

# 川南红层地区地下水赋存环境及水化学特征分析

——以宜宾市屏山县为例

魏良帅<sup>1,2</sup>, 孔德彦<sup>3</sup>, 罗雲丰<sup>1,2</sup>, 贾逸<sup>1,2</sup>, 舒勤峰<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川成都 611734; 2. 中国地质调查局地质灾害防治技术中心, 四川成都 611734; 3. 四川省地质矿产勘查开发局九一五水文地质工程地质队, 四川眉山 620010)

**摘要:**在对宜宾市屏山县地区地下水水文地质调查的基础上,对屏山地区地层分布、构造及含水特征等地下水赋存环境进行了研究,将地下水分为松散岩类孔隙水、基岩裂隙水、碎屑岩类孔隙裂隙层间水和碳酸盐类裂隙溶洞水;通过分析研究区 122 组水质样品的水化学特征,结合 Piper 三线图,建立了地下水类型空间分布图;在此基础上,利用相关性分析、主成分分析和离子比例系数分析,解释了地下水的控制性影响因素,揭示了屏山地区地下水化学空间分布特征及成因规律。结果表明:屏山地下水类型主要以  $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$  型为主,主要受到地层岩性的溶滤作用和大气降雨的影响,对指导川南地区地下水开发利用规划具有重要的现实意义。

**关键词:**川南;红层;地下水类型;水化学特征

**中图分类号:**P641 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)08-0145-06

**Groundwater Occurrence Environment in the Red Beds of Southern Sichuan and the Hydro-chemical Characteristic: A Case Study in Pingshan County, Yibin City/WEI Liang-shuai<sup>1,2</sup>, KONG De-yan<sup>3</sup>, LUO Yun-feng<sup>1,2</sup>, JIA Yi<sup>1,2</sup>, SHU Qin-feng<sup>1,2</sup>** (1. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China; 2. Technical Center for Geological Hazard Prevention and Control, CGS, Chengdu Sichuan 611734, China; 3. 915 Hydrogeology and Engineering Geology Company, Sichuan Geological & Mineral Bureau, Meishan Sichuan 620010, China)

**Abstract:** Based on the hydro-geological investigation of groundwater in Pingshan area of Yibin City, the groundwater occurrence environment, such as stratigraphic distribution, formation structure and water-bearing character in Pingshan area, is studied, the underground water is classified as pore water in loose rock strata, fissure water in bedrock, interlayer water in clastic rock and water in carbonate karst fissure. Through the analysis on the hydro-chemical characteristics of 122 groups of water sample in the study area, the spatial distribution map is established based on the Piper trilinear diagram; on this basis, the controlling factors of groundwater are explained by correlation analysis, principal component analysis and ion ratio coefficient analysis; and the spatial distribution characteristics of groundwater hydrochemistry in Pingshan area and the formation causes are revealed. The research results show that the groundwater in Pingshan area mainly are of  $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$  and  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$  types, which is mainly influenced by the dissolution and filtration of stratigraphic lithology and atmospheric rainfall. The fundamental data is of great practical significance to guide the groundwater exploration and utilization in the Southern Sichuan.

**Key words:** Southern Sichuan; red beds; groundwater type; hydro-chemical characteristics

## 0 引言

红层(以侏罗系和白垩系砂岩、泥岩为主)长期被视为“地下水资源缺乏的贫水地层”,其水资源时空分布极不均匀,资源性缺水和工程性缺水并存的现象极大制约了区域经济的发展,红层找水是地下

水勘查的难题之一,研究找水区的地下水赋存环境、地下水成分特征及地下水的演变规律是水文地球化学的基本任务。

近些年,国内外学者对地下水化学分析开展了大量研究工作,主要运用野外调查、室内数理统计及

收稿日期:2018-07-01

作者简介:魏良帅,男,汉族,1979年生,高级工程师,主要从事工程地质勘查、水文地质调查及研究工作,四川省成都市郫都区现代工业港(北区)港华路139号,53831087@qq.com。

