

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.117>



# 采动条件下沉积变质型铁矿床水化学特征及控制因素:以司家营铁矿南区为例

左文喆,任永强,杨豹,刘帅洲

华北理工大学矿业工程学院,河北唐山 063009

**摘要:** 为了解沉积变质型铁矿床开采后矿区地下水化学特征的变化趋势,在充分掌握矿区含水系统划分和流动系统发育规律的基础上,通过对四含上、四含下、基岩含水层 148 个水样常规离子的相关性、水化学类型及公因子的分析,得出水化学类型分区和公因子得分等值线,将二者叠加,分析各含水层潜在的形成作用及其控制因素。研究结果表明,四含上以碳酸盐溶滤、污染、氧化作用为主;四含下以污染、溶滤、局部脱硫酸作用为主;基岩含水层以离子交换吸附、第四系水的混合、硅酸盐矿物的不全等溶解作用为主。除了背景因素外,矿山开采后的三维流场控制了基岩含水层的形成作用和原生水化学类型,影响了第四系含水层的局部形成作用,水化学类型分区界线明显移动。

**关键词:** 沉积变质型铁矿床;常规离子;水化学形成作用;水化学类型;水文地质学。

中图分类号: P641

文章编号: 1000-2383(2020)04-1427-12

收稿日期: 2019-05-13

## Hydrochemistry Characteristics and Its Control Factors in Sedimentary Metamorphic Iron Deposit under Conditions of Mining: A Case Study of Southern Sijiaying Iron Mine Area

Zuo Wenzhe, Ren Yongqiang, Yang Bao, Liu Shuaizhou

*College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, China*

**Abstract:** In order to understand the hydrochemistry characterization variation tendency of the aquifer after the sedimentary metamorphic iron deposit mined, on the basis of the division of aquifer system and development law of the flow system in the mining area, through the analysis of relevance of conventional ions, hydrochemistry types and common factors on 148 groundwater samples collected from the Upper Quaternary aquifer, the Lower Quaternary aquifer and the bedrock aquifer, the hydrochemical type distribution and the isolines of common factors scores were obtained, then they were overlaid to analyze potential formation and controlling factors of the aquifers. The results show that Upper Quaternary aquifer is characterized by the carbonate dissolution, pollution and oxidation; the Lower Quaternary aquifer is characterized by the pollution, the carbonate dissolution and the local sulfate reduction; the bedrock aquifer is characterized by ion exchange adsorption, the mixing effect of the Quaternary aquifer and incongruent dissolution of silicate. In addition to background factors, three-dimensional flow field has controlled the formation and original hydrochemical types of the bedrock aquifers, and has affected the local formation of the Quaternary aquifer to make hydrochemical type boundary move significantly.

基金项目:河北省自然科学基金项目(No.D2017209229).

作者简介:左文喆(1969-),女,教授,博士,主要从事矿山水害防治、水岩作用过程及机理的研究. E-mail: zuowenzhej@sina.com.cn

引用格式:左文喆,任永强,杨豹,等,2020.采动条件下沉积变质型铁矿床水化学特征及控制因素:以司家营铁矿南区为例.地球科学,45(4):1427-1438.

**Key words:** sedimentary metamorphic iron deposit; conventional iron; hydrochemical formation; hydrochemical type; hydrogeology.

### 0 引言

沉积变质型铁矿床是我国重要的铁矿床类型,是由条带状铁建造变质而成的,如冀东地区沉积变质型铁矿(图1),司家营铁矿南区是此类矿床地下矿的典型代表(赵宏军等,2018).

由于基岩深部长期大量排水,司家营矿区地下水已由自北向南的天然状态转为向基岩含水层越流补给的三维流场,在垂向水头差作用下,矿坑涌水既有来自基岩含水层的侧向补给,也有第四系的垂向补给.三维流场作用下,各含水层的水化学特

征如何变化,水化学变化与流场变化之间的对应关系如何,是此类铁矿防治水的一项重要课题.

常规水化学方法在华北型煤田的防治水中广泛应用并取得较好的实践效果(曹雪春等,2010;陈陆望等,2012;孙林华和桂和荣,2013;武强,2014;武亚遵等,2018;陈建平等,2018).沉积变质型铁矿床的赋存地层、充水条件与煤矿皆存在差异,开展铁矿床水化学特征研究,不仅能指导此类矿山的涌突水预测工作,还可综合分析铁矿开采对地下水环境的影响.本次研究以地下水流场分析为基础,根据各含水层常规离子的空间分布,利用ArcGIS软

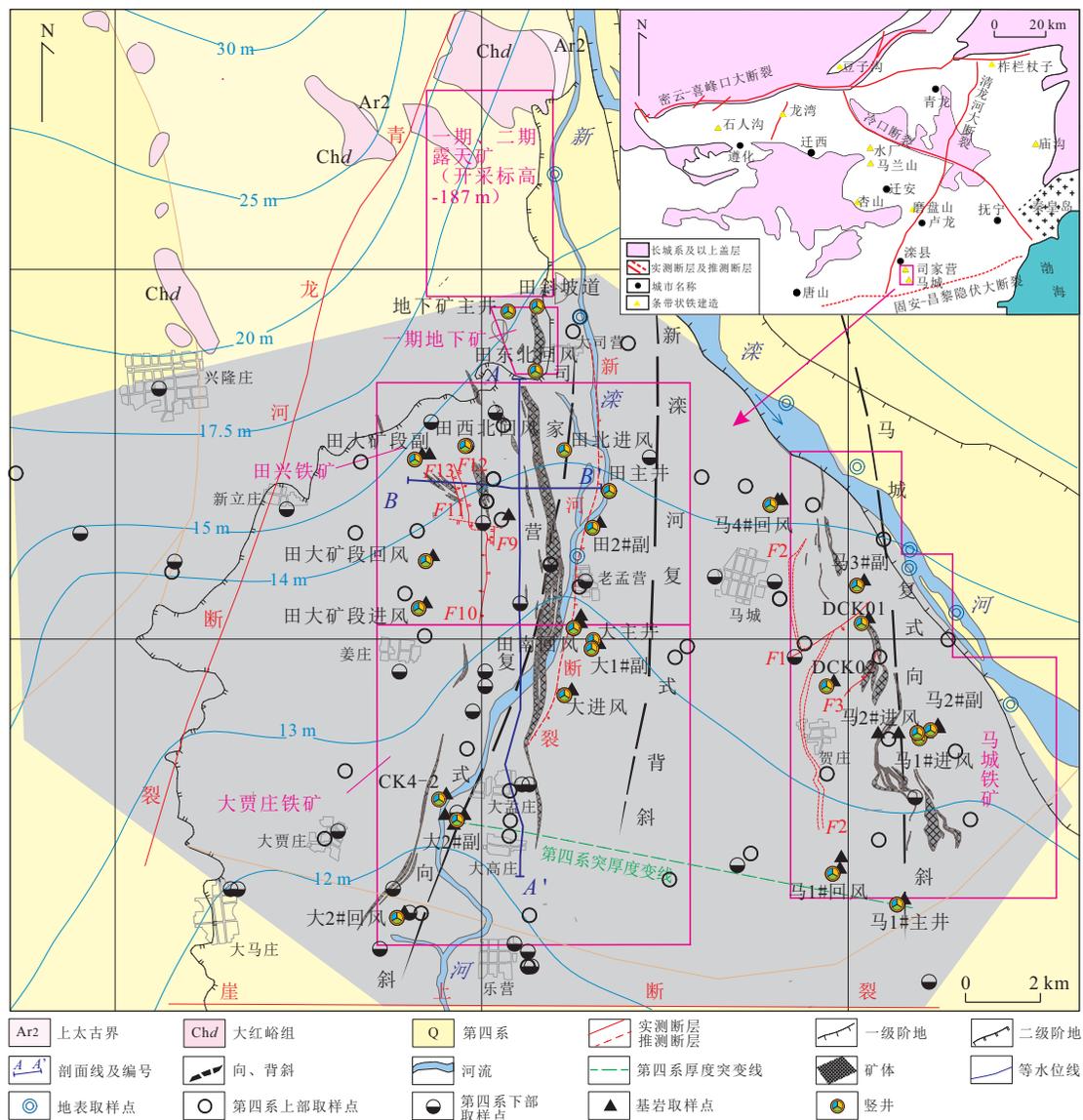


图1 司家营铁矿南区水文地质及采样点分布

Fig.1 Hydrogeological properties and distribution of sampling points in southern area of Sijiaoying iron mine

