

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2021.03.009

## 平朔矿区地下水水化学特征及成因

吴晓丽, 张 杨, 孙媛媛\*, 吴吉春

(表生地球化学教育部重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 南京, 210023)

**摘 要:**为揭示平朔矿区地下水化学特征及成因, 采集了区内浅层孔隙水、山西组砂岩裂隙水、煤系层间砂岩裂隙水和奥陶系灰岩裂隙水四个含水层共计 31 个地下水样, 运用统计分析、Piper 三线图、Gibbs 图、离子组合比和主成分分析等方法深入探讨该区地下水水化学组分形成及影响因素。结果表明: 研究区各含水层地下水总溶解固体(TDS, total dissolved solids)范围在 211.84~1315.00 mg·L<sup>-1</sup>。四个含水层主要优势阴阳离子分别为 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 Ca<sup>2+</sup>, 水化学类型随含水层深度增加由 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Ca<sup>2+</sup>·Mg<sup>2+</sup> 型向 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>·SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Ca<sup>2+</sup>·Mg<sup>2+</sup> 型过渡。地下水化学组分主要受阳离子交替吸附作用、黄铁矿氧化、盐岩溶解及碳酸盐和硫酸盐溶解作用控制。其中黄铁矿氧化、盐岩溶解及碳酸盐和硫酸盐溶解作用对深部含水层地下水组分的影响显著强于浅层孔隙水。

**关键词:**采煤活动, 地下水化学特征, 水-岩作用, 成因

中图分类号: P641

文献标志码: A

## Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Pingshuo mining area

Wu Xiaoli, Zhang Yang, Sun Yuanyuan\*, Wu Jichun

(Key Laboratory of Surficial Geochemistry Ministry of Education, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, 210023, China)

**Abstract:** In order to reveal the hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Pingshuo mining area, 31 groundwater samples of 4 aquifers including shallow pore water, sandstone fissure water of Shanxi Formation, sandstone fissure water of coal measure, and Ordovician limestone fissure water were collected in the area. The formation and influencing factors of the hydrochemical composition of groundwater in the area were deeply discussed by using statistical analysis, Piper three-line diagram, Gibbs diagram, ion combination ratio, and principal component analysis. The results showed that the total dissolved solids (TDS) of groundwater in each aquifer in the study area was in the range of 211.84~1315.00 mg·L<sup>-1</sup>. The dominant anions and cations of the four aquifers were HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> and Ca<sup>2+</sup>, and the hydrochemical type changed from HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Ca<sup>2+</sup>·Mg<sup>2+</sup> type to HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>·SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Ca<sup>2+</sup>·Mg<sup>2+</sup> type as the aquifer depth increased. The hydrochemical composition of groundwater was mainly controlled by cation exchange and adsorption, pyrite oxidation, salt rock dissolution, carbonate and sulfate dissolution. Among them, the oxidation of pyrite and the dissolution of carbonates, sulfates, and salt rocks had a significantly stronger influence on the components of the groundwater in the three deep aquifers than the shallow pore water.

**Key words:** coal mining activities, groundwater hydrochemical characteristics, water-rock interaction, formation mechanism

中国目前是世界最大的煤炭生产国, 2015 年全国煤炭消耗量占能源消耗总量的 63.7%<sup>[1-2]</sup>, 煤矿开采对地下水环境造成的不利影响受到国内外学者的高度重视<sup>[3-5]</sup>。大规模的煤矿开采严重

基金项目: 国家重点研发计划“水资源高效开发利用”重点专项项目(2018YFC0406401)

收稿日期: 2021-02-19

\* 通讯联系人, E-mail: sunyy@nju.edu.cn

地影响了地下水赋存环境与水循环条件<sup>[6]</sup>。一方面,采矿活动引发地下围岩应力改变并破坏岩层结构,形成断层、裂隙、陷落柱等,导致煤炭开采过程中出现涌水甚至突水灾害。矿井大量抽水也会在含水层中形成大面积降落漏斗,显著改变矿区天然地下水动力条件和补、径、排关系<sup>[7]</sup>。另一方面,地下水流场的变化与水岩作用的影响改变地下水化学环境,长期的采煤活动会导致地下水水质严重恶化,从而引发一系列生态环境问题<sup>[8]</sup>。

煤矿区地下水系统通常由具有不同程度水力联系的多个含水层组成,其水文地质条件复杂多变<sup>[9]</sup>,给阐明地下水循环条件与水化学组分演化机制带来很大挑战。近年来一些研究运用 Piper 三线图、离子比例系数法、数理统计等水化学方法分析地下水水化学特征与演化规律,结果表明采煤活动与水岩作用是导致地下水化学组分变化的重要原因<sup>[8-11]</sup>。例如,冯海波等<sup>[8]</sup>通过数理统计、Piper 三线图、库尔洛夫式等方法对比了草原露天煤矿开采前后地下水水化学特征的变化,发现煤矿开采活动使矿区地下水由还原环境变为氧化环境,水化学类型由  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$  型演化为  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$  型。殷晓曦等<sup>[10]</sup>采用主成分分析方法,从时空变化角度揭示了临涣矿区在采动影响下地下水化学演化过程中的水-岩作用机制,表明部分区域碳酸盐、硫酸盐溶解及黄铁矿氧化作用明显减弱。因此,水化学方法为准确分析和评估复杂矿区地下水水化学形成机制提供了有效可行的手段。

