

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.07.015

云南乌蒙山盘河地区地下水水化学及同位素特征

钱康¹, 张继^{1*}, 陈鹏¹, 蒲文斌¹, 陈贝贝¹, 魏良帅²QIAN Kang¹, ZHANG Ji^{1*}, CHEN Peng¹, PU Wenbin¹, CHEN Beibei¹, WEI Liangshuai²

1.四川省地质工程勘察院集团有限公司, 四川 成都 610072;

2.中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734

1.Sichuan Institute of Geological Engineering Investigation Group Co., Ltd., Chengdu 610072, Sichuan, China;

2.Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu 611734, Sichuan, China

摘要:在乌蒙山1:5万五寨幅水文地质调查的基础上,采集地下水样品,结合地下水水化学组分聚类分析和因子分析方法,研究区域地下水水化学特征,讨论其与水质评价结果的关系。结果表明,研究区地下水水化学类型以HCO₃-Ca型水为主,水化学组分具有明显的空间变异性。控制研究区地下水水化学组分的主要因素依次为水岩作用时间、含水层介质类型和人类活动。同位素测试结果印证了浅表地下水循环快、蒸发量较少,地下水的盐分来源以矿物的溶解和溶滤为主。盘河区域地下水水质较好,尤以玄武岩浅表风化裂隙富水结构中的A型水水质最优,适合作为该缺水区的开发利用水源。B型水多为沉积岩区典型的溶滤水。C型水为V类水,超标指标主要为SO₄²⁻,源于原生矿物溶解和废弃煤矿矿井涌水。D型水多经过中深部循环。通过聚类分析法识别地下水的形成演化过程,对在研究区开展供水井选址、发现矿泉水资源和水质评价有指导意义。

关键词:水化学特征;同位素特征;聚类分析;因子分析;乌蒙山区;水文地质调查工程

中图分类号:P641.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)07-1291-09

Qian K, Zhang J, Chen P, Pu W B, Chen B B, Wei L S. Hydrochemical and isotopic characteristics of groundwater in Panhe area of Wumeng Mountain, Yunnan. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(7): 1291-1299

Abstract: This paper aimed at studying hydrochemical chemical characteristics in Wumeng Mountain1:50000 Wuzhai sheet. On the basis of hydrogeological survey in the study area, groundwater samples were collected, and the cluster analysis and factor analysis were used to discuss the relationship between the result and groundwater quality assessment. The results show that the main chemical type of groundwater in the study area is HCO₃-Ca type, and the hydrochemical components have obvious spatial variability.

The main factors controlling the hydrochemical composition of groundwater in the study area are water rock interaction time, aquifer medium type and human activities. The isotopic test results confirm that the circulation of shallow groundwater is fast and the evaporation is less, and the salt source of groundwater is mainly dissolution and leaching of minerals. The groundwater quality in Panhe area is good, especially the type A water in the water rich structure of shallow weathering fissures of basalt is the best, which is suitable for the development and utilization. Type B water is mostly typical solution filtered water in sedimentary rock area. Type C water is class V water, and the over standard index is mainly SO₄²⁻, which comes from the dissolution of primary minerals and the water inflow of abandoned coal mines. Most of the D-type water passes through the middle and deep circulation. The cluster analysis method can identify the formation and evolution process of groundwater, which has guiding significance for water supply well site selection, discovery of mineral water resources and water quality evaluation in the study area.

Key words: hydrochemical characteristics; isotopic characteristics; cluster analysis; factor analysis; Wumeng Mountain; hydrogeological survey engineering

收稿日期:2021-05-16;修订日期:2021-08-02

资助项目:中国地质调查局项目《乌蒙山连片贫困缺水1:5万水文地质调查》(编号:DD20160287)和四川省科技计划《大型复杂红层岩质滑坡灾变机理及防控技术研究》(编号:2021YFSY0036)

作者简介:钱康(1991-),男,硕士,工程师,从事水文地质、水文地球化学工作。E-mail:wunaiyufeng@163.com

*通信作者:张继(1974-),男,博士,教授级高级工程师,从事水文地质、岩石学研究。E-mail:276582940@qq.com

乌蒙山连片贫困缺水位于云贵高原北部金沙江下游的乌蒙山腹地,该区以农业生产活动为主,贫困人口多,季节性缺水情况严重,影响当地居民的生产、生活,制约地方社会经济发展^[1]。地下水是当地居民生产、生活的最主要用水水源。本次工作填补了五寨幅区域 1:5 万水文地质调查的空白,支撑服务了岩溶缺水地区水资源开发利用。

地下水水化学及同位素特征可以用来研究区域水文地质条件,识别地下水水质演化规律^[2-5]。地下水的组分受地层矿物背景、水动力条件、人类活动等多种因素影响^[6-8]。在组分较多的条件下,难以分析隐性主导变量,仅使用传统的相关性分析难以识别地下水成分的主要控制因素和来源^[9-10]。聚类分析、因子分析等多元统计方法被广泛用于解释水文地球化学作用^[11-13]。应用此类方法可以从多组分的水化学数据中有效提取主要控制因素,识别水化学组分的来源,解释水化学特征的时空变化规律^[14-16]。

本文以云南省昭通市北部盘河区域(面积 456.05 km²)为研究对象,分析水化学特征及同位素特征,使用聚类分析和因子分析方法识别水化学组分的主要控制因素,同时对地下水进行水质评价,讨论地下水的形成演化与水质的关系。该研究结果对以地下水为主要用水水源的缺水地区的水资源综合利用,以及地下水污染防治有指导意义。

