会宝岭铁矿区地下水成因及断层水源探讨*

李军[1,2],白继坤[3],宋阳[3],于杜涛[3],左世晓[3],陈艳红[4],韩双元[1],白茹雪[1]

(1.山东省鲁南地质工程勘察院(山东省地质矿产勘查开发局第二地质大队), 山东 济宁市 272100;
2.山东省地质矿产勘查开发局岩溶地质重点实验室, 山东 济宁市 272100;
3.临沂会宝岭铁矿有限公司, 山东 兰陵县 277700;
4.山东省地矿建设有限公司, 山东 济宁市 272100)

摘要:为揭示会宝岭铁矿区不同埋深的地下水水化学特征及成因,并分析深部断层水的补给来源,采集了李官组-佟家庄组裂隙水、二青山组岩溶裂隙水、变质岩裂隙水、断层水共计37件地下水样,运用统计分析、Piper三线图、Gibbs图和离子组合比法探讨了该区地下水的水化学组分特征及成因,以及断层水的补给来源。结果表明:各层地下水的TDS随着埋深的增加而显著增大,优势阴、阳离子由HCO_3^-和Ca^{2+}逐渐演变为SO_4^{2-}、Cl^-和Na^+;由于各地下水的水化学组分在Piper三线图、Gissb图中均表现出明显的分区性,可知各含水层之间的水力联系较差;李官水和二青山水的水化学组分形成主要受岩石风化控制,离子成分主要来源于碳酸盐、硫酸盐类矿物及盐岩的溶解;变质岩水受蒸发浓缩作用控制,Na^+、K^+来源于硅酸盐类矿物溶解和阳离子交替吸附作用,Ca^{2+}、Mg^{2+}、HCO_3^-、SO_4^{2-}主要来源于碳酸盐、硫酸盐溶解与黄铁矿氧化;断层水受岩石风化和蒸发浓缩作用的双重影响,其主要补给来源为李官水和二青山水,应重点以此来源提出水害防治措施。研究结果可为矿井水害防治工作提供参考。

关键词:地下水;水化学特征;断层水;水源分析;水害防治

中图分类号:TD167 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)08-0162-08

Discussion on Groundwater Genesis and Fault Water Source in Huibaoling Iron Mine Area

LI Jun[1,2], *BAI Jikun*[3], *SONG Yang*[3], *YU Dutao*[3], *ZUO Shixiao*[3], *CHEN Yanhong*[4], *HAN Shuangyuan*[1], *BAI Ruxue*[1]

(1.Shandong Provincial Lunan Geo-engineering Exploration Institute (Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources No.2 Geological Brigade), Jining, Shandong 272100, China;
2.Key Laboratory of Karst Geology, Shandong Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, Jining, Shandong 272100, China;
3.Linyi Huibaoling Iron Mine Co., Ltd., Lanling County, Shandong 277700, China;
4.Shandong Geological and Mineral Construction Co., Ltd., Jining, Shandong 272100, China)

Abstract: In order to reveal the hydrochemical characteristics and genesis of groundwater under different buried depths in Huibaoling Iron Mine area, and analyze the recharge source of deep fault water, a total of 37 groundwater samples were collected from the fissure water of the Liguan Formation-Tongjiazhuang Formation, the karst fissure water of the Erqingshan Formation, the metamorphic rock fissure water and the fault water. The characteristics and genesises of groundwater hydrochemical components and the recharge source of fault water in this area were discussed by statistical analysis, Piper three-line diagram, Gibbs diagram and ion combination ratio method. The results show that the TDS of groundwater in each layer increases significantly with the increase of buried depth, and the dominant anions and cations gradually evolves from HCO_3^- and Ca^{2+} to SO_4^{2-}, Cl^- and Na^+. Because the hydrochemical components of each groundwater show obvious zoning in Piper three-line diagram and Gissb diagram, it can be seen that the hydraulic connection between each aquifer is poor. The formation of hydrochemical components of Liguan water and Erqingshan water is mainly controlled by rock weathering, and the ion components are mainly derived from the dissolution of carbonate, sulfate minerals and salt rocks. Metamorphic rock water is controlled by evaporation and concentration. Na^+ and K^+ are derived from the dissolution of silicate minerals and the

* **收稿日期**:2024-09-28
作者简介:李军(1983—),男,安徽阜阳人,硕士,高级工程师,主要从事水工环地质勘查工作。E-mail:413100356@qq.com
通信作者:陈艳红(1985—),女,山东兖州人,助理工程师,主要从事水化学、地质测量工作。E-mail:2514519006@qq.com

alternating adsorption of cations. Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^- and SO_4^{2-} are mainly derived from the dissolution of carbonate and sulfate and the oxidation of pyrite. The fault water is affected by both rock weathering and evaporation and concentration, and its main recharge sources are Liguan water and Erqingshan water, the prevention and control measures of water disaster should be put forward with emphasis on this source. The research results can provide reference for mine water disaster prevention and control.

