doi: 10.19388/j.zgdzdc.2023.229

引用格式:张伟,陈文彬,李健,等. 广安市平行岭谷区地下水化学特征及控制因素分析[J].中国地质调查,2024,11(4): 72-81. (Zhang W, Chen W B, Li J, et al. Groundwater chemical characteristics and analysis of the controlling factors in paralleled ridge valley area of Guang'an City[J]. Geological Survey of China. 2024,11(4): 72-81.)

# 广安市平行岭谷区地下水化学特征及控制因素分析

张伟<sup>1,2</sup>,陈文彬<sup>1\*</sup>,李健<sup>1</sup>,赵明轩<sup>1</sup>,程键<sup>1</sup>

(1.中国地质调查局军民融合地质调查中心,四川 成都 610036; 2.中国地质大学(北京)水资源与 环境学院,北京 100083)

**摘要:**广安市渠江以东是川东典型的平行岭谷区,具有独特的水文地质条件,为探寻该区域地下水化学特征及控制因素,运用 Piper 三线图、Gibbs 图、Phreeqc软件、离子比例系数图及 Pearson 相关性分析等方法,结合区域水文地质条件综合分析区域地下水化学组分空间分布特征、水岩作用类型、地下水化学组分来源及其主控因素。研究结果表明:研究区内浅层地下水主要为低溶解性总固体(total dissolved solids,TDS)的淡水,浅层地下水阴离子主要为 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,阳离子以 Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>为主,地下水类型以 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> – Ca<sup>2+</sup>型、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> – Ca<sup>2+</sup> · Mg<sup>2+</sup>型和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> – Ca<sup>2+</sup> · Na<sup>+</sup>型为主;地下水水化学组分主要来源于碳酸盐岩及硅酸岩溶滤,盐岩对地下水影响小;地下水中的钾盐、石膏、硬石膏、盐岩、萤石均处于非饱和状态中,地层中相关矿物是地下水中相关离子的主要来源;地下水化学组分主要受到溶滤作用、正向阳离子交换、煤矿开采及农业活动控制。研究结果可为研究区水资源合理开发利用、生态环境保护以及成渝区域经济发展提供科学依据。

关键词:广安市;水化学;阳离子交换;淋滤作用

中图分类号: P641.3 文献标志码: A 文章编号: 2095-8706(2024)04-0072-10

## 0 引言

广安渠江以东是典型的川东平行岭谷区,特 殊的地形地貌形成了岭谷区特有的水文地质条 件,岭谷区人口集中,农业活动强烈,人类活动不 但对土壤性状产生重要影响,同时还影响到本区 域地下水的化学组分<sup>[1]</sup>。前人在研究区做了很多 应用性的调查研究:沈芳兴<sup>[2]</sup>利用华蓥山隧道地 下涌水特征结合正交分析法及 FLOW – 3D 数值 模拟分析得出区域降雨对隧道涌水影响最大;陈 盟<sup>[3]</sup>通过水文地质调查、地学统计、同位素技术等 厘清了华蓥山区岩溶系统与龙潭煤系地层的关 系;林云等<sup>[4]</sup>通过同位素技术及水化学研究,对 华蓥山岩溶隧道地下水化学特征及涌水来源进行 了分析研究;陈绪钰等<sup>[5]</sup>等利用基于证据权法的 敏感性计算方法对华蓥山中段地质灾害孕灾因子 敏感性进行了分析,提出了运用证据权相对系数 的方差作为敏感性指数,并采用两种敏感性指数 定量分析了各孕灾因子对地质灾害发育分布的影 响程度。但以上研究主要针对华蓥山区的工程地 质条件及岩溶突水等方面,缺乏对整个岭谷区地 下水化学特征及控制因素的研究。因此,本文综 合运用地下水化学分析方法,对广安市平行岭谷 区地下水化学特征进行系统分析,阐明区域地下 水化学成因的主控因素,旨在为区域水资源合理 开发利用、生态环境保护以及成渝区域经济发展提 供科学依据。

## 1 研究区概况

本文以广安市渠江以东平行岭谷区为研究

收稿日期: 2023-07-27;修订日期: 2024-06-29。

基金项目:中国地质调查局"成渝经济圈广安市地表基质调查(编号:DD20220864)"项目资助。 第一作者简介:张伟(1993—),男,工程师,主要从事水文地质与工程地质方面的研究工作。Email:weizhang01292022@163.com。 通信作者简介:陈文彬(1979—),男,正高级工程师,主要从事沉积及油气地球化学方面的研究工作。Email:cdcwenbin@qq.com。

