

# 基于因子分析的岩溶地下水水质影响因素研究

——以毕节市大方县南部为例

李雪莲,朱昱桦,华兴,邬晓芳,姜福

(贵州省地质调查院,贵州 贵阳 550081)

**[摘要]**为了解研究区岩溶地下水水质形成及离子质量浓度空间变异影响因素,以毕节市大方县南部为研究区,采用因子分析方法对56组水样进行分析,得到基于研究区岩溶地下水水质形成及其影响的4组因子(F1、F2、F3、F4):F1以TH、TDS、COD、Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、F<sup>-</sup>为主,代表了碳酸盐岩及膏盐矿物的充分溶解对水质的影响;F2以游离CO<sub>2</sub>、Mg<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>为主,反映了碳酸盐岩中白云石矿物的溶解对水质的影响;F3以Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>为主,代表了盐岩溶解、大气降水对水质的影响;F4以pH、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>为主,揭示了人类生活污水和农业灌溉污水对岩溶地下水水质的影响。以上4种因子可以解释研究区岩溶地下水水质影响因素的80%以上。

**[关键词]**岩溶地下水;空间差异;因子分析;毕节市

**[中图分类号]**P641.134;P641.12 **[文献标识码]**A **[文章编号]**1000-5943(2021)04-0449-07

贵州省是全国岩溶发育最为广泛、岩溶地下水资源最为丰富的地区之一(罗维等,2014;杨荣康等,2017;江峰等,2019)。由于岩溶区特殊的地质条件制约,导致水资源时空分布不均、地域性及季节性缺水严重、岩溶生态环境脆弱,从而制约了地区社会经济的发展(张彦林等,2006;袁道先等,2007;杨平恒等,2013)。岩溶区特有的地表-地下双层结构,落水洞、竖井和天窗等岩溶地貌发育,使地表污染物极易直接进入岩溶含水层,严重威胁当地的饮水安全(卢丽等,2015)。为合理地开发利用及保护岩溶水资源,掌握岩溶地下水水质及影响因素非常必要。岩溶地下水水质研究涉及到变量多,变量间关系错综复杂,采用常规方法识别变量间的相互关系难度较大。因子分析法是一种降维处理的多元统计分析方法,其基本思想是通过对变量的相关系数矩阵的内部结构进行分

析,从中找出少数几个能够控制原始变量的公共因子,从而达到简化变量、降低变量维数和对原始变量再解释及命名的目的(卢丽等,2015;袁建飞等,2016;张路遥,2018)。

近年来,国内外学者利用因子分析法进行岩溶地下水水文地球化学研究(Helstrup, 2007; Cloutier et al., 2008; 蒋勇军等, 2009; 杨平恒等, 2010; 张东等, 2011; 鲁守刚等, 2014; 袁建飞等, 2016),在水化学演化规律、水化学组分来源及水质影响因素的研究方面取得了较好的成果。本研究以贵州省毕节市大方县南部岩溶地下水为研究对象,对研究区水样的水化学组分进行因子分析,旨在揭露研究区岩溶地下水水质的影响因素及影响程度,为岩溶区的岩溶地下水合理开发利用管理、污染防治和岩溶生态环境保护等提供科学依据。

**[收稿日期]**2021-05-03 **[修回日期]**2021-09-02

**[基金项目]**中国地质调查局地质调查项目乌蒙山区水文地质环境地质调查、1:5万水文地质环境地质调查(牛场坡幅)(编号12120113052500、水[2013]01-008-013)资助。

**[作者简介]**李雪莲(1983—),女,工程师,主要从事水工环地质工作,E-mail:48503479@qq.com。

**[通讯作者]**朱昱桦(1989—),男,工程师,主要从事水工环地质、地球化学、岩浆与成矿作用等相关方面的工作,E-mail:zhuyuhau23@163.com。

# 1 研究区概况

研究区位于贵州省毕节市大方县南部[图 1 (a)],地理坐标范围为东经 105°30'00"~105°45'00",北纬 26°50'00"~27°00'00"之间,行政隶属于大方县、织金县、纳雍县,涉及的乡镇主要包括大方县牛场乡、织金县金龙乡和纳雍县老凹坝镇。