件叠加分析得出水化学分区;通过公因子分析判断水化学特征的潜在形成作用,插值生成公因子得分等值线图,对比水化学分区图,揭示水化学组分的形成作用和控制因素,为建立基于水化学的水源判别模型提供理论依据。

### 1 研究区概况

司家营铁矿位于河北省唐山市滦县和滦南县交界处,包括北区的一期露天、二期露天和一期地下矿,南区的田兴、大贾庄和马城3个地下矿,矿区及矿体位置见图1。

司家营铁矿地处华北板块—燕山台褶带—山海关台拱的西南角,台拱西以青龙河大断裂、南以固安昌黎隐伏大断裂为界。矿区地层为二元结构(潘桂棠等,2016),下伏基底属上太古界滦县群,由一套中低变质的黑云变粒岩、斜长角闪岩、角闪斜长片麻岩和和磁铁石英岩建造组成,混合岩化普遍;上覆盖层为中上元古界和第四系。铁矿位于滦河冲积扇的上部,北部基岩出露,自北向南,第四系由0 m逐渐加厚至260 m左右,矿区南部即为二级构造单元燕山台褶带与华北断拗的转折带,基岩埋

深变大,第四系厚度突增,陡变点在大高庄、大孟庄至马城主井一带(图1,图2a)。第四系岩性主要为粉质粘土、砂及砾卵石层组成,由北向南,粒度总体由粗变细。

司家营铁矿矿体位于司(司家营)马(马城)长(长凝)复式向斜中,自东向西由马城复式向斜、新滦河复式背斜、司家营复式向斜3个次级紧密同斜褶皱组成,轴向为近南北向,轴面西倾(许英霞等,2015)。田兴和大贾庄的6条矿体位于司家营复式向斜中,马城的矿体位于马城复式向斜中。由于基岩在地质历史时期长期遭受风化剥蚀,背斜轴部被剥蚀掉,因此,在东西向剖面上,褶皱表现为以条带状磁铁石英岩(矿体)为原始层理的单斜构造(见图2中BB'剖面)。

受多期构造运动影响,矿区断裂构造发育,主要基岩断裂有F1-F3、F9-F13断裂,新河断裂,崖上断裂。在F1-F3形成的断裂复合影响区内,破碎带垂向发育标高在-150~-800 m之间;F9-F13形成的复合影响带垂向发育标高在-80~-400 m之间;新河断裂带南北长约5 km,东西宽约0.7 km,倾向东,倾角60°~70°,破碎带主要集中于-500 m标

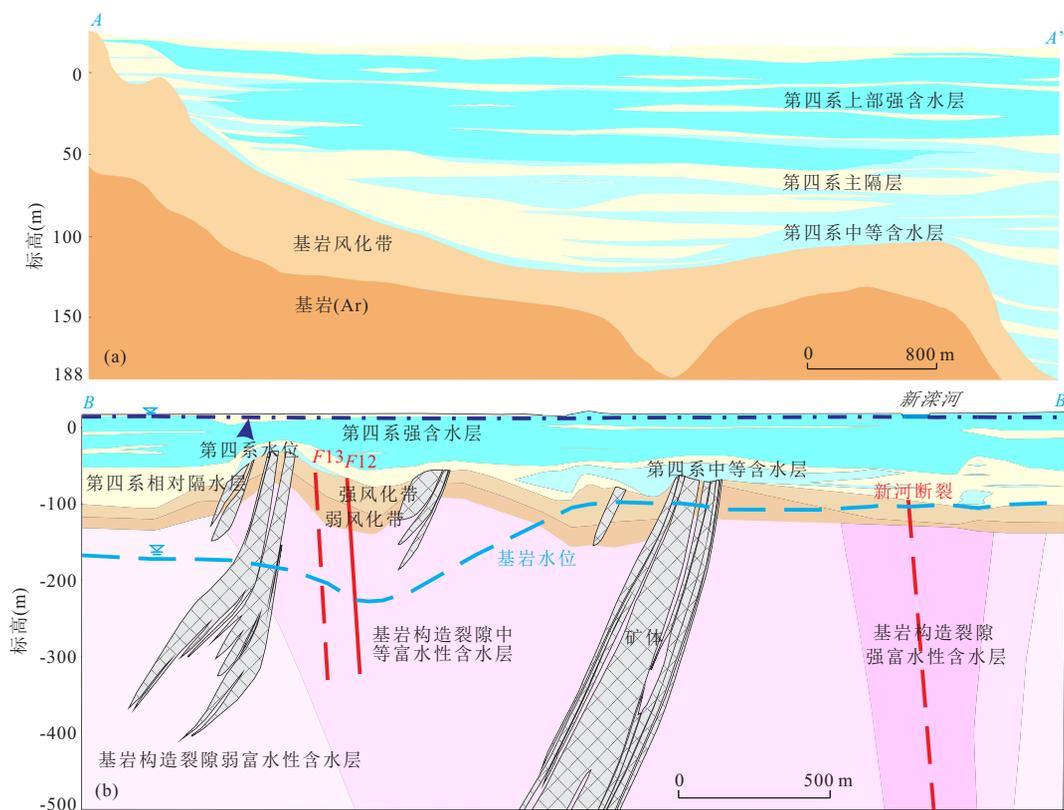


图2 第四系AA'(a)和基岩BB'(b)水文地质剖面

Fig.2 Hydrogeological profiles of Quaternary AA' (a) and bedrock BB' (b)

高以上(图 1~2)。

根据赋存地层、发育构造、风化程度,自上而下,将研究区含水层分为第四系孔隙含水层、基岩风化和构造裂隙含水层。第四系含水层自上而下又细分为:上部以粗砂砾卵石为主的强含水层、中部较连续的粉质粘土隔水层、下部以中细砂为主的中等含水层、底部砂质粘土形成的相对隔水层。第四系上、下部含水层(以下简称四含上、四含下)渗透系数分别为  $200\sim 550\text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $2\sim 50\text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ ,底部砂质粘土层存在局部“天窗”,第四系含水层结构见图 2。

长期风化在基岩顶面形成连续稳定的风化层。上部为粘土化的强风化带,渗透性较低,平均厚度约 26 m;下部为风化裂隙发育的弱风化带,平均厚度约 20 m,透水性、富水性均较好,形成基岩风化裂隙含水层。

断裂复合影响带内构造裂隙发育深度大,裂隙带富水性强,渗透性好,渗透系数约  $0.1\sim 2.0\text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ ,局部可达  $6.0\text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ ,形成基岩构造裂隙含水层。

## 2 开采条件下的地下水流场特征

司家营一期露天、一期地下矿于 2007 年投产,二期露天矿于 2009 年投产,目前露天矿开采标高至  $-187\text{ m}$  左右,一期地下矿至  $-240\text{ m}$ 。三期田兴铁矿于 2009 年开始基建,四期大贾庄铁矿于 2012 年开始基建。南区各地下矿均处于开拓阶段。田兴、大贾庄开拓水平为  $-350\sim -475\text{ m}$ ,自施工以来,2 个铁矿的多条竖井和平巷在基岩段突水。马城铁矿开工最晚,开拓水平为  $-300\sim -900\text{ m}$ ,目前多条竖井尚处于井筒施工阶段,未发生重大突水。

矿山开发之前,第四系水接受大气降水、滦河渗漏等补给后,自北向南流动(图 1),矿区第四系地下水水位标高约  $11.0\sim 16.0\text{ m}$ ;矿区北部基岩出露面积较大,基岩地下水接受北部山区补给后,自北向南径流,由于基岩含水层渗透性较差,径流缓慢,基岩水顶托越流补给第四系水,基岩地下水水位标高约  $11.3\sim 16.3\text{ m}$ 。

矿山相继开发之后,由于基岩深部长期排水,至 2017 年底,基岩含水层以田兴矿为中心形成复合漏斗,水位标高最低降至  $-253\text{ m}$ ;四含下在大贾庄 2#副井一带水位最低,与第四系底部粘土层缺失的“天窗”区位置对应;四含上年平均水位也呈持续下降趋势,由于富水性强、补给充沛,年平均降幅很小,其流场形状基本未变,但局部水位降幅稍大,开发后累计降幅达  $2\text{ m}$  以上。四含下、基岩含水层 2017 年底的等水头线分别见图 3。

