

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2021.04.006

赣南缺水地区浅层地下水水化学特征及成因分析 ——以银坑幅为例

赵幸悦子, 肖攀*, 黎义勇, 邵长生

ZHAO Xing-Yue-Zi, XIAO Pan*, LI Yi-Yong, SHAO Chang-Sheng

(中国地质调查局武汉地质调查中心, 武汉 430205)

(Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China)

摘要:赣南地区是典型的缺水地区,查清该地区浅层地下水水化学特征及演化规律,对保障区域饮水安全和促进经济发展具有重要意义。现以银坑幅为例,综合采用数理统计、相关分析、Gibbs 图解及离子比例系数等方法对研究区 97 个浅层地下水样品进行分析,结果表明,研究区浅层地下水中阳离子以 Ca^{2+} 为主,阴离子以 HCO_3^- 为主,并且两者在阴阳离子中占绝对优势;浅层地下水水化学类型多样,以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 和 $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型水为主;研究区浅层地下水水化学过程以岩石风化溶滤作用为主导; Na^+ 、 K^+ 主要来源于钠长石、钾长石等硅酸盐的风化溶解, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 主要来源于碳酸岩风化溶解,其中方解石风化溶解作用较白云岩强;浅层地下水水化学特征受阳离子交换作用和人类活动影响不强烈。

关键词:浅层地下水;水化学特征;影响因素;赣南地区

中图分类号:P641.1

文献标识码:A

文章编号:2097-0013(2021)04-0418-09

Zhao X Y Z, Xiao P, Li Y Y and Shao C S. Hydrochemical Characteristics and Genesis of Shallow Groundwater in Water Shortage Area of Southern Jiangxi Province—Taking Yinkeng Sheet as an Example. *South China Geology*, 2021, 37(4): 418-426.

Abstract: Southern Jiangxi Province is always deemed as the areas with typical shortage of groundwater, investigation of the hydrochemical characteristics and evolution law of shallow groundwater in this area is of great significance to ensure drinking water safety and promote economic development. Now taking Yinkeng sheet survey area as an example, the shallow groundwater samples from 97 locations were analyzed through such methods as mathematical statistics, correlation analysis, Gibbs diagrams and ion scale coefficients. The result shows that the cations and anions in the shallow groundwater were mainly Ca^{2+} and HCO_3^- , with absolute superiority of numbers in the anion-cations; the hydrochemical types of shallow groundwater were various with the majority of $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ and $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$; The hydrochemical composition of shallow groundwater was mainly influenced by rock weathering and dissolution; Na^+ and K^+ in shallow groundwater mainly came from the dissolution of silicate (such as albite and potassium feldspar), Ca^{2+} and Mg^{2+} were mainly derived from weathering dissolution of carbonate rock, and the weathering and dissolution

收稿日期:2021-8-26;修回日期:2021-9-15

基金项目:中地质调查局地质调查项目“赣江流域水文地质调查(编号 DD20190329)”

第一作者:赵幸悦子(1987—),女,硕士,工程师,从事水文地质等方面工作,E-mail:zhaoxingyuezi@163.com

*通讯作者:肖攀(1984—),男,博士,高级工程师,从事水文地质环境地质等方面工作,E-mail:xiaopanfree2008@163.com

of calcite were stronger than that of dolomite; The hydrochemical characteristics of shallow groundwater are not strongly affected by cation exchange and human activities.

Key words: shallow groundwater; hydro-chemical characteristics; influence factor; Southern Jiangxi Province

水是影响人类生存和发展的重要因素之一,水质的好坏对人类健康和经济发展有着重大的影响。地下水中各化学组分浓度大小、存在形式及分布演化规律直接影响着地下水水质状况^[1],因此,研究地下水水化学特征及变化原因,对地下水资源的合理开发和利用具有重要意义。

常用的分析地下水水化学特征的方法有数理统计法、相关分析法、Piper 三线图法、Gibbs 图解法和离子比值法等。杨森等^[1]运用描述性统计、相关分析、离子比例分析和水化模拟分析等方法研究了高子店幅地下水和地表水的水化学特征,发现地下水主要离子组分受阳离子交换作用、蒸发浓缩作用和人类活动的共同影响;刘慧等^[2]采用描述性统计分析、相关分析、Piper 三线图法、Gibbs 图解法和离子比例系数法对窟野河流域 2011 年和 2016 年的地下水化学特征进行系统研究,得出地下水主要离子浓度空间分布差异日益明显,主要离子形成受岩石风化作用、阳离子交替吸附作用与人为因素共同影响;张涛等^[3]综合运用数理统计、Piper 三线图、Gibbs 模型和离子比等方法分析了蛤蟆通河流域地下水水化学特征,研究表明蛤蟆通河流域水化学离子组成受岩石风化作用控制,主要离子来源于硅酸盐岩和碳酸盐岩的风化溶解。

赣南地区是我国严重的缺水地区,长期以来地表水是当地居民饮用水的主要来源,如何找到优质稳定的地下水成为制约该区经济发展的关键问题。在国家脱贫攻坚战略部署下,开展研究区水文地质调查研究对助力当地脱贫攻坚及乡村振兴工作极其重要^[4]。本文依托“赣江流域水文地质调查”项目,以银坑幅为例,综合采用数理统计、相关分析、Gibbs 图解及离子比例系数等方法,全面系统的对研究区浅层地下水水化学特征及形成演化机制进行分析,为此地居民地下水用水安全及地下水资源合理开发与保护提供科学的理论依据。