1 研究区概况

研究区地处云南省昭通市昭阳区、大关县、彝良县和永善县交界。地势总体呈现中部高,向北东方向逐渐降低的特点,地形地貌明显受地质构造基本格架的控制,分水岭呈北东向贯穿研究区,大部分地区为深切构造侵蚀中山地貌。研究区最高点为冷家坪山脊处,海拔 3198 m,最低点为北东部营盘村,海拔约 978 m,相对高差为 600~1500 m。区内属暖温带高原西南季风气候,年平均气温 13.4℃,降雨主要集中在 5—9 月,年降水量 614.8~1114.4 mm,年平均降水量 892.4 mm,境内主要属金沙江水系。研究区地层有元古宇志留系、泥盆系、石炭系、二叠系,中生界三叠系、侏罗系、白垩系和新生界第四系分布。其中二叠系、三叠系在研究区大面积展布,占研究区总面积的 63.61%,主要岩性为灰岩、白云质灰岩,白云岩、钙质白云岩,砂岩,泥

岩和玄武岩。区内构造线方向主要为北东向,变形程度强弱不均,褶皱、断裂较发育。

研究区地下水类型为碳酸盐岩裂隙岩溶水、碎屑岩类孔隙裂隙水、岩浆岩类裂隙水和沿大关河、洒渔河分布的松散岩类孔隙水。盘河区域内的地质、地貌条件,决定各类地下水补、径、排条件的一般性和特殊性。碳酸盐岩裂隙含水岩组的富水性不均一,主要受地形地貌条件控制,研究区碳酸盐岩含水岩组的地势低洼处,如出水洞区域往往是岩溶水的集中排泄区域;而地势较高的放马坝村,水位埋深大于 100 m,富水性极贫乏,泉点流量为 0.02~380.57 L/s。碎屑岩类孔隙裂隙含水岩组浅部水量贫乏至中等,五寨向斜核部的深层地下水具备承压性质,Sr 元素含量 4.88 mg/L,泉流量 0.01~11.61 L/s。玄武岩裂隙含水岩组,其富水性与该含水层所处地势相关性弱,富水结构为玄武岩浅表风化裂隙,而深部结构较完整,受到该表层风化裂隙富水结构控制的出水村和康家坪区域仍有较多泉点出露,一般流量 0.04~10.01 L/s。周期性变化的大关河水动力条件形成的多旋回、粗细相间的河流相松散沉积物,其毛细壁垒现象^[17]对研究区下游出水洞岩溶水的补给形式产生一定影响。

潜水主要接受大气降水入渗补给,灌溉回归补给量极少。径流方向受区域地形控制,总体由南向北运动,局部受地貌形态控制,可分为深部流动系统和浅部流动系统。深部流动系统与区域地下水运动方向一致,浅部地下水一般受地形地貌控制,由地势较高的河间地块、盆地边缘向河谷区和盆地中心径流。研究区潜水主要以泉或暗河形式在坡脚出露,或沿河谷地带或斜坡排泄,汇入洒渔河、大关河和洛泽河,蒸散发量较少。

研究区经济以农业为主,矿产资源主要为煤矿,分布于研究区西部的白蒿坪和北东部的营盘村老铁厂一带。废弃煤矿附近地表溪沟水由于矿井地下水排泄汇入,其颜色呈铁锈红色、褐黄色。

2 研究方法

布设采样点的原则是考虑采样点能够控制研究区不同地层及岩性的地下水样品分布,并选取与研究区居民生产、生活相关且具有开发利用价值的泉水、井水和地下河开展采样工作。采样瓶选取 1 L 和 500 mL 的用去离子水润洗后的聚乙烯瓶。使

用水样润洗取样瓶 3 次后,将水样使用 0.45 μm 的微孔滤膜进行抽滤取样。其中,1 L 的取样瓶不添加任何试剂用于阴离子测试,500 mL 的取样瓶滴加优级纯 HNO_3 ,用于抑制部分金属阳离子水解及微生物活动。

在乌蒙山 1:5 万五寨幅水文地质调查的基础上,笔者于 2018 年 8 月丰水期在研究区采集 113 组地下水化学组分分析样品和 15 组同位素样品。按地下水类型分类,碳酸盐岩裂隙岩溶水 53 组,碎屑岩孔隙裂隙水 29 组,玄武岩裂隙水 30 组,松散岩类孔隙水 1 组。

采用便携式多参数水质分析仪在现场测定水温、pH 值、氧化还原电位、总溶解性固体等指标,现场测试泉、井和地下河样本数量共计 325 个,其精度分别为 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 、0.01、0.01 mV、0.01 mg/L。常规组分测试在四川省地质矿产勘查开发局成都综合岩矿测试中心进行,所有测试水样阴阳离子电荷平衡误差小于 5%。氢氧同位素送样至中国地质科学院岩溶地质研究所测定,氢和氧同位素测定仪器的误差分别为 $\pm 2\text{‰}$ 和 $\pm 0.1\text{‰}$ 。

本文利用 SPSS 19.0 统计分析软件,选用离差平方和算法和欧式距离法^[18-19],Z-score 标准化增加基向量的正交性,综合利用水样的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、pH、TDS、总硬度 (TH) 和碱度共 12 项化学组分,对研究区地下水样进行 Q 型聚类分组。把性质相似的样品分在同一类,性质差异较大的样品分在不同的类。因子分析法可以剔除水化学组分中的重叠信息,降低变量维数,通过方差最大正交旋转因子分析法^[18,20],完成对上述 12 项水化学参数的 R 型因子分析。

3 结果与讨论

3.1 地下水化学类型及组分的空间变异性

水样测试结果表明,碳酸盐岩类岩溶水、碎屑岩孔隙裂隙水、玄武岩裂隙水和松散岩类孔隙水的 pH 平均值分别为 7.25、7.24、7.26 和 7.29,整体上属于中性水。四类地下水的 TDS 平均值小于 500 mg/L,其中玄武岩裂隙水的 TDS 平均值为 113 mg/L,硬度为 46.55 mg/L,研究区地下水为低矿化的软水。

