

乡宁矿区2号煤层涌水水源水化学特征分析

雷颖¹, 刘恺德^{1*}, 李晓龙², 储著双¹

¹西京学院土木工程学院, 陕西 西安

²中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2023年3月4日; 录用日期: 2023年4月5日; 发布日期: 2023年4月12日

摘要

在煤矿开采过程中, 准确快速地掌握地下水化学特征, 对矿井防治水具有重要指导意义。基于58份乡宁矿区某矿二号煤层涌水水源的水质分析资料(离子含量、TDS、pH值), 利用Piper三线图法研究了老空水和砂岩裂隙水的水质类型特征, 并利用两水源各离子浓度变化柱状图, 对比分析了两种涌水水源之间异同特征。研究表明: 老空水的水质类型为Na-HCO₃·SO₄型, 砂岩裂隙水为Na-HCO₃·SO₄-Ca·Mg型, 二者均显现微弱碱性, 且二者的TDS很接近; 老空水中各离子组分含量分布差异性明显高于砂岩裂隙水, 在各离子中, 除HCO₃⁻、Na⁺+K⁺含量明显大于砂岩裂隙水外, 其余离子(SO₄²⁻、Ca²⁺、Cl⁻、Mg²⁺、CO₃²⁻)含量均小于砂岩裂隙水; 且两水源中HCO₃⁻、Na⁺+K⁺、SO₄²⁻三种离子均为含量最高的离子。老空水中HCO₃⁻含量高, SO₄²⁻含量低, pH值呈弱碱性, TDS略高于砂岩裂隙水, 均表明矿井老空水滞留时间较短, 补给通道较通畅。可见, 矿井防治老空水的方向应为查明老空水补给通道和源头, 从根本上遏制老空水害。研究结论可作为乡宁矿区研究区涌水水源快速识别的有效依据。

关键词

乡宁矿区, 老空水, 砂岩裂隙水, 水化学特征

Analysis on Chemical Characteristics of Gushing Water Source of No. 2 Coal Seam in Xiangning Mining Area

Ying Lei¹, Kaide Liu^{1*}, Xiaolong Li², Zhushuang Chu¹

¹School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

²Xi'an Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group Corp, Xi'an Shaanxi

Received: Mar. 4th, 2023; accepted: Apr. 5th, 2023; published: Apr. 12th, 2023

*通讯作者。

文章引用: 雷颖, 刘恺德, 李晓龙, 储著双. 乡宁矿区 2 号煤层涌水水源水化学特征分析[J]. 矿山工程, 2023, 11(2): 216-223. DOI: 10.12677/me.2023.112028

Abstract

In the process of coal mining, it is of great guiding significance to grasp the chemical characteristics of underground water accurately and quickly. Based on 58 water quality analysis data (Ion content, TDS, pH value) of the gushing water source of No. 2 coal seam of a coal mine in Xiangning Mining area, Piper three-plot method was used to study the water quality type characteristics of goaf water and sandstone fissure water, and the differences and similarities between the two kinds of gushing water sources were compared and analyzed by using the histogram of the change of each ion concentration of the two water sources. The results show that the quality of goaf water is $\text{Na-HCO}_3\cdot\text{SO}_4$, and that of sandstone fissure water is $\text{Na-HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$, both of which show weak alkalinity, and their TDS are close to each other. The distribution difference of ion components in goaf water is significantly higher than that in fractured sandstone water. In all ions, except HCO_3^- and $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ contents are significantly higher than that in fractured sandstone water, the contents of other ions (SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Cl^- , Mg^{2+} , CO_3^{2-}) are lower than that in fractured sandstone water. HCO_3^- , $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ and SO_4^{2-} were the most abundant ions in the two water sources. In goaf water, HCO_3^- content is high, SO_4^{2-} content is low, pH value is weakly alkaline, and TDS is slightly higher than that of sandstone fissure water. All these indicate that the goaf water has a short retention time and a smooth recharge channel. It can be seen that the direction of mine prevention and control of goaf water should be to find out the supply channel and source of goaf water, and fundamentally curb the goaf water damage. The results can be used as an effective basis for rapid identification of inrush water source in the research area of Xiangning mining area.