1 研究区概况

银坑幅位于江西省赣州市于都县东北角,地理坐标范围为:东经 115°30'-115°45',北纬 26°10'-26°20'(图 1a)。研究区总体地势由西向东逐渐降低,中部为典型河谷平原,以低山丘陵地貌为主。该区处于亚热带季风气候区,气候温和,年平均气温 19.7℃,雨量充沛,年降雨量在 881.3 ~ 2309.9 mm 之间,多年平均降雨量为 1535.1 mm,降水时间多集中在 3-6 月,约占该地区全年降雨量的 55.4%,降雨总体表现为四周丘陵山区降雨量大于中部盆地地区^[5]。主要河流有银坑河、江背河和杰村河,银坑河属梅江水系,长约 50 km,流域面积约为 350 km²,江背河、杰村河属平江水系,长度约为 10 km,流域面积约为 50 km²,三大主要河流汇入贡江。该区位于雩山隆起与宁(都)于(都)坳陷接触部位,构造类型复杂多样,出露地层从老到新依次为震旦系 - 青白口系、泥盆系 - 侏罗系、白垩系和第四系^[5]。

研究区地下水类型包括松散岩类孔隙水、红层裂隙孔隙水、碳酸盐岩裂隙岩溶水、碎屑岩孔隙裂隙水及岩浆岩变质岩裂隙水^[5]。松散岩类孔隙水主要分布于梅江流域及其支流两岸;红层裂隙孔隙水主要分布于南东部银坑山一带;碳酸盐岩裂隙溶洞水主要分布于图幅中部的高兴圩、平安寨等地;碎屑岩类孔隙裂隙水主要分布于马安、银坑岩溶盆地两翼,呈北东向带状展布;岩浆岩变质岩裂隙水在图中广泛分布且不均匀。大气降水是区内地下水的主要补给来源,通过岩土体裂隙、孔隙和岩溶等构造渗入地下,形成地下水。地下水流向一般与地表水流向相同,径流途径大多较短,至河溪或地形低洼处,以股状或散流状形式排泄于地表。

2 样品采集与测试

在对银坑幅进行水文地质调查评价的基础上,

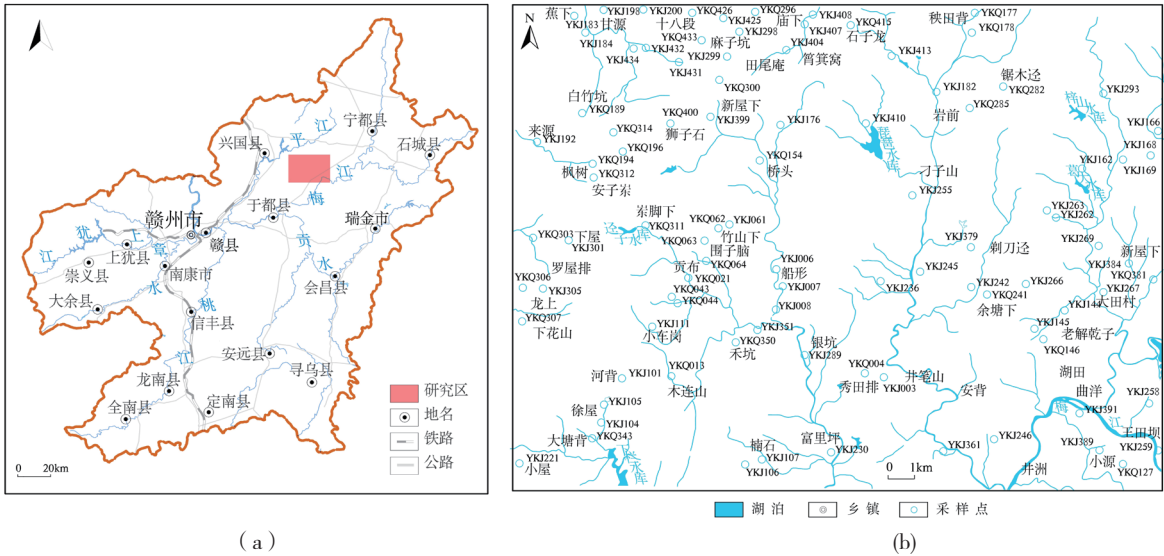


图 1 研究区地理位置(a)及采样点分布图(b)
Fig. 1 Geographical location (a) and distribution of water samples (b) of the study area

调查小组于 2020 年 7 月进行取样,综合考虑研究区地质构造发育特点、地形地貌以及水文地质条件,所取水样覆盖区内全部地下水类型,其中采集松散岩类孔隙水 16 组,红层裂隙孔隙水 17 组,碳酸岩盐裂隙溶洞水 10 组,碎屑岩类孔隙裂隙水 5 组以及岩浆岩变质岩裂隙水 49 组,共 97 组浅层地下水样品,均取自泉水或民井。样品采集严格按照送样实验室标准进行,采集前对聚乙烯样品瓶进行硝酸浸泡和去离子水清洗,采样时对采样瓶用取水刷洗 2-3 次,采样后立即用蜡将瓶口进行封装,具体采样点分布见图 1b。