研究区碳酸盐岩类岩溶水的水化学类型以 HCO_3-Ca 型为主,其次为 $\text{HCO}_3-\text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型。碎

屑岩孔隙裂隙水的水化学类型以 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4-\text{Ca}$ 型为主,其次为 $\text{HCO}_3-\text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型和 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4-\text{Ca}$ 型水。玄武岩裂隙水的水化学类型以 HCO_3-Ca 型为主。松散岩类孔隙水的水化学类型为 HCO_3-Ca 型。总体上,四类地下水水化学类型主要为 HCO_3-Ca 型、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4-\text{Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3-\text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型(图 1)。

无量纲的变异系数可以表示水样化学组分数据的离散程度,可比较多组均值不同的数据。检验本次水样数据发现,没有平均值接近于 0 的情况,不会因变量微小扰动对变异系数产生巨大影响,该值的有效性满足要求。变异系数值小,表示区域内地下水化学组分相对稳定。变异系数值大,表示区域地下水形成的控制因素不同。

由表 1 可知,研究区地下水整体上呈中性,其变异系数较小。除 pH 值外,其他离子浓度的变异系数较大,特别是 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、和 NO_3^- 浓度体现出明显的空间变异特征。

地下水阳离子中 Na^+ 、 K^+ 和 Mg^{2+} 的空间变异性较大,其变异系数分别为 102.61%、103.79% 和 116.84%,浓度范围分别为 0.13~16.80 mg/L、0.05~5.69 mg/L 和 0.52~73.00 mg/L。地下水中 Na^+ 、 K^+ 和 Mg^{2+} 的背景值含量主要受控于地下水补给、径流和排泄区岩石矿物溶解、沉淀、浓缩作用。变异系

表 1 研究区地下水常规水化学参数统计结果
Table 1 Statistical results of chemical parameters of groundwater in the study area

变量	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数/%
Ca^{2+}	158.00	2.25	34.59	27.75	80.25
Mg^{2+}	73.00	0.52	9.25	10.81	116.84
Na^+	16.80	0.13	2.07	2.12	102.61
K^+	5.69	0.05	0.90	0.93	103.79
HCO_3^-	319.00	30.00	133.81	74.30	55.53
SO_4^{2-}	473.00	0.02	31.32	56.37	179.98
Cl^-	14.30	0.01	1.83	2.10	114.95
TDS	868.00	9.00	187.33	111.04	59.28
pH	7.46	7.05	7.25	0.09	1.24
TH	690.00	8.00	123.73	103.49	83.64
碱度	262.00	24.00	109.71	61.00	55.61
NO_3^-	13.30	0.004	3.20	2.80	87.62

注:除 pH 值为无量纲外,其余变量的单位为 mg/L

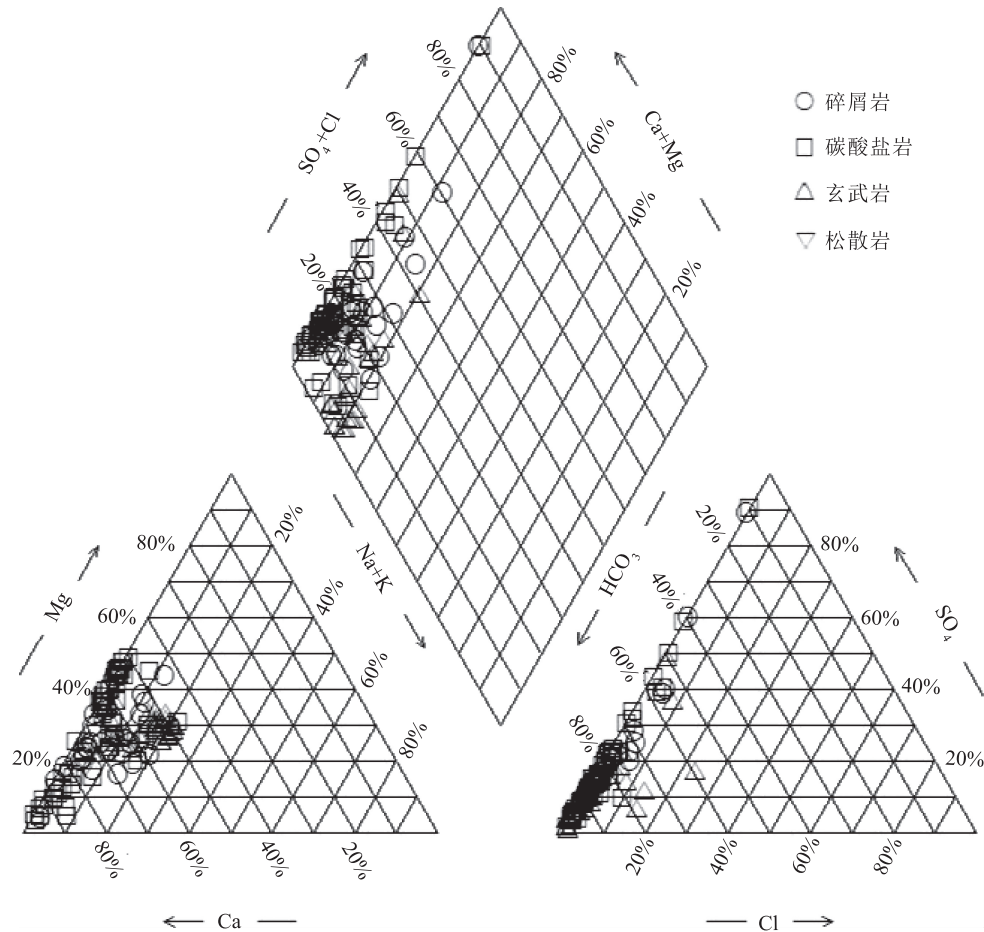


图1 四类地下水 Piper 图

Fig. 1 Piper diagram of four kinds of groundwater

数大,说明研究区不同区域地下水交替速度存在差异。阴离子 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的变异性较大,分别为 179.98% 和 87.62%,浓度变化范围分别为 0.02~473.00 mg/L 和 0.004~13.30 mg/L。 SO_4^{2-} 主要来源于含硫酸盐矿物溶解,此外还有含硫酸盐化肥使用、废弃采煤矿井地下水排放等^[21]。 NO_3^- 主要来源于人类活动,区域内主要为农业生产中化肥的施用、人类生活废水排放等。