根据抽水试验解译、动态监测的结果,将司家营铁矿南区基岩含水层划分为田兴矿中心区、新河断裂带区、大贾庄矿中心区、马城铁矿区等 4 个相对独立的分区系统(图 3b),各区分别以 F9-F13 断裂、新河断裂、褶皱轴部、F1-F3 等构造裂隙发育带为中心,各区之间以致密磁铁矿石岩或地下水分水岭为界。

开采条件下,各分区的充水因素也不同。田兴矿中心区水位漏斗梯度大,长期排水已转为无压状态(图 2,图 3b),东北、西、南方向的侧向补给差,矿坑涌水主要来自四含下稳定的越流补给和北部的侧向补给,水量稳定,区内各竖井正常排水总量约  $2.9\times 10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。新河断裂带内水位总体相近,带内竖井突水频发(瞬时最大出水量  $8.0\times 10^2\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ),井下突水时,从北部至南的所有基岩观测孔,水位

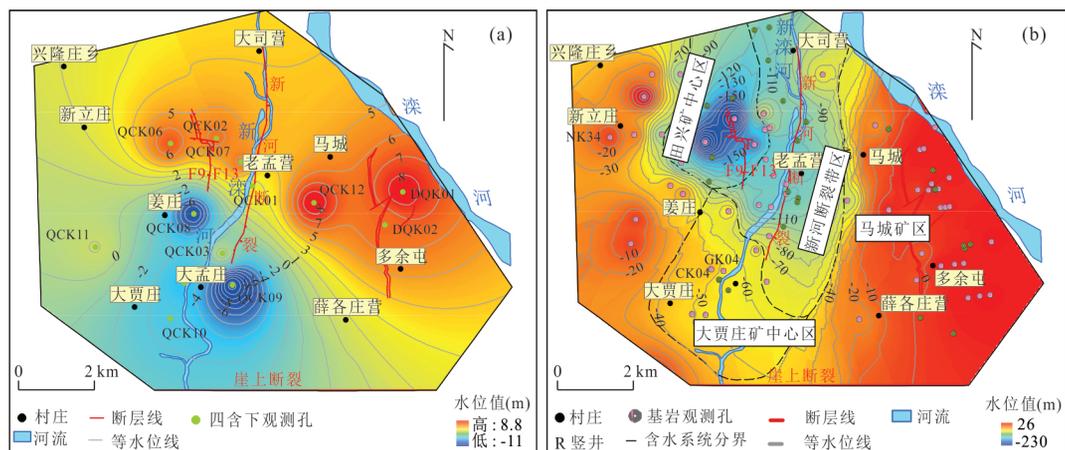


图 3 2017 年四含下等水头线(a)和基岩含水层等水头线(b)

Fig. 3 Groundwater contour of the Lower Quaternary aquifer (a) and the bedrock aquifer (b) in 2017

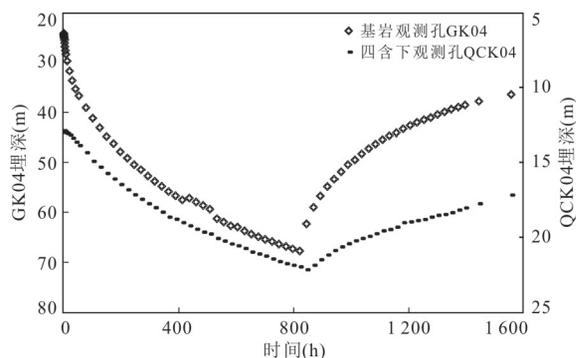


图4 突水时基岩观测孔与上覆第四系观测孔水位埋深对比

Fig.4 Comparison of groundwater depth between bedrock observation well and Quaternary observation well

孔位见图3

同步下降且降幅较一致,封堵后水位恢复较快,说明本区富水性强、补给量大,是集储、汇、导于一体的复杂含水系统,各竖井正常排水总量约  $5.3 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ . 大贾庄矿中心区各竖井正常排水总量约  $7.0 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ,但突水点瞬时出水量可达  $1.0 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ,突水时区内基岩孔水位同步下降且降幅较大,并沿NNE向形成细条带状漏斗,四含下水位也同步下降(图4),反映本区的侧向补给差,垂向上第四系通过“天窗”补给的特点.北区露天矿和地下矿均有独立排水系统,露天矿除东帮滦河渗水外,边帮基本无大的出水点,地下矿正常排水量约  $4.0 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ .

综合分析,司家营铁矿各分区系统之间,由于构造发育、地层结构及开采进度不同,各区的充水水源、通道及强度也不同,基岩深部开采对各含水层水化学特征的影响也不同.

### 3 样品的采集与测试

为分析采动后各含水层的水化学特征,根据矿山开采影响范围及地形地貌条件,确定了水化学采样范围(图1中阴影部分).东北以滦河为界,东南边界与四含上等水位线垂直,南部以崖上断裂(压性断裂)为边界;西和北边界选在河流二级阶地陡坎之上,西边界大致与等水位线垂直,北边界大致与等水位线一致.

2017年4—6月的第1批次采样,主要采集四含上和四含下的样品,2018年1月和6月,主要采集基岩水样,并对第四系水样补点.3批共采集水样148

个,地表、四含上、四含下、基岩水样个数分别为13、60、41、34.采样点大致均匀分布于工作区内,位置见图1.

四含上水样主要通过浇地民井采集,四含下通过村镇集中供水深井采集,基岩水委托铁矿在井下涌水点或水仓采集,地表水采自矿区范围内的河段. pH、TDS、ORP、电导率及温度等指标在现场直接测定,常规离子在室内通过离子色谱仪、火焰光度计和电位滴定仪进行测试,指标包括  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{F}^-$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$ 等,阴离子相对误差小于5%,自测与外送样相对误差小于5%.根据测试结果对四含上、四含下的样本又进行了聚类分析和Bayes判别分析,进一步核实样品所属层位(郭江峰等,2016).

3个含水层水化学指标统计结果见表1,不同含水层各指标明显不同,表明3个含水层为相对独立的总体.四含上、四含下都以  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 为主,但四含上中  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 含量较高;基岩水以  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Na}^+$ 为主.

四含上中各离子变异系数均小于0.5( $\text{K}^+$ 除外),四含下大于0.5的有  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ ,基岩水  $\text{F}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 变异系数大于0.5,且均值比四含下高,初步判断其形成可能与基岩中硅酸盐矿物的不全等溶解作用有关.

## 4 结果与分析

根据埋藏条件分析,第四系和基岩水的成因类型均为溶滤—渗入成因.水中各离子主要来源于流体与围岩的各种作用,主要有溶滤、脱硫酸、氧化还原、阳离子交替吸附、混合以及地表盐污染作用等.水化学特征是各种成因作用的综合表现.天然状态下,水化学特征受地形地貌、地层构造、埋藏条件等背景因素控制,形成与之相符的分带规律.在人为扰动作用下,各含水层的形成作用发生变化,水化学特征及分区也相应改变.

### 4.1 离子间的相关性分析

地下水中  $\text{Cl}^-$ 的来源应主要是地表盐污染的下渗和岩盐的溶解.区内盐污染通常由垃圾淋滤液、养殖污水下渗造成的,主要组分为  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 等(周训等,2014).在  $\text{Cl}^-$ -TDS的二元关系图中(图5a),各含水层  $\text{Cl}^-$ 与TDS均呈正相关,说明生成  $\text{Cl}^-$ 的作用在各含水层均不同程度地存在.四含上中  $\gamma_{\text{Na}^+}/\gamma_{\text{Cl}^-}$ (当量浓度比,以下同)多小于1,