本次研究选取浅层地下水样品中的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 NO_3^- 、pH、总硬度(TH)和可溶性总固体(TDS)测试结果进行分

析。除 pH 值由现场调查人员采用 manta 便携式水质分析仪进行测试外,其余指标均委托自然资源部中南矿产资源监督检测中心进行检测。

3 测试结果及分析

3.1 浅层地下水水化学特征

运用数理统计的方法对地下水中主要离子进行描述性统计是研究区域地下水水化学特征及其演化规律的基础工作,有助于初步了解区域地下水中各化学组分的富集、运移及转化规律^[6]。本次研究利用 Excel 软件对研究区内 97 组浅层地下水样品中的主要离子浓度及测试指标值进行了统计分析,统计结果见表 1。

表 1 研究区浅层地下水水化学描述性统计特征值 (mg/L)

Table 1 Descriptive statistics of shallow groundwater hydrochemistry in the study area

离子	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	TDS	TH	pH
平均值	3.05	5.32	18.97	2.17	2.5	3.9	73.61	146.49	43.59	6.93
中值	1.62	4.69	7.29	1.23	0.9	1.4	40.2	104	21.2	6.99
最大值	37.2	20	71	10.1	25.6	23.6	242	1190	203	7.87
最小值	0.07	0.43	0.76	0.12	0.18	0	6.95	15.6	2.39	6.04
标准差	5.48	3.76	21.29	2.47	3.77	5.51	68.65	169.75	50.28	0.43
变异系数	179.68	70.63	112.24	113.91	151.14	141.21	93.26	115.88	115.35	6.24

研究区浅层地下水 pH 值在 6.04 ~ 7.87 之间,均值为 6.93,仅 16% 的水样 pH 值在 6.1 ~ 6.4 之间,为酸性水,其余水样 pH 值均在 6.5 ~ 8 之间,属于中性水; K^+ 质量浓度介于 0.07 ~ 37.2 mg/L 之间,均值为 3.05 mg/L; Na^+ 质量浓度介于 0.43 ~ 20 mg/L 之间,均值为 5.32 mg/L; Ca^{2+} 质量浓度介于 0.76 ~ 71 mg/L 之间,均值为 18.97 mg/L; Mg^{2+} 质量浓度介于 0.12 ~ 10.1 mg/L 之间,均值为 2.17 mg/L; Cl^- 质量浓度介于 0.18 ~ 25.6 mg/L 之间,均值为 2.5 mg/L; SO_4^{2-} 质量浓度介于 0 ~ 23.6 mg/L 之间,均值为 3.9 mg/L,部分样品未检测出 SO_4^{2-} ; HCO_3^- 质量浓度介于 6.95 ~ 242 mg/L 之间,均值为 73.61 mg/L;TDS 质量浓度介于 15.60 ~ 1190 mg/L 之间,均值为 146.49 mg/L;TH 质量浓度介于 2.39 ~ 203 mg/L 之间,均值为 43.59 mg/L。

依据统计分析结果可知,所取水样中仅 2 组水样属微咸水 (TDS > 1000 mg/L),其余水样为淡水

(TDS < 1000 mg/L),由此可见研究区浅层地下水总体属于淡水范畴,适宜饮用;TH 值的高低代表水的软硬程度,当 TH < 150 mg/L 时属软水,150 mg/L < TH < 300 mg/L 时属微软水,300 mg/L < TH < 450 mg/L 时属硬水,而当 TH > 450 mg/L 时则属极硬水^[7],83% 的水样 TH 值小于 150 mg/L,其余则均在 150 ~ 300 mg/L 之间,表明研究区浅层地下水大部分属软水范畴。各指标中 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 变异系数均超过 100%,反映出研究区浅层地下水水化学组分具有一定的空间离散性。

研究区浅层地下水中主要阳离子质量浓度表现为 Ca^{2+} > Na^+ > K^+ > Mg^{2+} ,主要阴离子质量浓度表现为 HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^- (表 1),通过绘制的浅层地下水水化学参数箱型图(图 2)可以看出, Ca^{2+} 和 HCO_3^- 分别为阳离子和阴离子的优势离子,其中, Ca^{2+} 占阳离子总浓度的 64%, HCO_3^- 占阴离子总浓度的 92%。