3.2 地下水化学组分的影响因素

3.2.1 聚类分析

结合地下水化学组分基本特征,采用 Q 型 K-mean 均值聚类分析将研究区 113 组样品分为四型(即 A、B、C 和 D)。将四型地下水样投影到水文地质图(图 2),同时将样品的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 NO_3^- 浓度值做 box-whisker 图(图 3)。

A 型地下水的样品共计 59 个,其中玄武岩裂隙水和碳酸盐岩裂隙溶洞水样品共计 46 个,占比 77.97%,玄武岩裂隙水样品数量大于碳酸盐岩裂隙溶洞水。A 型地下水水化学类型以 HCO_3-Ca 型为主,TDS 平均值为 110.96 mg/L, Ca^{2+} 平均值为 15.82 mg/L,含量较低,TDS 小于 100 mg/L 的水样共计 36 个。根据研究区水文地质条件分析,地下水化学演化的原因主要是玄武岩的富水性除与气孔、柱状节理等原生裂隙有关外,还与浅表层风化裂隙的发育程度相关,孔洞是蓄水空间,风化裂隙主要起导水作用。玄武岩浅表风化裂隙发育且连通性较好,地下水赋存于玄武岩风化裂隙。本次施工的探采结合井 ZK61 井深 103 m,钻探揭露情况显示,深部玄武岩呈弱风化或微风化。玄武岩裂隙含水层接受大气降水补给,径流通道为浅表风化裂隙,径流途径短,且由于深部风化程度低,难以向深部

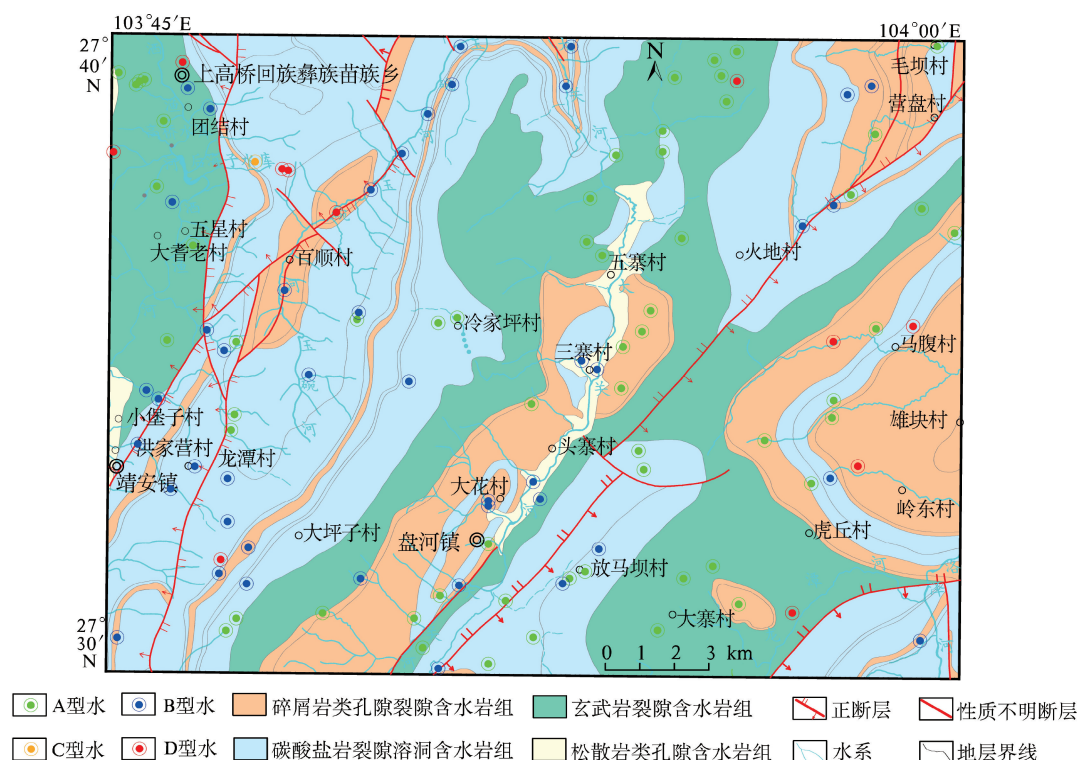


图 2 研究区采样点聚类分析成果图

Fig. 2 Samples are classified by cluster analysis in the study area

运动。A 型水分布在冷家坪、出水村、康家坪等地势较高的区域,受小区域地貌控制,就近排泄,地下水循环快,水质点滞留时间短,溶解作用时间短,风化裂隙水多以小泉及散流方式排泄于当地河谷,造成 A 型地下水 TDS 值低, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子浓度低。