水文地球化学模拟的方法对地下水的水文特征、区域性规律进行研究。毛文清等<sup>[1]</sup>对红层地下水的形成环境和水文地质类型进行了研究,认为地下水主要受到构造带控制;张廷山等<sup>[2]</sup>对川东北地区红层地下水的赋存特征进行了研究,并分析了地下水富集的影响因素;朱春林等<sup>[3-4]</sup>系统地论述了红层中的含盐层导致地下水水质复杂、富水性差异性大的特征,总结了云南地区红层赋存主控因素、富集条件及规律;周绪纶<sup>[5]</sup>和张福存等<sup>[6]</sup>对四川盆地红层地下水特征和水文条件进行了总结分析,并建议了红层地区地下水的开发利用模式;曾彩霞等<sup>[7]</sup>对成都青白江小流域红层地下水水文特征、成因及富集模式进行了研究;周中海等<sup>[8]</sup>利用GIS技术对云南楚雄地区地下水特征和类型进行了分析,并建立了红层地下水的区域水化学空间模型。以上学者,主要关注红层区相对经济发达的盆地区的水文地质问题,对集中连片贫困缺水地区地下水水化学的研究工作尚存在众多不足。

本次研究区位于四川盆地南部南缘,金沙江北岸的屏山县境内,经度 $104^{\circ}\sim 104^{\circ}15'$ ;纬度 $28^{\circ}40'\sim 28^{\circ}50'$ ,属乌蒙山集中连片贫困缺水地区,本次工作侧重于川南红层地区的地下水赋存环境及特征的研究,在开展1:5万水文地质调查基础上,利用统计分析手段分析地下水水化学特征、类型和地下水的控制性因素,查明研究区含水层地质条件、地下水类型、地下水分布和地下水赋存环境与运移规律,为地

下水资源开发利用提供重要的地质基础资料,对解决川南贫困缺水地区居民缺水问题,改善群众用水,加快脱贫致富步伐,支撑国家扶贫战略具有重要的意义。

## 1 研究区地质背景

研究区地形南高北低,主要分布中山和低山地貌,西南部为岩溶中山峡谷地貌,高程一般 $1000\sim 2000\text{ m}$ ,相对高差 $500\sim 1000\text{ m}$ ,东西部洼地发育,总表现为侵蚀作用大于溶蚀作用,特点为冲沟发育,且呈“V”形谷,溶蚀裂隙普遍发育,亦有数量不多洞身不长的溶洞。中部及东部区域多为斜坡状中山,尤以岷江和金沙江分水岭地带为多,高程一般 $1000\sim 1500\text{ m}$ ,相对高差 $300\sim 600\text{ m}$ ,中山区沟谷狭窄,一般为“V”型谷,坡度较陡,一般大于 $40^{\circ}$ 。而低山地貌区高程一般 $700\sim 1200\text{ m}$ ,相对高差 $100\sim 500\text{ m}$ 。

研究区广大低山区地层主要为红层,覆盖以紫红色、暗紫红色、棕红色为主的侏罗系和白垩系的砂岩、泥岩及少量薄层灰岩,占整个研究区约 $87.80\%$ 的面积;其余以三叠系的灰岩、白云岩、砂岩、页岩为主,占研究区面积的 $11.51\%$ 左右;在河谷地区分布少量第四系冲积、洪积等地层,主要地质构造为五指山—龙桥背斜,天宫堂背斜、龙华寺向斜及屏山向斜,主要断裂为团半石压扭性断裂。其地层特征和分布如表1和图1所示。