区,面积约3300 km<sup>2</sup>。区域构造属四川中坳陷构 造区域,NE向构造为主,华蓥山以西属于川中褶 皱带、龙女寺半环状构造区,华蓥山以东属于川东 褶皱带<sup>[6]</sup>。山脉以NE—SW向为主,地势整体以 西高东低,北高南低,地形以小起伏低山和高、低 丘陵。丘陵区出露地层以侏罗系砂岩、泥岩地层 为主,在山区两翼出露须家河组含煤系的泥岩、页 岩和砂岩地层,三叠系的碳酸盐岩在华蓥山区广 泛分布,寒武系、奥陶系、志留系、石炭系、二叠系 碳酸盐岩地层仅局限出露于华蓥山复式背斜核 部;研究区属亚热带季风性气候区,气候温暖,热 量充足,雨量丰沛,年平均气温16℃,多年平均降 水量超过1000 mm,最多年为1485 mm,最少年 为836.6 mm。

根据地下水赋存条件研究区地下水可分为第 四系冲洪积孔隙水、碎屑岩孔隙裂隙水和基岩裂 隙水,以及山区的碳酸盐岩裂隙溶洞水。区内主 要以碎屑岩风化带孔隙裂隙水、基岩裂隙水为主, 且上述类型地下水多分布在包气带内,属于上层 滞水或潜水。区内地下水位埋深一般 2~20 m, 最深处可达 60 m<sup>[7]</sup>。本研究采样点为地下水位 小于 40 m 的碎屑岩孔隙裂隙潜水和基岩裂隙水, 统称为浅层地下水(图1)。



基 岩裂 原水; 2. 大 洪 河 水; 3. 碎 肖 岩 扎 原 裂 原 水; 4. 恢 酸 盐 岩
 裂 隙 溶 洞 水; 5. 河 流; 6. 湖 泊 、水 库; 7. 地 名

#### 图1 研究区地下水采样位置分布

#### Fig. 1 Groundwater sampling location in the study area

## 2 技术方法

#### 2.1 样品采集与测试

2022 年 8 月对研究区内浅层地下水进行系统 采样,采样点位如图1所示。共采集地下水样品30 组,其中碳酸盐岩裂隙溶洞水3组,基岩裂隙水7 组,碎屑岩孔隙裂隙水19组,河水1组。所有水样 采用2.5L聚乙烯塑料桶,在实验室清洗后,再在 现场用水样润洗3遍,取样时每组两桶,不留气泡, 并现场密封,采样完成当天送入实验室保存、测试。 现场采用便携式水质检测笔进行温度(T)、溶解性 总固体(total dissolved solids, TDS)、电导率(electrical conductance, EC)、pH 值测定,测试精度分别为 0.5 ℃,1 mg/L,1 µs/cm,0.05。离子测定由四川省 地质矿产勘查开发局成都综合岩矿测试中心完成,  $CO_3^{2-}$ 、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和 OH<sup>-</sup>采用滴定法测定;依照 《HJ 700-2004 水质 65 种元素的测定电感耦合等 离子体质谱法》<sup>[8]</sup>、《HJ 766—2015 水质 32 种元素 的测定电感耦合等离子体发射光谱法》<sup>[9]</sup>和 《HJ 84—2016 水质无机阴离子(F<sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO,<sup>-</sup>、 Br<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>、SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)的测定离子色谱 法》<sup>[10]</sup>对水样中的各项阴阳离子进行测试。所有样 品测试结果阴阳离子电荷平衡误差均在5%以内。

#### 2.2 数据处理

SPSS 软件作为一个专业的数据统计软件,广 泛运用在地下水化学特征及形成原因分析中<sup>[11]</sup>。 本文利用 SPSS 26.0 软件进行数据统计分析,运用 Phreeqc 软件进行地下水中矿物饱和指数计算,运 用 Arcgis 10.7 软件进行克里金法空间插值,分析研 究区地下水主要离子的空间分布特征,并绘制 piper 图、离子比值端元图、离子比例关系图等,研究 地下水的特征及控制因素。

# 3 结果与讨论

#### 3.1 地下水化学组分特征

测试结果见表 1, 研究区地下水常规离子特征阴 阳离子浓度关系分别为 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>-</sup> > Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup> > Na<sup>+</sup> + K<sup>+</sup> > Mg<sup>2+</sup>。HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>浓度变化范围分 别为 30. 30 ~ 443. 00 mg/L、2. 30 ~ 137. 00 mg/L、0. 27 ~ 106. 00 mg/L; Na<sup>+</sup> + K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>浓度变化范围分 别为 1.53~116.63 mg/L、4.10~111 mg/L、1.48~
31.80 mg/L。浅层地下水阴离子主要为 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、
分别占总阴离子浓度 79%、14%; 阳离子以 Ca<sup>2+</sup>、