B 型水分布于碳酸盐岩区域,地下水样品共计 44 个,其中,碳酸盐岩裂隙溶洞水 30 个,占比 68.18%。地下水化学类型以 HCO_3^- -Ca 型为主, TDS 含量较高,平均值为 261.07 mg/L。B 型水是沉积岩区典型的溶滤水,主要受岩溶区溶解作用控制^[22], Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主要阳离子, HCO_3^- 为主要阴离子,含量较高,主要来源于大坪子村、出水洞、放马坝村等出露的碳酸盐类和白云岩类沉积物风化溶解。

C 型地下水在研究区西部下石炭统含水层呈条带状不连续分布,地下水化学类型以 SO_4 -Ca·Mg 型为主, TDS 含量为 868 mg/L, SO_4^{2-} 含量为 473 mg/L。下石炭统为滨海相砂页岩沉积,以灰黑色碎薄层状页岩、炭质页岩为主,炭质页岩偶夹黄铁矿结核和煤线。该区采矿活动频繁,存在无主废弃矿

井涌水,导致流经该地层的地下水水化学组分中 SO_4^{2-} 离子浓度超标。

D 型水主要分布于研究区东部三叠系、侏罗系的碎屑岩区域,地下水样品共计 9 个,与前三类相比, D 型水中 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 和 NO_3^- 含量较高,其聚类中心值是 A、B 类型的 3~4 倍。D 型水含水层的岩性以砂岩、泥岩为主,地下水大多经过中深部循环,径流速度慢,水岩作用充分,蒙脱石、钠长石等含钠盐和钾盐的矿物溶解,使 Na^+ 和 K^+ 质量浓度较高;此外村落大多傍水而建,居住分散,在泉点排泄区存在人类的生活和农业生产活动,造成 Cl^- 和 NO_3^- 浓度较高。在盘河镇缺水施工区施工的探采结合井涌水量达 634.05 m^3/d ,经该自流井验证,在三叠系须家河组砂泥岩中,该类水的 Sr 元素含量达到饮用矿泉水界限标准。

根据 Q 型聚类分析结果,结合离子质量浓度 box-whisker 图,发现 A 类型和 B 类型水中 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 NO_3^- 浓度分布特征相似,均低于 C 型和 D 型水,说明与 C、D 型水相比, A、B 型水径流途

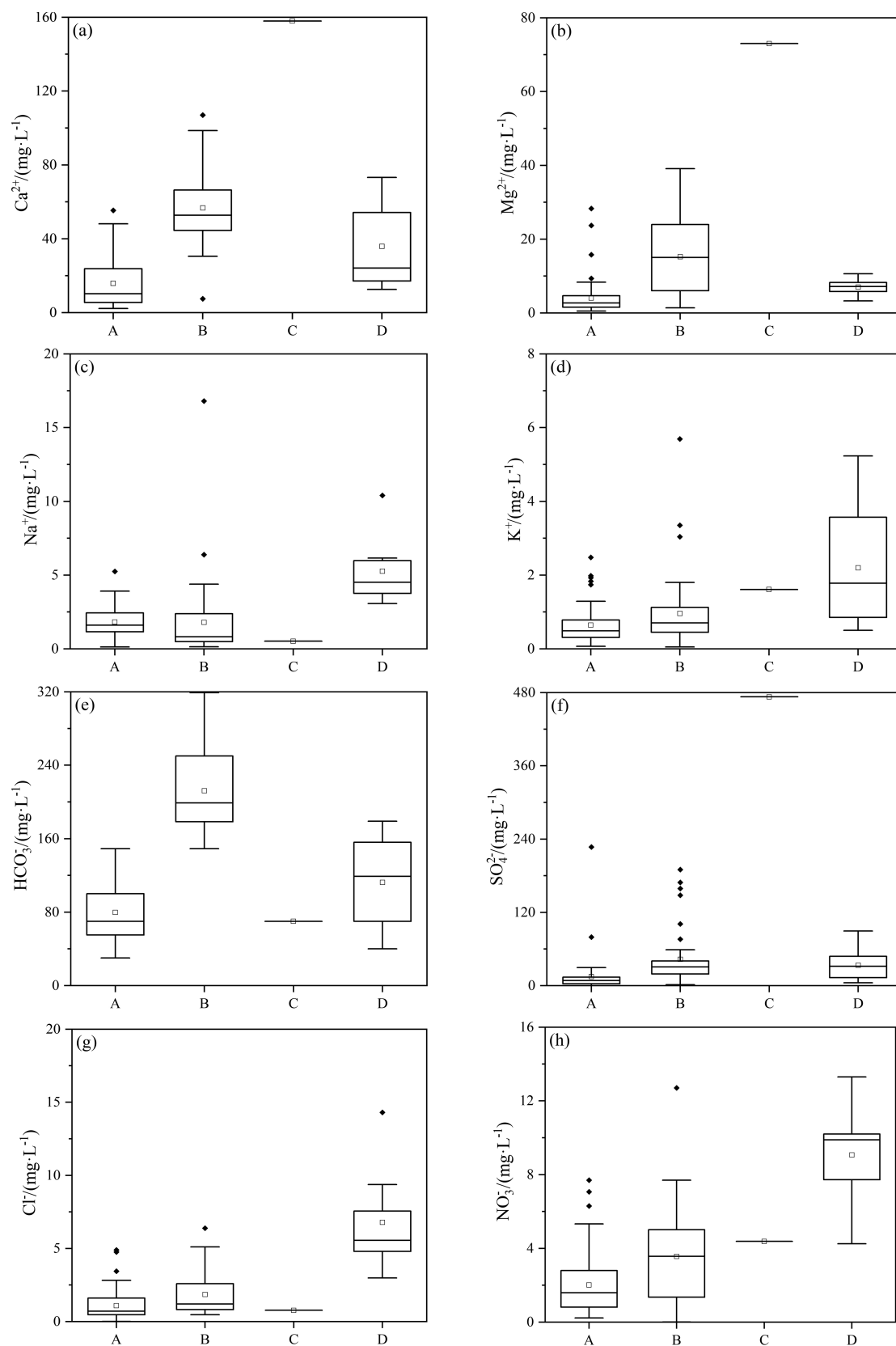


图3 研究区 A、B、C、D 型地下水水化学组分浓度的 Box 和 whisker 图

Fig. 3 Box and Whisker plots of the concentrations in groundwater samples of type A,B,C,D in the study area