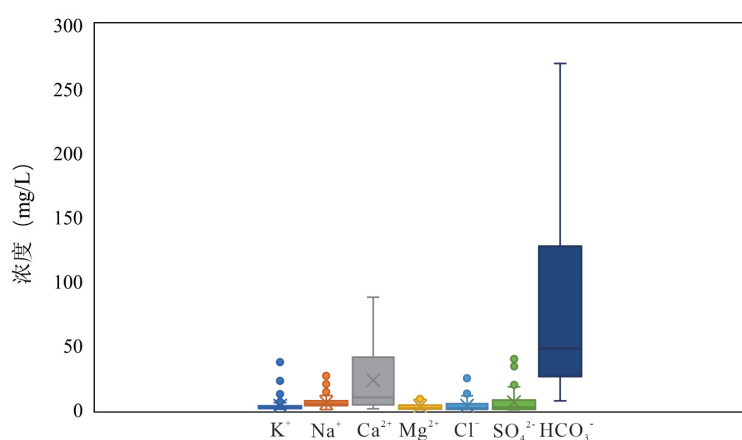


图 2 研究区浅层地下水水化学参数箱型图

Fig. 2 Box plots of shallow groundwater chemical parameters in the study area

3.2 浅层地下水水化学类型

地下水中化学组分之间的相关性可以从一定程度上反映出离子的来源和差异性^[6,15],采用 SPSS 软件计算得到研究区地下水离子间的相关系数 R(表 2),R 值越大相关程度越高^[8]。研究区浅层地下水化学组分相关性矩阵指示出 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 都存在显著的相关性,相关系数 R 分别为 0.967 和 0.832,同时 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 也存在较高的

相关性,相关系数 R 为 0.821,由此可推测 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 有着相同的物质来源,可能来自碳酸盐、硅酸盐或者石膏的溶解。其次, Na^+ 和 Cl^- 也呈现出显著相关性,相关系数 R 为 0.696,地下水中 Na^+ 的来源主要是大气降水、蒸发盐岩的溶解作用或钠长石等含钠硅酸盐溶解,研究区水样点大部分 Na^+ - Cl^- 值相对较高,说明 Na^+ 来源于含钠硅酸盐溶解的可能性大于蒸发盐岩的溶解和大气降水。

表 2 研究区浅层地下水主要离子相关关系

Table 2 Correlation between major ions of shallow groundwater in study area

	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	TDS	pH
K ⁺	1	.470**	.317**	.262**	.462**	.393**	.377**	.311**	.085
Na ⁺	.470**	1	.163	.043	.696**	.410**	.167	.177	.056
Ca ²⁺	.317**	.163	1	.821**	.562**	.551**	.967**	.270**	.330**
Mg ²⁺	.262**	.043	.821**	1	.410**	.474**	.832**	.256*	.274**
Cl ⁻	.462**	.696**	.562**	.410**	1	.513**	.498**	.264**	-.034
SO ₄ ²⁻	.393**	.410**	.551**	.474**	.513**	1	.411**	.134	.105
HCO ₃ ⁻	.377**	.167	.967**	.832**	.498**	.411**	1	.287**	.386**
TDS	.311**	.177	.270**	.256*	.264**	.134	.287**	1	.032
pH	.085	.056	.330**	.274**	-.034	.105	.386**	.032	1

** . 在 0.01 级别(双尾),相关性显著, * . 在 0.05 级别(双尾),相关性显著.

依据舒卡列夫分类法,研究区内松散岩类孔隙水地下水化学类型以 HCO₃-Ca 为主,红层裂隙孔隙水化学类型以 HCO₃-Ca、HCO₃-Ca·Na 为主,碎屑岩类孔隙裂隙水和碳酸盐岩裂隙溶洞水地下水化学类型以 HCO₃-Ca 为主,岩浆岩变质岩裂隙水地下水化学类型以 HCO₃-Ca·Na 和 HCO₃-Na·Ca 为主。总体来说,研究区浅层地下水水化学类型以 HCO₃-Ca、HCO₃-Ca·Na、HCO₃-Na·Ca 为主,约占所取水样的 87.63%,其次是 HCO₃-Ca·Mg、HCO₃-

Na 和 HCO₃-Ca·Na·Mg, 约占所取水样的 8.25%, 其余 4.12% 的水样类型较为分散,离子组合多样。

依据研究区内不同类型浅层地下水化学数据,作 Piper 三线图(图 3),从图上可以看出,各种类型采样点在图中分布较为分散,反映出区内浅层地下水水化学类型较为多样,浅层地下水样品整体呈现出阳离子向 Ca²⁺ 端元靠近,阴离子向 (HCO₃+Cl⁻) 端元靠近的趋势。