平朔矿区地处山西省宁武煤田北端,煤矿资源丰富,探明地质储量达 127.5 亿吨,拥有露天煤矿安太堡露天矿和安家岭露天矿以及两个辅助开采的大型井工矿。平朔矿区是我国规模最大、现代化程度最高的煤炭生产基地之一。开展平朔矿区地下水化学组分特征及成因研究,对该矿区地下水资源合理开发利用和环境保护具有重要意义。然而,目前仍缺乏关于平朔矿区地下水化学形成机制的研究。基于此,本文以平朔矿区为研究区,通过水文地质资料收集与地下水采样分析,采用统计分析、Piper 三线图、Gibbs 图、离子组合比和主成分分析等方法探究不同含水层水化学特征及主控因素,揭示地下水化学组分形成规律。

## 1 研究区概况

平朔矿区位于山西省朔州市平鲁区境内,北、东、西三面环山,中间为黄土丘陵,黄土广布,形成典型的黄土高原地貌景观,主要含煤层为二叠系太原组,厚度 130 m 左右。该区为典型大陆性季风气候,年平均降水量 374.3 mm,最高 451.8 mm,最低 330.9 mm。本次研究范围北部以木瓜界断层为界,南部以全武营断层为界,东部以马关河河流为界,西部以党家山断层及煤层露头线为界,总面积约 226.2 km<sup>2</sup>。研究区内主要包括安太堡露天矿、安家岭露天矿、井工一矿和井工二矿四个大型煤矿以及若干小型煤矿(图 1)。

研究区内发育断层 16 条,断距在 5 m 以上者六条,其中安家岭逆断层 F19 和马蹄沟断层 F25 规模较大。一号井田发育陷落柱 16 个,较可靠者九个;二号井田两个,均为较可靠陷落柱。陷落柱内岩石破碎,具导水性,不仅沟通了上部砂岩含水层,而且使煤层下伏的奥陶系岩溶水通过破碎带进入矿井。区内地层由老至新分别为:奥陶系下统亮甲山组、冶里组(O);奥陶系中统马家沟组(O);石炭系中统本溪组(C);石炭系上统太原组(C);二叠系下统山西组、下石盒子组(P);二叠系上统上石盒子组(P);第三系(N);第四系(Q)。根据地层岩性与地下水赋存空间的空隙性质,矿区含水层由浅至深分别为浅层孔隙含水层、山西组砂岩裂隙含水层、煤系层间砂岩裂隙含水层和奥陶系灰岩裂隙含水层。区域地下水的补给来源主要为大气降水,其次为地表水。地下水排泄有点状、线状、矿坑排泄、越流排泄及地表蒸发等。

## 2 研究方法

**2.1 水样采集与测试** 2019 年 9 月从平朔矿区四个含水层钻孔中共采集地下水样 31 个,按照深度由浅至深依次为浅层孔隙水(以下简称浅层水)八个、山西组砂岩裂隙水七个(以下简称山西水)、煤系层间砂岩裂隙水六个(以下简称煤系水)、奥陶系灰岩裂隙水十个(以下简称奥灰水)。采样点分布如图 1 所示。样品采集前,预先用水样反复冲洗取样瓶,然后将采集的水样经 0.45 μm 滤膜过滤后装入 100 mL 聚乙烯塑料瓶中,每个样品采集