径短,水循环快,部分碎屑岩分布区域受煤系地层影响,Na⁺、K⁺、SO₄²⁻、Cl⁻浓度较高。A 型水的 Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻离子浓度低于 B 型水(图 3),这两类水的化学组分演化过程一致,B 型多属于溶滤水,水岩作用时间与 Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻离子浓度呈正相关。

参照《地下水质量标准》(GB/T14848—2017),采用地下水质量综合评价方法评价样品水质,参评指标 8 项,分别为 pH、总硬度、溶解性总固体、硫酸盐、氯化物、钠、亚硝酸盐和硝酸盐。地下水水质为Ⅰ类地下水的 26 组,Ⅱ类地下水的 56 组,Ⅲ类地下水的 30 组,V 类地下水的 1 组。聚类分析 A 型地下水水质最优,在Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类水中均有分布,从补径排条件分析,与水岩作用时间相关;B 型水评价结果为Ⅱ类和Ⅲ类水;C 型水评价结果为 V 类水,SO₄²⁻和 TH 为超过 V 类水指标;D 型水评价结果为Ⅲ类水。

3.2.2 因子分析

对研究区 113 组水样的前述 12 个指标使用因子分析,提取控制研究区地下水化学组分的主要因素。使用 KMO 度量及 Bartlett 球型度检验,选取特征根大于 1 的 3 个公因子(F1、F2 和 F3),其累计贡献率达到 76.41%,能够反映原始数据的基本信息。计算水样每个公因子的因子得分,可以反映单个因子对公共因子的贡献度^[18],并获得相关系数矩阵的特征值、贡献率和累积贡献率(表 3;图 4)。结合 Q 型聚类分析得到的四型水样分布图,可以揭示研究区地下水化学特征及其演化。

第一主因子 F1 的贡献率为 44.25%,其中 Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻、SO₄²⁻、TDS、TH 和碱度的因子载荷均较大,均与 F1 呈正相关。F1 得分值高的点绝大多数为 B 区水样点,而 A 区水样点得分低或为负值,

F1 控制区域主要为 B 区,其代表地下水与沉积岩围岩矿物发生风化溶解和阳离子交换作用,相比于 A 区风化裂隙水的水质点滞留时间较长,在研究区白蒿坪等有易溶矿物存在的层位是因子载荷较大的点位。

第二主因子 F2 的贡献率为 19.29%,K⁺、Na⁺、Cl⁻和 NO₃⁻的因子载荷较大,且均与 F2 呈正相关(表 3)。F2 得分值较大的点位多为 D 型水样分布区,而负分值多位于 B 型水样分布区。F2 的控制区域主要为研究区东部条带状砂泥岩地层,该区域地形受洛泽河支流切割深,相对高差大,富水性贫乏且水位埋深大,径流速度缓慢,水质点滞留时间长,水岩作用充分,部分区域发现岩层中存在钙质结核,说明有碳酸钙析出;Cl⁻和 NO₃⁻主要来源于人类农业生产、生活等活动。因此,F2 代表了研究区中深层地下水循环速度慢,同时受人类活动影响的特定水化学背景。

第三主因子 F3 的贡献率为 12.87%,HCO₃⁻和碱度的因子载荷较大,其与 F3 呈正相关。值得注意的是,与 F1、F2 相比,F3 中 NO₃⁻的载荷因子较小,同时 Ca²⁺和 Mg²⁺比 F1 的载荷因子显著减小,可以揭示 F3 代表地下水与围岩风化溶解作用时间短、循环快,矿物成分中少有白云石,不易受到人类活动影响的水化学背景,F3 控制区域为研究区水质较好的地下水水源。

3.3 同位素特征

研究区表层泉水样同位素测试如表 4 所示,地下

表 3 研究区地下水水化学参数的旋转因子载荷矩阵

Table 3 Matrix of rotated factor loadings of chemical parameters in the study area

变量	F1	F2	F3
Ca ²⁺	0.942 *	-0.081	0.046
Mg ²⁺	0.826 *	-0.151	-0.355
Na ⁺	0.048	0.758 *	-0.121
K ⁺	0.359	0.693 *	-0.022
HCO ₃ ⁻	0.709 *	-0.249	0.625 *
SO ₄ ²⁻	0.719 *	0.03	-0.659
Cl ⁻	0.301	0.796 *	0.24
TDS	0.96 *	-0.059	-0.2
pH	0.045	-0.338	-0.038
TH	0.98 *	-0.118	-0.12
碱度	0.709 *	-0.248	0.625 *
NO ₃ ⁻	0.333	0.585 *	0.27

注: * 表示较高的因子载荷

表 2 聚类分类的水质统计

Table 2 Water quality evaluation of samples classified by cluster analysis

聚类分析 类别	水质分类			
	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类	V 类
A 型地下水	25	27	7	0
B 型地下水	1	28	15	0
C 型地下水	0	0	0	1
D 型地下水	0	1	8	0