Keywords

Xiangning Mining Area, Goaf Water, Sandstone Fissure Water, Water Chemical Characteristics

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤炭作为我国能源结构的主体，其安全高效开采一直是关乎国家能源供给的首要问题。然而我国煤炭开采的水文地质条件极其复杂，老空水分布密集，是世界上矿井水害最为严重的国家之一。各类地下水突水、透水事故尤为严重，已造成了极大的人员伤亡和财产损失，严重威胁矿井安全生产[1] [2]。地下水在与岩石长期接触的过程中，不断与岩石发生水-岩作用，常见的地下水化学成分形成作用包括溶滤作用、浓缩作用、脱碳酸作用、脱硫酸作用、阳离子交替吸附作用及混合作用[3]。查明研究区地下水水化学类型分布规律，了解区域地下水化学特征。有助于迅速准确地进行地下水突水水源识别，从而揭示不同含水层之间的水力联系，可对矿井水害防治方案的制定提供有效依据。

目前有关地下水化学特征方面，国内外学者已开展了大量研究，侯恩科等[4]，通过对萨拉乌苏组含水层、直罗组风化基岩含水层、烧变岩含水层以及采空区积水进行水质化验，分析了柠条塔煤矿不同含水层的水化学特征。房日荣等[5]以福建煤矿为研究对象，采集典型煤矿突水水源水样，进行了水化学特征实验研究，分析了各水源的水质类型特征及其总离子浓度的差别。张好等[6]基于袁店二井煤矿各含水层水质化验资料，得出了各含水层的水质类型以及各水化学参数的变化规律。杨聘卿[7]结合孔家沟煤矿

开拓开采及涌水实际,研究了矿井开采区域的地下水水化学特征及与 TDS、pH 值之间的关系。杨志等[8]、郭瑞等[9]、陈绍杰等[10]均分别基于不同煤矿的主要含水层水样为研究对象,对各自研究区地下水水化学特征开展了研究。综上所述,这些地下水水化学特征的研究均取得了较为理想的研究成果,但成果中针对地下老空水水文化学特征方面的研究尚报道较少。本文以乡宁矿区 2 号煤层老空水及顶板砂岩裂隙水水样为研究对象,对研究区 2 号煤层地下水水化学特征开展研究。

2. 研究区概况

乡宁矿区位于山西省河东煤田南部,包括王家岭、韩咀、吉宁等煤矿(图 1),现阶段各矿井主要开采山西组 2 号煤层[11] [12] [13] [14] [15]。研究区为乡宁矿区某矿,地表水系属黄河流域,矿井北部东西向的安里河为区内主要季节性河流,由东向西流出区外汇入黄河。根据地表出露情况及钻孔揭露,井田地层由老至新依次为奥陶系、石炭系、二叠系、第四系。矿井主体构造为一走向北东,向北西倾斜的单斜构造,倾角一般 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 。仅在矿井中西部,有一条宽约 700 m~1700 m 的急倾斜带,走向北东,倾角 $12^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 。井田内揭露的断层均为正断层,走向一般为北东、北西,未发现陷落柱和岩浆岩。然而,由于该矿属资源整合矿井,井田内 2#煤层大部分区域上分层被小窑破坏,老空积水往往存在空间分布杂乱、隐蔽,且连通性复杂等特点,隔水煤岩柱在不足以抵抗静水压力的情况下容易发生透水事故,一旦掘透,来势凶猛,具有极强破坏性,常导致重大恶性事故[3] [12] [13]。不仅直接制约巷道掘进和工作面正常回采效率,更对人们的生命财产安全造成严重威胁。现阶段对矿井造成威胁的主要水源是二叠系下统山西组 2 号煤层老空水和顶板砂岩裂隙水。因此,进行老空水及砂岩裂隙水水源识别,进而有效开展水害防治工作,已成为确保研究区矿井安全高效生产亟待解决的关键课题,而开展 2 号煤层地下水水化学特征研究是研究区水源识别的前提和当务之急。