Key words: Groundwater, Hydrochemical characteristic, Fault water, Water source analysis, Water disaster prevention and control

0 引言

中国作为世界最大的铁矿石生产国之一,在进行铁矿资源开采过程中,井下涌水现象频发,一方面,增加了排水成本、存在突水危害;另一方面,改变了地下水流场,对地下水环境造成破坏,从而引发一系列水环境及生态环境问题。近年来,众多学者通过运用数理统计法、Piper 三线图法、Gibbs 图法、离子组合比法等方法有效地分析了地下水水化学特征、成因和演化规律[1-6]。施龙青等[7]通过 Piper 三线图法分析了断层水水源,为矿井水害防治及保护水环境提供了理论基础,但主要集中于第四系水、风化层水等浅层地下水及煤矿地下水的研究工作,尚未对沉积变质型铁矿区的地下水水化学特征、成因、断层水水源等进行系统分析。

会宝岭铁矿为大型鞍山式铁矿床,顶部存在多个沉积岩含水层,含矿岩系受多期次断裂构造改造破坏,存在断层导水隐患[8-9],水文地质条件较为复杂。矿山投产以来,矿井最大涌水量超过 12 000 m^3/d,且预测矿床深部揭穿 F_3 和 F_{3-1} 断层时,将新增矿井涌水量 5 100 m^3/d。矿床深部涌水不仅排水成本高,还会对地下水环境造成破坏,尤其是矿井深处即将掘进到 F_3 及 F_{3-1} 断层导水带,面临着断层水害的潜在危害[10],亟需进行水害防治的研究工作。基于此,本文通过水文地质勘查成果及地下水测试结果,采用统计分析法、Piper 三线图法、Gibbs 图法和离子组合比法研究了各含水层地下水的水化学特征、成因及演化规律,并分析 F_3 及 F_{3-1} 断层水的来源。研究结果对断层水水害的防治工作具有借鉴意义。

1 研究区基本概况

1.1 矿床概况

会宝岭铁矿位于兰陵县尚岩镇西部,属苍峄铁矿带中东部。矿床赋存于新太古代变质岩地层中,发育南北两条平行矿带,矿带近直立,相向而倾,总体走向 280°。设计开采标高为+60～−970 m,目前矿山正在开采−410 m 中段及以上各中段矿体,即将开采−410 m 以下的矿体。本次研究根据矿区含水层、导水构造的分布及地下水流场特征向四周外扩一定范围作为研究区,研究区面积为 8.3 km^2,研究深度为地表至深部−700 m 标高。

1.2 地质概况

研究区地层由老到新为新太古代泰山岩群山草峪组、新元古代土门群二青山组和佟家庄组、古生代长清群李官组以及新生代第四纪地层[10]。矿内断裂构造较发育,主要有北东向的 F_1、F_2、F_3 和 F_{3-1} 断层,其中 F_1、F_2 延深较浅、F_3 和 F_{3-1} 断层延深较深,造成矿区深部矿体出现一定错动。

1.3 水文地质概况

1.3.1 含(隔)水层划分及富水性

矿区含水层由浅到深依次为第四系松散岩类孔隙含水层(微弱富水)、李官组-佟家庄组裂隙含水层(弱—中等富水)、二青山组岩溶裂隙含水层(弱富水)和变质岩裂隙含水层(微弱富水)。其中第四系松散岩类孔隙含水层规模小、厚度薄,水文地质意义不大;李官组-佟家庄裂隙含水层和二青山组岩溶裂隙含水层为矿床充水间接补给含水层;变质岩裂隙含水层为矿床直接充水含水层。李官组页岩、佟家庄组页岩及二青山组页岩为相对隔水层。

1.3.2 断层导水带

F_1 及 F_2 断层分布于矿区的中西部,两断层透水性微弱且延伸浅,水文地质条件意义不大。F_3 及 F_{3-1} 断层出露于矿区东南侧、深部位于矿区内,两断层破碎带单位涌水量为 0.038～0.15 L/(s·m),渗透系数为 0.26～0.55 m/d,富水性、透水性相对较大,矿床开采至−450～−960 m 处时将揭穿两断层破碎带。由于两断层水埋藏深、水压大,将造成较大的矿井充水危害。

2 研究方法

2.1 水样采集与测试

2.1.1 水样采集

通过钻孔、水井和井下出水点共采集地下水水样 37 件,并进行了水化学成分测试分析。依次采集

李官组-佟家庄组裂隙水(以下简称李官水)10件、二青山组岩溶裂隙水(以下简称二青山水)5件、变质岩裂隙水(以下简称变质岩水)16件、深部F_3及F_{3-1}断层水(以下简称断层水)6件。在取样前,对钻孔或水井进行了抽水洗井,所抽出水量是钻孔或水井水量的5倍以上。取样过程中,先用离子水将取样瓶冲洗干净,再用待采样水润洗干净,最后用滤膜对水样进行过滤后装入采样瓶中。每个样品采集两瓶,其中一份加硝酸酸化至pH<2,另一份为原水样。

2.1.2 水样测试

采用烘干重量法(105 ℃)测定溶解性总固体(Total dissolved solids, TDS),水样中K^+、Na^+、Ca^{2+}和Mg^{2+}使用离子体发射光谱仪进行分析,SO_4^{2-}和Cl^-通过离子色谱仪进行测定,CO_3^{2-}和HCO_3^-采用酸碱滴定法进行测定[11]。测试过程中借助了阴阳离子平衡验证、监控样等多种质控手段进行检验,以确保测试质量的可靠性。