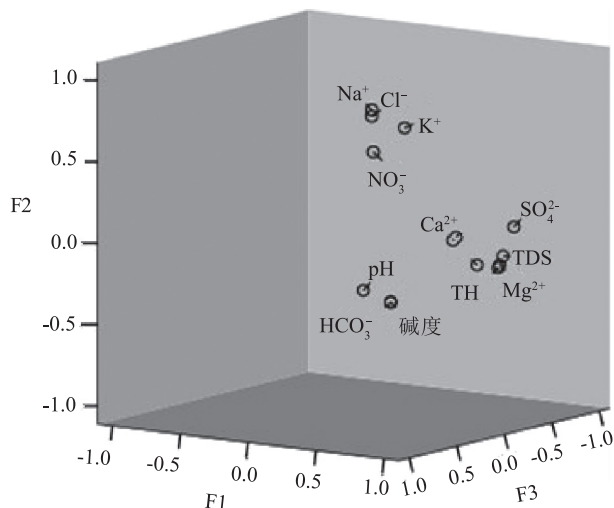


图 4 地下水组分公因子成分图

Fig. 4 Common factor composition diagram of groundwater components

水中 δD_{V-SMOW} 值变化范围为 $-82.70\text{‰} \sim -58.50\text{‰}$, 平均值 -70.85‰ , 变异系数为 -0.08 。 $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 值变化范围为 $-11.68\text{‰} \sim 8.95\text{‰}$, 平均值 -10.28‰ , 变异系数为 -0.06 。 3H (TU) 值变化范围为 $2.35 \sim 5.70$, 平均值 3.96 , 变异系数为 0.26 , 3H 值大于 $1TU$ 。

研究区地下水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 值偏离全球大气降水曲线 (GMWL), 位于其左上方 (图 5), 说明山区浅表地下水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 平均值低于全球大气降水的平均值, 表明山区地下水受蒸发作用影响小。水在蒸发和凝结过程中的同位素分馏, 使大气降水同位素组成呈线性关系。昭阳区和大关县地区大气降水的 δD 、 $\delta^{18}O$ 同位素值符合地下水中

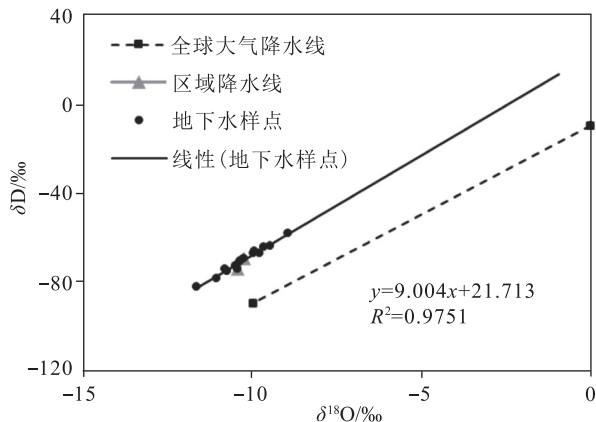


图 5 研究区水样氧氧关系图

Fig. 5 The $\delta^{18}O$ - δD correlation of samples in the study area

表 4 氢氧同位素测试结果

Table 4 Hydrogen and oxygen isotope results

样品	样品类别	δD_{V-SMOW} /‰	$\delta^{18}O_{V-SMOW}$ /‰	3H /TU
WB003	地下水	-58.5	-8.95	5.27
WC086	地下水	-79.2	-11.08	3.19
WC080	地下水	-82.7	-11.68	3.01
WB080	地下水	-73.5	-10.53	3.68
WB070	地下水	-67.9	-9.98	5.70
WA075	地下水	-75.6	-10.78	2.35
WA067	地下水	-64.5	-9.48	3.80
WA068	地下水	-66.9	-9.95	4.36
WB027	地表水 (暗河入口)	-70.9	-10.35	5.66
WC032	地下水	-71.6	-10.39	3.13
WB072	地下水	-67.5	-9.80	2.67
WD041	地下水	-69.9	-10.28	4.96
WA003	地下水	-64.7	-9.68	4.00
WB011	地下水	-74.7	-10.83	4.28
WC049	雨水	-74.7	-10.45	3.37

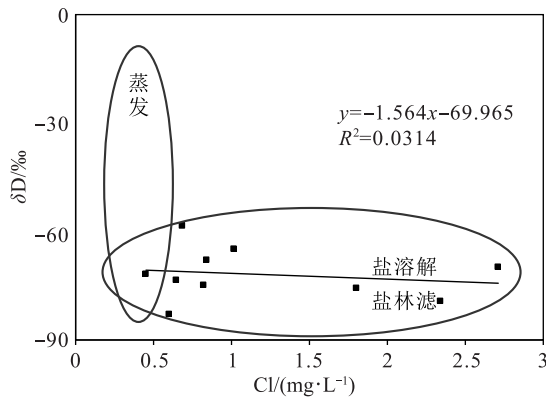
δD 和 $\delta^{18}O$ 的线性关系 (曲线方程: $\delta D = 9\delta^{18}O + 21.71$), 说明地下水来源于大气降水补给, 区域降水线截距偏高, 反映了区域湿润多雨的气候特点。区域大气降水线落在全球大气降水线的左下方, 说明区域位于内陆或高海拔区。地下水中 $\delta^{18}O$ 不存在漂移, 说明取样点地下水径流活动性强, 水交替快, 地下水滞留时间短。

地下水补给过程中的蒸散发可以通过 δD 结合 Cl 浓度识别, 本次对研究区同时取得水质分析和同位素分析的 10 个样品进行分析。经过蒸发作用的地下水样品沿降水线斜率 $4 \sim 7$ 的直线分布, 在干旱区斜率更小; 而经历蒸腾作用的地下水样品不发生同位素分馏, 样品沿区域降水线分布 (图 6)。盘河区域处于山区地貌中, 浅表地下水循环快, 蒸发量较少, 地下水的盐分来源以矿物的溶解和溶滤为主。