区内为高海拔低纬度区,属于亚热带湿润季风气候。多年平均气温约 13.2℃,年平均降雨量 1 120.8~1 188.9 mm,年平均蒸发量 1 189 mm。乌江上游支流六冲河流经研究区,为当地最低排泄基准面。

研究区处于贵州一级高原面(威宁、赫章一带)向中部二级高原面(遵义、贵阳一带)过渡的斜坡地带,地势北西、南东高,平均海拔约 1 450 m,最高点位于研究区北西侧,海拔 1 820 m,最低位于东部建于六冲河上的洪家渡水库,海拔 1 100 m。峰丛洼地、峰丛谷地为区内主要的地貌组合类型,南东部局部为溶丘洼地、溶蚀-侵蚀地貌。

区内出露地层由老到新为:古生界二叠系,中生界三叠系、侏罗系和新生界第四系。碳酸盐岩地层出露面积约占研究区总面积的 84%,主要岩性为灰岩、泥灰岩、白云质灰岩、白云岩和泥质白云岩。根据地层岩性、地下水赋存条件和径流特征(图 1b),研究区地下水分为碳酸盐岩类岩溶水、基岩裂隙水和第四系孔隙水三类;碳酸盐岩类岩溶水分布广泛,其含水岩组以三叠系灰岩、白云岩和白云质

灰岩为主,含水介质以溶洞、裂隙和管道为主,出露泉水及地下河流量为 0.02~287.00 L/s;基岩裂隙水分布面积小,主要集中出露于石板寨、包营一带,老凹镇北西有零散分布,含水岩组主要为三叠系砂岩、粘土岩,含水介质以层间裂隙、风化裂隙和构造裂隙为主,出露泉水的流量为 0.01~3.55 L/s。第四系孔隙水零星分布,基本无供水意义。

研究区矿产资源匮乏,以农业生产为主导产业。粮食作物主要有玉米、小麦、水稻、大豆、马铃薯和高粱,经济作物主要有烤烟、油菜和辣椒。区内人口密度大,垦殖率较高,但大部份地段土层薄,土壤层次缺失,土体结构破坏严重,土壤养分流失,肥力降低。

# 2 数据来源

为研究岩溶地下水水质影响因素,近年对研究区共采集岩溶地下水水样 56 组,采样点位见图 1(b)。采样原则为:选取流量较大、可能成为农村饮水安全供水水源点的地下河出口、岩溶泉、地下河天窗等进行取样。取样方法为:选用 350 mL 的聚乙烯塑料瓶,预先用蒸馏水清洗干净,采样时用水样润洗取样瓶 3 遍,再将取样瓶放入泉水中装满,水下盖紧瓶盖。所有水样当日用 0.45 μm 的微孔滤膜进行抽虑,以便用于阴、阳离子的测试,具体操作过程可参考袁建飞等(2016)。所有样品测试在贵州黔北建筑实验测试有限公司进行,阴阳离子测试精度±5%。

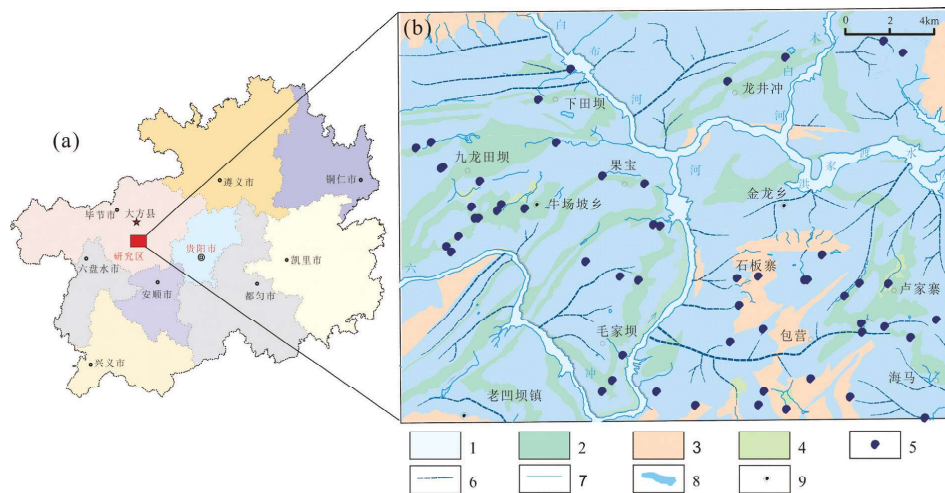


图 1 研究区地理位置图(a)和采样点位图(b)