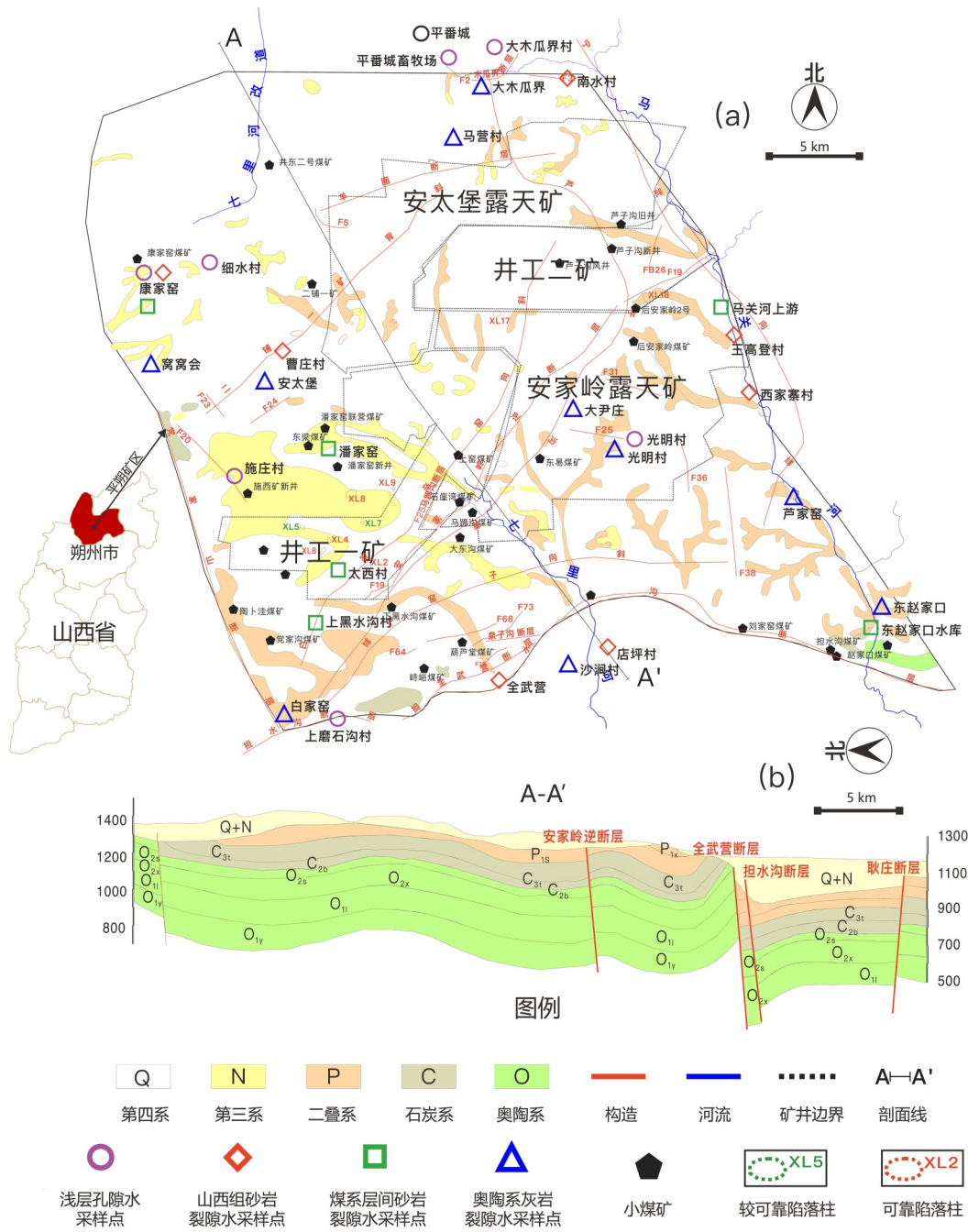


图1 平朔矿区地质及采样点分布:(a)平面图;(b)剖面图

Fig. 1 Geology and sampling points distribution of Pingshuo mining area: (a) plan,(b) profile map

两瓶,其中一份原水样用于阴离子分析,另一份加酸(HNO<sub>3</sub>)酸化至pH小于2用于阳离子分析,所有水样均置于4℃冰箱保存<sup>[12]</sup>.

水样中阳离子(K<sup>+</sup>,Ca<sup>2+</sup>,Na<sup>+</sup>,Mg<sup>2+</sup>)使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES,Perkin Elmer Optima 2100 DV,USA)进行分析,阴离子

(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>,Cl<sup>-</sup>)通过离子色谱仪(ICS-1100,Dionex,USA)进行测定,CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>采用酸碱滴定法测得<sup>[12]</sup>.总溶解固体(TDS)质量浓度根据水质分析结果计算得到(阴、阳离子质量浓度之和减去HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>质量浓度二分之一).

2.2 数据分析方法 所有水样数据均经阴阳离

子平衡检验,使用 Excel 对数据进行数理统计,采用 Piper 三线图分析地下水水化学类型,采用 Gibbs 图解法、离子组合比法及主成分分析方法分析水化学成因及主控因素。

### 3 地下水化学特征及成因分析

**3.1 地下水化学特征及空间分布** 研究区内各含水层中的主要离子与 TDS 的最小值、最大值、均值、标准差与变异系数结果如表 1 所示。其中变异系数为标准差与平均值的比值,反映单位均值上的离散程度。浅层水、山西水、煤系水、奥灰水 TDS 均值分别为 270.49, 580.71, 731.63, 481.12  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 深层地下水(山西水、煤系水、奥灰水) TDS 明显高于浅层地下水(浅层水),说明深层地下水流动缓慢,与围岩相互作用更加充分<sup>[13]</sup>。此外,山西水(1047.01  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )和煤系水(1315.00  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )各有一个水样点 TDS 高于 1000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,属于微咸水,其余水样的 TDS 均低于 1000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,属于淡水。

以平均值计,四个含水层阳离子浓度顺序均为  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ ,阴离子浓度顺序均为

$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ ,其优势阳、阴离子分别为  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$ ,其中  $\text{Ca}^{2+}$  浓度均值分别为 40.18, 97.57, 105.82, 83.51  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  浓度均值分别为 244.62, 273.49, 300.12, 324.70  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。与浅层水相比,三个深层含水层地下水中大多数阳、阴离子浓度普遍较高,其中  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度的变化最为显著。如表 1 所示,深层地下水中  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度均值范围分别为 83.51~105.82  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和 91.89~223.86  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,约为浅层水  $\text{Ca}^{2+}$  (40.18  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 和  $\text{SO}_4^{2-}$  (24.84  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 浓度的 2.08~2.63 倍和 3.70~9.01 倍。深层水中煤系水离子浓度普遍高于山西水和奥灰水,但深部三个含水层总体差别不大。深部三个含水层介质组成差别较大,然而水化学特征近似,说明采煤活动使煤系含水层与相邻含水层产生导水裂隙,故水化学类型趋于统一,三者之间可能存在一定程度水力联系<sup>[9,14]</sup>。此外,四个含水层中各离子的变异系数均小于 1,总体不大,但部分离子如山西组砂岩裂隙水的  $\text{SO}_4^{2-}$  与煤系层间砂岩裂隙水的  $\text{Cl}^-$  的变异系数高达 87.03% 与 97.77%,较大的离子变异系数说明该含水层离子分布离散程度较

表 1 平朔矿区不同含水层地下水样水化学指标统计

Table 1 Hydrochemical index statistics of groundwater samples from different aquifers in Pingshuo mining area