2.2 数据分析方法

采用Piper三线图对地下水水化学类型进行分析,采用Gibbs图解法、离子组合比法等对地下水水化学成因及演化规律进行分析。

3 结果与讨论

3.1 地下水水化学特征

3.1.1 地下水组分统计分析

研究区各层地下水中的主要离子和TDS的最大值、最小值、平均值、标准差与变异系数见表1。由表1可知,李官水、二青山水、变质岩水、断层水TDS范围分别为240.61~619.00 mg/L、814.00~1 448.08 mg/L、2 015.00~3 099.00 mg/L、623.00~1 588.36 mg/L,除了断层水外,其余地下水的TDS随着埋深的增加显著增大,说明随着埋深的增大,地下水流动变缓,与围岩相互作用更加充分[12],使得TDS增加。其中,李官水为淡水,二青山水和断层水为淡—微咸水,变质岩水为微咸—咸水。

表1 研究区各含水层地下水化学指标统计

Table 1 Statistical of groundwater chemical indicators of various aquifers in the research area

离子类型	李官水					二青山水				
	浓度最大值/(mg·L^{-1})	浓度最小值/(mg·L^{-1})	浓度平均值/(mg·L^{-1})	标准差/(mg·L^{-1})	变异系数/%	浓度最大值/(mg·L^{-1})	浓度最小值/(mg·L^{-1})	浓度平均值/(mg·L^{-1})	标准差/(mg·L^{-1})	变异系数/%
$Na^+ + K^+$	66.44	12.30	32.31	17.76	54.96	135.00	123.69	129.35	8.00	6.18
Ca^{2+}	116.70	47.32	79.36	25.78	32.48	242.22	135.00	198.37	41.09	20.71
Mg^{2+}	18.79	7.18	11.85	3.94	33.23	15.15	11.48	13.31	1.40	10.54
Cl^-	123.64	18.49	51.66	39.06	75.61	221.90	147.79	174.40	32.53	18.65
SO_4^{2-}	165.57	9.26	69.43	46.57	67.08	573.34	313.00	439.89	108.55	24.68
HCO_3^-	251.42	73.95	173.06	55.86	32.28	251.42	147.00	202.80	38.49	18.98
TDS	619.00	240.61	388.58	133.00	34.23	1 448.08	814.00	1 123.22	247.13	22.00
离子类型	变质岩水					断层水				
	浓度最大值/(mg·L^{-1})	浓度最小值/(mg·L^{-1})	浓度平均值/(mg·L^{-1})	标准差/(mg·L^{-1})	变异系数/%	浓度最大值/(mg·L^{-1})	浓度最小值/(mg·L^{-1})	浓度平均值/(mg·L^{-1})	标准差/(mg·L^{-1})	变异系数/%
$Na^+ + K^+$	748.91	403.46	594.27	114.79	19.32	389.46	123.50	248.43	97.79	39.36
Ca^{2+}	327.16	184.72	260.12	37.38	14.37	133.59	32.15	77.22	43.91	56.86
Mg^{2+}	28.87	0.82	8.00	7.57	94.56	12.00	1.53	4.06	4.08	100.43
Cl^-	644.15	315.57	505.46	111.66	22.09	274.71	49.76	139.42	80.71	57.89
SO_4^{2-}	1 380.92	968.93	1 212.68	142.08	11.72	729.89	184.90	392.68	200.14	50.97
HCO_3^-	96.13	9.86	57.01	20.02	35.12	288.39	135.76	201.95	60.24	29.83
TDS	3 099.00	2 015.00	2 645.82	367.18	13.88	1 588.36	623.00	1 003.01	363.61	36.25

以平均值计,李官水阴离子浓度由大到小依次为HCO_3^-、SO_4^{2-}、Cl^-,阳离子浓度由大到小依次为Ca^{2+}、$Na^+ + K^+$、Mg^{2+};二青山水阳离子浓度由大到小依次为Ca^{2+}、$Na^+ + K^+$、Mg^{2+},阴离子浓度由大到小依次为SO_4^{2-}、HCO_3^-、Cl^-;变质岩水阳离子浓度由大到小依次为$Na^+ + K^+$、Ca^{2+}、Mg^{2+},阴离子浓度由大到小依次为SO_4^{2-}、Cl^-、HCO_3^-。随着埋深的增加,各层地下水中优势阴、阳离子的浓度也显著增加,且优势阴、阳离子由HCO_3^-和Ca^{2+}演变为SO_4^{2-}、Cl^-和Na^+,说明矿山开采后各含水层的水力联系较差。而断层水阳离子浓度由大到小依次为$Na^+ + K^+$、Ca^{2+}、Mg^{2+},阴离子浓度由大到小依次为SO_4^{2-}、HCO_3^-、Cl^-,优势阴、阳离子分别为SO_4^{2-}和Na^+,与变质岩水的优势阳、阴离子一致,

而 TDS 介于李官水与二青山水之间,说明断层水与各含水层之间可能均存在水力联系。

此外,李官水、二青山水和变质岩水中各离子的变异系数均小于 100%,且大部分小于 50%,说明水化学成分较为稳定。而断层水中 Mg^{2+} 的变异系数大于 100%,Ca^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-} 的变异系数大于 50%,说明这些离子在水化学组成中不稳定,反映了断层水的水化学成分形成作用较为复杂[13]。