表1 研究区地层描述

系	统	地层名称	代号	岩性	分布面积/ $\text{km}^2$	所占比例/ $\%$
第四系	全新统		Q <sup>al</sup>	上部砾砂土、砂质粘土,下部漂卵石层	3.05	0.68
白垩系	上统	三合组	K <sub>2s</sub>	砖红色岩屑长石砂岩夹泥岩	0.47	0.10
		夹关组	K <sub>2j</sub>	厚层状砂岩夹透镜体泥岩	1.42	0.31
	下统		K <sub>1</sub>	块层状砂岩为主,夹粉砂岩、砂质泥岩	51.47	11.41
侏罗系	上统	蓬莱镇组	J <sub>3p</sub>	砂岩与粉砂岩、砂质泥岩互层	342.79	75.98
		遂宁组	J <sub>3sn</sub>	钙质泥岩、砂质泥岩夹砂岩		
	中统	沙溪庙组	J <sub>2s</sub> <sup>2</sup>	泥岩、砂质泥岩夹透镜体砂岩		
			J <sub>2s</sub> <sup>1</sup>	砂岩、粉砂岩、钙质泥岩互层		
中下统	自流井组	J <sub>1-2z</sub>	钙质泥岩、砂质泥岩夹砂岩、薄层灰岩			
三叠系	上统	须家河组	T <sub>3xj</sub>	砂岩、粉砂岩夹炭质页岩及煤线	29.75	6.59
	中统	雷口坡组	T <sub>2l</sub>	灰质白云岩、白云质灰岩、泥灰岩夹粉砂岩	21.67	4.80
		嘉陵江组	T <sub>1j</sub>	泥质灰岩、灰质白云岩夹砂岩		
	下统	飞仙关组	T <sub>1f</sub>	砂岩夹粉砂岩、砂质泥岩	0.54	0.12

## 2 研究区地下水赋存环境

### 2.1 地下水赋存基本条件

研究区气候温湿,降雨丰富,地表水文网发育,因而与其密切相关的浅层地下水交替循环畅通,补给来源充足<sup>[9]</sup>,地下水赋存环境可分为红层区和非

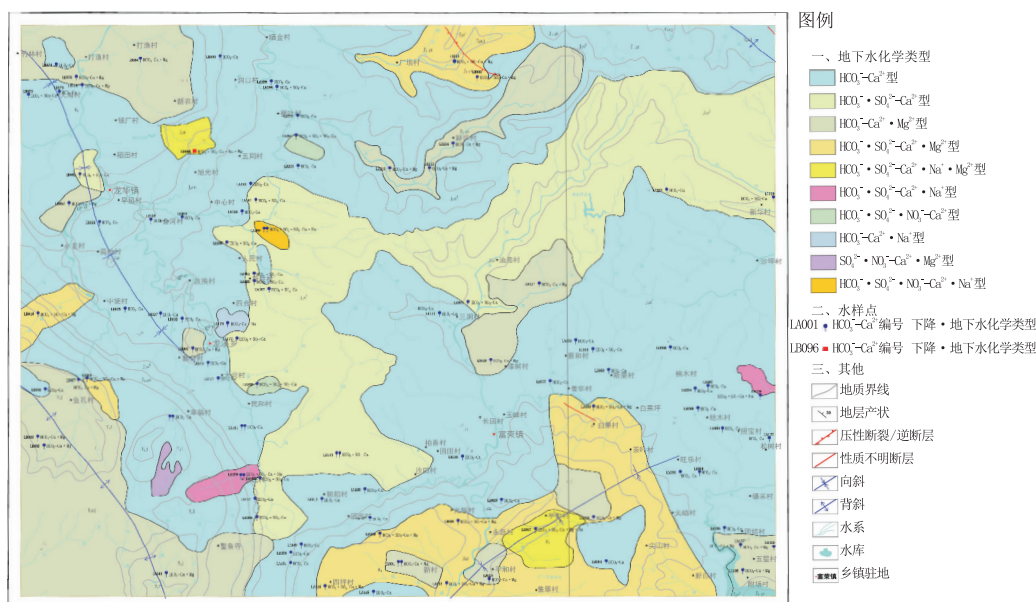
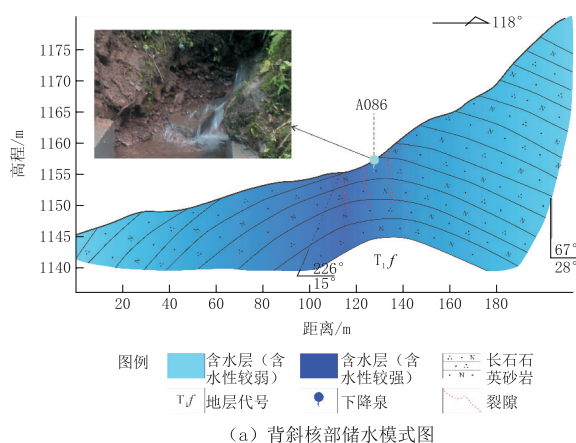