Na<sup>+</sup> + K<sup>+</sup>离子为主,分别占总阳离子浓度 49%,39%。 研究区内 Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Na<sup>+</sup> + K<sup>+</sup>离子浓度变异系数较 大,表明空间差异性大,个别地区富集(表1)。

	表1	研究区浅层地下水化学参数特征统计
Tab. 1	Characteristic statistics of	chemical parameters for the shallow groundwater in the study

		HCO <sub>3</sub> -	$SO_4^2$ -	Cl -	F -	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na + K +	Ca <sup>2</sup> +	Mg <sup>2 +</sup>	TDS	pH 值	NO <sub>3</sub>
碳酸盐岩裂 隙溶洞水	最小值	165.00	16.20	1.03	0.08	0.10	1.53	55.90	2.04	172.00	7.10	0.10
	最大值	387.00	89.90	13.90	0.39	6.94	65.54	68.00	16.40	428.00	7.70	6.94
	均 值	251.67	49.37	5.36	0.20	2.49	29.02	61.40	10.15	305.33	7.47	2.49
	标准差	118.73	37.33	7.40	0.16	3.86	32.95	6.12	7.36	128.33	0.32	3.86
	变异系数	0.47	0.76	1.38	0.82	1.55	1.14	0.10	0.73	0.32	0.04	1.55
	最小值	30.30	2.30	0.27	0.03	0.02	4.64	4.10	1.48	51.00	6.10	0.02
	最大值	329.00	68.70	14.80	0.34	18.80	101.74	72.30	18.80	440.00	8.50	18.80
基岩裂隙水	均 值	192.47	26.30	5.16	0.18	7.73	39.37	33.00	8.13	243.29	7.36	7.73
	标准差	125.14	24.16	5.45	0.13	7.49	40.63	29.08	7.42	147.52	0.75	7.49
	变异系数	0.65	0.92	1.06	0.74	0.97	1.03	0.88	0.91	0.61	0.10	0.97
碎屑岩孔隙 裂隙水	最小值	30.50	6.30	0.66	0.08	_	6.05	8.79	2.31	146.00	6.30	_
	最大值	443.00	137.00	106.00	3.76	69.10	116.63	111.00	31.80	616.00	8.20	69.10
	均 值	265.79	47.38	28.25	0.43	25.96	47.86	60.62	17.35	387.89	7.34	23.36
	标准差	112.97	28.49	28.22	0.82	18.61	30.98	32.64	8.37	119.62	0.48	19.33
	变异系数	0.43	0.60	1.00	1.92	0.72	0.65	0.54	0.48	0.31	0.07	0.83

注:除 pH 值和变异系数无量纲外,所有参数单位均为 mg/L;"一"代表低于检出限(<0.016 mg/L)。

Piper 三线图被广泛用于水化学成分的表示<sup>[12-14]</sup>。 研究区地下水化学组分中碱土金属离子超过碱金属离 子(图2),弱酸根超过强酸根,碳酸盐超过 50%,同时 可知区域内大部分的浅层地下水阴离子趋于  $HCO_3^-$ 端,少部分为  $SO_4^{2-}$ ,阳离子则以  $Ca^{2+}$ 、 $Na^+$ 为主。对研 究区浅层地下水样进行分类,地下水化学类型分类如 表2 所示,研究区浅层地下水以  $HCO_3^- - Ca^{2+}$ 型、  $HCO_3^- - Ca^{2+} \cdot Mg^{2+}$ 型和  $HCO_3^- - Ca^{2+} \cdot Na^+$ 型为主。