3.1.2 地下水水化学类型分析

通过 Piper 三线图法对地下水水化学组成类型进行分析[14],结果如图 1 所示。由图 1 可知,李官水以 HCO_3-Ca 型水为主,少数为 HCO_3 · Cl-Ca · Na 或 HCO_3 · SO_4-Ca 型水;二青山水为 SO_4-Ca · Na 和 SO_4 · Cl-Ca · Na 型水;变质岩水则为 SO_4 · Cl-Na 和 SO_4 · Cl-Na · Ca 型水。浅层水(李官水)的 HCO_3^- 毫克当量百分数为 55%~80%、$Ca^{2+}+Mg^{2+}$ 毫克当量百分数为 65%~90%;较深层地下水(二青山水)的 $SO_4^{2-}+Cl^-$ 毫克当量百分数为 75%~85%、$Ca^{2+}+Mg^{2+}$ 毫克当量百分数为 75%~85%;深层地下水(变质岩水)的 $SO_4^{2-}+Cl^-$ 毫克当量百分数大于 95%、Na^++K^+ 毫克当量百分数为 55%~75%。随着各地下水层由浅到深,水化学类型由以 HCO_3-Ca 型水为主演变为以 SO_4 · Cl-Na 型水为主。而断层水的 $SO_4^{2-}+Cl^-$ 毫克当量百分数为 50%~90%,占比高且变化大,Na^++K^+ 毫克当量百分数为 40%~82%,占比偏高且变化大。李官水、二青山水和变质岩水的阴、阳离子含量分布具有明显的分区性,而断层水的阴、阳离子较为分散,反映了断层水水化学成分的形成相对较为复杂。

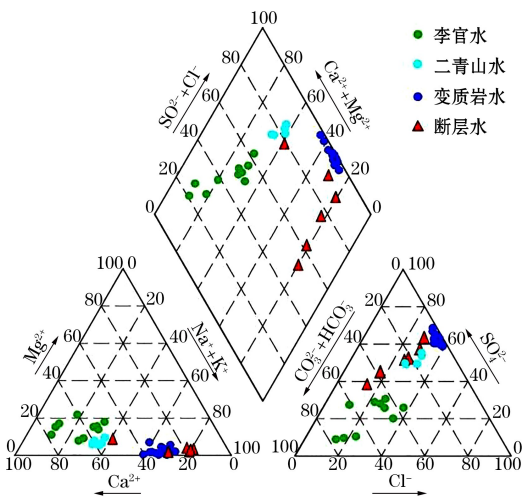


图 1 研究区地下水 Piper 三线图

Fig.1 Piper three line diagram of groundwater in the research area

3.2 地下水成因分析

3.2.1 Gibbs 图

Gibbs 图法作为揭示地下水化学组分形成机制的常用方法[15],可用于判断岩石风化作用、蒸发浓缩作用和大气降水作用对地下水水化学成分的影响[16-18]。图 2 为研究区地下水的阴、阳离子 Gibbs 图,由图 2 可知,研究区内李官水、二青山水分布在 Gibbs 图的左中部,即 Na^+ 与 Na^++Ca^{2+} 浓度比值或 Cl^- 与 $Cl^-+HCO_3^-$ 的浓度比值在 0.5 以内,且 TDS 在 200~1 400 mg/L 之间,说明研究区地下水水化学组分主要受岩石风化作用的影响。变质岩水分布在 Gibbs 图的右上部,即 Na^+ 与 Na^++Ca^{2+} 浓度比值或 Cl^- 与 $Cl^-+HCO_3^-$ 浓度比值大于 0.5,且 TDS 较高,说明研究区地下水水化学组分主要受蒸发浓缩作用的影响。而断层水在岩石风化区和蒸发浓缩区均有分布,说明断层水水化学组分受岩石风化和蒸发浓缩作用的双重影响,形成机制较为复杂。

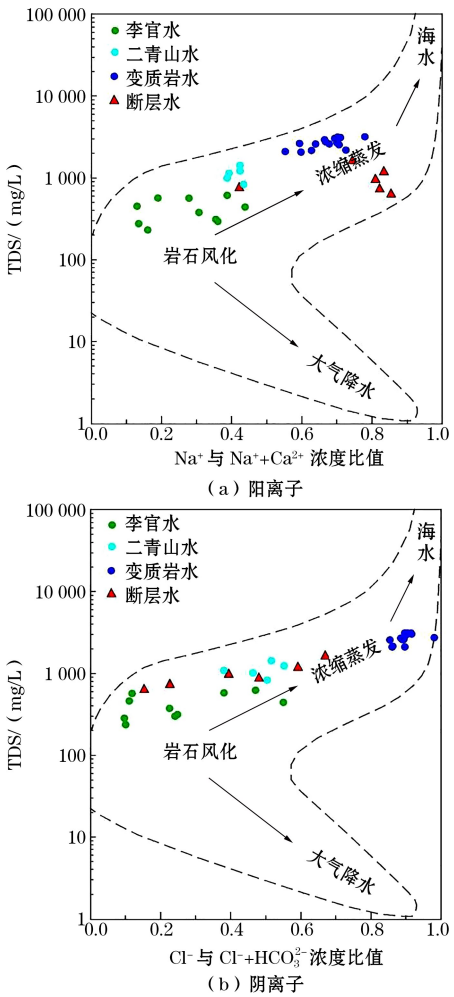


图 2 研究区阴、阳离子 Gissb 图

Fig.2 Gissb diagrams of anions and cations in the research area

3.2.2 离子组合比分析

离子组合比法常用于研究地下水中主要离子的形成机理[19-21]。地下水中 $Na^+ + K^+$ 与 Cl^- 毫克当量比接近 1 时,表明 Na^+ 和 K^+ 主要来源于沉积岩中的少量盐岩溶解,若该比值大于 1,说明还可能存在硅酸盐岩的溶解[22]。研究区不同离子组合比的关系如图 3 所示。