含水层	特征值分析	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$	TDS
浅层孔隙水	最大( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	48.24	28.10	72.42	286.54	35.91	31.07	317.46
	最小( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	30.16	12.10	19.59	200.20	11.89	8.48	211.84
	平均( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	40.18	16.91	35.42	244.62	24.84	16.68	270.49
	标准差	6.43	5.19	17.83	28.16	8.26	7.41	41.24
	变异系数	16.01%	30.68%	50.34%	11.51%	33.24%	44.44%	15.25%
山西组砂岩裂隙水	最大( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	172.70	72.25	94.76	325.33	502.13	100.23	1047.01
	最小( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	61.10	18.51	10.24	197.70	65.42	21.25	366.41
	平均( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	97.57	35.00	49.29	273.49	179.16	52.98	580.71
	标准差	40.33	18.93	27.39	49.28	155.93	33.87	260.45
	变异系数	41.33%	54.10%	55.57%	18.02%	87.03%	63.93%	44.85%
煤系层间砂岩裂隙水	最大( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	217.90	66.69	184.03	420.42	488.99	254.51	1315.00
	最小( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	22.25	26.60	21.10	222.72	68.13	16.40	413.29
	平均( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	105.82	39.99	86.97	300.12	223.86	83.13	731.63
	标准差	62.10	14.52	58.96	70.34	155.50	83.94	331.66
	变异系数	45.73%	34.42%	62.75%	18.06%	61.18%	97.77%	45.33%
奥陶系灰岩裂隙水	最大( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	133.20	45.44	78.84	399.15	178.41	130.26	753.60
	最小( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	58.65	23.54	21.69	295.30	45.55	14.64	368.50
	平均( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	83.51	31.90	45.71	324.70	91.89	48.35	481.12
	标准差	22.04	6.88	20.06	33.36	52.30	37.86	131.24
	变异系数	26.40%	21.57%	43.89%	10.27%	56.92%	78.32%	27.28%

大,其在水化学组成中不稳定,反映地下水化学成分形成作用较为复杂<sup>[15]</sup>.

Piper三线图是分析水化学组分的常用方法,可以表明水体中主要离子组成变化及不同水体化学组成类型特征<sup>[16]</sup>. 本文利用Piper三线图分析区内各含水层的水化学类型及分布规律,结果如图2所示. 研究区不同深度含水层水化学类型明显的分带性,浅层水化学类型以 $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Ca}^{2+}$ · $\text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Na}^+$ + $\text{K}^+$ · $\text{Ca}^{2+}$ 型水为主,而山西水和煤系水化学类型以 $\text{HCO}_3^-$ · $\text{SO}_4^{2-}$ - $\text{Ca}^{2+}$ · $\text{Mg}^{2+}$ 型水为主,奥灰水则以 $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Ca}^{2+}$ · $\text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{HCO}_3^-$ · $\text{SO}_4^{2-}$ - $\text{Ca}^{2+}$ · $\text{Mg}^{2+}$ 型水为主. 各含水层阳离子含量分布较集中, $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 毫克当量百分数分别为25%~70%和20%~40%,尤其在深部三个含水层含量分布更高,而 $\text{Na}^+$ + $\text{K}^+$ 毫克当量百分数大部分在10%~50%,在浅层水含量普遍分布较高. 然而,与阳离子的集中式分布相反,阴离子含量在各含水层中分布较离散. 各含水层中 $\text{HCO}_3^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 含量整体变化范围较大,呈互补分布,毫克当量百分数分别为20%~90%和10%~60%,浅层水以 $\text{HCO}_3^-$ 占主导,占比高达75%以上,而深层地下水 $\text{HCO}_3^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 含量分布范围则较广,毫克当量百分数分别分布在20%~80%和15%~60%之间. 另外, $\text{Cl}^-$ 在各含水层中含量较低,毫克当量百分数仅为10%~30%.

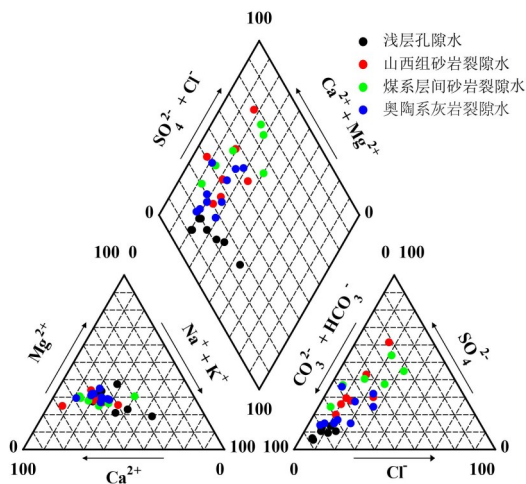


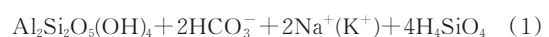
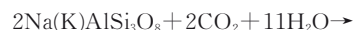
图2 平朔矿区地下水Piper三线图

Fig. 2 Piper diagram of groundwater samples in Pingshuo mining area

### 3.2 地下水化学组分成因分析

**3.2.1 Gibbs图** Gibbs图可以有效揭示水体中化学组分的主要形成机制<sup>[17]</sup>,主要用于判断水化学成分受蒸发浓缩作用、岩石风化作用和大气降水作用的影响,该方法被广泛应用到地表水和地下水化学分析中<sup>[18-20]</sup>. 如图3所示,Gibbs图以阳离子质量浓度比值 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 或阴离子质量浓度比值 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 为横坐标,以TDS浓度的对数为纵坐标. Gibbs图中TDS较高且阴、阳离子质量浓度比值接近1时,表明水化学成分主要受蒸发浓缩作用影响;TDS中等且阴、阳离子质量浓度比值小于0.5时,表明水化学成分主要受岩石风化作用影响;TDS较低且阴、阳离子质量浓度比值大于0.5时,表明水化学成分主要受大气降水作用影响. 图3表明,研究区内绝大部分水样分布在Gibbs图中部,即 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 或 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值主要在0.5以内,且TDS低于 $1400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,说明研究区地下水水化学成分主要受岩石风化作用影响. 由于研究区干旱少雨,大气降水作用对区内地下水化学成分几乎没有影响,仅个别水样点位于Gibbs图的右上角,说明存在微弱的蒸发浓缩作用影响.