Fig. 2 Piper triplex map of shallow groundwater in the study area

表 2 研究区浅层地下水类型分类

Tab. 2 Classification of shallow groundwater types in the study area

地下水类型	数量/个	采样点号
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> – Na <sup>+</sup>	3	12 17 25
$HCO_3^ Ca^{2+}$	5	1 \5 \18 \23 \28
$HCO_3^ Ca^2 + \cdot Na^+$	7	3 6 8 9 13 14 15
$HCO_3^ Ca^{2+} \cdot Mg^{2+}$	4	2 4 16 19 24
$\mathrm{HCO}_{3}^{-}$ – $\mathrm{Ca}^{2+}$ • $\mathrm{Mg}^{2+}$ • $\mathrm{Na}^{+}$	1	21
$\mathrm{HCO}_{3}^{-}$ $\cdot$ $\mathrm{SO}_{4}^{2-}$ – $\mathrm{Ca}^{2+}$ $\cdot$ $\mathrm{Na}^{+}$	2	10,22
$\rm HCO_3^-  \cdot  SO_4^{2 -} - Mg^{2 +}  \cdot  Na^{ +}$	1	11
$\mathrm{HCO}_{3}^{-}$ $\cdot$ $\mathrm{SO}_{4}^{2-}$ $ \mathrm{Ca}^{2+}$ $\cdot$ $\mathrm{Mg}^{2+}$	1	29
$HCO_3^- \cdot Cl^ Ca^{2+} \cdot Na^+$	1	27
$\mathrm{HCO}_{3}^{-}$ $\cdot$ $\mathrm{Cl}^{-}$ $ \mathrm{Ca}^{2+}$ $\cdot$ $\mathrm{Mg}^{2+}$	2	7 ,30
$\mathrm{HCO}_{3}^{-}$ $\cdot$ $\mathrm{Cl}^{-}$ $ \mathrm{Ca}^{2+}$ $\cdot$ $\mathrm{Mg}^{2+}$ $\cdot$ $\mathrm{Na}^{+}$	1	20

#### 3.2 主要离子空间分布特征

在 Arcgis 10.7 软件中利用克里金法对离子组 分含量进行空间插值(图 3)。研究区地下水化学 组分分布差异性较明显,东部地区 TDS 普遍大于西 部地区,且 TDS 主要受到硬度的控制。HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 与 Ca<sup>2+</sup>空间分布特征相似,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 与 Ca<sup>2+</sup>含量较高的 浅层地下水主要分布在北部和东部。华蓥山区浅 层地下水总体离子含量较低,西南地区 Na<sup>+</sup>偏高, 而 Ca<sup>2+</sup>离子偏低可能是由于南部地下水径流途径 较长,地下水阳离子交换作用较充分导致。Cl<sup>-</sup>、 SO<sub>4</sub><sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>在研究区东部含量较高,可能是来 源于东部区域地层内普遍存在的盐岩、石膏和煤。

#### NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、F<sup>-</sup>离子含量分布差异性明显,在个别点位含

量高于地下水质量标准[15]。





(d) K <sup>4</sup>

#### (e) HCO<sub>3</sub>







### 3.3 控制因素分析

Gibbs<sup>[16-17]</sup>基于全球地表水体的主要水化学 组分特征分析,将其水化学形成划分为3类:蒸发 结晶主导型、岩石风化主导型和大气降水主导型。 将研究区的地下水化学数据绘制到 Gibbs 图中,全 部水样点基本落在岩石风化主导区域,14 号和16 号点属于基岩裂隙水,TDS 值低于100,地下水流经 途径短,主要受大气降水影响。研究区地下水的主 控因素为岩石风化作用;个别地下水水力条件好, 地下水径流途径短,受大气降水影响;蒸发作用对 区域内地下水的影响不明显(图4)。

离子端元图可进一步分析地下水离子组分来 源于哪一种岩石的溶滤作用<sup>[18]</sup>。研究区水样点主 要位于硅酸岩与碳酸盐岩区域(图 5(a)),说明研 究区浅层地下水化学组分主要受硅酸岩和碳酸盐 岩溶滤作用控制,水样点有偏离碳酸盐岩端元的趋 势(图 5(b)),可能与浅层地下水的阳离子交换作 用有关<sup>[19]</sup>。



图 4 研究区水化学 Gibbs 图







为进一步判定在地下水径流过程中,地下水中 阳离子交换作用的强弱。通过  $Mg^{2+} + Ca^{2+} - SO_4^{2-} - HCO_3^{-}/Na^+ + K^+ - Cl^-浓度比值关系可以$ 进一步分析地下水中发生的阳离子交换作用<sup>[19]</sup>。研究区水样点分布拟合线斜率近似 -1,且存在明 $显的相关性(<math>R^2 = 0.9154$ ),说明研究区内存在较 强阳离子交换作用(图6)。

通过氯碱指数可以判断研究区阳离子交替吸附的方向(图7)。通常地下水中的 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>与 含水层表面的 Na<sup>+</sup>和 K<sup>+</sup>进行阳离子交换时,CAI – 1,CAI – 2均为负值,相反,如果离子交换反应的方 向相反,则 CAI – 1,CAI – 2 为正值,研究区绝大多 数地下水氯碱指数为负数,少部分地下水氯碱指数