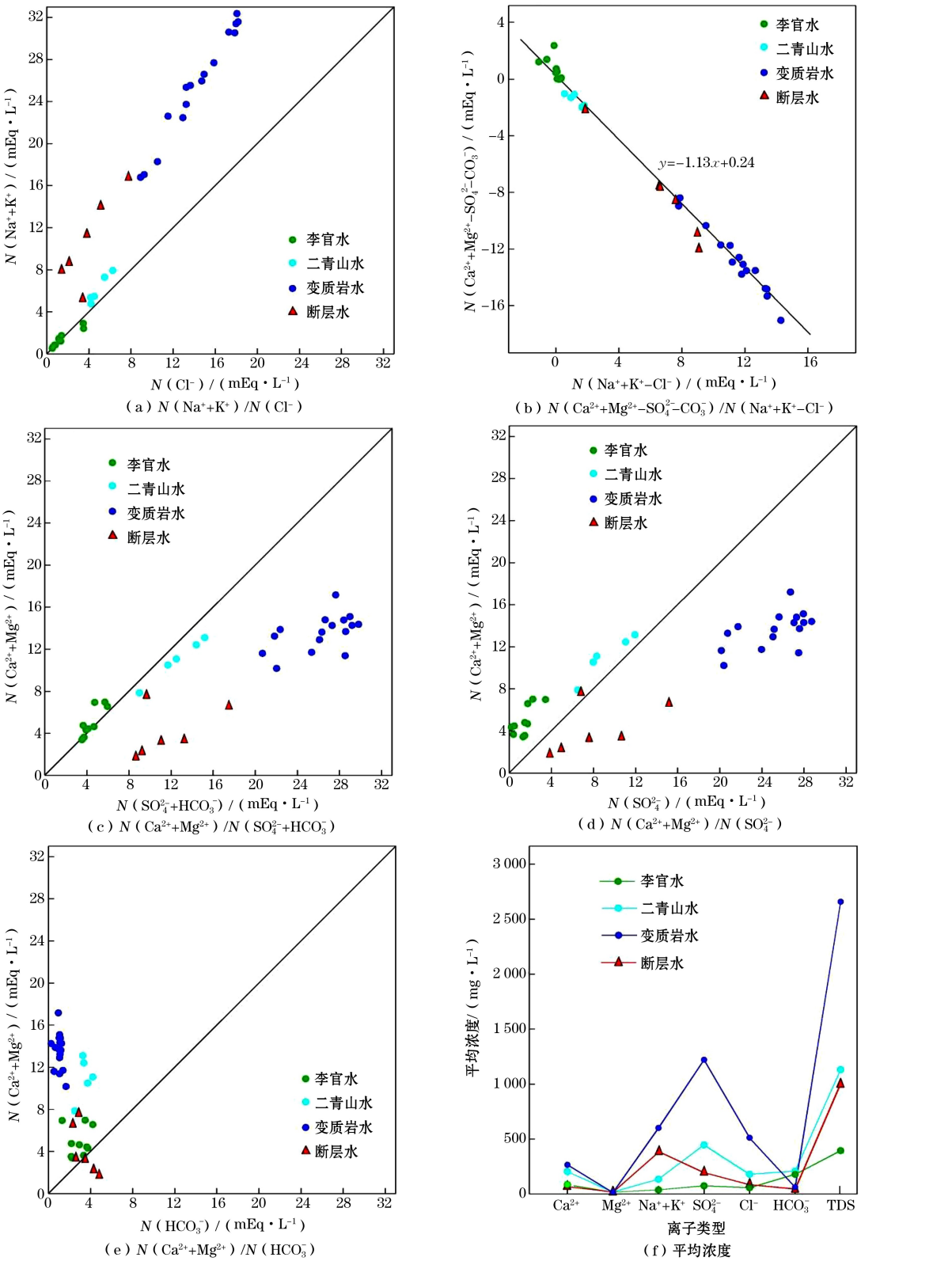


图 3 研究区不同离子组合比的关系

Fig.3 The relationship between different ion combination ratios in the reasearch area

从图 3(a)可以看出,李官水和二青山水中 $Na^+ + K^+$ 与 Cl^- 的毫克当量比接近 1,说明 Na^+、K^+ 和 Cl^- 主要来源于盐岩溶解。而变质岩水与断层水中 $Na^+ + K^+$ 与 Cl^- 的毫克当量比明显大于 1,说明还存在硅酸盐岩的溶解。由于变质岩水与断层水赋存于变质岩地层中,主要岩性为以长石为主的变粒岩,偏高的 Na^+ 和 K^+ 可能源于长石类矿物的溶解,此外,由于 Na^+ 吸附于岩层的能力明显弱于 Ca^{2+} 和 Mg^{2+},吸附交换作用使岩石表面的 Na^+ 被水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 替换,导致地下水中 Na^+ 含量比增大。通过 $N(Mg^{2+}+Ca^{2+}-SO_4^{2-}-HCO_3^-)$ 与 $N(K^++Na^+-Cl^-)$ 的比值来验证阳离子交换作用是否明显,若 $N(Mg^{2+}+Ca^{2+}-SO_4^{2-}-HCO_3^-)$ 与 $N(K^++Na^+-Cl^-)$ 的比值接近−1,说明地下水环境中存在明显的阳离子交换作用[23-24]。