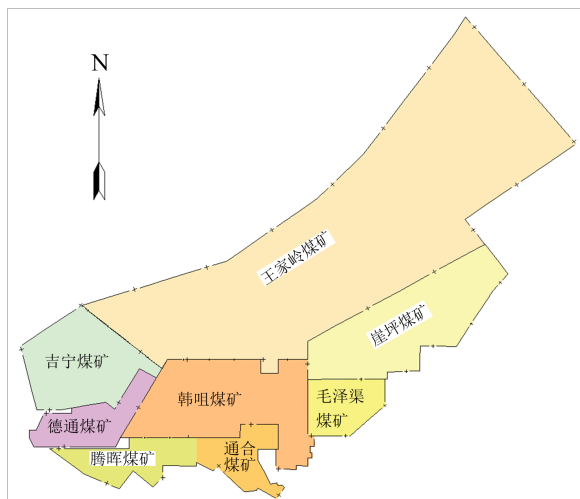


Figure 1. Distribution diagram of coal mines in Xiangning Mining area
图 1. 乡宁矿区煤矿分布示意图

3. 水化学特征分析

查清矿井突水水源是针对性开展矿井水害防治的前提,而水化学特征分析是判别矿井突水水源的重要方法。文中针对研究区面临的实际防治水难题,首先尽可能广泛采集研究区老空水和顶板砂岩裂隙水等地下水水化学样本资料;其次通过不同水源水化学 Piper 三线图,进行各自水化学特征分析;同时,利用两水源各离子浓度变化柱状图开展老空水与砂岩裂隙水水化学特征差异性对比分析,以查明和判别突

水水源个性化特征的原因。

3.1. 数据采集

经多次收集数据, 已获得了多个时间段矿井内不同地点的大量水文资料, 为此次研究提供了基础。本次共收集 58 个地下水样品化学资料, 包括 $K^+ + Na^+$ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、TDS 及 pH 值, 共计 9 个指标, 其中老空水水样 42 份, 顶板砂岩裂隙水水样 16 份, 具体样本数据见表 1、表 2。

Table 1. Water chemical index content of old empty water samples in Xiangning Mining Area

表 1. 乡宁矿区老空水水样水化学指标含量

样品编号	$Na^+ + K^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	CO_3^{2-}	TDS	pH
	(mg/L)								
1	338.40	63.79	26.60	60.93	248.46	859.38	0.00	1167.87	7.90
2	446.90	29.90	18.14	144.01	219.79	877.53	5.95	1303.46	8.06
3	563.00	8.12	3.69	57.15	58.40	1292.09	38.69	1375.10	7.91
4	563.00	8.12	1.23	50.01	51.10	1243.68	26.78	1322.08	7.94
5	386.10	58.83	28.25	53.72	340.75	833.66	17.82	1302.30	7.92
6	582.90	12.18	0.00	56.50	19.47	1303.27	74.66	1397.35	8.17
7	371.50	33.00	31.02	59.50	268.98	959.32	0.00	1243.66	7.11
8	365.90	57.55	22.44	57.15	266.00	871.48	0.00	1204.78	7.61
9	510.10	5.55	2.24	51.03	4.43	1221.02	15.55	1199.41	7.68
10	386.50	61.28	25.28	57.30	334.88	791.37	35.65	1296.58	7.83
11	385.60	10.28	2.49	31.86	2.46	961.48	0.00	913.43	7.71
12	439.10	40.40	17.50	60.88	235.15	943.55	0.00	1264.81	7.79
13	447.10	42.32	12.84	60.88	193.66	952.65	0.00	1233.13	8.10
14	379.20	52.91	19.84	57.30	214.41	861.63	0.00	1154.48	7.94
15	385.20	67.82	18.70	50.98	263.54	931.43	0.00	1251.96	7.90
16	548.10	14.52	0.00	70.10	52.21	1364.10	0.00	1366.98	8.83
17	421.10	69.88	14.96	54.17	285.71	943.46	5.91	1323.46	8.33
18	423.80	59.98	21.95	60.69	225.53	887.97	39.83	1275.77	7.14
19	423.80	58.94	19.44	60.69	193.31	912.89	24.51	1237.14	7.21
20	407.56	21.28	33.02	56.60	269.60	767.06	17.37	1188.96	7.16
21	410.50	49.00	4.35	55.61	265.28	786.68	16.40	1194.48	7.80
22	390.38	23.10	25.01	59.50	263.42	982.86	0.00	1252.84	7.14
23	533.17	16.50	10.01	57.80	232.96	1016.21	0.00	1358.55	7.21
24	327.72	3.46	2.10	24.79	22.22	920.08	0.00	840.33	7.16
25	386.50	51.10	19.00	64.70	261.00	871.00	61.20	1279.00	7.70
26	419.35	51.10	19.10	59.50	229.00	1016.21	0.00	1286.16	7.68
27	537.63	15.20	9.84	59.30	231.00	940.00	0.00	1322.97	7.75
28	402.60	0.96	6.98	54.40	225.00	736.00	0.00	1057.94	7.80