Fig. 1 Location Map of the study area (a) and sampling points (b)

1—碳酸盐岩含水岩组;2—碳酸盐岩夹碎屑岩含水岩组;3—碎屑岩含水岩组;4—松散岩含水岩组;5—取样点;6—地下河管道;7—河流;8—水库;9—居民地

### 3 结果与分析

#### 3.1 水化学特征

为了突出因子分析在岩溶地下水水质影响因素研究中的作用,表征地下水离子的空间差异性,本文在不区分含水岩组的情况下统计了研究区样品的水化学特征,结果显示:研究区地下水主要离

子组成依次有  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 等(表1)。其中,阳离子以  $\text{Ca}^{2+}$ (81.13 mg/L)为主,次为  $\text{Mg}^{2+}$ (26.32 mg/L),而  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 质量浓度较低,分别为 2.03 mg/L、1.96 mg/L;阴离子以  $\text{HCO}_3^-$ (270.92 mg/L)为主,其次为  $\text{SO}_4^{2-}$ (61.98 mg/L), $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 质量浓度较低,分别为 25.71 mg/L、7.50 mg/L。研究区地下水化学类型主要为  $\text{HCO}_3-\text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3-\text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型,两者占样品总数的 80%,其次为  $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4-\text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型。

表1 地下水水质统计结果

Table 1 Statistical results of groundwater quality

项目	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{NO}_3^-$	TDS	pH
平均值	81.13	26.32	2.03	1.96	7.5	61.98	270.92	25.71	349.76	7.39
最小值	29.31	4.18	0	0	0.95	11	94.45	1	106.95	6.9
最大值	223.29	67.44	13.9	18	34.05	530	507.05	68	981.15	8.1
标准差	27.92	15.63	2.8	3.18	7.78	75	88.76	15.69	138.09	0.25
CV(%)	34.41	59.39	138.06	162.06	103.81	121.01	32.76	61.03	39.48	3.41

注:pH 值为无量纲,其它项目单位为 mg/L;TDS 为固体总溶解度;CV 为变异系数,表征空间差异性。下同。

#### 3.2 水化学组分空间变异性

研究区地下水水质统计结果(表1)表明,除 pH、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、TDS 空间差异性较小外,其余组分质量浓度的空间差异大,特别是  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  的质量浓度体现出明显的空间变异特征。

pH 值变动范围为 6.9 ~ 8.1,变异系数为 3.41%;TDS 变动范围为 106.95 ~ 981.15 mg/L,变异系数为 39.48%。pH 值与 TDS 空间差异性小,符合岩溶地下水弱碱性淡水的性质。

$\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度变异系数分别为 32.76%、34.41%,空间差异性较小。地下水中  $\text{HCO}_3^-$  的主要来源是  $\text{CO}_2$  参与的各种碳酸盐岩(灰岩、白云岩等)的溶解, $\text{Ca}^{2+}$  的来源主要是碳酸盐岩的溶解,可受农业污染的影响(Aiuppa et al., 2003; Negrel, 2003; Negrel, 2005; Brenot et al., 2008)。

$\text{Mg}^{2+}$  质量浓度变异系数为 59.39%。 $\text{Mg}^{2+}$  的主要来源是碳酸盐岩的溶解,同时受农业污染以及大气的输入的影响(Aiuppa et al., 2003; Negrel, 2005; Brenot et al., 2008)。

$\text{NO}_3^-$  质量浓度变异系数为 61.03%。地下水中的  $\text{NO}_3^-$  主要来源于人为活动的输入,特别是农业中化肥的使用、生活废水、动物和人类排泄物的排放等是其主要影响因素(Aiuppa et al., 2003; Edmunds et al., 2003; Valdes et al., 2007)。