 $HCO_3^-$  and  $Na^+ + K^+ - Cl^-$ 





为正值。表明研究区以正向阳离子交换为主,Ca<sup>2+</sup>、 Mg<sup>2+</sup>被吸附,Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>离子被释放到地下水中,这可 能也是导致个别地下水中 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>偏高的原因。

#### 3.4 离子来源分析

利用 SPSS 26.0 软件分析地下水化学参数间 的 Pearson 相关性(表3),TDS 与基本离子均显著 相关,其中与 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>相关系数在 0.75 以上,表明研究区内地下水的 TDS 主要由这 3 种 离子的含量控制。Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>呈高度相关 性,表明其可能有共同来源,这可能与区域内碳酸 盐岩地层内灰岩、白云岩风化有关。SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>与 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>离子呈显著相关,CI<sup>-</sup>离子与 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>呈显著相关,说明这些离子组合在 一定程度上有共同来源,这可能与区域内地层中 普遍存在的碳酸盐岩、硬石膏、盐岩等岩石的风化 有关。

表 3 研究区浅层地下水化学参数间的相关系数

Tab. 3 Correlation coefficient amony shallow groundwater chemical parameters in the study area

	Ca <sup>2</sup> +	$Mg^{2}$ +	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	$HCO_3^-$	$SO_4^2$ -	Cl -	F -	TDS	$_{\rm pH}$
Ca <sup>2 +</sup>	1									
Mg <sup>2 +</sup>	0.748 * *	1								
Na +	-0.16	-0.088	1							
K *	0.346	0.455 *	-0.032	1						
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.769 * *	0.564 * *	0.381*	0.229	1					
$SO_4^2$ -	0.397*	0.396 *	0.11	0.363 *	0.182	1				
Cl -	0.402 *	0.650 * *	0.298	0.515 * *	0.362 *	0.186	1			
F -	0.002	-0.058	0.209	-0.078	0.022	0.061	0.037	1		
TDS	0.767 * *	0.751 * *	0.435*	0.471 * *	0.839 * *	0.499 * *	0.686 * *	0.101	1	
pН	0.183	0.018	0.465 * *	-0.15	0.535 * *	-0.039	-0.058	0.196	0.292	1

注: \*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关,\* 在 0.5 水平(双侧)上显著相关。

矿物饱和指数(saturation index,SI)可以判断 地下水溶滤作用的强弱及矿物的溶解平衡状态,离 子比例系数则有利于分析地下水中主导的水岩作 用及判断离子的来源,当SI在-0.5~0.5范围内, 说明矿物处于溶解平衡状态<sup>[20-23]</sup>。研究区石膏与 硬石膏(图8(a))、钾盐与盐岩(图8(b))、萤石(图 8(c))均处于非饱和状态,说明区内地层中的钾盐、 石膏、硬石膏、盐岩、萤石均处于溶滤状态中,表明 地下水中相关离子可能来源于这些矿物的溶解。 半数以上的点白云石处于溶解平衡或饱和状态(图 8(d)),说明研究区内浅层地下水含水层中可能出 现白云石析出,而方解石和文石有着近乎相同的溶 解状态,只有少数点位处于非饱和状态,说明大多 数浅层地下水在径流途中碳酸盐矿物溶滤作用充 分,途径较长或存在水分蒸发现象,导致多数地下 水中碳酸盐处于溶解平衡或饱和状态。

利用离子比例关系可以进一步说明地下水化 学组分的来源及控制因素。研究区地下水中 Na<sup>+</sup> + K<sup>+</sup>与 Cl<sup>-</sup>比例关系中全部水样点均分布在 1:1 直线上方,说明浅层地下水除了来源于盐岩的 溶滤外,还可能源于硅酸岩溶滤、盐岩溶滤、正向阳 离子交换等(图9(a))。

由研究区浅层地下水 Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> 与 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 比 例关系中大多数水样点分布于 1:1 直线上方,说明 研究区地下水 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 除了来源碳酸盐岩溶滤 外,还存在其他来源;这与离子端元图分析地下水 化学组分来源于硅酸岩和碳酸盐岩相风化溶解相 吻合(图9(b))。