图 1 研究区地层分布及地下水类型空间分布图

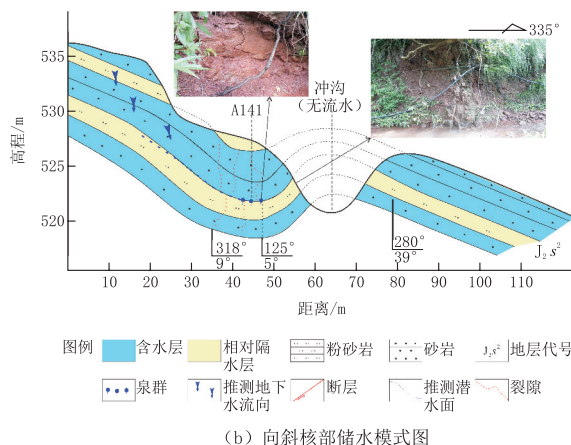
红层区。在红层分布区,地下水赋存于白垩系、侏罗系的砂岩、泥岩中,其地层多含钙质胶结物和透镜体,还含有可溶盐组分,主要为钙质及纤维状、层状、颗粒状石膏和钠质芒硝等,受风化作用影响,结构疏松,易产生溶蚀孔隙和风化裂隙,为地下水的运移储存增加了空间;在非红层分布区,地层分布受五指山背斜、天宫堂背斜和龙华寺向斜构造控制,在背斜翼部伴生由挤压作用形成断裂,岩溶发育,有利于地下水富集;地下水赋存运移以溶洞管道流为主,中等至强富水,含水性极不均一,地下水枯季径流模数  $6.25 \sim 8.30 \text{ L/s} \cdot \text{km}^2$ 。

研究区内构造形迹简单,褶皱舒缓,构造裂隙和构造破裂面控制了区域内风化裂隙的发育,对地下水的富水状况具有重要影响。地下水受到构造形迹的影响,背斜核部的纵张裂隙发育,构成含水层,而下部岩层裂隙发育相对较弱,构成相对隔水层。地下水接收大气降雨补给,沿构造裂隙下渗至潜水面,遇下部相对隔水层而蓄集,再沿含水层与隔水层界面由高处向低处运移,在沟谷切割、地势较低或地形陡变处出露成泉(图 2a);对于向斜构造的影响,在向斜核部发育纵张、横张裂隙,其顺层面发育层面裂隙,地下水沿纵张、横张裂隙下渗沿层间裂隙由两翼向核部汇集,并在沟谷切割、地势较低或地形陡变处出露成泉(图 2b)。

### 2.2 地下水赋存类型



(a) 背斜核部储水模式图



(b) 向斜核部储水模式图

图 2 研究区地质构造赋存地下水环境的模式图

研究区地下水类型按地下水赋存条件、埋藏条件、水理性质及水动力特征等,结合地球物理探测

证,可分为松散岩类孔隙水、基岩裂隙水、碎屑岩类孔隙裂隙层间水和碳酸盐类岩溶洞穴水4种类型。

(1)松散岩类孔隙水,主要埋藏于江河两岸松散堆积体及冲积层中,其补给来源主要大气降水,一般以渗透形式向河流排泄,局部低洼地段以泉的形式排泄。

(2)基岩裂隙水,主要为风化带裂隙水,多在沟谷两侧或斜坡地带以裂隙泉排泄,具“就近补给,就近排泄”的特点,构造发育地带下渗的降水逐步汇集到含水层与隔水层的裂隙中继续运移,并在地势低洼地带以接触泉的形式排泄。地下水在断裂带附近的径流模数 $>5\text{ L/s}\cdot\text{km}^2$ ,常见泉水流量 $0.5\sim 1.0\text{ L/s}$ ,水量较丰富;而在远离断裂带的基岩中的地下水径流模数为 $0.1\sim 1.0\text{ L/s}\cdot\text{km}^2$ ,常见泉水流量 $<0.1\text{ L/s}$ ,水量贫乏。

(3)碎屑岩类孔隙裂隙层间水,以须家河组地层的碎屑岩作为含水层的地下水类型,砂岩是含水层,煤系、页岩夹少量薄层细砂岩为相对隔水层。地下水多分布于背斜区,接受大气降水和相邻含水层的越流补给,水量较丰富,但地下水分布埋藏不均。