从图 3(b)可以看出,大部分水样点沿斜率为 −1.13 的直线($y=-1.13x+0.24$)附近分布,说明研究区岩溶地下水中存在较明显的 $Mg^{2+}+Ca^{2+}$ 与 K^++Na^+ 阳离子交换作用。主要化学反应过程如下:

$$2Na(K)AlSi_3O_8+2CO_2+11H_2O\rightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4+2HCO_3^-+2Na^+(K^+)+4H_4SiO_4 \quad (1)$$

$$2Na^+(岩石)+Ca^{2+}(水)\rightarrow 2Na^+(水)+Ca^{2+}(岩石) \quad (2)$$

$$2Na^+(岩石)+Mg^{2+}(水)\rightarrow 2Na^+(水)+Mg^{2+}(岩石) \quad (3)$$

此外,由于岩石中含有碳酸盐和硫酸盐矿物,当 $N(Ca^{2+}+Mg^{2+})/N(SO_4^{2-}+HCO_3^-)$ 接近 1 时,说明地下水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐和硫酸盐的溶解[22,25]。从图 3(c)可以看出,李官水与二青山水 $N(Ca^{2+}+Mg^{2+})/N(SO_4^{2-}+HCO_3^-)$ 接近 1,说明李官水和二青山水中 Ca^{2+}、Mg^{2+}、SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 主要来源于碳酸盐、硫酸盐的溶解。

然而,图 3(c)中变质岩水和断层水 $N(Ca^{2+}+Mg^{2+})/N(SO_4^{2-}+HCO_3^-)$ 显著小于 1。为进一步分析变质岩水和断层水水样中 Ca^{2+}、Mg^{2+}、SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 的来源,通过图 3(d)和图 3(e)分析 $N(Ca^{2+}+Mg^{2+})/N(SO_4^{2-})$ 和 $N(Ca^{2+}+Mg^{2+})/N(HCO_3^-)$,进一步分析变质岩水,可知变质岩水中 HCO_3^- 的含量远小于李官水及二青山水。从图 3(d)可以看出,$N(Ca^{2+}+Mg^{2+})4/N(SO_4^{2-})$ 明显小于 1,为 0.6 左右,且变质岩水中的 SO_4^{2-} 含量远大于李官组与二青山组,这表明单一硫酸岩溶解不是变质岩水中 SO_4^{2-} 的唯一来源。根据矿物成分分析可知,矿区的变质岩中存在黄铁矿,矿山开采使地层环境由原来封闭的还原环境变得相对开放,导致黄铁矿发生氧化,使得变质岩水中的 SO_4^{2-} 和 H^+ 含量增加。一方面,这些离子与岩石中的碳酸钙发生反应;另一方面,H^+ 又与 HCO_3^- 发生反应。此外,随着封闭环境相对开放,承压水压力降低,CO_2 逸出,变质岩水中 HCO_3^- 的含量也随之减少,Ca^{2+} 的含量相对于李官水与二青山水有所增加。相关化学反应过程如下:

$$FeS_2+\frac{15}{4}O_2+\frac{7}{2}H_2O\rightarrow Fe(OH)_3\downarrow+2SO_4^{2-}+4H^+ \quad (4)$$

$$CaCO_3+H^+\rightarrow Ca^{2+}+HCO_3^- \quad (5)$$

$$H^++HCO_3^-\rightarrow H_2O+CO_2\uparrow \quad (6)$$

最后通过图 3(d)和图 3(e)中 $N(Ca^{2+}+Mg^{2+})/N(HCO_3^-)$ 和 $N(Ca^{2+}+Mg^{2+})/N(SO_4^{2-})$ 进一步分析断层水成因。断层水的 $N(Ca^{2+}+Mg^{2+})/N(HCO_3^-)$ 及离子含量与李官水基本一致,说明断层水中 Ca^{2+}、Mg^{2+} 和 HCO_3^- 的来源与李官水一致,主要来源于碳酸盐、硫酸盐的溶解。断层水的 $N(Ca^{2+}+Mg^{2+})/N(SO_4^{2-})$ 与变质岩水较为接近,但 SO_4^{2-} 含量远小于变质岩水,说明断层水中存在较弱的黄铁矿氧化现象,产生了少量的 SO_4^{2-},使得断层水中 $N(Ca^{2+}+Mg^{2+})/N(SO_4^{2-})$ 小于 1。因此,断层水中的 SO_4^{2-} 同时来源于硫酸盐溶解与黄铁矿的氧化。

3.3 断层水补给来源探讨

从以上分析中可以看出,断层水的 TDS 更接近于李官水、二青山水,初步说明断层水主要受李官水与二青山水的补给。根据阴离子 Gissb 图(见图 2(b))和离子浓度(见图 3(f))可以看出,断层水的阴离子分布与李官水、二青山水的阴离子分布吻合度高,进一步说明其明显受到李官水、二青山水的补给。从阳离子 Gissb 图和离子组合比分析可以看出,断层水也经历了离子吸附交换及黄铁矿氧化溶解一系列反应,尤其是 $Na^+ + K^+$ 含量显著高于李官水、二青山水。

因此,断层水补给主要来自于李官水、二青山水,在径流到矿床深部时受到与变质岩水相似的离子吸附交换及黄铁矿氧化溶解作用。对此,应重点从李官水、二青山水的补给来源上提出防治措施。