Fig. 8 Mineral saturation index

由研究区 Ca<sup>2+</sup> 与 Mg<sup>2+</sup> 关系图(图9(c))可知, 研究区 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 主要来源于碳酸盐岩与硅酸岩 溶滤,碳酸盐岩以方解石和白云岩为主。研究区 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 与 Ca<sup>2+</sup>比例关系中(图9(d))水样点几乎全 部分布于 1:1直线上方,说明研究区内地下水几乎 不受蒸发盐岩溶滤影响。同时,由 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 与 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> + Cl<sup>-</sup>关系图(图9(e))可知,绝大多数水样点 位于 1:1 直线上方,进一步说明区域内地下水主要 来源于硅酸岩及碳酸盐岩溶滤。受盐岩溶滤影 响小。

通过 Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> 与 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 毫克当量浓度比 值、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 与 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 毫克当量浓度比值可以进一步 分析碳酸、硫酸参与碳酸盐岩溶解的情况,当比值 为 2 时,硫酸参与碳酸盐岩矿物的溶解过程;当比 值为 1 时,碳酸参与碳酸盐岩的溶解过程;研究区 水样点主要位于比值线 2:1 附近及上方,说明碳酸 及硫酸均参与了碳酸盐岩矿物的溶解过程,同时碳 酸作用大于硫酸(图9(f))。

研究区内大多数 Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> 与SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> + HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 离子比例关系中水样点分布在 1:1 直线附近及其 下方(图 9(g)),由上分析可能是由于研究区内分布 的含煤系的地层和区内频繁的人类活动,导致部分的 浅层地下水中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 偏高,致使离子比值点位分布靠 右下方。

人类活动产生的三废及农业上广泛使用的化 肥等,可以在降雨入渗、淋滤作用下进入地下水影 响浅层地下水的水化学组分,硝酸盐可以在一定程 度上反映地下水受人类影响的程度<sup>[24]</sup>。(Cl<sup>-</sup>/ Na<sup>+</sup>)与(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/Na<sup>+</sup>)的比值越高,受人类活动的影 响越明显。研究区(Cl<sup>-</sup>/Na<sup>+</sup>)与(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/Na<sup>+</sup>)的离 子比例关系所示,二者的比值偏高,并且偏离了碳 酸盐岩和盐岩区域,有倾向农业活动端元的趋势, 说明研究区内浅层地下水在一定程度上受到农业 活动的污染(图9(h))。





# 4 结论

(1)广安市平行岭谷区内浅层地下水主要为较低TDS的淡水,浅层地下水阴离子主要为HCO<sub>3</sub>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,阳离子以Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>为主,地下水类型以HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> - Ca<sup>2+</sup>型、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> - Ca<sup>2+</sup> · Mg<sup>2+</sup>型和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> - Ca<sup>2+</sup> · Na<sup>+</sup>型为主。

(2)广安市平行岭谷区地下水 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>主要 来源于碳酸盐岩与硅酸岩溶滤,碳酸盐岩以方解石 和白云岩为主,碳酸及硫酸均参与了碳酸盐岩矿物 的溶解过程,同时碳酸作用大于硫酸; Na<sup>+</sup> + K<sup>+</sup>主 要来源于硅酸岩溶滤作用及正向阳离子交换作用, 受盐岩影响较小; Cl<sup>-</sup>主要来源于盐岩溶滤作用; SO<sub>4</sub><sup>-</sup>浓度可能与区内煤系地层及人类活动有关。

(3)广安市平行岭谷区浅层地下水中的钾盐、石膏、硬石膏、盐岩、萤石均处于非饱和状态中,地层中相关矿物是地下水中相关离子的来源;浅层地下水组分主要受到溶滤作用、正向阳离子交换作用及人类活动影响,溶滤作用以碳酸盐岩和硅酸岩为主,阳离子交换作用以正向阳离子交换为主,人类活动主要以采煤活动及农业活

动为主。

(4)由于水点数据只是为一期采集,区内存在 个别水点氟离子、铁锰离子浓度偏高,具体原因有 待进一步研究确定。

#### 参考文献(References):

- [1] National Research Council (NRC), Commission on Geosciences, Environment, and Resources, Board on Earth Sciences and Resources, et al. Basic Research Opportunities in Earth Science [M].
   Washington: National Academy Press, 2001.
- [2] 沈芳兴. 华蓥山北部地下水系统及其对隧道涌水的影响研 究[D]. 成都:西南石油大学,2017.

Shen F X. Research on Groundwater System and Its Influence on Tunnel Water Gushing in Northern Huaying Mt. [D]. Chengdu; Southwest Petroleum University, 2017.