**3.2.2 离子组合比分析** 通过离子组合比进一步分析地下水化学成分形成作用及离子成分的来源<sup>[9]</sup>. 地下水中 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ 和 $\text{Cl}^-$ 毫克当量比可以揭示 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 和 $\text{Cl}^-$ 的来源,若 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) / \text{Cl}^-$ 比值等于1时,表明地下水中 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ 和 $\text{Cl}^-$ 主要来源于盐岩溶解作用,若该比值大于1,则可能还存在硅酸盐岩的溶解<sup>[21]</sup>. 由图4a可以看出,各含水层大多数水样 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) / \text{Cl}^-$ 比值大于1,说明盐岩溶解不是研究矿区地下水中 $\text{Na}^+$ 和 $\text{K}^+$ 的唯一来源. 矿区含水层发育砂岩,矿物成分以长石为主<sup>[22]</sup>,偏高的 $\text{Na}^+$ 和 $\text{K}^+$ 一部分可能来自长石等硅酸盐类矿物溶解,此外由于地下水中 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 吸附于岩层的能力强于 $\text{Na}^+$ ,含水层会发生阳离子交替吸附作用,使地下水中 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 被吸附,吸附于地层中的 $\text{Na}^+$ 被释放,导致地下水中 $\text{Na}^+$ 含量的增多<sup>[9]</sup>. 相关化学反应如下:



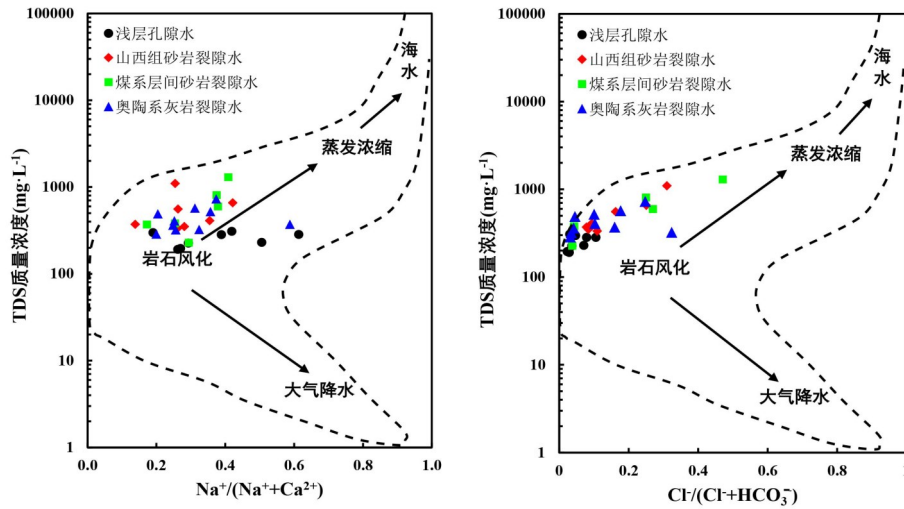
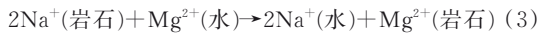


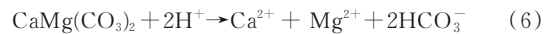
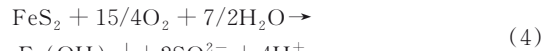
图 3 平朔矿区阴、阳离子 Gibbs 图

Fig.3 Gibbs diagrams of cation and anion in Pingshuo mining area

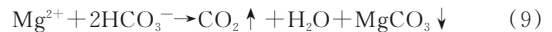
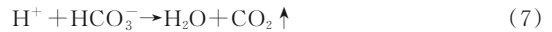


此外, 矿区含水层中含碳酸盐和硫酸盐矿物<sup>[22-23]</sup>, 当  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$  与  $(\text{SO}_4^{2-} + 0.5\text{HCO}_3^-)$  毫克当量比等于 1 时, 说明地下水中的  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  离子主要来源于碳酸盐和硫酸盐的溶解<sup>[9]</sup>. 由图 4b 可以看出, 部分浅层孔隙水样主要分布在  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{SO}_4^{2-} + 0.5\text{HCO}_3^-) = 1$  线及其附近, 说明浅层孔隙水受碳酸盐、硫酸盐的溶解的影响较大. 然而, 所有深部含水层水样  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{SO}_4^{2-} + 0.5\text{HCO}_3^-)$  均显著大于 1, 说明深层地下水  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  不仅来源于碳酸盐、硫酸盐的溶解. 进一步通过图 4c 和图 4d 可以看出, 各含水层水样  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{SO}_4^{2-}$  与  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/0.5\text{HCO}_3^-$  也均大于 1, 表明单一的硫酸岩或碳酸盐的溶解不是  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  的唯一来源,  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  势必存在其他来源.