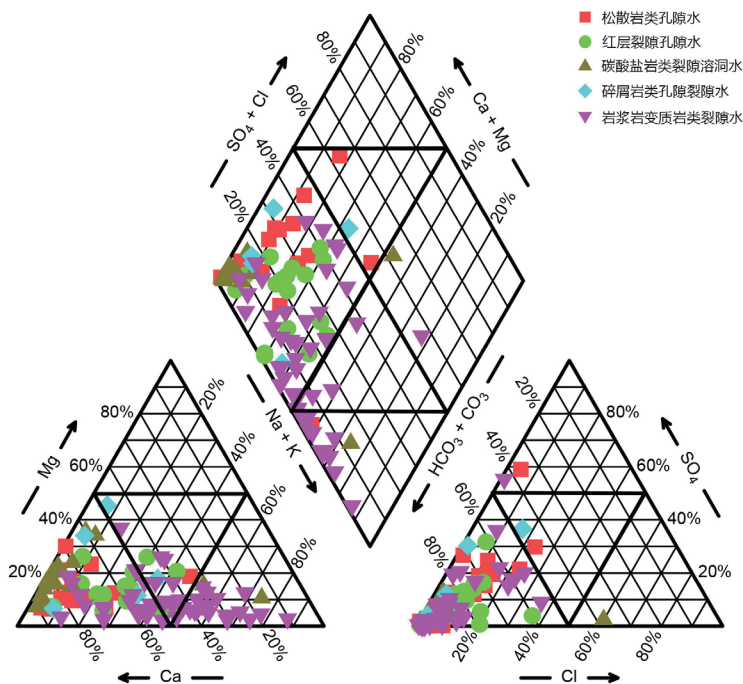


图 3 研究区浅层地下水 Piper 三线图

Fig. 3 Ternary diagrams for ions of shallow groundwater in the study area

4 地下水水文地球化学作用

4.1 控制因素

Gibbs 图是利用 TDS 与 $\text{Na}^+(\text{Na}^+\text{+Ca}^{2+})$ 、TDS 与 $\text{Cl}^-(\text{Cl}^-\text{+HCO}_3^-)$ 的关系来反应水岩作用、蒸发浓缩作用和大气降水对地下水化学成分演化过程的影响程度^[9],将天然水的形成分为降水作用控制型、岩石风化控制型和蒸发结晶控制型三种类型。

型。当 TDS 值大于 300 mg/L 且 $\text{Na}^+(\text{Na}^+\text{+Ca}^{2+})$ 或 $\text{Cl}^-(\text{Cl}^-\text{+HCO}_3^-)$ 的比值在 0.5 ~ 1.0 之间时,水样落在蒸发结晶作用区;当 TDS 值在 70 ~ 300 mg/L 之间且 $\text{Na}^+(\text{Na}^+\text{+Ca}^{2+})$ 或 $\text{Cl}^-(\text{Cl}^-\text{+HCO}_3^-)$ 的比值小于 0.5 时,水样落在岩石风化作用区;当 TDS 值小于 70 mg/L 且 $\text{Na}^+(\text{Na}^+\text{+Ca}^{2+})$ 或 $\text{Cl}^-(\text{Cl}^-\text{+HCO}_3^-)$ 的比值在 0.5 ~ 1.0 之间时,水样落在大气降水作用区^[10]。

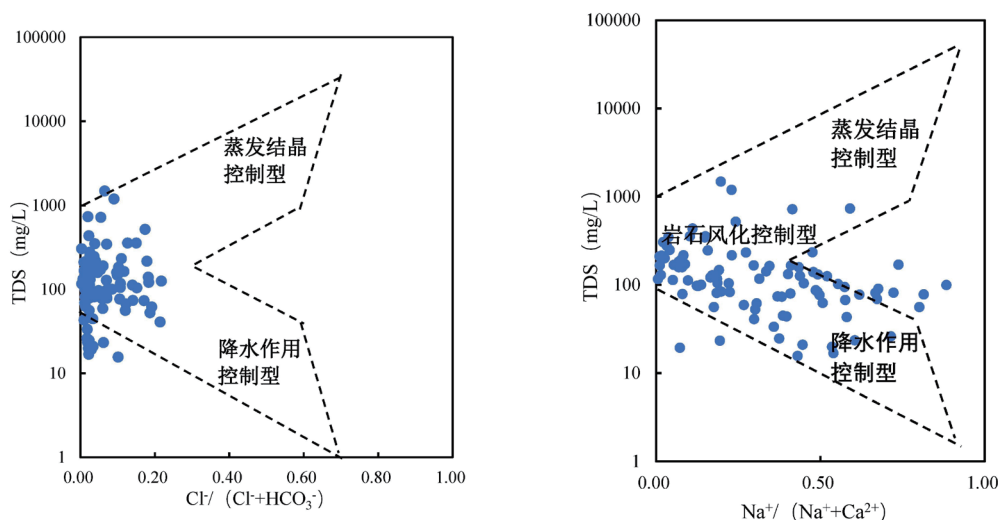


图 4 研究区浅层地下水 Gibbs 图

Fig. 4 Gibbs plots of shallow groundwater in the study area

依据样品测试结果可知,研究区 69% 的浅层地下水 TDS 值在 70 ~ 300 mg/L 之间, $\text{Na}^+(\text{Na}^+\text{+Ca}^{2+})$ 的毫克当量比值小于 0.5, 且所有浅层地下水样 $\text{Cl}^-(\text{Cl}^-\text{+HCO}_3^-)$ 的毫克当量比值均小于 0.5。从研究区浅层地下水样的 Gibbs 图(图 4)亦可看出水样主要落在岩石风化控制型区域,但同时有向降水作用控制区延伸的趋势,而且部分样品落在三区以外的空白区,表明浅层地下水中的离子组成主要受岩石风化作用影响,同时,大气降水对浅层地下水化学组分的形成有一定影响作用,部分样品非天然成因,受到人类活动的干扰。

4.2 主要离子来源

地下水中 Na^+ 和 K^+ 一般来源于大气降水、岩盐或硅酸盐的风化溶解^[11]。海水中 Na^+/Cl^- 比值约为 0.86, 大气降水中 Na^+/Cl^- 比值与海水接近。研究区浅层地下水样品中 Na^+/Cl^- 比值在 0.71 ~ 66.94 之间, 仅 2 个浅层地下水样 Na^+/Cl^- 比值小于 0.86。