表 1 司家营矿区各含水层水化学指标统计

Table 1 Statistical results of hydrochemical indexes for groundwater samples in Sijiaoying iron mine

| 水化学<br>指标   | 四含上    |        |      | 四含下    |        |      | 基岩水    |        |      |
|---|--------|--------|------|--------|--------|------|--------|--------|------|
|   | 均值     | 标准差    | 变异系数 | 均值     | 标准差    | 变异系数 | 均值     | 标准差    | 变异系数 |
| pH  | 7.08   | 0.24   | 0.03 | 7.99   | 0.22   | 0.03 | 8.30   | 0.36   | 0.04 |
| TDS(mg·L <sup>-1</sup> )                            | 725.35 | 235.13 | 0.32 | 356.07 | 130.49 | 0.37 | 472.43 | 118.96 | 0.25 |
| K <sup>+</sup> (mg·L <sup>-1</sup> )                | 3.70   | 2.56   | 0.69 | 1.28   | 0.99   | 0.77 | 2.73   | 1.12   | 0.41 |
| Na <sup>+</sup> (mg·L <sup>-1</sup> )               | 34.66  | 10.82  | 0.31 | 19.44  | 10.44  | 0.54 | 119.24 | 44.91  | 0.38 |
| Ca <sup>2+</sup> (mg·L <sup>-1</sup> )              | 123.70 | 36.90  | 0.30 | 67.09  | 27.26  | 0.41 | 19.52  | 8.35   | 0.43 |
| Mg <sup>2+</sup> (mg·L <sup>-1</sup> )              | 37.62  | 13.73  | 0.36 | 19.23  | 8.87   | 0.46 | 8.30   | 4.56   | 0.55 |
| Cl <sup>-</sup> (mg·L <sup>-1</sup> )               | 61.12  | 27.10  | 0.44 | 27.79  | 31.05  | 1.12 | 68.30  | 38.41  | 0.56 |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg·L <sup>-1</sup> ) | 122.85 | 36.87  | 0.30 | 37.35  | 32.24  | 0.86 | 58.11  | 26.20  | 0.45 |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg·L <sup>-1</sup> ) | 296.33 | 83.23  | 0.28 | 232.20 | 63.52  | 0.27 | 212.75 | 35.40  | 0.17 |
| F <sup>-</sup> (mg·L <sup>-1</sup> )                | 0.29   | 0.11   | 0.38 | 0.39   | 0.13   | 0.33 | 4.48   | 2.51   | 0.56 |

注:样品均在河北省矿业开发与安全技术实验室测试,每个含水层各选一个平行样,送国土资源部地下水检测中心测试,并测试了碳、氧、氢同位素。

随着 TDS 的增加,其值基本保持不变,说明 Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>可能来源于面状分布的地表盐污染,且 Na<sup>+</sup>下渗时可能存在交换吸附。基岩水中 Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>的相关系数较高,分析基岩水中部分 Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>可能均与围岩溶解有关。

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>通常来源于硫酸盐的溶解、硫化物的氧化、人为污染等。四含上、四含下、基岩水中,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-TDS 相关性均较低,且  $\gamma$ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>与  $\gamma$ (Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>)相关性也较低,分析 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>来自硫酸盐矿物溶解的可能性小,来自地表污染和硫化物氧化的可能性大。

四含上、四含下中, $\gamma$ HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>与  $\gamma$ (Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>)正相关(图 5b),分析主要为碳酸盐的溶滤形成。在四含上、四含下的  $\gamma$ (Na<sup>+</sup>-Cl<sup>-</sup>)与  $\gamma$ (Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)的关系图中(图 5c),剔除岩盐溶解后的 Na<sup>+</sup>与剔除硫酸盐及碳酸盐溶解后的(Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>)呈负相关,进一步说明地表渗滤液中的 Na<sup>+</sup>在下渗过程中,与土体吸附的(Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>)发生了交换吸附。

基岩水中  $\gamma$ (Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup>)高, $\gamma$ (Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>)值很低,且  $\gamma$ (Na<sup>+</sup>-Cl<sup>-</sup>)与  $\gamma$ (Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)负相关,相关系数近于 1,存在(Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>)与 Na<sup>+</sup>的与交换吸附。大贾庄矿和田兴矿中心区的  $\gamma$ (Na<sup>+</sup>-Cl<sup>-</sup>)值低于 2.6,新河断裂带区和马城矿区多在 3.0 以上,交换吸附作用较强。基岩水中 Cl<sup>-</sup>、F<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup>还两两正相关,说明三者的形成还与硅酸盐矿物的溶解有关。

离子的相关性分析表明,四含上的形成作用主要为碳酸盐溶滤、盐污染、离子交换吸附;四含下的

形成作用主要为碳酸盐溶滤、离子交换吸附;基岩含水层的形成作用可能有硅酸盐矿物的风化水解、离子交换吸附。

## 4.2 各含水层水化学类型及分区

### 4.2.1 水化学类型

在 Piper 三线图(图 6)中,四含上水样落在 1 区靠上的位置,阳离子(Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>)毫克当量百分数大于 70%,阴离子(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>+Cl<sup>-</sup>)在 30%~70% 之间,主要水化学类型为 Ca-HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>、Ca·Mg-HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>、Ca·Mg-HCO<sub>3</sub>型。四含下落在 1 区下部,阳离子(Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>)百分数大于 70%,阴离子(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>+Cl<sup>-</sup>)在 8%~40% 之间,远小于四含上,四含下主要水化学类型为 Ca-HCO<sub>3</sub>、Ca·Mg-HCO<sub>3</sub>型,局部为 Ca-HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>型。四含下中,位于矿区北部的 QSH09、QSH39 等水样,在三线图上的落点位置与四含上接近,而位于南部的水样,投点位置在 1 区底部,Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的含量低。

基岩水落在 7、8、9 三个区,仅大贾庄矿中心区的水样落在 8 区,其余点都位于与 9 区和 7 区,这与典型 8 区的基岩水不同,研究区基岩水 Cl<sup>-</sup>含量较高,主要水化学类型为 Na-HCO<sub>3</sub>·Cl、Na-HCO<sub>3</sub>型。新河断裂带区与马城矿区的水样落点基本一致,新河断裂带长时间持续排水,但其水化学类型及投点位置无大的变化,反映矿坑涌水主要来自基岩含水层的侧向补给;田兴矿中心区的水样落在新河断裂带与四含下北部水样的连线上,说明田兴矿中心区混入一定比例的四含下水。

根据四含下、新河断裂带区、田兴矿中心区水样的现代碳百分数和离子组分,进行了简单的混合

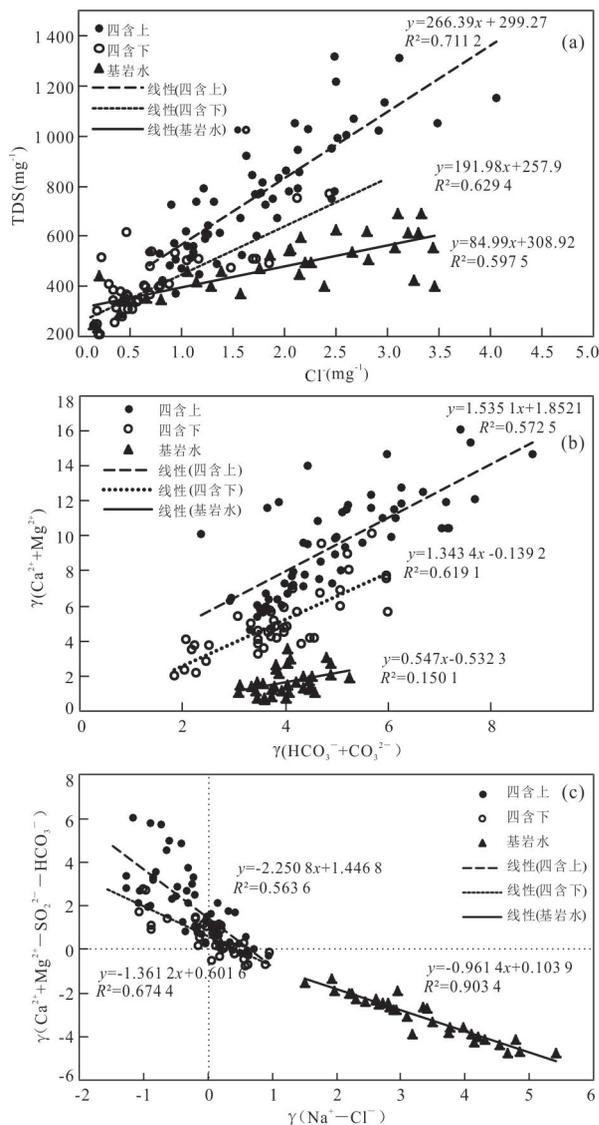


图5 TDS 与 Cl<sup>-</sup> 的关系图 (a);  $\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$  与  $\gamma(\text{HCO}_3^-+\text{CO}_3^{2-})$  的关系图 (b);  $\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}-\text{HCO}_3^-)$  与  $\gamma(\text{Na}^+-\text{Cl}^-)$  的关系图 (c)

Fig.5 Correlation of TDS and Cl<sup>-</sup> (a),  $\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$  and  $\gamma(\text{HCO}_3^-+\text{CO}_3^{2-})$  (b),  $\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}-\text{HCO}_3^-)$  and  $\gamma(\text{Na}^+-\text{Cl}^-)$  (c)

计算,田兴中心区比新河断裂带多混入约 8%~15% 的第四系水.大贾庄中心区水样中现代碳百分比为 22.39%,与田兴矿中心区 22.38% 的值一致,说明此区也混入一定比例的四含水.