- [3] 陈盟. 华蓥山区域岩溶水系统及其与龙潭煤系组合关系研究[D]. 成都:成都理工大学,2017.
   Chen M. Research on Regional Karst Water System and Its Combination Research on Regional Karst Water System and Its Combination Relationship with Longtan Coal Measures in Huaying-shan[D]. Chengdu; Chengdu University of Technology, 2017.
- [4] 林云,娄亚南,武亚遵,等.华蓥山隧道隧址区水文地球化学 特征及涌水来源识别[J].水资源与水工程学报,2017, 28(5):43-48.

Lin Y,Lou Y N,Wu Y Z, et al. Hydrogeochemical characteristics and identification of water source in Huayingshan tunnel district [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(5): 43 – 48.

 [5] 陈绪钰,李明辉,朱华平,等.华蓥山中段地质灾害发育分布 规律与孕灾因子敏感性研究[J].工程地质学报,27(S1): 276-288.

Chen X Y, LI M H, Zhu H P, et al. Study on the development and distribution law of geological hazards and sensitivity of hazard – brewing factors in the middle section of Huaying mountain [J]. Journal of Engineering Geology, 27 (S1):276 – 288.

- [6] 谢应修. 广安幅 H 48 17 1/20 万区域水文地质普查报告[R]. 广安:四川地质局南江水文地质大队,1981.
  Xie Y X. Report of Regional Hydrogeological Survey H 48 171/200000, Guangan Area[R]. Guang'an: Nanjiang Hydrogeological Group, Sichuan Geological Bureau, 1981.
- [7] 李树鼎.四川盆地红层软岩风化物及风化带的一般特征[J]. 四川建筑,2003,23(6):37-38.

Li S D. General characteristics of soft rock weathering and weathering zone in red bed of Sichuan Basin[J]. Sichuan Architectural, 2003,23(6):37 – 38.

[8] 环境保护部.HJ 700-2004 水质65 种元素的测定电感耦合等 离子体质谱法[S].北京:中国环境科学出版社,2014.

Ministry of Environment Protection HJ 700 – 2004 Water Quality – Determination of 65 Elements – Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014.

- [9] 环境保护部. HJ 766—2015 固体废物金属元素的测定电感耦合等离子体质谱法[S]. 北京:中国环境科学出版社,2015. Ministry of Environment Protection HJ 766-2015 Solid Waste -Determination of Metals - Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP - MS)[S]. Beijing: China Environmental Science Press,2015.
- [10] 环境保护部. HJ 84—2016 水质无机阴离子(F<sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、Br<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>、SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)的测定离子色谱法[S]. 中国环境科学出版社,2016.
  Ministry of Environment Protection HJ 84 2016 Water Quality Determination of Inorganic Anions (F<sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、Br<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>、SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) Ion Chromatography[S]. China Environ-
- mental Science Press,2016.
  [11] 刘国子,杨凤根,许斌. 基于 SPSS 的广西水库地下水化学特征 及其形成原因分析[J]. 湖北农业科学,2020,59(5):49-53.
  Liu G Z, Yang F G, Xu B. Analysis of groundwater chemical characteristics and formation causes of reservoirs in Guangxi based on SPSS[J]. Hubei Agricultural Sciences,2020,59(5):49-53.
- [12] 刘沛,黄峻川,喻晓.南伊沟水体水化学及氢氧同位素特征分析[J].中国地质调查,2023,10(1):91-99.
  Liu P,Huang J C,Yu X. Analysis of hydrochemistry and hydrogen and oxygen isotope characteristics of Nanyi Gully water body[J].
  Geological Survey of China,2023,10(1):91-99.
- [13] 卢兆群,彭明章,董妍,等.山东平阴地热水水文地球化学特征及成因分析[J].中国地质调查,2022,9(1):104-114.
  Lu Z Q,Peng M Z,Dong Y, et al. Hydrogeochemical characteristics and genesis analysis of geothermal water in Pingyin of Shandong Province [J]. Geological Survey of China, 2022,9(1): 104-114.
- [14] Piper A M. A graphic procedure in the geochemistry [J]. Science, 1970,17:1088 - 1090.
- [15] 中华人民共和国固定质量监督检验检疫总局,中国国家标准 化管理委员会. GB/T 14848—2017 地下水质量标准[S].中 国标准出版社,2017.
   General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Stundardization Administration of China. GB/T 14848 – 2017 Standard for Groundw-

ater Quality[S]. Standards Press of China, 2017.