由图 5 可知,几乎全部样品点落在 1 : 1 线上方,表明大气降水不是研究区浅层地下水中 Na^+ 、 Cl^- 的主要来源;同时,数理统计结果显示研究区浅层地下水中 Na^+ 含量远大于 Cl^- 含量,因此还存在其他阴离子来平衡多余的 Na^+ ,由此判断出大气降水并非研究区浅层地下水中 Na^+ 主要来源。

研究区浅层地下水样品 ($\text{Na}^+\text{+K}^+$) 和 Cl^- 比值大部分落在 1 : 1 线上方(图 6), 且 $(\text{Na}^+\text{+K}^+) - (\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ 大部分为正值,表明 Na^+ 和 K^+ 的主要来源不是盐岩的溶解,而是来源于钠长石和钾长石等硅酸盐的风化溶解。

地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐岩、硅酸盐或者石膏的风化溶解,但硅酸盐与酸反应释放出 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的可能性与碳酸盐相比低很多,一般可忽略不计^[12]。浅层地下水样离子统计分析结果显示,虽有 62% 的水样有 SO_4^{2-} 检出,但其中 84% 的水样 SO_4^{2-} 质量浓度都在 10 mg/L 以下,表明石

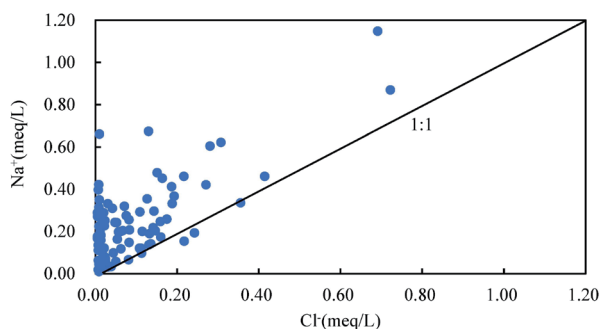
图5 研究区浅层地下水中 Na^+ 与 Cl^- 比例关系图

Fig. 5 Plots showing the relationships between Na^+ and Cl^- of shallow groundwater in the study area

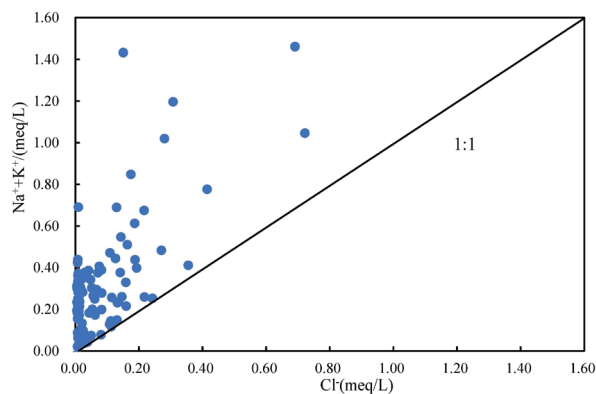
图6 研究区浅层地下水中 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ 和 Cl^- 比例关系图

Fig. 6 Plots showing the relationships between $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ and Cl^- of shallow groundwater in the study area

膏的溶解不是 Ca^{2+} 的主要来源,由此可以判断出研究区浅层地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐的风化溶解。图7中 $\text{HCO}_3^-/(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 比值约为 1.65, 介于白云岩和方解石比值之间,表明研究区浅层地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 主要由这两种碳酸盐的风化溶解提供。

当地下水中 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值为 0.5 时,表明白云石和方解石均参与了溶解反应,在图8中研究区浅层地下水样大部分落在 0.5 比值线以下,由此可知方解石风化溶解占主导地位,部分样点落在 0.5 比值线以上,表明同时存在白云石风化溶解。在离子相关性分析中, HCO_3^- 和 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 都存在显著的相关性(表2),这也充分说明了 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 有着

相同的物质来源。由表1可知, Ca^{2+} 为主要的阳离子,而 Mg^{2+} 含量普遍较低,反映出方解石的风化溶解作用较白云石强烈。

$(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)/\text{HCO}_3^-$ 比值可用于判断碳酸盐和蒸发岩对地下水中主要阴离子来源的影响程度,当 $(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)/\text{HCO}_3^-$ 比值大于 1 时,说明地下水中阴离子主要来源于蒸发岩,反之则主要来源于碳酸盐^[13]。根据离子浓度统计值可知,研究区浅层地下水样品中仅 2 个样品 $(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)/\text{HCO}_3^-$ 比值大于 1,其余均小于 1,由此指示出碳酸盐是研究区浅层地下水阴离子的主要来源。

4.3 阳离子交换作用

阳离子交换作用通常是指 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 、 K^+

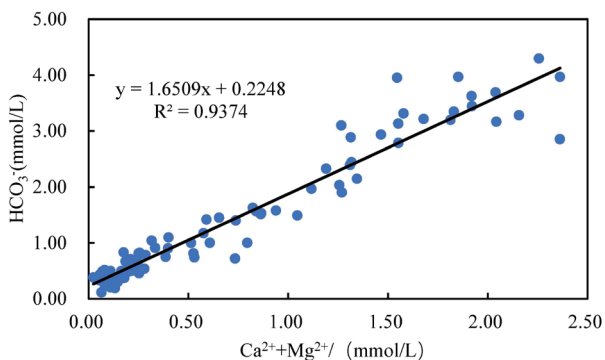
图7 研究区浅层地下水中 HCO_3^- 与 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 比例关系图