Continued

29	407.02	19.40	7.06	<0.001	251.00	798.00	61.20	1144.68	7.40
30	423.52	8.81	2.37	47.50	293.00	820.00	0.00	1185.20	8.12
31	453.40	40.61	11.08	58.32	278.72	967.96	6.22	1332.33	7.96
32	492.34	16.58	5.80	146.08	7.82	1064.02	0.00	1200.63	6.46
33	436.77	4.02	58.52	97.39	271.24	899.00	0.00	1317.44	6.65
34	187.56	12.87	10.21	9.92	54.54	555.19	0.00	552.70	6.87
35	587.60	6.09	3.08	64.29	17.03	1343.54	35.71	1385.57	8.31
36	398.30	33.91	31.79	162.47	325.11	550.73	29.76	1256.71	8.33
37	562.80	20.55	0.00	87.48	4.93	1398.17	31.11	1405.96	8.11
38	381.70	45.22	18.70	54.67	241.37	898.37	0.00	1190.85	7.83
39	346.10	55.49	2.26	54.67	246.30	879.39	0.00	1144.51	7.80
40	366.10	59.60	24.93	57.15	266.00	874.51	0.00	1211.04	7.72
41	337.00	62.94	14.78	58.94	209.26	829.12	5.95	1103.43	8.00
42	225.14	15.20	8.07	27.30	70.60	594.00	0.00	643.31	7.50
平均	423.53	33.06	14.63	62.76	190.82	940.95	13.10	1206.89	7.70

Table 2. Content of water chemical index in fractured water sample of roof sandstone in Xiangning mining area

表 2. 乡宁矿区顶板砂岩裂隙水样水化学指标含量

样品编号	Na ⁺ + K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	TDS	pH
	(mg/L)								
1	197.26	226.65	99.36	48.75	425.14	1083.31	2.74	1541.55	7.68
2	183.81	30.68	68.44	157.00	306.93	0.00	412.18	1159.02	7.58
3	170.71	228.37	100.27	59.72	433.92	1002.16	2.12	1496.19	7.62
4	212.20	250.53	99.68	48.30	453.38	1167.58	2.08	1649.95	7.67
5	162.27	229.24	96.39	57.32	424.43	972.47	3.98	1459.86	7.72
6	216.82	21.89	74.33	145.43	354.76	389.76	4.59	1012.70	8.04
7	225.20	24.33	70.08	157.36	430.60	461.82	7.01	1145.49	7.58
8	186.92	31.78	67.23	161.18	294.40	471.40	6.12	983.33	7.58
9	136.74	33.28	70.33	152.45	165.78	469.78	6.72	800.19	7.81
10	182.79	29.72	67.87	172.77	359.42	401.42	5.89	1019.17	7.68
11	200.33	31.22	69.22	143.87	387.53	398.99	5.34	1037.01	7.44
12	273.25	77.67	85.20	51.42	296.75	920.06	1.94	1246.27	7.61
13	121.81	89.22	39.77	78.14	143.05	472.03	1.96	709.96	7.69
14	252.27	148.13	109.80	43.97	375.45	1120.98	1.63	1491.74	7.75
15	66.77	216.65	116.34	41.83	424.88	811.02	2.31	1274.29	7.37
16	130.28	105.08	42.16	77.75	172.94	511.90	2.82	786.99	7.69
平均	182.46	110.90	79.78	99.83	340.58	665.92	29.34	1175.86	7.66