(4)碳酸盐类岩裂隙溶洞穴水,主要分布于三叠系雷口坡组和嘉陵江组的灰岩中。地下水的径流以溶蚀裂隙、岩溶管道运移,排泄途径向江河排泄或向深部渗漏。

### 3 地下水水文地球化学特征

本次调查对研究区内代表性地下水的水质样品进行采集,共采集122组进行检测分析,样品在野外不进行预处理,样品采集后再对其进行现场封蜡处理,水质样品的保存按照《水质采样样品的保存和管理技术规定》(HJ 493-2009)<sup>[10]</sup>进行处理,检验测试方法按照《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)<sup>[11]</sup>的规定,使用离子色谱法和电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)进行检测分析。

#### 3.1 地下水化学特征

对研究区内的122组地下水水样进行水化学成分特征值统计分析(表2),可知:(1)地下水的阳离子以 $\text{Al}^{3+}$ 和Fe离子为优势阳离子,其次为 $\text{Ca}^{2+}$ ,均值由大至小顺序为 $\text{Al}^{3+}>\text{Total Fe 离子}>\text{Ca}^{2+}>\text{Na}^++\text{K}^+>\text{Mg}^{2+}$ ,其 $\text{Al}^{3+}$ 、Fe离子含量较高,是红层中含有大量粘土矿物和铁质(氢)氧化物的溶解造成的;(2)阴离子主要以 $\text{HCO}_3^-$ 为主,其次为

$\text{SO}_4^{2-}$ ,以阴离子均值大小顺序排列为 $\text{HCO}_3^->\text{SO}_4^{2-}>\text{NO}_3^->\text{Cl}^-$ ; (3)总溶解固体(TDS)值位于 $28\sim 668\text{ mg/L}$ 之间,平均值为 $179.93\text{ mg/L}$ ,小于 $1\text{ g/L}$ ,同时TDS的标准差较大,但变异系数较小,说明研究区内地下水均属于淡水,且径流相对缓慢,其相对含量差别不大;(4)pH值在 $6.08\sim 8.43$ 之间,平均值为7.46,属于弱碱性水。由于 $\text{Na}^++\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、Fe离子、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 的变异系数相对较小,说明了研究区地下水相对较为稳定;而 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 的变异系数较大,说明了这些离子在研究区地下水中含量变化也较大,易随环境变化而发生相应变化。

表2 研究区地下水水化学成分统计特征值 mg/L

项目	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数
$\text{Na}^++\text{K}^+$	1.36	56.24	9.43	9.10	0.965
$\text{Ca}^{2+}$	3.02	118.00	43.12	24.57	0.570
$\text{Mg}^{2+}$	0.80	47.40	7.24	7.24	1.001
Total Fe 离子	41.10	332.00	130.88	71.21	0.544
$\text{Al}^{3+}$	51.40	349.00	147.40	81.71	0.554
$\text{Cl}^-$	0.32	29.30	4.74	6.12	1.291
$\text{SO}_4^{2-}$	1.49	248.00	26.56	34.16	1.286
$\text{HCO}_3^-$	1.79	376.51	128.74	78.38	0.609
$\text{NO}_3^-$	0.49	53.72	14.02	10.73	0.765
TDS	28.00	668.00	179.93	108.99	0.606
pH值	6.08	8.43	7.46	0.52	0.070