4 结论

(1) 会宝岭铁矿区李官水、二青山水和变质岩水的 TDS 随着埋深的增加而显著增大,由淡水逐渐演变为微咸—咸水;随着埋深的增加,各优势离子的浓度逐渐增大,且增大幅度显著,优势阴、阳离子由 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 演变为 SO_4^{2-}、Cl^- 和 Na^+。各类地下水在 Piper 三线图、Gissb 图中均表现出明显的分区性,说明矿山开采后各含水层之间的水力联系较差。F_3 与 $F_{3\text{-}1}$ 断层水的 TDS 为 623.00～1 588.36 mg·L^{-1},为淡-微咸水,其优势阴、阳离子分别为 SO_4^{2-} 和 Na^+。

(2) 研究区李官水、二青山水的水化学组分形成主要受岩石风化控制,大气降水和蒸发浓缩作用影响微弱,水中各离子主要来源于碳酸盐、硫酸盐类矿物及盐岩的溶解;变质岩水受蒸发浓缩作用控制,几乎不受大气降水的影响,Na^+、K^+ 来源于硅酸盐类矿物的溶解和阳离子交替吸附作用,Ca^{2+}、Mg^{2+}、HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 主要来源是碳酸盐、硫酸盐的溶解与黄铁矿氧化;F_3 与 $F_{3\text{-}1}$ 断层水受岩石风化和蒸发浓缩作用的双重影响。

(3) 综合分析认为 F_3 和 $F_{3\text{-}1}$ 断层水主要补给来源为李官水和二青山水,并受到与变质岩水相似的离子吸附交换及黄铁矿氧化溶解的影响。对于 F_3 和 $F_{3\text{-}1}$ 断层水的水害防治工作,建议重点从补给来源上提出解决对策。

参考文献(References):

[1] 贾超,王丛,刘森,等.济南西部冲积平原地下水水文地球化学特征研究[J].水利水电技术(中英文),2022,53(3):49-60.
JIA Chao, WANG Cong, LIU Sen, et al. Study on hydrogeochemical characteristics of groundwater in the alluvial plain of western Jinan[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2022,53(3):49-60.

[2] 赵庆令,李清彩,陈洪年,等.山东梁山县地下水水化学特征及其成因分析[J].水文,2022,42(2):102-108.
ZHAO Qingling, LI Qingcai, CHEN Hongnian, et al. Analysis on hydrochemical characteristics and formation of groundwater in Liangshan County, Shandong Province[J]. Journal of China Hydrology,2022,42(2):102-108.

[3] 张凌鹏,马宝强,范斌,等.兰州市城区深层地热水的水化学成因及其指示意义[J].水利水电技术,2020,51(8):129-139.
ZHANG Lingpeng, MA Baoqiang, FAN Bin, et al. Hydrochemical origin and indicative significance of deep geothermal water in Lanzhou city[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2020,51(8):129-139.

[4] 秦娜,成文举,董方营,等.东平湖地区地下水化学特征及质量评价[J].科学技术与工程,2022,22(24):10434-10443.
QIN Na, CHENG Wenju, DONG Fangying, et al. Chemical characteristics and quality evaluation of groundwater in Dongping lake area [J]. Science Technology and Engineering,2022,22(24):10434-10443.

[5] 冯海波,董少刚,张涛,等.典型草原露天煤矿区地下水环境演化机理研究[J].水文地质工程地质,2019,46(1):163-172.
FENG Haibo, DONG Shaogang, ZHANG Tao, et al. Evolution mechanism of a groundwater system in the opencast coalmine area in the typical prairie [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2019, 46(1): 163-172.

[6] 赵凯,栾志刚,周金玲,等.塔里木盆地北缘图木舒克绿洲区潜水水文及水化学特征研究[J].水文,2020,40(4):66-72+21.
ZHAO Kai, LUAN Zhigang, ZHOU Jinling, et al. Study on hydrological and hydrochemical characteristics of phreatic water in Tumxuk Oasis Area in the Northern Tarim Basin [J]. Journal of China Hydrology,2020,40(4):66-72+21.

[7] 施龙青,史雅迪,邱梅,等.基于 Piper 图、灰色关联度和三维高密度电法的断层水源判别[J].中国科技论文,2022,17(1):1-8.
SHI Longqing, SHI Yadi, QIU Mei, et al. Identification of fault water source based on piper diagram grey correlation degree and 3D high density electric method [J]. China Sciencepaper,2022,17(1):1-8.

[8] 李军,朱世芳,安茂国,等.隐伏铁矿矿井充水机理分析与防治水措施[J].山东国土资源,2022,38(6):33-40.
LI Jun, ZHU Shifang, AN Maoguo, et al. Analysis on water filling mechanismand countermeasures of water prevention in deep hidden iron deposit[J]. Shandong Land and Resources,2022,38(6):33-40.

[9] 李军,韩双元,韩文撑,等.隐伏铁矿床封闭不良钻孔井下止水技术及应用[J].山东国土资源,2023,39(4):34-38.
LI Jun, HAN Shuangyuan, HAN Wencheng, et al. Underground water stopping technology and application of poorly sealed boreholein concealed iron deposit [J]. Shandong Land and Resources,2023,39(4):34-38.

[10] 李军,张纪堂,于杜涛,等.兰陵县会宝岭铁矿变质岩裂隙含水层放水试验技术探讨[J].云南地质,2023,42(2):230-236.
LI Jun, ZHANG Jitang, YU Dutao, et al. Discussion on dewatering test technology of metamorphic rock fissure aquifer in Huibaoling iron mine, Lanling county[J]. Yunnan Geology,2023,42(2):230-236.