$\text{Cl}^-$  质量浓度变异系数大(103.81%),表现出强烈的空间变异性。 $\text{Cl}^-$  来源可分为三方面,一是大气降水,主要为雨水中海盐、含 HCl 工业废气的溶解;二为水岩作用,即盐岩矿床和其他氯化物沉积物的溶解;三为人类活动的影响,包括农业活动中化肥的使用、生产、生活废水排放,如动物和人类排泄物排放等(Negrel et al., 2003; Valdes et al., 2007; 蒋勇军等, 2009)。

$\text{SO}_4^{2-}$  质量浓度变异系数为 121.01%,空间变异性强烈。 $\text{SO}_4^{2-}$  一方面来源于水岩作用(含硫酸盐矿物的溶解),另一方面受人为活动的影响,包括含硫酸盐化肥的使用、工业废气的排放等(Negrel, 2005; Valdes et al., 2007)。

地下水中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  质量浓度变异系数分别为 138.06%、162.06%,空间差异性最大。 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  的来源主要为水岩作用(含  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  矿物的溶解),同时还受离子置换、人类活动(生活废水排放及化肥使用)以及大气降水的影响(Aiuppa et al., 2003; Valdes et al., 2007; Brenot et al., 2008)。

#### 3.3 数据分析

##### 3.3.1 分析原理及方法

基本原理为:通过相关分析,根据相关性大小对各参数进行分组,同组内参数之间的相关性高,不同组的相关性低,从而达到对参数的降维处理。每组变量代表一个基本结构(即因子 F1、F2、F3、

F4……Fn),从而达到剔除水化学组分中独立和重复的成分的目的。因此每一个因子(F1、F2、F3、F4……Fn)代表着各种水化学组分之间的一种基本组合方式,可以用来揭示水化学特征的某种成因,进而分析水化学组分之间的错综复杂的关系(王喆等,2014)。

具体方法为:选择主成分分析方法提取公因子(F1、F2、F3、F4……Fn),最大方差法对成分矩阵进行旋转,从而使每个因子(F1、F2、F3、F4……Fn)所包含的高荷载变量的个数最少,且每个变量在因子上的荷载较大,而在其他因子的荷载较小,从而克服了因子荷载矩阵不唯一造成解释困难,

达到利用公因子(F1、F2、F3、F4……Fn)对岩溶地下水水质的影响因素及影响程度进行定量分析的目的(王喆等,2014;卢丽等,2015)。

### 3.3.2 因子分析

为更全面地分析研究区岩溶地下水水质的影响因素,结合研究区的地质岩性、矿物组成等,将研究区总硬度(TH)、游离CO<sub>2</sub>、F<sup>-</sup>等结合到前述地下水化学组分中进行综合分析。通过相关系数矩阵(表2)可知,大部分组份之间存在相关关系,其中Ca<sup>2+</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Mg<sup>2+</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Na<sup>+</sup>-K<sup>+</sup>相关关系尤为显著。因此变量之间存在信息重叠,为分析水质受影响的主要因素,需进行数据的降维处理。

表2 水化学组分相关系数矩阵

Table 2 Correlation coefficient matrix of water chemical components

	PH	TH	COD	CO <sub>2</sub>	TDS	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	F <sup>-</sup>
PH	1													
TH	-0.038	1												
COD	.227*	.494**	1											
CO <sub>2</sub>	-.496**	.633**	0.09	1										
TDS	-0.026	.986**	.558**	.582**	1									
Ca <sup>2+</sup>	0.012	.894**	.499**	.478**	.935**	1								
Mg <sup>2+</sup>	-0.083	.875**	.371**	.648**	.804**	.565**	1							
Na <sup>+</sup>	-0.136	.236*	0.22	.363**	.300*	0.215	0.203	1						
K <sup>+</sup>	-0.189	.270*	.285*	.421**	.332**	.232*	.245*	.711**	1					
Cl <sup>-</sup>	-0.143	.405**	0.16	.455**	.398**	.344**	.373**	.495**	.380**	1				
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.079	.754**	.626**	0.217	.825**	.866**	.451**	0.105	0.145	0.044	1			
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.148	.760**	0.119	.767**	.664**	.472**	.888**	.281*	.299*	.451**	0.171	1		
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.017	0.166	0.153	0.049	0.202	0.163	0.128	0.193	0.216	.372**	-0.05	0.124	1	
F <sup>-</sup>	.224*	.611**	.464**	.232*	.589**	.483**	.603**	0.014	0.023	-0.046	.493**	.468**	0.053	1