**4.2.2 水化学类型分区** 将各含水层水样点的 K<sup>+</sup>、Na<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> 等 7 种离子的毫克当量百分比,按采样范围在 ArcGIS 中插值生成栅格图,基于舒卡列夫分类法赋值并转换成矢量图,再将阴阳离子的矢量图叠加,在属性表中编写 Python 程序进行水化学类型计算,生成四含上、四

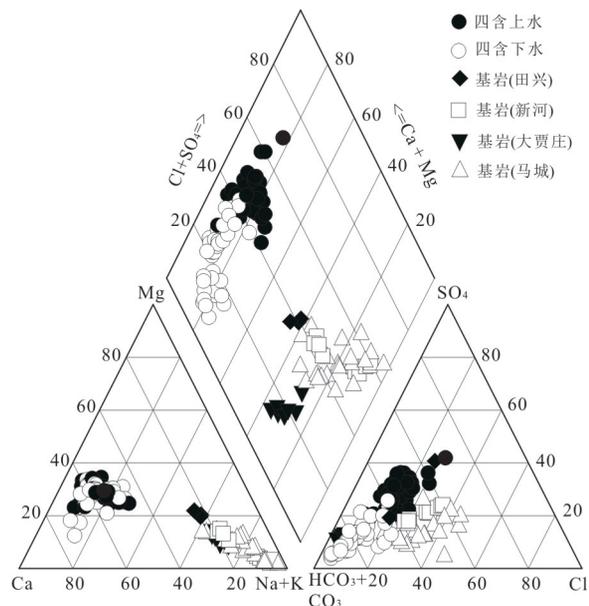


图6 各含水层常规离子 Piper 三线图

Fig.6 Piper diagram of conventional ions in each aquifer

含下、基岩水化学类型分区图 (马雷等,2012;陈陆望等,2017).

**四含上:**图 7 中,从西北向东南,水化学类型依次为 Ca-HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>、Ca·Mg-HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>、Ca·Mg-HCO<sub>3</sub>型,分区界线大致与二级阶地、第四系厚度突变的界线大体一致.

北部位于二级阶地的强径流区, $\gamma\text{Ca}^{2+}/\gamma\text{Mg}^{2+}$  值高,沿径流向南逐渐降低,说明 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 主要是溶滤作用形成的,也反映了围岩中灰岩和白云岩的同步溶解.矿区北部出露有中上元古界碳酸盐地层,由于方解石的溶解比白云石溶解的快,但比白云石易沉淀,在二级阶地地区 Ca<sup>2+</sup> 含量高,沿径流途径方解石先达饱和产生沉淀后,白云石继续溶解, $\gamma\text{Ca}^{2+}/\gamma\text{Mg}^{2+}$  值下降,水化学类型由 Ca-HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub> 转变为 Ca·Mg-HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub> 型 (沈照理等,1993;李华等,2017).

北部 Ca-HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>、Ca·Mg-HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub> 型分区,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 均超过 25%,反映北侧为氧化环境.南部第四系厚度变大,还原性应增强,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量降低.但含 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的分区界线明显在大孟庄一带向南弯曲,正与第四系底部粘土缺失区对应,分析认为,正是基岩排水使四含下水位下降、进而影响到四含上,此处包气带加厚,黄铁矿等还原性矿物被氧化后生成更易溶解的 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>.

**四含下:**图 8 中,从西北向东南,依次为 Ca-HCO<sub>3</sub>、Ca·Mg-HCO<sub>3</sub>型,分区与阶地界线基本一致.

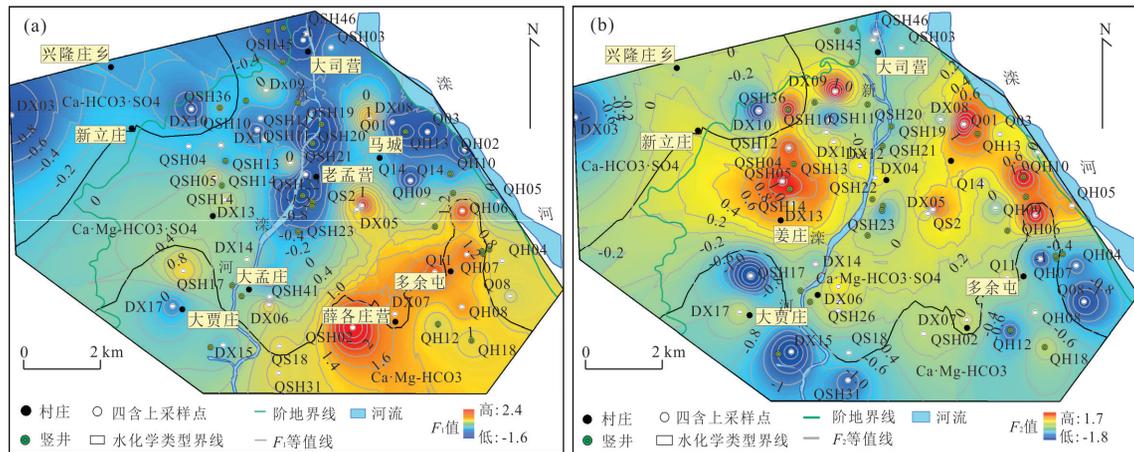


图 7 四含上公因子  $F_1$ (a)、 $F_2$ (b)得分等值线及水化学类型分区

Fig.7 Isolines of scores of  $F_1$  (a),  $F_2$  (b) and hydrochemical type distribution in the Upper Quaternary aquifer

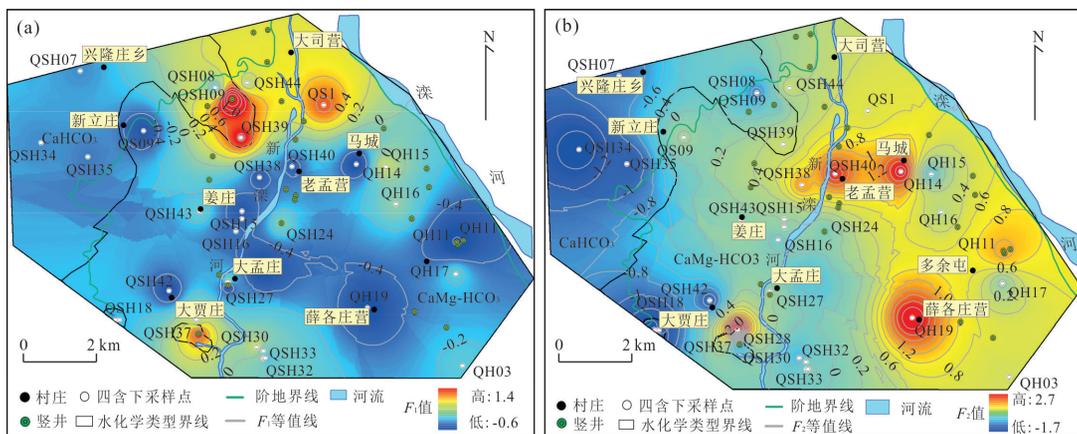


图 8 四含下公因子  $F_1$ (a)、 $F_2$ (b)得分等值线及水化学类型分区

Fig.8 Isolines of scores of  $F_1$  (a),  $F_2$  (b) and hydrochemical type distribution in the Lower Quaternary aquifer

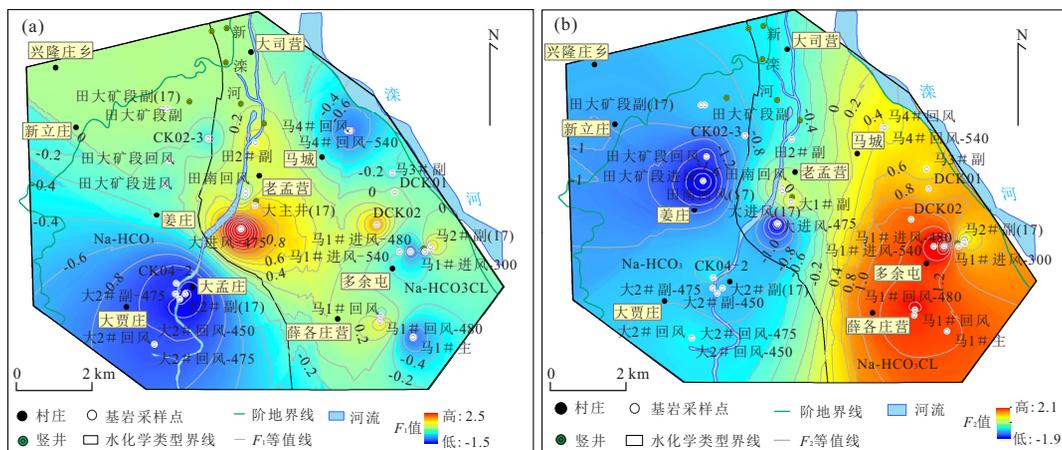


图 9 基岩含水层公因子  $F_1$ (a)、 $F_2$ (b)得分等值线及水化学类型分区

Fig.9 Isolines of scores of  $F_1$  (a),  $F_2$  (b) and hydrochemical type distribution in the bedrock aquifer