#### 3.2 相关性分析

相关性分析可以解释地下水化学参数之间是否存在相关关系、依存性质及程度等,可揭示地下水来源的一致性和差异性<sup>[12-13]</sup>。利用SPSS软件对研究区地下水化学成分进行Pearson相关系数分析,其结果如表3所示。由分析结果表明,研究区地下水中的 $\text{Na}^++\text{K}^+$ 和 $\text{Ca}^{2+}$ 及 $\text{Mg}^{2+}$ 均呈正的显著性相关关系; $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 也呈显著性正相关,其原因可能是红层中所含白云石矿物的溶解影响造成的<sup>[13]</sup>。 $\text{SO}_4^{2-}$ 与 $\text{Na}^++\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 呈高度线性相关( $R=0.892$ ,  $0.758>0.70$ ),而 $\text{HCO}_3^-$ 与 $\text{Ca}^{2+}$ 及 $\text{Mg}^{2+}$ 呈高度线性相关( $R=0.958$ ,  $0.791$ );总溶解固体(TDS)与阳离子的相关大小依次为 $\text{Ca}^{2+}$ ( $0.932$ ) $>\text{Mg}^{2+}$ ( $0.907$ ) $>\text{Na}^++\text{K}^+$ ( $0.834$ ),而与阴离子相关性关系系数自大至小为 $\text{HCO}_3^-$ ( $0.889$ ) $>\text{SO}_4^{2-}$ ( $0.776$ ) $>\text{Cl}^-$ ( $0.670$ ) $>\text{NO}_3^-$ ( $0.537$ ),其中TDS与阳离子、 $\text{HCO}_3^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 高度线性相关,说明地下水主要以 $\text{Na}^++\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、

表 3 研究区地下水水化学成分 Person 相关系数(R)

	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	TDS
Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	1	0.621	0.801	0.600	0.892	0.583	0.422	0.834
Ca <sup>2+</sup>		1	0.766	0.603	0.551	0.958	0.492	0.932
Mg <sup>2+</sup>			1	0.624	0.758	0.791	0.479	0.907
Cl <sup>-</sup>				1	0.391	0.517	0.775	0.670
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>					1	0.463	0.257	0.776
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>						1	0.381	0.889
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>							1	0.537
TDS								1

注:以上相关系数均通过  $P < 0.01$  水平上显著双尾检验。

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 离子为主,且易以离子形态共存于地下水中。

### 3.3 地下水水化学类型

将研究区 122 组地下水水质样品数据导入 Piper 三线图中,并对各地下水类型面积进行统计(表 4)和地下水类型进行分类(图 3),并建立了地下水类型空间分布图(图 1)。从图 3 和表 4 可知,研究区内水化学类型主要以 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> - Ca<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> · SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> - Ca<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> · SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> - Ca<sup>2+</sup> · Mg<sup>2+</sup> 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> · SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> - Ca<sup>2+</sup> · Mg<sup>2+</sup> 型为主,这 4 类地下水类型约占总数量的 97.74%;且从图 3 中可看出局部地点分布有 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> · SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> - Ca<sup>2+</sup> · Mg<sup>2+</sup> · Na<sup>+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> · SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> - Ca<sup>2+</sup> · Na<sup>+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> · SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> · NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> · NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - Ca<sup>2+</sup> · Mg<sup>2+</sup> 等类型,仅占有研究区总面积约 2.26%。

表 4 研究区地下水水化学类型统计

地下水类型	分布面积/ km <sup>2</sup>	所占比例/ %
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - Ca <sup>2+</sup> 型	251.33	55.71
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> · SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> - Ca <sup>2+</sup> 型	81.90	18.16
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - Ca <sup>2+</sup> · Mg <sup>2+</sup> 型	67.46	14.96
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> · SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> - Ca <sup>2+</sup> · Mg <sup>2+</sup> 型	40.19	8.91
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> · SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> - Ca <sup>2+</sup> · Mg <sup>2+</sup> · Na <sup>+</sup> 型	4.80	1.06
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> · SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> - Ca <sup>2+</sup> · Na <sup>+</sup> 型	2.19	0.49
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> · SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> · NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - Ca <sup>2+</sup> 型	1.09	0.24
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - Ca <sup>2+</sup> · Na <sup>+</sup> 型	0.71	0.16
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> · NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - Ca <sup>2+</sup> · Mg <sup>2+</sup> 型	0.83	0.18
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> · SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> · NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - Ca <sup>2+</sup> · Na <sup>+</sup> 型	0.61	0.14

### 3.4 地下水特征控制因素

地下水的水化学特征主要受到地形地貌、地层岩性、地质构造、气象因素、径流路径及条件的影响,往往多是定性的评价各影响因素对地下水的作用,而利用主成分分析可将相关关系变量转为较少综合指标的多元统计方法,研究地下水水化学特征形成的主要作用与因素,更清楚的了解其影响程度。