- [16] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. Science, 1970, 170(3962): 1088 - 1090.
- [17] Gibbs R J. Water chemistry of the Amazon River[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1972, 36(9):1061-1066.
- [18] Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, et al. Global silicate weathering and CO<sub>2</sub> consumption rates deduced from the chemistry of large rivers[J]. Chemical Geology, 159(1/2/3/4):3-30.
- [19] 范祖金,魏兴,李佳文,等. 重庆市万州区浅层地下水化学特 征及控制因素[J]. 环境化学,2023,42(1):113-124.
  Fan Z J,Wei X,Li J W, et al. Hydrochemical characteristics and possible controls of shallow groundwater in Wanzhou District, Chongqing[J]. Environmental Chemistry, 2023,42(1):113 -

124.

- [20] 严建飞. 格尔木地区地下水地球化学特征与地下水流系统研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2017.
   Yan J F. Study on Groundwater Geochemical Characteristics and Groundwater Flow System in Golmud Area[D]. Beijing; China University of Geosciences, 2017.
- [21] 张涛,蔡五田,李颖智,等. 尼洋河流域水化学特征及其控制 因素[J]. 环境科学,2017,38(11):4537-4545.
  Zhang T, Cai W T, Li Y Z, et al. Major ionic features and their possible controls in the water of the Niyang River Basin[J]. Environmental Science,2017,38(11):4537-4545.
- [22] 张文琦,董少刚,马铭言,等.岱海盆地地下水化学特征及成因[J].干旱区研究,2021,38(6):1546-1555.

Zhang W Q, Dong S G, Ma M Y, et al. Chemical characteristics

and origin of groundwater in the Daihai Basin[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6):1546-1555.

- [23] 张敏,董少刚,张文琦,等. 红碱淖流域湖泊-地下水系统水化 学特征及成因[J]. 干旱区资源与环境,2022,36(5):102-109.
  Zhang M, Dong S G, Zhang W Q, et al. Hydrochemical characteristics and genesis of lake - groundwater system in the Hongjiannao Basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022,36(5):102-109.
- [24] 张志强,张强,张希雨,等. 川中红层灌区地下水硝酸盐污染 特征及影响因素[J]. 人民长江,2018,49(9):6-10.
  Zhang Z Q,Zhang Q,Zhang X Y, et al. Characteristics of groundwater nitrate pollution and identification of influencing factors in irrigation area in central Sichuan red layer basin[J]. Yangtze River,2018,49(9):6-10.

# Groundwater chemical characteristics and analysis of the controlling factors in parallel ridge valley area of Guang'an City

ZHANG Wei<sup>1,2</sup>, CHEN Wenbin<sup>1</sup>, LI Jian<sup>1</sup>, ZHAO Mingxuan<sup>1</sup>, CHENG Jian<sup>1</sup>

(1. Civil – Military Integration Center of China Geological Survey, Sichuan Chengdu 610036, China; 2. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract**: The eastern Qujiang of Guang'an City is a typical paralleled ridge valley area with unique hydrogeological conditions. The Piper triplex map, Gibbs map, Phreeqc software, ion proportional coefficient map and Pearson correlation analysis methods were used to study the chemical characteristics and the controlling factors of groundwater. And the spatial distribution of groundwater chemical components, water – rock interaction types and groundwater chemical components source and its controlling factors were comprehensively analyzed combined with regional hydrogeological conditions. The results show that shallow groundwater in the study area is low TDS fresh water. The shallow groundwater anions are mainly  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ , and the cations are mainly  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ . The groundwater types are mainly  $HCO_3^- - Ca^{2+}$ .  $Mg^{2+}$  and  $HCO_3 - Ca^{2+} \cdot Na^+$ . The groundwater types are mainly  $HCO_3^- - Ca^{2+}$ ,  $McO_3^- - Ca^{2+}$ .  $Mg^{2+}$  and  $HCO_3 - Ca^{2+} \cdot Na^+$ . The groundwater hydrochemical component mainly comes from the weathering of carbonate rock and silicate karst filtration, and salt rock has little effect on groundwater. The potassium salt, gypsum, anhydrite, salt rock and fluorite in groundwater are all in the unsaturated state, and the related minerals in the strata are the sources of related ions in groundwater. The chemical components of groundwater are mainly controlled by leaching, positive cation exchange, coal mining and agricultural activities. The research results could provide some scientific basis for the rational development and utilization of water resources in the study area, ecological environmental protection, and economic derelopment of Chengdu – Chongqiang region.

Keywords: Guang'an City; hydrochemistry; cation exchange; leaching

(责任编辑: 王晗)