通过KMO和球形Bartlett可进行因子分析的适用性检验。KMO统计量为0.564,大于0.5,说明各变量间信息重叠程度比较高;球形检验拒绝各变量独立的假设,故因子分析的适用性检验通过。选取特征根大于1的4个公因子(F1、F2、F3、F4)代替原来所有变量,4个公因子的累计贡献率达到80.153%(表3),原始数据的基本信息损失较小。

利用旋转后因子载荷矩阵(表4)结合各水样点因子得分空间分布图(图2),对研究区水质影响因素进行分析:

F1贡献率达27.819%,其中TH、COD、TDS、Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、F<sup>-</sup>因子载荷最大,TH、TDS、Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>之间相关性极为显著,与表2反映的结果相一致。F1得分高值区位于研究区西北部(图2a),水样中Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、F<sup>-</sup>浓度值高,是由于这些区域为三叠

系嘉陵江组地层,岩性主要为灰岩、白云岩和膏盐角砾白云岩等碳酸盐岩(图1b)且岩溶发育,为碳酸盐岩及膏盐矿物的充分溶解提供了条件。此外,F1中COD的因子载荷大,说明地下水受污染影响较严重。因此F1代表碳酸盐岩及膏盐矿物的充分溶解对水质的影响。

F2贡献率为26.308%,其中游离CO<sub>2</sub>、Mg<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>因子载荷最大,三者相关性好,说明CO<sub>2</sub>促进了碳酸盐岩中白云石矿物的溶解。土壤是一个巨大的碳库,全球土壤碳容量是森林的2~3倍,土壤中CO<sub>2</sub>含量超过大气的10倍(王喆等,2014),其溶于水,参与白云石矿物的溶解,形成HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>,成为地下水中HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和Mg<sup>2+</sup>的主要来源。F2得分高值中心为W55、W90、W89、W86(图2b),这些取样点大多位于三叠系关岭组白云岩中,地貌上多位于峰丛洼地或峰丛谷地底部,补给

表 3 总方差解释

Table 3 Total variance interpretation

成分	总计	初始特征值 方差百分比	累计%	总计	提取载荷平方 和方差百分比	累积 %	总计	旋转载荷平方 和方差百分比	累积 %
F1	6.288	44.912	44.912	6.288	44.912	44.912	3.895	27.819	27.819
F2	2.311	16.509	61.421	2.311	16.509	61.421	3.683	26.308	54.127
F3	1.529	10.923	72.344	1.529	10.923	72.344	2.408	17.201	71.328
F4	1.093	7.81	80.153	1.093	7.81	80.153	1.236	8.826	80.153
F5	0.871	6.223	86.376						
F6	0.639	4.567	90.943						
F7	0.444	3.173	94.116						
F8	0.328	2.345	96.461						
F9	0.224	1.602	98.063						
F10	0.196	1.398	99.46						
F11	0.075	0.538	99.998						
F12	0	0.001	99.999						
F13	0.000	0.001	100						
F14	0.000	0.000	100						