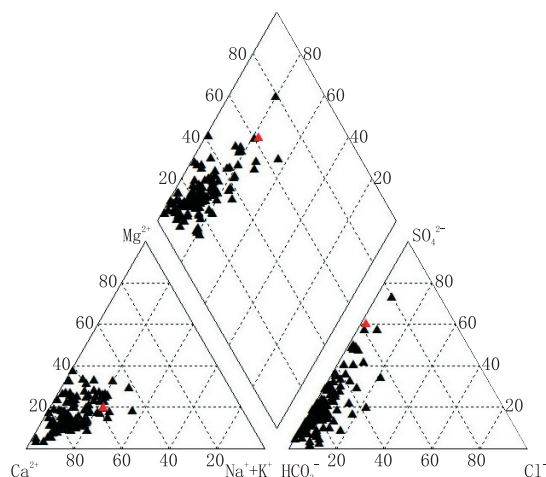


图 3 研究区地下水特征 Piper 三线图

本文利用 SPSS 软件,通过主成分分析,利用方差最大正交的旋转分析方法,可以得到地下水各成分的特征值(表 5)。由主成分因子贡献率可知,前 2 个因子的特征值  $> 1$ ,且特征值之和占总特征值的 84%,因此提取前 2 个因子,得到第一主成分和第二主成分载荷如表 6 所示。

表 5 主成分因子贡献率

成分	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	特征值	方差/%	累积/%	特征值	方差/%	累积/%	特征值	方差/%	累积/%
1	5.650	70.623	70.623	5.650	70.623	70.623	4.344	54.298	54.298
2	1.073	13.409	84.032	1.073	13.409	84.032	2.379	29.734	84.032
3	0.799	9.999	94.021						
4	0.214	2.680	96.701						
5	0.168	2.101	98.802						
6	0.090	1.122	99.924						
7	0.005	0.057	99.981						
8	0.002	0.019	100						

表 6 主成分分析旋转后的因子载荷

分析指标	F1	F2	分析指标	F1	F2
Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	0.865	0.249	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.900	0.017
Ca <sup>2+</sup>	0.750	0.490	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.749	0.408
Mg <sup>2+</sup>	0.855	0.377	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.152	0.920
Cl <sup>-</sup>	0.359	0.848	TDS	0.884	0.448

注:旋转在 3 次迭代后收敛。

从表 5、表 6 可知,第一主成分 F1 的方差贡献率为 70.6%,主要与 Na<sup>+</sup> + K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 TDS 呈密切的正相关,其载荷分别为 0.865、0.750、0.855、0.900、0.749 和 0.884,反映了地下水受到了含水岩层的影响,由前可知,区内红层主要由砂岩、泥岩等组成,通常在岩层中含有

方解石、白云石和石膏脉或结晶体,其中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  主要来自于岩层中方解石、白云石、石膏矿物的溶解作用; $\text{SO}_4^{2-}$  浓度在地下水中呈现较高数值,在阴离子组成中也较为显著,区域内主要形成了  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$  型地下水,因此  $\text{SO}_4^{2-}$  主要来自石膏、芒硝等易溶性矿物的溶解和黄铁矿等硫化矿物的风化、氧化作用,因此 F1 指示了岩石的矿物溶滤效应对地下水的影响,反映了地层岩性对地下水的控制因素。

第二主成分 F2 的方差贡献率为 13.4%, 主要与  $\text{Cl}^-$  和  $\text{NO}_3^-$  呈密切的正相关关系,其载荷分别为 0.848 和 0.920。研究区主要位于四川盆地南缘,酸雨频率大于 50%, 呈现出酸雨频率高的特点,这说明了  $\text{Cl}^-$  和  $\text{NO}_3^-$  主要来源于大气降雨,因此 F2 指示了大气降雨对地下水的影响,反映了气象因素对地下水的影响。