3.2. 结果分析

根据在研究区 2 号煤层所收集的 42 份老空水水样及 16 份顶板砂岩裂隙水水样的水质检测资料,开展本区 2 号煤层涌水水源的水化学特征分析。

3.2.1. 老空水水化学特征分析

根据 42 份老空水水样水化学分析结果(表 1), 绘制出如图 2 所示的老空水水化学 piper 三线图, 从图中可以看出, 老空水水化学成分分布广泛, 但差异性较大, 主要以 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 等为主, 其中 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 的毫克当量/升的百分数全部均在 70% 以上, 且绝大多数在 80%~100% 之间, HCO_3^- 主要集中在 60%~100% 之间, SO_4^{2-} 部分处于 20%~60% 之间, 其余离子的毫克当量/升的百分数均在 20% 以下, 这里取 20% 为界, 则容易判知老空水水型为 $\text{Na-HCO}_3\text{,SO}_4$ 型水, 其 TDS 在 552.70 mg/L~1405.96 mg/L 之间变化, 平均为 1175.86 mg/L; pH 值在 6.46~8.38 之间变化, 平均 7.66, 总体呈微弱碱性, 42 份老空水水样中仅有 3 份 pH 值小于 7, 可见老空水酸性水样占比极少, 这与通常老空水呈酸性的认识相悖, 表明矿井老空水滞留时间较短, 补给源较通畅。

3.2.2. 顶板砂岩裂隙水水化学特征分析

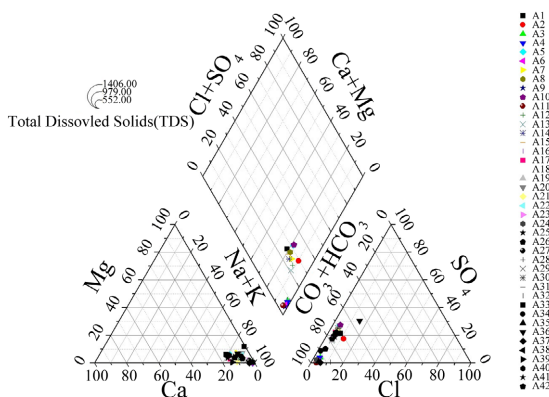


Figure 2. Piper diagram of goaf water
图 2. 老空水 Piper 图

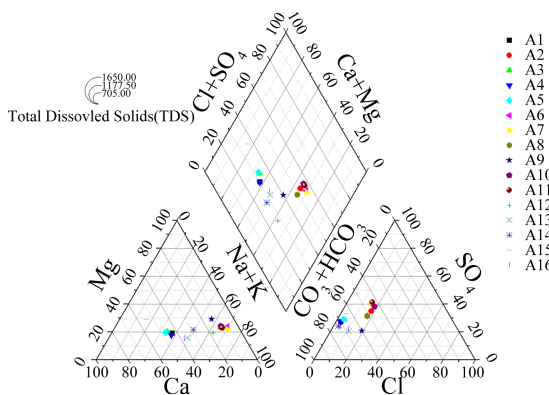


Figure 3. Piper diagram of sandstone fissure water
图 3. 砂岩裂隙水 Piper 图

由 16 份顶板砂岩裂隙水水样水化学分析结果(表 2), 绘制出如图 3 所示的顶板砂岩裂隙水水化学 Piper 三线图, 可以看出裂隙水中各离子含量分布较为分散, 主要以 HCO_3^- 、 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 SO_4^{2-} 为主, 其次为 Ca^{2+} 、

