7，位于流域中部，靠近居民点，人类活动增强，EC 和各主要离子的质量浓度中等， $[\text{Ca}^{2+}]^*$ 与 $[\text{HCO}_3^-]$

具有与 A 类泉点完全不同的特征,表明此组泉水流经地区的岩石类型为白云质灰岩;;

(3) C 类泉点: 仅有泉点 S1, 位于村庄下游, 人类活动最强, EC 和各主要离子的质量浓度也最大, $[Ca^{2+}]^*$ 与 $[HCO_3^-]$ 的关系与第二组泉点相似, 但是 $[SO_4^{2-}]$ 和 $[F^-]$ 远高于前两组泉点, 可能是由于在地下水的运移过程中流经了富含石膏和氟的岩层。

参考文献:

- [1] 袁道先. 论岩溶环境系统[J]. 中国岩溶, 1988, 7(3): 179-186.
YUAN Daoxian. On karst environment system[J]. *Carsologica Sinica*, 1988, 7(3): 179-186.
- [2] 蒋忠诚, 袁道先. 表层岩溶带的岩溶动力学特征及其环境和资源意义[J]. 地球学报, 1999, 20(3): 302-308.
JIANG Zhongcheng, YUAN Daoxian. Dynamics features of the epikarst zone and their significance in environments and resources[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1999, 20(3): 302-308.
- [3] 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.
LIU Zaihua, YUAN Daoxian. Features of geochemical variations in typical epikarst systems of China and their environmental significance[J]. *Geological Review*, 2000, 46(3): 324-327.
- [4] 章程, 曹建华. 不同植被条件下表层岩溶泉动态变化特征对比研究: 以广西马山县弄拉兰电堂泉和东旺泉为例[J]. 中国岩溶, 2003, 22(1): 1-5.
ZHANG Cheng, CAO Jianhua. Seasonal and diurnal variation of physico-chemistry of typical epikarst springs under different vegetation-A case study of Landiantang Spring and Dongwang Spring at Nongla Village, Mashan County, Guangxi[J]. *Carsologica Sinica*, 2003, 22(1): 1-5.
- [5] 杜学莲, 王世杰, 葛永罡, 等. 喀斯特石漠化过程的植物叶片 $\delta^{13}C$ 值变化及其环境分析[J]. 自然科学进展, 2008, 18(4): 413-423.
DU Xuelian, WANG Shijie, GE Yonggang, et al. Environment and $\delta^{13}C$ values of the foliar of karst rocky desertification[J]. *Progress in Natural Science*, 2008, 18(4): 413-423.
- [6] 余海. 喀斯特丘原区石漠化过程中土壤退化的表征与分析: 以清镇王家寨小流域为例[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2007.
YU Hai. The Characterization and Analysis of Soil Degradation in the Process of Karst Rocky Desertification: A case of Wangjiazhai Catchments in Guizhou Qingzhen Area[D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [7] 周梦维. 喀斯特石漠化景观的空间因子分析及生态优化途径初探: 以贵州清镇王家寨小流域为例[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2007.
ZHOU Mengwei. Spatial Factor Analysis and Optimization Study of Karst Rocky Desertification Landscape in Wangjiazhai Catchments, Guizhou[D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [8] 郑淑慧, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素的研究[J]. 科学通报, 1983, 28(13): 801-806.
ZHENG Shuhui, HOU Fagao, NI Baoling. Discussion on features of δD and $\delta^{18}O$ of China atmospheric precipitation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1983, 28(13): 801-806.
- [9] 刘进达, 赵迎昌, 刘恩凯. 中国大气降水稳定同位素时空分布规律探讨[J]. 勘察科学技术, 1997, 3: 34-39.
LIU Jingda, ZHAO Yingchang, LIU Enkai, et al. Discussion on the stable isotope time-space distribution law of China atmospheric precipitation[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 1997, 3: 34-39.
- [10] GÜLER C, THYNE G D, MCCRAY J E, et al. Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data[J]. *Hydrogeology Journal*, 2002, 10(4): 455-474.
- [11] DREVER J I. The geochemistry of nature waters: surface and ground-water environments[M]. 3th ed. London: Prentice-Hall, 1997: 436.
- [12] GAO S Q, CHI B M, DAI C L, et al. Application of cluster Analysis in hydrochemical composition classifications-case study of middle reaches of Yinma river[J]. *Journal of Geoscientific Research in Northeast Asia*, 2005, 8(1/2): 94-97.
- [13] 韩贵琳, 刘丛强. 贵州喀斯特地区河流的研究: 碳酸盐岩溶解控制的水文地球化学特征[J]. 地球科学进展, 2005, 20(4): 394-406.
HAN Guilin, LIU Congqiang. Hydrogeochemistry of rivers in Guizhou Province, China: constraints on crustal weathering in Karst terrain[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(4): 394-406.
- [14] 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.
JIA Yanan, YUAN Daoxian. The impact of land use change on karst water in Shuicheng Basin of Guizhou province[J]. *Acta Geographica SINICA*, 2005, 20(4): 394-406.
- [15] WANG Yanxin, GUO Qinghai, SU Chunli, et al. Strontium isotope characterization and major ion geochemistry of karst water flow, Shentou, northern China[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 328(3/4): 592-603.

The hydrochemical characteristics of the epikarst zone: a case study on Wangjiazhai karst catchment in Qinzhen city, Guizhou province

CHEN Shenghua^{1,2,3}, WANG Shijie^{1,2}, XIAO Dean^{1,3,4}, YANG Tao^{1,2,3}

1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, 550002, China;

2. Puding Experimental Research Station of Karst Ecology and Desertification, Puding 550002, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Guizhou Environmental Monitoring Center, Guiyang 550002, China

Abstract: In this paper, we monitored 9 epikarst springs for a hydrological year in Wangjiazhai of Qinzhen City in Guizhou Province, where farmlands were converted to forestry and pasture, and carried out a clustering analysis with SPSS statistical software from the perspective of conventional water chemistry to provide scientific bases for the restoration and reconstruction of degraded watershed. From the results, although the types of water chemistry of all springs were $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, the 9 springs could be divided into 3 groups according to the specific differences in indicators like K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , F^- , Cl^- , NO_3^- , HCO_3^- and SO_4^{2-} (1) S8 and S9 on upper watershed and free from the influence of human activities, where EC and the concentration of major ions in springs were very low and the relationship between $[\text{Ca}^{2+}]$ and $[\text{HCO}_3^-]$ demonstrated that the region consisted mainly of dolomite rocks. (2) S2、S3、S4、S5、S6 and S7 on middle watershed and near residential areas, where EC and the concentration of major ions in springs were high and the relationship between $[\text{Ca}^{2+}]$ and $[\text{HCO}_3^-]$ was different from that in group 1, demonstrating a transition of rock types from dolomite rocks to limestones. (3) S1 on lower watershed and highly influenced by human activities, where EC and the concentration of major ions in springs were very high, the relationship between $[\text{Ca}^{2+}]$ and $[\text{HCO}_3^-]$ was similar to that of group 2, but $[\text{SO}_4^{2-}]$ and $[\text{F}^-]$ were higher than those in the other groups, demonstrating the possible existence of rocks rich in gypsum and fluorine in the migration path.

Key words: epikarst zone; karst catchment; Hydrochemical characteristics; R-cluster analysis