[11] 魏复盛.水和废水监测分析方法[M].4 版.北京:中国环境科学出版社,2002.
WEI Fusheng. Analytical method for monitoring of surface water and wastewater[M]. 4nd ed. Beijing:China Environmental Science Press,2002.

[12] 张恒星,张翼龙,李政红,等.基于主导离子分类的呼和浩特盆地浅层地下水化学特征研究[J].干旱区资源与环境,2019,33(4):189-195.

ZHANG Hengxing, ZHANG Yilong, LI Zhenghong, et al. Chemical characteristics of shallow groundwater in Hohhot basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019,33(4):189-195.

[13] 汪子涛,刘启蒙,刘瑜.淮南煤田地下水水化学空间分布及其形成作用[J].煤田地质与勘探,2019,47(5):40-47.
WANG Zitao, LIU Qimeng, LIU Yu. Spatial distribution and formation of groundwater hydrochemistry in Huainan coalfield [J]. Coal Geology & Exploration,2019,47(5):40-47.

[14] 黄望望,姜春露,陈星,等.淮南新集矿区主要充水含水层水化学特征及成因[J].地球与环境,2020,48(4):432-442.
HUANG Wangwang, JIANG Chunlu, CHEN Xing, et al. Chemical characteristics and genesis of deep groundwater in the Xinji mining area[J]. Earth and Environment,2020,48(4):432-442.

[15] GIBBS R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. Science,1970,170:1088-1090.

[16] 栾风娇,周金龙,贾瑞亮,等.新疆巴里坤-伊吾盆地地下水水化学特征及成因[J].环境化学,2017,36(2):380-389.
LUAN Fengjiao, ZHOU Jinlong, JIA Ruiliang, et al. Hydrochemical characteristicsand formation mechanism of groundwater in plain areas of Barkol-Yiwu Basin, Xinjiang [J]. Environmental Chemistry,2017,36(2):380-389.

[17] 苏绘梦,张发旺,侯甦予,等.基于水化学与氢氧稳定同位素的平禹矿区沉降区地下水循环变化解析[J].水文地质工程地质,2023,50(5):53-67.
SU Huimeng, ZHANG Fawang, HOU Suyu, et al. An analysis of groundwater circulation in the Pingyu mining area based on hydrochemical and isotopic characteristics of groundwater[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023,50(5):53-67.

[18] 唐玺雯,吴锦奎,薛丽洋,等.锡林河流域地表水水化学主离子特征及控制因素[J].环境科学,2014,35(1):131-142.
TANG Xiwen, WU Jinkui, XUE Liyang, et al. Major ion chemistry of surface water in the Xilin river basin and the possible controls[J]. Environmental Science, 2014, 35(1): 131-142.

[19] 陈陆望,许冬清,殷晓曦,等.华北隐伏型煤矿区地下水化学及其控制因素分析:以宿县矿区主要突水含水层为例[J].煤炭学报,2017,42(4):996-1004.
CHEN Luwang, XU Dongqing, YIN Xiaoxi, et al. Analysis on hydrochemistry and its control factors in the concealed coal mining area in North China: a case study of dominant inrush aquifers in Suxian mining area[J]. Journal of China Coal Society,2017,42(4):996-1004.

[20] 胡昱欣,周瑞静,宋炜,等.北京市丰台区永定河以东浅层地下水水化学演变规律及成因分析[J].环境科学,2024,45(5):2651-2664.
HU Yuxin, ZHOU Ruijing, SONG Wei, et al. Analysis on hydrochemical evolution of shallow groundwater east of Yongding river in Fengtai district, Beijing [J]. Environmental Science,2024,45(5):2651-2664.

[21] 唐春雷,申豪勇,赵春红,等.古堆泉域岩溶地下水水化学特征及成因[J].环境科学,2023,44(9):4874-4883.
TANG Chunlei, SHEN Haoyong, ZHAO Chunhong, et al. Hydrochemical characteristics and formation causes of ground karst water systems in Gudui Spring Catchment[J]. Environmental Science,2023,44(9):4874-4883.

[22] 李政葵,夏蔓宏,董少刚,等.洛阳盆地浅层地下水化学特征及其演化特征分析[J].地球与环境,2019,47(1):57-63.
LI Zhengkui, XIA Manhong, DONG Shaogang, et al. Hydrochemical characteristics and evolution characteristics of shallow groundwater in the Luoyang basin[J]. Earth and Environment,2019,47(1):57-63.

[23] FISHER R S, MULLICAN W F. Hydrochemical evolution of sodium sulfate and sodium-chloride groundwater beneath the northern chihuahuan desert, Trans-Pecos, Texas, USA [J]. Hydrogeology Journal,1997,5(2):4-16.

[24] 林聪业,孙占学,高柏,等.拉萨地区地下水水化学特征及形成机制研究[J].地学前缘,2021,28(5):49-58.
LIN Congye, SUN Zhanxue, GAO Bai, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Lhasa area, China [J]. Earth Science Frontiers,2021,28(5):49-58.

[25] 吴晓丽,张杨,孙媛媛,等.平朔矿区地下水水化学特征及成因[J].南京大学学报(自然科学),2021,57(3):417-425.
WU Xiaoli, ZHANG Yang, SUN Yuanyuan, et al. The Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Pingshuo mining area[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science),2021,57(3):417-425.