据文献报道, 平朔矿区含煤地层中存在黄铁矿<sup>[23]</sup>. 煤矿开采使地层环境由原来封闭的还原环境变得相对开启, 造成黄铁矿氧化, 使得平朔矿区地下水中的  $\text{SO}_4^{2-}$  含量增加, 同时 pH 降低, 加速钙镁碳酸盐矿物的溶解, 导致  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  的增加和  $\text{HCO}_3^-$  的产生<sup>[24]</sup>, 但由于每生成两个  $\text{SO}_4^{2-}$  都会生成四个  $\text{H}^+$ , 而每个  $\text{H}^+$  又会与碳酸盐反应生成相应的  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  离子<sup>[8]</sup>, 导致  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{SO}_4^{2-}$  大于 1. 相关化学反应如下:



此外长期采煤活动导致含水层环境相对开启, 承压水压力降低, 产生脱碳酸作用, 使  $\text{HCO}_3^-$  下降, 导致  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$  与  $0.5\text{HCO}_3^-$  的比值大于 1. 相关化学反应如下:



**3.2.3 主成分分析** 主成分分析法是在确保数据信息损失最少的前提下, 将原本具有一定关联性的变量通过降维处理后, 转化为几个不相关的综合性指标的一种多元统计方法, 可以综合反映地下水中化学组分包含的大多数信息<sup>[9]</sup>. 为进一步揭示各含水层离子形成作用的主控因素, 对矿区 31 个水样中有相关性的分析变量  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  进行主成分分析, 提取特征值大于 1 且累计贡献率最大的前两个特征向量作为主成分 F1 和 F2, 得到两个新的无关联的综合性指标 (主成分 F1, F2), 主成分 F1 与主成分 F2 的方差贡献率分别为 45.30% 和 22.41%, 累计方差贡献率达 67.71%, 可以较全面地解释各含水层水化学成分的主要形成作用. 主成分与分析变量之间的相关系数为荷载值, 图 5 为各常规

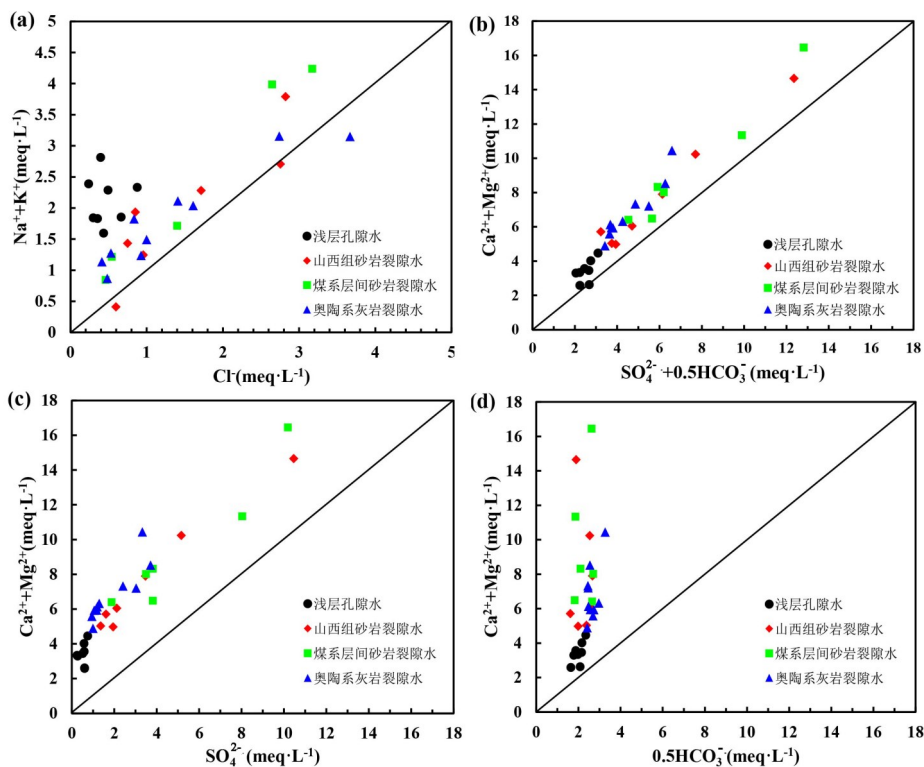


图4 平朔矿区离子组合比图

Fig.4 Ion combination ratio diagrams in Pingshuo mining area

离子在主成分F1与主成分F2上的荷载值分布情况. 由图5可知,主成分F1中 $Ca^{2+}$ , $Mg^{2+}$ , $SO_4^{2-}$ 和 $Cl^-$ 的荷载值大于0.9,对主成分F1贡献较大,与上文讨论结果一致,黄铁矿氧化产生 $SO_4^{2-}$ , $H^+$ , $Fe^{2+}$ ,地下水呈弱酸性,进一步加速碳酸盐和硫酸盐溶解,从而导致 $Ca^{2+}$ , $Mg^{2+}$ , $SO_4^{2-}$ 荷载值较高,因此F1轴可用于表示黄铁矿氧化与碳酸盐、硫酸盐、盐岩溶解作用. $Na^+$ 和 $HCO_3^-$ 在主成分F2上表现出很好的正相关,荷载值大于0.75,而 $Ca^{2+}$ , $Mg^{2+}$ , $SO_4^{2-}$ 在主成分F2上表现为负相关, $Na^+$ 荷载值高是由于地下水中的 $Ca^{2+}$ 和 $Mg^{2+}$ 与吸附在岩层上的 $Na^+$ 发生阳离子交替吸附作用所致; $HCO_3^-$ 荷载高是由于还原条件下, $SO_4^{2-}$ 在脱硫酸菌作用下产生还原作用所致<sup>[9]</sup>,因此F2可用于表示阳离子交替吸附与脱硫酸作用.