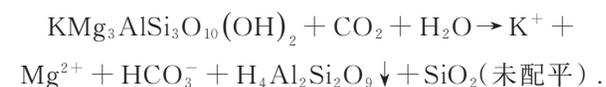
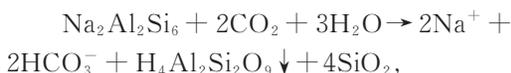
四含下相对封闭,受污染影响较小,  $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 、TDS值相对较低.与四含上一样,  $\gamma Ca^{2+}/\gamma Mg^{2+}$ 值从西北向东南逐渐降低,同样也反映了碳酸盐沿地下

水流向的溶解变化.

基岩水:图 9 中,大致沿马城铁矿、新河断裂带区与田兴矿中心、大贾庄矿中心区的的分界,西部

为Na-HCO<sub>3</sub>型、东部为Na-HCO<sub>3</sub>·Cl型。深埋基岩水的形成作用主要包括含硅酸盐的水解、脱硫酸、离子交换吸附和氧化等作用。

矿区基岩地层中富含黑云母KMg<sub>3</sub>[AlSi<sub>3</sub>O<sub>10</sub>](OH,F)、普通角闪石(Ca,Na)<sub>2-3</sub>(Mg,Fe,Al)<sub>5</sub>[Si<sub>3</sub>(Si,Al)O<sub>11</sub>]<sub>2</sub>(OH,F)、钠长石、钾长石,还可见磷灰石、榍石、黄铁矿等副矿物(李万亨等,1983),钠长石、黑云母非全等溶解反应方程(沈照理等,1993):



黑云母、普通角闪石等矿物的附加阴离子中,常含有OH<sup>-</sup>、F<sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>等离子,其风化水解除产生K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>等阳离子外,还会生成F<sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>等阴离子,氟磷灰石也会水解产生F<sup>-</sup>,因此,沉积变质型铁矿区的基岩含水层中,pH、Cl<sup>-</sup>、F<sup>-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>值较煤系水高。

在未扰动的深埋基岩含水层,还原环境下还会发生脱硫酸作用,Ca<sup>2+</sup>-Na<sup>+</sup>间的交换吸附作用,形成低SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Ca<sup>2+</sup>,高HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup>的Na-HCO<sub>3</sub>·Cl型水,如马城矿区。在扰动大的非承压区域,氧化性增强,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量相对较高,如田兴矿中心区;扰动大且第四系补给的承压区,如大贾庄矿中心区,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>含量相对较低,γ(Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>)值逐渐升高,为第四系水下渗混合作用形成。

总之,基岩含水层经过水解、脱硫酸、离子交换吸附等作用,形成沉积变质型铁矿床特有Na-HCO<sub>3</sub>·Cl型水。

### 4.3 公因子及控制因素分析

因子分析是把具有复杂关系的变量分解为少数几个公因子的一种多变量统计分析方法,目的是

找出潜在变量来了解事物的内在成因(章文波和陈红艳,2006;卢颖和郭建强,2016)。公因子提取采用主成分分析法,主成分分析后反解方程,方程右侧主成分前的系数,称为因子载荷,实质就是变量与标准化后的主成分(即公因子)间的相关系数。通过最大方差法旋转因子后,其意义比主成分中更清楚。根据公因子得分系数,计算各样本的在公因子上的得分并进行插值,可得出研究区形成作用的强弱分布,进而分析形成作用的控制因素。

区内3个含水层中,即使同一离子其形成作用也不同,因此,用样本总体进行因子分析的效果不好,公因子代表的含义也不够明确,研究区各含水层样本量较大,可分别进行因子分析。

**4.3.1 样本的公因子分析及形成作用** 四含上:根据60个样本的常规水化学指标测试结果进行因子分析。剔除相关性检验不显著的变量,最终选择TDS、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>共7个变量。提取了2个公因子,每个变量提取的公因子方差均达到0.75以上。第1、2公因子F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>的特征值分别为4.81、1.08,2个公因子方差累计贡献率分别达68.7%、84.2%。

最大方差法旋转的的因子载荷图(图10a)中,TDS、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>的在F<sub>1</sub>上的载荷最大,代表了碳酸盐溶滤作用(於昊天等,2017),其强度与沉积物粒度、水的径流有关;Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>在F<sub>1</sub>上高载荷与Na<sup>+</sup>的低载荷形成对比,代表了离子交换吸附作用。在F<sub>2</sub>上,Na<sup>+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>载荷较大,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>为负值,代表以盐污染、氧化作用为主的公因子。在水位降幅大的区域,氧化环境下SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量增加,因此,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>在F<sub>2</sub>上载荷值大于Cl<sup>-</sup>。

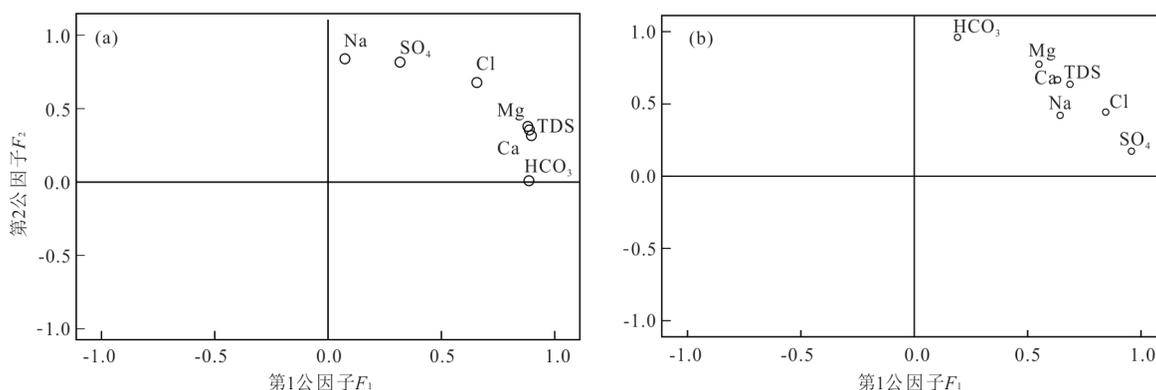


图10 四含上(a)和四含下(b)的变量在公因子上载荷分布

Fig.10 Loading distribution of variables in F<sub>1</sub>-F<sub>2</sub> of the Lower Quaternary aquifer (a) and Upper Quaternary aquifer (b)

根据因子得分系数矩阵和变量的观测值可以计算出各样本的因子得分。 $F_1$ 、 $F_2$ 的因子得分计算公式为：

$$S_{F_1} = -0.244\text{Na}^+ + 0.275\text{Ca}^{2+} + 0.259\text{Mg}^{2+} - 0.055\text{Cl}^- - 0.133\text{SO}_4^{2-} + 0.371\text{HCO}_3^- + 0.248\text{TDS},$$

$$S_{F_2} = 0.507\text{Na}^+ - 0.069\text{Ca}^{2+} - 0.039\text{Mg}^{2+} + 0.265\text{Cl}^- + 0.474\text{SO}_4^{2-} - 0.284\text{HCO}_3^- - 0.021\text{TDS}.$$

四含下：选择与四含上相同的 7 个指标，提取的 2 个公因子  $F_1$ 、 $F_2$  的特征值分别为 5.31、0.72，累计贡献率分别为 75.8%、86.1%。图 10b 中， $F_1$  上  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  的载荷较大，代表了以污染、氧化为主的形成作用。 $F_2$  上  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  的载荷较大，且  $\text{Mg}^{2+}$  的载荷大于  $\text{Ca}^{2+}$ ，未旋转的载荷矩阵中  $\text{SO}_4^{2-}$  的系数为负值，代表了溶滤作用和脱硫酸作用，在脱硫酸过程中生成的过量  $\text{HCO}_3^-$  可能形成  $\text{CaCO}_3$  的沉淀。