提取方法:主成分分析法。

表 4 主成分矩阵

Table 4 Principal component matrix

成分矩阵	成分				旋转后的成分矩阵	成分			
	F1	F2	F3	F4		F1	F2	F3	F4
PH	-0.089	-0.569	0.39	0.442	PH	0.268	-0.291	-0.321	0.648*
TH	0.972	-0.146	-0.12	0.026	TH	0.694*	0.693	0.131	0.029
COD	0.559	-0.372	0.495	-0.1	COD	0.776*	-0.054	0.209	0.238
CO <sub>2</sub>	0.699	0.467	-0.383	-0.131	CO <sub>2</sub>	0.108	0.778*	0.376	-0.335
TDS	0.971	-0.164	0.017	-0.05	TDS	0.768*	0.58	0.211	0.035
Ca <sup>2+</sup>	0.858	-0.252	0.082	-0.155	Ca <sup>2+</sup>	0.798*	0.406	0.171	-0.016
Mg <sup>2+</sup>	0.861	0.004	-0.309	0.215	Mg <sup>2+</sup>	0.415	0.839*	0.056	0.072
Na <sup>+</sup>	0.411	0.563	0.481	-0.178	Na <sup>+</sup>	0.124	0.081	0.852*	0.024
K <sup>+</sup>	0.443	0.533	0.447	-0.247	K <sup>+</sup>	0.175	0.091	0.837*	-0.046
Cl <sup>-</sup>	0.496	0.545	0.215	0.258	Cl <sup>-</sup>	-0.02	0.444	0.620*	0.272
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.701	-0.517	0.165	-0.385	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.951*	0.098	0.025	-0.142
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.77	0.264	-0.412	0.286	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.142	0.934*	0.143	0.04
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.223	0.242	0.425	0.605	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.061	0.175	0.354	0.703*
F <sup>-</sup>	0.607	-0.474	-0.12	0.209	F <sup>-</sup>	0.595*	0.424	-0.265	0.216

提取方法:主成分分析法。

提取了 4 个成分。

区土壤层较厚,甚至地下水出口处被残积物掩盖严重(W89、W90),为白云石矿物的溶解提供了条件。因此 F2 代表碳酸盐岩中白云石矿物的溶解对地下水水质的影响。

F3 贡献率为 17.201%,Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>因子载荷最大,与 F3 呈正相关。一方面,研究区内南东 W93 至 W110 一带出露有三叠系夜郎组粘土岩、

提取方法:主成分分析法。

旋转方法:凯撒正态化最大方差法。

粉砂岩(图 1b),这些岩石中多含有岩盐矿物,这些岩盐矿物在溶滤的过程中形成 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>;另一方面,F3 得分值的高值中心(W55、W80)(图 2c)范围内多有基岩出露,受断层影响,岩石节理裂隙发育,为降雨的入渗、岩盐矿物的溶滤提供了良好的场所。因此 F3 代表岩盐矿物的溶解、大气降水对地下水水质的影响。

F4 贡献率较低 (8.826%)。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、pH 因子载荷最大。从研究区所采集的水样检测结果来看,其中不到一半水样 N 含量在《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017) III 类水范围内。因 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 主要来源于人类活动的输入,且从图 2d 可知 F4 得分高值区主要为各水样点 (W74、W68、W84、W61、W81 和 W85 等) 单点控制为主,符合人类活动对

地下水水化学组分影响局部性的特点,与调查结果一致。研究区内农田、耕地零星分布,化肥和农药广泛使用,为硝酸盐污染的重要原因。同时,生活废水的不规范排放,也影响地下水中硝酸盐浓度,从而影响地下水的 pH 值。因此 F4 代表人类活动(包括生活污水和农业灌溉污水)对地下水水质的影响。