将各含水层水样的常规离子浓度代入主成分表达式:

$$Z_1 = 0.247x_1 + 0.257x_2 + 0.118x_3 + 0.038x_4 + 0.257x_5 + 0.247x_6 \quad (10)$$

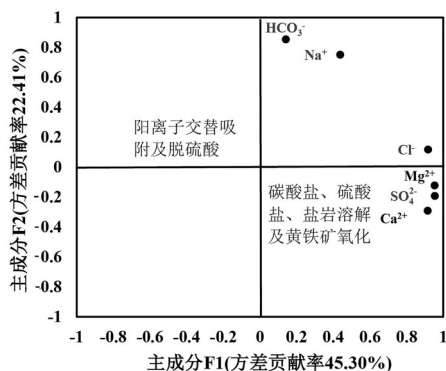


图5 平朔矿区地下水常规离子在F1-F2上的荷载分布  
Fig. 5 Loading distribution of groundwater conventional ions on F1-F2 in Pingshuo mining area

$$Z_2 = -0.186x_1 - 0.077x_2 + 0.478x_3 + 0.543x_4 - 0.123x_5 + 0.074x_6 \quad (11)$$

可得出各水样的主成分荷载得分,绘制于主成分F1-F2上的荷载得分关系图中(图6),荷载得分大小反映水化学作用的强弱,有助于揭示各含水层的水化学作用变化规律.图6显示四个含水层水样点均分布在第一象限,在主成分F2轴得分近似,说明均受到一定程度阳离子交替吸附与脱硫

酸作用影响. 浅层孔隙水在主成分 F1 轴得分较小, 表明其中的黄铁矿氧化与碳酸盐、硫酸盐、盐岩溶解作用微弱, 而深部三个含水层受黄铁矿氧化与碳酸盐、硫酸盐、盐岩溶解作用的影响增强, 其中在煤系水与山西水中尤为显著. 此外深部三个含水层的水化学组分均存在高浓度的  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , 且具有近似的水化学形成作用, 表明在采煤扰动下三者间存在一定程度的水力联系.

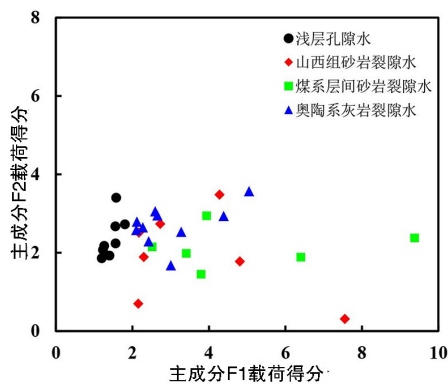


图 6 平朔矿区地下水主成分 F1-F2 荷载得分关系图

Fig. 6 Diagram of groundwater principal component F1-F2 loading scores in Pingshuo mining area

## 4 结 论

(1) 平朔矿区含水层主要优势阴、阳离子为  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{Ca}^{2+}$ . 浅层孔隙水 TDS 低于深层地下水, 水化学类型以  $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$  型水和  $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+ + \text{K}^+ \cdot \text{Ca}^{2+}$  型水为主; 深层地下水中  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度普遍较高, 其中山西组砂岩裂隙水与煤系层间砂岩裂隙水水化学类型相似, 均以  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$  型水为主, 奥陶系灰岩裂隙水则以  $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$  型水为主.

(2) 研究区地下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. 含水层中  $\text{Na}^+$  来源于盐岩溶解、硅酸盐类矿物溶解和阳离子交替吸附作用,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  主要来源是碳酸盐、硫酸盐溶解与黄铁矿氧化.

(3) 主成分分析结果表明深部三个含水层受黄铁矿氧化与碳酸盐、硫酸盐、盐岩溶解作用的影响强于浅层孔隙水, 尤其在煤系层间砂岩裂隙水与山西组砂岩裂隙水中更加显著. 深层地下水水

质类型相似, 具有近似的演化规律, 表明在采煤扰动下三者间存在一定程度的水力联系.

## 参考文献

- [1] Dong K Y, Sun R J, Li H, et al. A review of China's energy consumption structure and outlook based on a long - range energy alternatives modeling tool. *Petroleum Science*, 2017, 14 (1): 214—227.
- [2] Li P Y. Mine water problems and solutions in China. *Mine Water and the Environment*, 2018, 37 (2): 217—221.
- [3] Chen L W, Xie W P, Feng X Q, et al. Formation of hydrochemical composition and spatio - temporal evolution mechanism under mining - induced disturbance in the Linhuan coal - mining district. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, 10 (3): 57.
- [4] Qiao X J, Li G M, Li M, et al. Influence of coal mining on regional karst groundwater system: A case study in West Mountain area of Taiyuan City, northern China. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64 (6): 1525—1535.
- [5] 乔小娟, 李国敏, 周金龙等. 采煤对地下水资源与环境的影响分析: 以山西太原西山煤矿开采区为例. *水资源保护*, 2010, 26(1): 49—52. (Qiao X J, Li G M, Zhou J L, et al. Analysis of influence of coal exploitation on water resources and environment: A case study of coal exploitation in Xishan of Taiyuan City. *Water Resources Protection*, 2010, 26 (1): 49—52.)
- [6] Yang Z Y, Huang P H, Ding F F. Groundwater hydrogeochemical mechanisms and the connectivity of multilayer aquifers in a coal mining region. *Mine Water and the Environment*, 2020, 39 (4): 808—822.
- [7] 董东林, 王焕忠, 武彩霞等. 断层及滑动构造复合构造区煤层顶板含水层渗流特征及突水危险性分析. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(2): 373—379. (Dong D L, Wang H Z, Wu C X, et al. Seepage characters of roof aquifers in faults and sliding structure and risk analysis of water inrush. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28 (2): 373—379.)
- [8] 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. *水文地质工程地质*, 2019, 46(1): 163—172. (Feng H B, Dong S G, Zhang T, et al. Evolution mechanism of a groundwater system in the opencast coalmine area in the typical prairie. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2019, 46 (1): 163—172.)