四含下多由四含上补给形成，由于埋藏环境相对封闭， $\text{SO}_4^{2-}$  含量较低，仅北部基岩浅埋区受污染和氧化作用较强。 $F_1$ 、 $F_2$  的因子得分计算公式为：

$$S_{F_1} = 0.215\text{Na}^+ + 0.061\text{Ca}^{2+} - 0.062\text{Mg}^{2+} + 0.590\text{SO}_4^{2-} - 0.432\text{HCO}_3^- + 0.119\text{TDS},$$

$$S_{F_2} = -0.025\text{Na}^+ + 0.190\text{Ca}^{2+} + 0.330\text{Mg}^{2+} - 0.125\text{Cl}^- - 0.422\text{SO}_4^{2-} + 0.701\text{HCO}_3^- + 0.132\text{TDS}.$$

基岩水：去掉了相关性检验不显著的  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ ，增加了  $\text{F}^-$ ，最终选择  $\text{TDS}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{F}^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$  6 个指标。基岩水变量间相关性不强，一是采样点偏少，二是开采扰动后，有第四系水的补给，形成作用较复杂。提取的 2 个公因子  $F_1$ 、 $F_2$  的特征值分别为 4.04、0.94。累计贡献率分别达 67.3%、83.1%。

图 11 中， $F_1$  上  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{TDS}$  的载荷较大，代表以氧化作用和离子交换吸附作用为主的成因作用。未旋转的载荷矩阵中， $F_2$  上  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{F}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$  的载荷为正值， $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{TDS}$  为负值，代表了硅酸盐矿物的不全等溶解以及脱硫酸作用。脱硫酸形成  $\text{HCO}_3^-$ ， $\text{HCO}_3^-$  在  $F_2$  上载荷较高；硅酸盐矿物的不全等溶解，伴随粘土矿物的沉淀， $\text{TDS}$  载荷为负。 $F_1$ 、 $F_2$  的因子得分计算公式为：

$$S_{F_1} = 0.183\text{Na}^+ - 0.103\text{F}^- + 0.157\text{Cl}^- + 0.504\text{SO}_4^{2-} - 0.303\text{HCO}_3^- + 0.374\text{TDS},$$

$$S_{F_2} = 0.154\text{Na}^+ + 0.436\text{F}^- + 0.181\text{Cl}^- - 0.388\text{SO}_4^{2-} + 0.611\text{HCO}_3^- - 0.134\text{TDS}.$$

**4.3.2 采动条件下水化学特征的控制因素分析**  
在 ArcGIS 中插值生成各含水层  $F_1$ 、 $F_2$  的等值线图，将等值线图与水化学类型分区图叠加，通过二者的

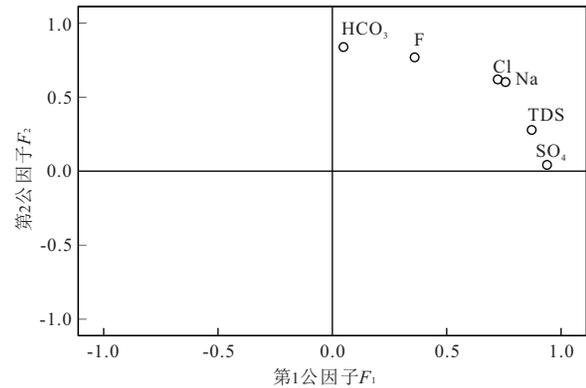


图 11 基岩水的变量在公因子上载荷分布

Fig.11 Loading distribution of variables in  $F_1$ - $F_2$  of the bedrock aquifer

对应关系，分析采动条件下水化学的控制因素。

四含上： $F_1$ 等值线图中（图 7a），北部  $\text{Ca-HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$  水化学类型区的  $F_1$  值较低。该区地下水流速快，溶滤作用强，水中  $\text{HCO}_3^-$  的含量相对较低， $F_1$  值为负。中部  $\text{Ca} \cdot \text{Mg-HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$  型区  $F_1$  在 0~1.0 之间，溶滤作用稍弱，但河流两侧的  $F_1$  为负值，反映了河水对四含上的补给作用。南部  $\text{Ca} \cdot \text{Mg-HCO}_3$  型区域第四系厚度大、粒度细，径流不强，溶滤作用更弱，容易形成较高的  $\text{TDS}$  和  $\text{HCO}_3^-$  的积累， $\text{SO}_4^{2-}$  含量较低， $F_1$  在 1.0~2.0 之间。

$F_2$ 等值线图（图 7b）中，北部两个水化学类型区得分较高，氧化性较强，面状污染严重；南部的  $\text{Ca} \cdot \text{Mg-HCO}_3$  型区，沉积物粒度相对较细，污染程度小，氧化性较弱，得分值在 0~-1.2 之间，但在大孟庄一带明显南弯。受溶滤、氧化、污染作用影响，自北向南  $\text{HCO}_3^-$  相对含量增加、 $\text{SO}_4^{2-}$  含量降低， $\gamma\text{Ca}^{2+}/\gamma\text{Mg}^{2+}$  值下降，水化学类型相应变化，其控制因素除本区的地形地貌、地层岩性、沉积物粒度等背景因素外，水动力及水位变化也是影响各种形成作用强弱变化的重要因素。

四含下： $F_1$ 得分等值线图中（图 8a），西北部值较高、东南区值较低。北部四含上与四含下间的隔水层局部缺失，水力交替作用较强，北部  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$  等污染离子浓度也较南区大，但低于四含上。南部受地表盐污染影响小（个别井点的高浓度可能是沿井管污染所致）。

$F_2$ 值分布与水化学类型分区基本一致（图 8b）。西北侧  $\text{Ca-HCO}_3$  型区得分值在 -1.4~-0.2 之间，为二级阶地向一级阶地的补给地带，溶滤作用强；中间一带得分值 -0.2~+0.2 之间，与田兴矿中心

区、大贾庄矿中心区的位置基本对应,受开采影响,溶滤作用较强;东部得分值高的区域与新河断裂带区、马城铁矿区的位置基本对应,四含下受扰动较小,溶滤作用相对较弱,得分值较高。

水化学界线在田兴矿中心区处明显拐弯。此区基岩含水层为非承压状态,四含下越流补给基岩,水位下降使此处氧化、污染、溶滤作用均增强, $F_1$ 、 $F_2$ 的值在此处也明显不同。

$F_1$ 、 $F_2$ 分值变化,说明四含下的水化学特征很大程度上受到开采引起的流场变化控制。

基岩水: $F_1$ 在大贾庄矿中心区值最低,由于第四水的补给混合,离子交换吸附作用不强, $\text{Na}^+$ 的相对含量较低;在新河断裂带和马城矿区,井下排水主要来自基岩含水层的侧向补给,原生基岩水中的高 $\text{Na}^+$ 值,主要为 $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{Na}^+$ 间交换吸附形成,因此, $F_1$ 值较高,在0~1.8之间(图9a)。田兴矿中心区转为非承压状态后,氧化作用增强,生成少量硫酸盐,此区 $F_1$ 值在0~0.2之间。

在 $F_2$ 等值线图(9b)中,大致以水化学类型分区为界,东部值高,西部值低。开采时间越长、第四系越流补给混合量比例越大的区域,原基岩含水层的 $\text{F}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 等特征离子含量越低, $F_2$ 值越小;扰动小的东部马城矿区,特征离子分布与自北向南的天然流场大体一致,北低南高, $F_2$ 值在马城铁矿南部最大。

总之,基岩东西区水化学特征、公因子分值的不同,均与地下水的补给来源和流场状态相关,采动引起的流场变化控制了基岩含水层的水化学特征。

## 5 结论

(1)司家营铁矿南区主要充水含水层中,四含上水化学类型从西北向东南,依次为 $\text{Ca-HCO}_3\cdot\text{SO}_4$ 、 $\text{Ca}\cdot\text{Mg-HCO}_3\cdot\text{SO}_4$ 、 $\text{Ca}\cdot\text{Mg-HCO}_3$ 型;四含下水化学类型从西北向东南,依次为 $\text{Ca-HCO}_3$ 、 $\text{Ca}\cdot\text{Mg-HCO}_3$ 型;基岩含水层西部为 $\text{Na-HCO}_3$ 、东部为 $\text{Na-HCO}_3\cdot\text{Cl}$ 型。受开采影响大的区域,基岩水化学类型已发生变化,四含下、四含上的分区界线局部发生移动。