4 结 论

(1) 乌蒙山盘河地区地下水的阴离子以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主, 阳离子以 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主。研究区碳酸盐岩类岩溶水、碎屑岩孔隙裂隙水、玄武岩裂隙水和松散岩类孔隙水水化学类型主要为 HCO_3-Ca 型, 其次为 $HCO_3 \cdot SO_4-Ca$ 型和 $HCO_3-Ca \cdot Mg$ 型水, 总体地下水呈中性, TDS 值低。

(2) 因子分析法识别出影响研究区地下水成分的主要因素依次为水岩作用时间、地层中矿物成分

图 6 地下水咸化作用的 δD 与 Cl 关系Fig. 6 Relationship between δD and Cl in groundwater salinization

和含量及人类活动,这 3 个主控因素可以解释研究区 76% 的组分特征。浅表地下水中 $\delta^{18}O$ 不存在漂移,印证了盘河区域浅表地下水循环快,蒸发量较少,地下水的盐分来源为主要矿物的溶解和溶滤。

(3) Q 型 K-mean 均值聚类分析将研究区样品分为 A、B、C 和 D 四型。A 型水在玄武岩裂隙含水层分布较广泛,地下水就地补给,就地排泄,泉点出露数量较多且水质良好,开发利用较便利。B 型水分布于碳酸盐岩区域,是沉积岩区典型的溶滤水,该区整体水质较好,但此类水分布于高山与深切型河谷结合的地形,地下水水位埋深大,建议采取工程措施解决该区缺水状态。C 型水主要受煤系地层中废弃矿井涌水影响,水质超过 V 类水标准,建议封闭历史遗留无主矿井,避免该层矿井涌水污染其他地下含水层。D 型水径流速度较慢,水岩作用充分,排泄区受到人类生产活动影响,该区为矿泉水资源靶区。

致谢:中国科学院地理科学与资源研究所杨志洲博士研究生在数据处理过程中给予帮助,论文在编写过程中得到中国地质科学院岩溶地质研究所潘晓东研究员的指导,审稿专家提出了宝贵的修改意见和建议,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 洪涛,谢运球,喻崎雯,等.乌蒙山重点地区地下水水化学特征及成因分析[J].地球与环境,2016,44(1): 11-18.
- [2] 鲁孟胜,韩宝平,武凡,等.鲁西南地区高氟地下水特征及成因探讨[J].中国地质,2014,41(1): 294-302.
- [3] 柳凤霞,史紫薇,钱会,等.银川地区地下水水化学特征演化规律及水质评价[J].环境化学,2019,38(9): 2055-2066.
- [4] 王焰新,高旭波.人类活动影响下娘子关岩溶水系统地球化学演

化[J].中国岩溶,2009,28(2): 103-112.

- [5] Cloutier V, Lefebvre R, Therrien R, et al. Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system [J]. Journal of Hydrology, 2008, 353(3): 294-313.
- [6] 董维红,苏小四,侯光才,等.鄂尔多斯白垩系地下水盆地地下水水化学类型的分布规律[J].吉林大学学报(地球科学版),2007,37(2): 288-292.
- [7] 沈照理,王焰新.水-岩相互作用研究的回顾与展望[J].地球科学: 中国地质大学学报,2002,27(2): 127-133.
- [8] 袁建飞,邓国仕,徐芬,等.毕节市北部岩溶地下水水文地球化学特征[J].水文地质工程地质,2016,43(1): 12-21.
- [9] 蒋勇军,吴月霞, Groves C, 等.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,2009, (4): 1-7.
- [10] 蒲文斌,钱康,陈鹏,等.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.
- [11] Lambrakis N, Antonakos A, Panagopoulos G. The use of multicomponent statistical analysis in hydrogeological environmental research [J]. Water Research, 2004, 38(7): 1862-1872.
- [12] Helstrup T, Jrgensen N O, Banoeng-Yakubo B. 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, 2007, 15(5): 977-989.
- [13] 袁建飞,邓国仕,徐芬.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,2016,43(4): 1446-1456.
- [14] Mouser P J, Rizzo D M, Röling W F M, et al. A multivariate statistical approach to spatial representation of groundwater contamination using hydrochemistry and microbial community profiles [J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(19): 7551-7559.
- [15] Liu Chenwu, Lin Kaohung, Kuo Yiming. Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease area in Taiwan [J]. Science of the Total Environment, 2003, 313(1): 77-89.
- [16] Olmez I, Beal J W, Villaume F. A new approach to understanding multiple-source groundwater contamination: Factor analysis and chemical mass balances [J]. Water Research, 1994, 28(5): 1095-1101.
- [17] 程东会,钱康,常琛朝.水分入渗条件下层状非饱和和松散沉积物中的毛细壁垒效应研究[J].水文地质工程地质,2016,43(4): 20-25.
- [18] Omo-Irabor O O, Olobaniyi S B, Oduyemi K, et al. Surface and groundwater water quality assessment using multivariate analytical methods: A case study of the Western Niger Delta, Nigeria [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2008, 33(8): 666-673.
- [19] Yadav I, Devi N, Mohan D, et al. Groundwater classification using multivariate statistical methods: Birimian Basin, Ghana [J]. Journal of Environmental Engineering, 2010, 136(12): 1379-1388.
- [20] 沈杨,何江涛,王俊杰,等.基于多元统计方法的地下水水化学特征分析:以沈阳市李官堡傍河水源为例[J].现代地质,2013,27(2): 440-447.
- [21] 郝春明,何培雍,王议,等.煤炭开采后峰峰矿区奥陶系岩溶水硫酸盐演化过程研究[J].中国岩溶,2014,33(4): 425-431.
- [22] 潘晓东,梁杏,唐建生,等.黔东北高原斜坡地区 4 种岩溶地下水系统模式及特点——基于地貌和蓄水构造特征[J].地球学报,2015,36(1): 85-93.