Fig. 7 Plots of HCO_3^- versus $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ of shallow groundwater in the study area

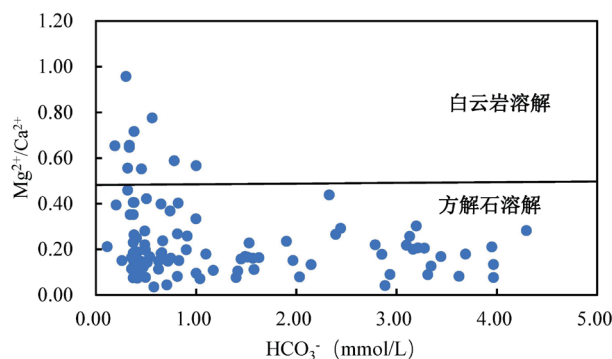
图8 研究区浅层地下水中 HCO_3^- 与 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比例关系图

Fig. 8 Plots of HCO_3^- versus $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ of shallow groundwater in the study area

之间的交替作用,其对地下水化学演化也存在一定的影响,通常用 $(\text{Mg}^{2+}+\text{Ca}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}-\text{HCO}_3^-)/(\text{Na}^+-\text{Cl}^-)$ 的比值来反应^[14],研究区浅层地下水样品投点大部分分布于 $(\text{Mg}^{2+}+\text{Ca}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}-\text{HCO}_3^-)/(\text{Na}^+-\text{Cl}^-)$ 比值线上或两侧(图 9),同时有少部分水样远离比值线,表明研究区存在一定的阳离子交换作用,但相关系数 $R^2=0.4303$,表明交换作用不明显。另外,离子相关性统计结果显示 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 存在显著的相关性,由此也可推断出该区浅层地下水中阳离子交换作用不强烈。

4.4 人类活动影响

依据 Gibbs 图可判断出研究区浅层地下水离子组成主要受岩石风化作用控制,但无法显示人类活动对地下水离子组分演化特征的影响,利用 $[(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}-\text{SO}_4^{2-})/\text{HCO}_3^-]$ 与 $[(\text{Na}^++\text{K}^+-\text{Cl}^-)/\text{HCO}_3^-]$ 比例系数相关性可判断出地下水化学组分受人为因素和岩石风化作用影响大小的对比情况^[15]。由图 10 可知,大部分样品点落在岩石风化作用控制区,少量样品点落在人为因素影响区,表明研究区浅层地下水化学组分形成受岩石风化作用影响大于人为因素。

通过图 10 可知,研究区部分样品点受到人类活动的影响。人类活动对地下水中离子组分的影响程度通常用 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{NO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ 比值来衡量, $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ 比值大小代表受工矿活动的影响程度, $\text{NO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ 比值大小代表受农业活动和生活污水的影响程度,当 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ 比值大于 $\text{NO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ 比

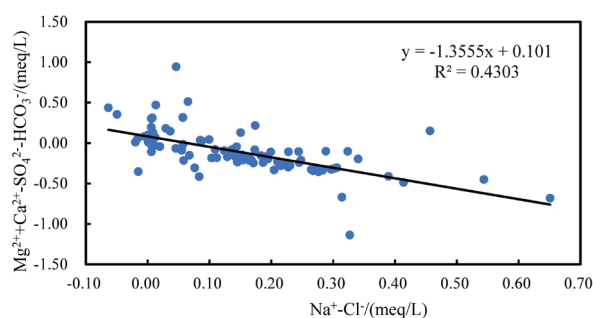


图 9 研究区浅层地下水阳离子交换作用关系图

Fig. 9 Cation exchange of shallow groundwater in the study area

值时表示受工矿活动的影响较大,反之受农业活动和生活污水的影响较大^[15]。研究区 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{NO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ 比值均较小(图 11),说明浅层地下水受人类活动影响不强烈。依据《生活饮用水标准》(GB5749-2006)^[16],浅层地下水全分析 45 个水样中有 17 个水样未检测出 SO_4^{2-} ,其余水样中 SO_4^{2-} 浓度大小均符合生活饮用水标准;仅存在 7 个水样 NO_3^- 浓度超标,最大值为 52.3 mg/L,与这些区域存在大规模蔬菜种植基地情况吻合,其余水样 NO_3^- 含量均符合生活饮用水标准。

5 结论

(1) 研究区浅层地下水 TDS 值 98% 小于 1000 mg/L,属于淡水范畴,83% 的水样 TH 值小于 150 mg/L,总体来说为软水,pH 平均值为 6.93,多

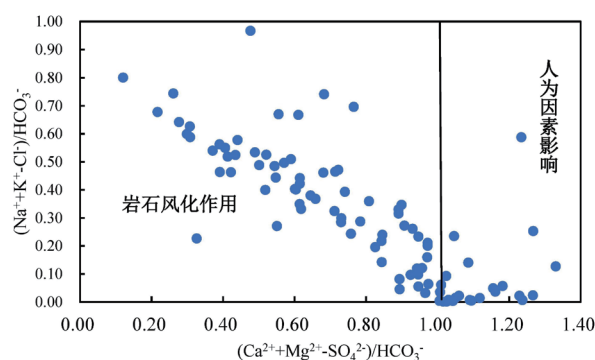


图 10 研究区浅层地下水中 $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}-\text{SO}_4^{2-})/\text{HCO}_3^-$ 与 $(\text{Na}^++\text{K}^+-\text{Cl}^-)/\text{HCO}_3^-$ 比例关系图