(2)采动条件下,基岩水的形成作用主要以离子交换吸附、硅酸盐矿物的不全等溶解、混合、脱硫酸作用为主。各种形成作用与矿坑排水量及矿坑涌水来源密切相关。涌水来自第四系补给的区域,混合作用为主;基岩水侧向补给的区域,以离子交换吸附和不全等溶解作用为主;施工初期扰动小的区域,基岩水基本保持了天然条件下的水化学类型。

受基岩排水影响,四含下和四含上整体水化学类型虽未改变,但局部形成作用强度发生了变化,常规离子含量及离子比也相应改变,水化学类型分区界线移动。

(3)司家营铁矿南区的水化学分区与形成作用的强弱,与矿山的水文地质背景条件、矿山开拓时间以及矿坑涌水来源密切相关。基于常规水化学的因子分析,不仅可预测长期开采条件下矿区各主要充水含水层的水化学演化趋势,还可辅助判别矿坑涌水来源。

## References

- Cao, X.C., Qian, J.Z., Sun, X.P., et al., 2010. Hydrochemical Classification and Identification for Groundwater System by Using Integral Multivariate Statistical Models: A Case Study in Guqiao Mine. *Journal of China Coal Society*, 35 (S1): 141—144 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J.P., Pan, G.Y., Wu, L., et al., 2018. Identifying the Source of the Groundwater Based on the Characteristics of Environmental Isotopes and Water Chemistry. *Environmental Chemistry*, 37 (6): 1410—1420 (in Chinese with English abstract).
- Chen, L.W., Liu, X., Yin, X.X., et al., 2012. Analysis of Hydrochemical Environment Evolution in Main Discharge Aquifers under Mining Disturbance in the Coal Mine. *Journal of China Coal Society*, 37(S2): 362—367 (in Chinese with English abstract).
- Chen, L.W., Xu, D.Q., Yin, X.X., et al., 2017. 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. *Journal of China Coal Society*, 42(4): 996—1004 (in Chinese with English abstract).
- Guo, J.F., Yao, D.X., Huang, H., et al., 2016. System Design and Implementation of Water Source Identification of Mine Water Inrush Based on the Bayes Algorithm. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 43 (2): 153—158 (in Chinese with English abstract).
- Li, H., Wen, Z., Xie, X.J., et al., 2017. Hydrochemical Characteristics and Evolution of Karst Groundwater in Sanqiao District of Guiyang City. *Earth Science*, 42(5): 804—812 (in Chinese with English abstract).
- Li, W.H., Peng, W.N., Liu, J.X., et al., 1983. The Mineralogenesis and Prognosis of Precambrian Sedimentary-Metamorphic Iron Ore Deposits of Luan Xian District, Eastern Hebei. *Earth Science*, 8 (2): 115—123, 179 (in Chinese with English abstract).
- Lu, Y., Guo, J.Q., 2016. Hydrochemical Characteristics of Groundwater of Zhangye Basin. *Journal of Arid Land Re-*

- sources and Environment*, 30(5):129–134 (in Chinese with English abstract).
- Ma, L., Qian, J.Z., Zhao, W.D., 1995. GIS-Based Approaches for Spatially Dividing Groundwater Chemical Types. *Journal of China Coal Society*, 37(3):490–494 (in Chinese with English abstract).
- Pan, G.T., Lu, S.N., Xiao, Q.H., et al., 2016. Division of Tectonic Stages and Tectonic Evolution in China. *Earth Science Frontiers*, 23(6):1–23 (in Chinese with English abstract).
- Shen, Z.L., Zhu, W.H., Zhong, Z.X., et al., 1993. Hydrogeochemistry. Geological Publishing House, Beijing, 113 (in Chinese).
- Sun, L.H., Gui, H.R., 2013. Statistical Analysis of Deep Groundwater Geochemistry from Taoyuan Coal Mine, Northern Anhui Province. *Journal of China Coal Society*, 38(S2):442–447 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Q., 2014. Progress, Problems and Prospects of Prevention and Control Technology of Mine Water and Reutilization in China. *Journal of China Coal Society*, 39(5):795–805 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y.Z., Pan, C.F., Lin, Y., et al., 2018. Hydrogeochemical Characteristics and Controlling Factors of Main Water Filled Aquifers in the Typical North China Coalfield. *Geological Science and Technology Information*, 37(5):191–199 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y.X., Zhang, L.F., Li, H.M., et al., 2015. The Exploration Model of the Sijiyang Sedimentary Metamorphic Iron Deposit in Eastern Hebei Province. *Geology and Exploration*, 51(1):23–35 (in Chinese with English abstract).
- Yu, H.T., Ma, T., Deng, Y.M., et al., 2017. Hydrochemical Characteristics of Shallow Groundwater in Eastern Jianghan Plain. *Earth Science*, 42(5):685–692 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W.B., Chen, H.Y., 2006. Practical Data Analysis and SPSS 12.0 Applcance. Posts & Telecom Press, Beijing (in Chinese).
- Zhao, H.J., Chen, X.F., He, X.Z., et al., 2018. A Study of Genetic Type Characteristics and Important Distribution Zones of Global Iron Deposits. *Geology in China*, 45(5):890–919 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X., Hu, F.S., He, J.T., et al., 2014. Introduction to Groundwater Science. Geological Publishing House, Beijing, 125 (in Chinese).
- 附中文参考文献**
- 曹雪春, 钱家忠, 孙兴平, 等, 2010. 煤矿地下水系统水质分类判别的多元统计组合模型——以顾桥煤矿为例. *煤炭学报*, 35(S1):141–144.
- 陈建平, 潘光义, 吴丽, 等, 2018. 基于环境同位素和水化学特征识别矿井涌水来源. *环境化学*, 37(6):1410–1420.
- 陈陆望, 刘鑫, 殷晓曦, 等, 2012. 采动影响下井田主要充水含水层水化学环境演化分析. *煤炭学报*, 37(S2):362–367.
- 陈陆望, 许冬清, 殷晓曦, 等, 2017. 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. *煤炭学报*, 42(4):996–1004.
- 郭江峰, 姚多喜, 黄河, 等, 2016. 基于 Bayes 算法的煤矿井下突水水源判识系统的设计与实现. *水文地质工程地质*, 43(2):153–158.
- 李华, 文章, 谢先军, 等, 2017. 贵阳市三桥地区岩溶地下水水化学特征及其演化规律. *地球科学*, 42(5):804–812.
- 李万亨, 彭文能, 刘瑾璇, 等, 1983. 冀东滦县一带前寒武纪沉积变质铁矿床成矿规律及成矿预测. *地球科学*, 8(2):115–123, 179.
- 卢颖, 郭建强, 2016. 基于多元统计方法的张掖盆地地下水水化学特征分析. *干旱区资源与环境*, 30(5):129–134.
- 马雷, 钱家忠, 赵卫东, 2012. 基于 GIS 的地下水化学类型空间分区方法. *煤炭学报*, 37(3):490–494.
- 潘桂棠, 陆松年, 肖庆辉, 等, 2016. 中国大地构造阶段划分和演化. *地学前缘*, 23(6):1–23.
- 沈照理, 朱宛华, 钟佐燊, 1993. *水文地球化学基础*. 北京:地质出版社, 104–113.
- 孙林华, 桂和荣, 2013. 皖北桃源矿深部含水层地下水地球化学数理统计分析. *煤炭学报*, 38(S2):442–447.
- 武强, 2014. 我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展望. *煤炭学报*, 39(5):795–805.
- 武亚遵, 潘春芳, 林云, 等, 2018. 典型华北型煤矿区主要充水含水层水文地球化学特征及控制因素. *地质科技情报*, 37(5):191–199.
- 许英霞, 张龙飞, 李厚民, 等, 2015. 冀东司家营沉积变质型铁矿床找矿模型. *地质与勘探*, 51(1):23–35.
- 於昊天, 马腾, 邓娅敏, 等, 2017. 江汉平原东部地区浅层地下水水化学特征. *地球科学*, 42(5):685–692.
- 章文波, 陈红艳, 2006. *实用数据统计分析及 SPSS12.0 应用*. 北京:人民邮电出版社.
- 赵宏军, 陈秀法, 何学洲, 等, 2018. 全球铁矿床主要成因类型特征与重要分布区带研究. *中国地质*, 45(5):890–919.
- 周训, 胡伏生, 何江涛, 等, 2014. *地下水科学概论*. 北京:地质出版社, 125.