- [9] 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.煤炭学报,2017,42(4):996-1004.(Chen L W, Xu D Q, Yin X X, 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. Journal of China Coal Society, 2017, 42 (4):996-1004.)
- [10] 殷晓曦,陈陆望,谢文莘等.采动影响下矿区地下水主要水-岩作用与水化学演化规律.水文地质工程地质,2017,44(5):33-39.(Yin X X, Chen L W, Xie W P, et al. Main water-rock interactions and hydrochemical evolution in the aquifers under the mining-induced disturbance in a mining district. Hydrogeology and Engineering Geology, 2017, 44 (5):33-39.)
- [11] 杨雪,胡俊良,刘劲松等.湖南香花岭矿区地下水的水文地球化学特征及形成机制.环境科学学报,2018,38(7):2575-2585.(Yang X, Hu J L, Liu J S, et al. Hydrogeochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Xianghualing Mining area, Hunan Province. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38 (7):2575-2585.)
- [12] 魏复盛.水和废水监测分析方法.第4版.北京:中国环境科学出版社,2002,836.(Wei F S. Analytical method for monitoring of surface water and wastewater. The 4<sup>th</sup> Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002, 836.)
- [13] 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.干旱区资源与环境,2019,33(4):189-195.(Zhang H X, Zhang Y L, Li Z H, et al. Chemical characteristics of shallow groundwater in Hohhot basin. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33 (4):189-195.)
- [14] 刘凯旋,刘启蒙,柴辉婵等.孙疃矿区地下水化学特征及其控制因素研究.煤炭工程,2019,51(4):74-79.(Liu K X, Liu Q M, Chai H C, et al. Chemical characteristics and control factors of groundwater in suntuan coal mine. Coal Engineering, 2019, 51 (4):74-79.)
- [15] 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.煤田地质与勘探,2019,47(5):40-47.(Wang Z T, Liu Q M, Liu Y. Spatial distribution and formation of groundwater hydrochemistry in Huainan coalfield. Coal Geology & Exploration, 2019, 47 (5):40-47.)
- [16] 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.地球与环境,2020,48(4):432-442.(Huang W W, Jiang C L, Chen X, et al. Chemical characteristics and genesis of deep groundwater in the Xinji Mining area. Earth and Environment, 2020, 48 (4):432-442.)
- [17] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry. Science, 1970, 170(3962):1088-1090.
- [18] 栾凤娇,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.环境化学,2017,36(2):380-389.(Luan F J, Zhou J L, Jia R L, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in plain areas of Barkol - Yiwu Basin, Xinjiang. Environmental Chemistry, 2017, 36 (2):380-389.)
- [19] 邵杰,李瑛,王文科等.水化学在新疆伊犁河谷地下水循环中的指示作用.水文地质工程地质,2016,43(4):30-35.(Shao J, Li Y, Wang W K, et al. Indicative effects of hydrochemistry on groundwater circulation in the Yili River Valley of Xinjiang. Hydrogeology and Engineering Geology, 2016, 43(4):30-35.)
- [20] 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.环境科学,2014,35(1):131-142.(Tang X W, Wu J K, Xue L Y, et al. Major ion chemistry of surface water in the Xilin river basin and the possible controls. Environmental Science, 2014, 35 (1):131-142.)
- [21] 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.地球与环境,2019,47(1):57-63.(Li Z K, Xia M H, Dong S G, et al. Hydrochemical characteristics and evolution characteristics of shallow groundwater in the Luoyang basin. Earth and Environment, 2019, 47 (1):57-63.)
- [22] 孙振洋,刘贯群.中煤平朔三号井工矿水化学特征及对水文地质条件的反映.中国煤炭地质,2011,23(4):36-40,63.(Sun Z Y, Liu G Q. Mine water chemical characteristics in China coal Pingshuo No.3 underground coalmine and their hydrogeological condition reflections. Coal Geology of China, 2011, 23 (4):36-40, 63.)
- [23] 白向飞,王越.平朔矿区煤中矿物分布及赋存特征研究.煤炭科学技术,2013,41(7):118-122.(Bai X F, Wang Y. Study on mineral distribution and deposition features of coal seam in Pingshuo mining area. Coal Science and Technology, 2013, 41 (7):118-122.)
- [24] Zhang J, Chen L W, Chen Y F, et al. Discrimination of water - inrush source and evolution analysis of hydrochemical environment under mining in Renlou coal mine, Anhui Province, China. Environmental Earth Sciences, 2020, 79 (2):61.

(责任编辑 杨 贞)