Fig. 10 Plots of $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}-\text{SO}_4^{2-})/\text{HCO}_3^-$ versus $(\text{Na}^++\text{K}^+-\text{Cl}^-)/\text{HCO}_3^-$ of shallow groundwater in the study area

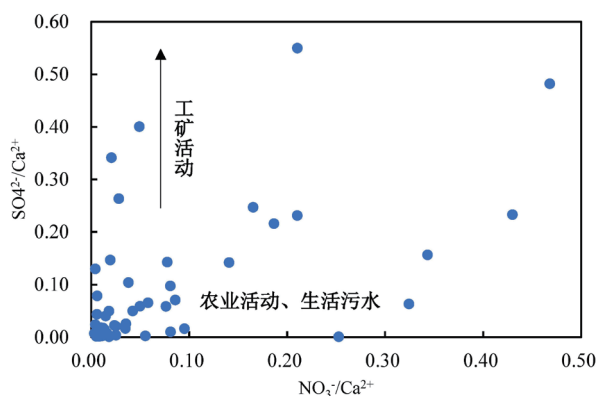


图 11 研究区人类活动对浅层地下水影响程度图

Fig. 11 Human activities impact of shallow groundwater in the study area

为中性水,少量为酸性水。浅层地下水中优势阳离子为 Ca^{2+} , 占阳离子总浓度的 64%, 优势阴离子为 HCO_3^- , 占阴离子总浓度的 92%。 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 变异系数均超过 100%, 显示出较强变异性。浅层地下水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-CaNa}$ 和 $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型水, 其余水样类型较为分散, 离子组合较为复杂。

(2) 研究区浅层地下水主要离子组成受岩石风化作用控制, 部分地区受大气降水作用影响。 Na^+ 、 K^+ 主要来源于钠长石、钾长石等硅酸盐的风化溶解作用, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐的风化溶解作用, 且以方解石风化溶解占主导地位。此外, 浅层地下水水化学特征受阳离子交换作用和人类活动影响较小。

参考文献:

- [1] 杨森, 李义连, 姜凤成, 杨国栋. 高店子幅水化学特征及水质评价 [J]. 地质科技情报, 2019, 38(2): 226-234.
- [2] 刘慧, 白皓, 田国林. 神木市窟野河流域地下水水化学时空演化特征 [J]. 人民黄河, 2019, 41(8): 83-89.
- [3] 张涛, 何锦, 李敬杰, 曹月婷, 龚磊, 刘金巍, 边超, 蔡月梅. 蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素 [J]. 环境科学, 2018, 39(11): 4981-4990.
- [4] 蒲文斌, 钱康, 陈鹏, 张继, 韩小刚, 魏良帅. 乌蒙山 1:5 万奎香幅地下水水质评价及相关性分析 [J]. 地下水, 2020, 42(2): 7-10+33.
- [5] 肖攀, 黎义勇, 刘前进, 刘凤梅, 黄旭娟. 银坑幅 1:5 万水文地质图说明书 [R]. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 2021.
- [6] 孙为奕, 吴勇, 卓勇, 田梦莎, 贺密. 巴中市恩阳镇地区浅层地下水水文地球化学特征分析 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16(27): 114-121.
- [7] 杨子林, 李培月, 吴建华, 崔先伟. 泾源县饮用地下水水化学特征及水质评价 [J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(5): 99-104.
- [8] 何军, 彭轲, 肖攀. 咸宁地区地下水水化学特征及其形成机制 [J]. 资源环境与工程, 2017, 31(2): 196-201.
- [9] 王攀, 靳孟贵, 路东臣. 河南省永城市浅层地下水水化学特征及形成机制 [J]. 地球科学, 2020, 45(6): 2232-2244.
- [10] 陈昌剑, 马青山, 徐卫东, 田福金. 南昌平原区孔隙地下水水化学特征及成因分析 [J]. 地下水, 2021, 43(3): 13-15+96.
- [11] 唐金平, 张强, 胡漾, 邵江, 何文君, 张宇. 巴中北部岩溶山区地下水水化学特征及演化分析 [J]. 环境科学, 2019, 40(10): 4543-4552.
- [12] 徐明, 刘宏伟, 钱会. 华县地下水水化学特征及水质评价 [J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(6): 83-86+149.
- [13] 刘鑫, 向伟, 司炳成. 渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素 [J]. 环境科学, 2021, 42(6): 2817-2825.
- [14] 寇永朝, 华琨, 李洲, 李志. 泾河支流地表地下水的水化学特征及其控制因素 [J]. 环境科学, 2018, 39(7): 3142-3149.
- [15] 陈雯, 黎清华, 余绍文, 刘怀庆. 广西防城区地下水水化学特征及离子来源分析 [J]. 华南地质与矿产, 2017, 33(2): 162-168.
- [16] 中华人民共和国卫生部. 生活饮用水卫生标准: GB 5749-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.