对于地下水化学组分的来源、动力过程和演化特征可利用比例系数法来进行说明,通过离子毫克当量浓度的比值进行描述地下水的特征,通过统计分析计算来判断地下水的动力条件等<sup>[13]</sup>,各离子比值计算表(表 7)。 $[\text{Cl}^-/\text{Ca}^{2+}]$  比例系数可描述地下水动力参数, $\text{Cl}^-$  通常富集于水动力滞缓区, $\text{Ca}^{2+}$  主要属于低矿化度水质的阳离子特征,研究区的  $[\text{Cl}^-/\text{Ca}^{2+}]$  平均值为 0.101,表明其地下水动力条件较好,水流交替作用强,水岩溶滤作用充分。 $[\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-]$ 、 $[\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-]$  和  $[\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}]$  的比值可反映地下水阴离子的演化过程,而研究区  $[\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-]$ 、 $[\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-]$  和  $[\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}]$  的平均值分别为 0.278、0.039 和 0.218,说明了研究区地下水中的碳酸盐最易溶解,主要来自于碳酸盐矿物的溶解导致的,其次是硫酸盐的溶解,主要来自于石膏和硫化矿物的溶解。对于地下水阳离子的相互关系,低矿化度水中  $\text{Ca}^{2+}$  占优势,当径流过程中 TDS 增加后促使  $\text{Mg}^{2+}$  含量增加,当 TDS 进一步增加时,会导致地下水中  $\text{Na}^+$  占有优势地位。因此, $[\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+]$  和  $[\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+]$  的比值可判断地下水径流过程中是否发生离子交换作用,可反映地下水径流演化过程中的矿化程度,研究区地下水的  $[\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+]$  和  $[\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+]$  平均值分别为 10.607 和 1.662,可知研究区主要是  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  占优势,属于低矿化度水,也侧面反映出研究区地下水主要由

表 7 研究区地下水各离子比值统计

项 目	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数
$[\text{Cl}^-/\text{Ca}^{2+}]$	0.006	0.561	0.101	0.099	0.987
$[\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-]$	0.028	2.843	0.278	0.332	1.194
$[\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-]$	0.002	0.279	0.039	0.045	1.152
$[\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}]$	0.020	2.723	0.218	0.331	1.514
$[\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+]$	1.322	53.000	10.607	8.249	0.778
$[\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+]$	0.244	16.000	1.662	2.152	1.295
$[\text{Na}^+/\text{Cl}^-]$	0.336	10.943	2.867	2.051	0.715

碳酸盐类矿物控制,其径流动力过程较为强烈。 $[\text{Na}^+/\text{Cl}^-]$  可表征地下水中是否具有长石矿物的溶解效应,对于低矿化水的  $[\text{Na}^+/\text{Cl}^-]$  比值通常大于标准海水  $[\text{Na}^+/\text{Cl}^-]$  平均值 0.85,而研究区地下水的  $[\text{Na}^+/\text{Cl}^-] = 2.867 > 0.85$ ,说明研究区的  $\text{Na}^+$  主要来自于含盐地层(如:芒硝等)风化-溶滤作用形成的,并不是来自于长石矿物的水岩作用导致的。

#### 4 结论

(1)研究区地下水分布受到地层岩性和地质构造控制,按水化学特征,以  $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$  型为主,占整个研究区面积 97.74%。

(2)研究区地下水阳离子以  $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Fe}$  离子为主,但  $\text{Ca}^{2+}$  控制了地下水类型,阴离子以  $\text{HCO}_3^-$  为主,其次为  $\text{SO}_4^{2-}$ ,TDS 均小于 1 g/L,pH 均值为 7.46,属于弱碱性低矿化度淡水。

(3)研究区  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Fe}$  离子、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  的变异系数相对较小,表明研究区地下水相对较为稳定;而  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$  的变异系数较大,说明  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$  易随环境变化而发生相应变化。

(4)相关性分析表明研究区地下水主要以  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  离子为主,且易以离子形态共存于地下水中。

(5)根据主成分分析和离子比例系数分析,研究区地下水以  $\text{Ca}^{2+}$  占优势, $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  主要来自于岩层中方解石、白云石、石膏矿物的溶解作用, $\text{Na}^+$  主要来自于芒硝等易溶盐的溶解作用, $\text{SO}_4^{2-}$  主要来自石膏、芒硝等易溶性矿物的溶解和黄铁矿等硫化矿物的风化、氧化作用, $\text{Cl}^-$  和  $\text{NO}_3^-$

(下转第 115 页)