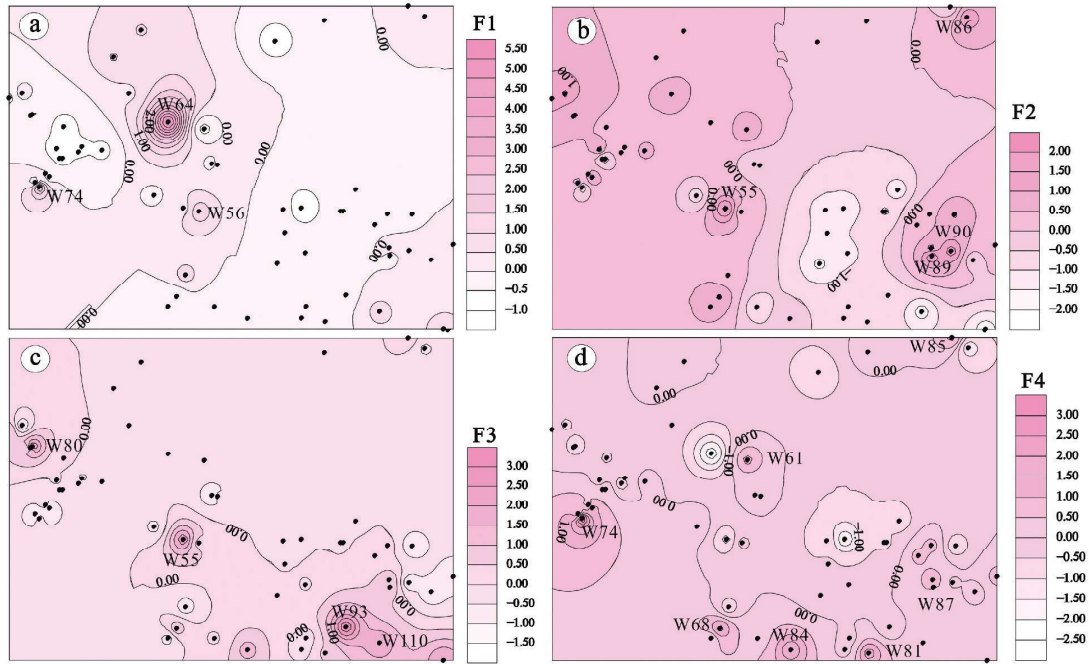


图 2 研究区水样因子得分空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of water sample factor scores in the study area

### 4 结论

选取贵州省毕节市大方县南部岩溶地下水为研究对象,采用因子分析对研究区地下水水质影响因素进行识别,获得如下结论:

(1) 研究区阳离子以 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 为主、阴离子以 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 为主,地下水化学类型主要为 HCO<sub>3</sub>-Ca、HCO<sub>3</sub>-Ca·Mg 型,其次为 HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Ca·Mg 型。水样水化学组分除 pH、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Ca<sup>2+</sup>、TDS 空间差异性较小外,其余组分质量浓度的空间差异大。

(2) 因子分析法提取的 4 个主因子 (F1、F2、F3、F4) 对研究区水化学数据的贡献率达 80% 以上,识别出研究区水质一方面为自然因素控制,包括大气降水、水岩作用和土壤分布等,另一方面为人为因素所影响,主要包括生活污水及农业活动。

(3) 本研究定量分析了岩石矿物溶解、大气降

水及人类活动等对研究区岩溶地下水水质的影响程度。因子分析结果与地质背景相吻合,充分表明了此分析方法在岩溶区地下水水质分析中具有较好的可行性和科学性,研究结果可为岩溶地下水资源的合理开发利用和保护、岩溶地区生态环境保护提供科学依据。

### [参考文献]

蒋勇军,吴月霞,Chris Groves,等. 2009. 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,36(4): 1-7.  
 江峰,李强,吉勤克补子,等. 2019. 贵州省岩溶地区饮用天然矿泉水水化学特征及其宏量组分来源分析[J]. 贵州地质,36(2): 173-179.  
 鲁守刚,邓娅敏,张美雁,等. 2014. 基于多元统计分析的高地地下水水化学特征研究—以内蒙古杭锦旗为例[J]. 中国农村水利水电, (12): 40-44+48.  
 罗维,杨秀丽,犹俊,等. 2014. 浅谈岩溶地区区域地下水水质评价——以贵州鸭池河—枸皮滩流域为例[J]. 贵州地质,31

- (2):150-153+135.
- 卢丽,王喆,裴建国,等. 2015. 红水河中上游流域岩溶地下水水质影响因素的R型因子分析[J]. 中国岩溶,34(4):415-419.
- 王喆,夏日元,Chris Groves,等. 2014. 西南岩溶地区地下水水质影响因素的R型因子分析—以桂林寨底地下河为例[J]. 桂林理工大学学报,34(1):45-50.
- 袁道先,薛禹群,傅家谟. 2007. 防止我国西南岩溶地区地下河变成“下水道”的对策与建议[J]. 中国科学院院士建议,4:1-14.
- 杨平恒,袁道先,袁文昊,等. 2010. 以PCA揭示降雨期间岩溶地下水地球化学的形成[J]. 科学通报,55(9):788-797.
- 杨平恒,袁道先,叶许春,等. 2013. 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,58(18):1755-1763.
- 袁建飞,邓国仕,徐芬,等. 2016. 毕节市北部岩溶地下水水化学特征及影响因素的多元统计分析[J]. 中国地质,43(4):1446-1456.
- 杨荣康,罗维,王诗扬等. 2017. 玉屏县朱家场地下水集中开采区地下水数值模型建立及相关问题探讨[J]. 贵州地质,34(4):306-312.
- 张彦林,李永生,付东林,等. 2006. 陇东盆地西部岩溶地下水形成机制研究[J]. 中国地质,33(6):1393-1399.
- 张东,李成杰,刘运涛,等. 2011. 基于多元统计的淮河中上游农业区地下水水质控制因素分析[J]. 安全与环境学报,11(6):135-140.
- 张路遥,马祖陆,覃星铭. 2018. 岩溶水水化学特征的主成分分析和因子分析[J]. 广西科学院学报,34(4):309-316.
- Aiuppa A, Bellomo S, Brusca L, et al. 2003. Natural and anthropogenic factors affecting groundwater quality of an active volcano (Mt. Etna, Italy) [J]. Applied Geochemistry, 18(6):863-882.
- Brenot A, Baran N, Petelet-Giraud E, et al. 2008. Interaction between different water bodies in a small catchment in the Paris basin (Brevilles, France): Tracing of multiple Sr sources through Sr isotopes coupled with Mg/Sr and Ca/Sr ratios [J]. Applied Geochemistry, 23(1):58-75.
- Cloutier V, Lefebvre R, Therrien R, et al. 2008. Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system [J]. Journal of Hydrology, 353(3-4):294-313.
- Edmunds W M, Shand P, Hart P, et al. 2003. The natural (baseline) quality of groundwater: a UK pilot study [J]. Science of the Total Environment, 310(1-3):25-35.
- Helstrup T, Jørgensen N, Bruce B-Y. 2007. Investigation of hydrochemical characteristics of groundwater from the Cretaceous-Eocene limestone aquifer in southern Ghana and southern Togo using hierarchical cluster analysis [J]. Hydrogeology Journal, 15(5):977-989.
- Negrel P, Pauwels H. 2003. Interaction between the different water bodies in catchments in Brittany (France): Characterizing multiple sources in waters through isotopic tracing [J]. Water Air & Soil Pollution, 151(1/4):261-285.
- Negrel P, Petelet-Giraud E. 2005. Strontium isotopes as tracers of groundwater-induced floods: the Somme case study (France) [J]. Journal of Hydrology, 305(1-4):99-119.
- Valdes D, Dupont J P, Laignel B, et al. 2007. A spatial analysis of structural controls on Karst groundwater geochemistry at a regional scale [J]. Journal of Hydrology, 340(1-4):244-255.

## Study on Influencing Factors of Karst Groundwater Quality Based on Factor Analysis

—Take the Southern Part of Dafang County, Bijie City as an Example

LI Xue-lian, ZHU Yu-hua, HUA Xing, WU Xiao-fang, JIANG Fu

(Guizhou Geological Survey, Guiyang 550081, Guizhou, China)

**[Abstract]** In order to understand the influencing factors of karst groundwater quality formation and spatial variation of ion mass concentration in the study area, the southern part of Dafang County in Bijie city is taken as the research area, 56 groups of water samples were analyzed by factor analysis method, and four groups of factors (F1, F2, F3 and F4) were obtained based on karst groundwater quality formation and its influence in the study area: F1 is dominated by TH, TDS, COD,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{F}^-$ , representing the influence of co-dissolution of carbonate rock and gypsolyte on water quality. F2 is dominated by free  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{HCO}_3^-$ , reflecting the influence of dolomite dissolution on water quality in carbonate rocks. F3 is dominated by  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  and  $\text{Cl}^-$ , representing the influence of salt rock dissolution and atmospheric precipitation on water quality. F4 is dominated by pH and  $\text{NO}_3^-$ , revealing the impact of human domestic sewage and agricultural irrigation sewage on karst groundwater quality. The above four factors can explain more than 80% of the influencing factors of karst groundwater quality in the study area.

**[Key Words]** Karst groundwater; Spatial difference; Factor analysis; Bijie city