Cl^- 、 Mg^{2+} ，其它离子含量很少。其中，在阳离子中， $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 的毫克当量/升的百分数为 50%~80%，部分样品的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 均超过了 20%，分别在 20%~60%、20%~40%之间；阴离子中， HCO_3^- 的毫克当量/升的百分数为 40%~80%之间，部分 SO_4^{2-} 在 20%~60%之间。因此，顶板砂岩裂隙水的水质类型属 $\text{Na-HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水；其 TDS 值变化范围为 709.96 mg/L~1459.49 mg/L，平均为 1175.86 mg/L；pH 值为 7.37~8.04，平均为 7.66，呈微弱碱性。

3.2.3. 老空水与砂岩裂隙水水化学特征比较分析

根据老空水和砂岩裂隙水中各离子含量平均值(见表 1、表 2)，绘制出两种水源同种离子浓度对比柱状图，如图 4 所示。由图 4 可知：共性主要为二者的 TDS 很接近，老空水略大于砂岩裂隙水，可见老空水虽溶解部分固体颗粒，但总体 TDS 增幅较小，亦表明老空水补给较通畅；二者 pH 值相差无几，且均呈微弱碱性；两水源中 HCO_3^- 、 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 SO_4^{2-} 三种离子均为含量最高的离子。不同之处在于老空水中各离子组分含量分布差异性明显较砂岩裂隙水偏大，老空水中除 HCO_3^- 、 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 含量明显大于砂岩裂隙水外，其余离子(SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 、 CO_3^{2-})含量均小于砂岩裂隙水，老空水 HCO_3^- 含量高，表明老空水补给通畅，与外界有一定联系， SO_4^{2-} 含量低亦表明老空水滞留时间较短；二者的水质类型不同，老空水为 $\text{Na-HCO}_3\cdot\text{SO}_4$ 型，砂岩裂隙水为 $\text{Na-HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型。

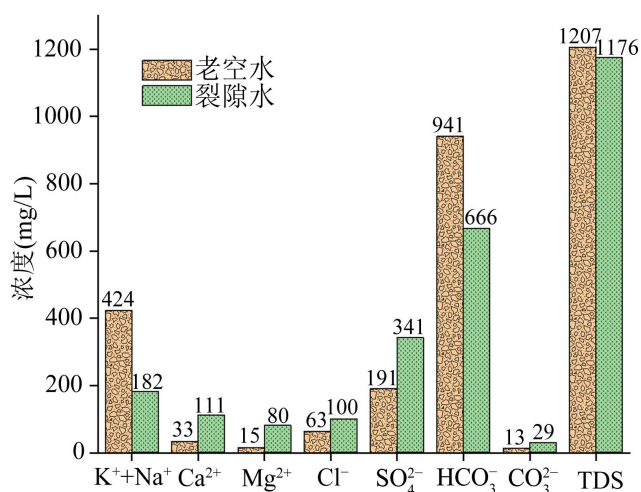


Figure 4. Histogram of ion concentration comparison in each water source
图 4. 各水源离子浓度对比柱状图

4. 结论

通过对采集到的乡宁矿区某矿 2 号煤层老空水及砂岩裂隙水检测数据进行水化学特征分析，得到了两水源的水质类型、特征规律及其差异性，主要结论如下：

(1) 利用 piper 三线图，分析得到了老空水和砂岩裂隙水的水质类型，老空水的水质类型属于 $\text{Na-HCO}_3\cdot\text{SO}_4$ 型，砂岩裂隙水为 $\text{Na-HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型，且二者均显现微弱碱性。

(2) 利用两水源各离子浓度变化柱状图，对比分析了两种涌水水源之间的异同特征。老空水中各离子组分含量分布差异性明显高于裂隙水；两水源中含量最高的三种离子均为 HCO_3^- 、 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 SO_4^{2-} 。

(3) 相较于砂岩裂隙水，老空水的 HCO_3^- 含量高， SO_4^{2-} 含量低，TDS 略高，同具微弱碱性的特征表明，老空水滞留时间较短，补给通道较通畅，查明老空水补给通道和源头，是遏制老空水害的关键。

以上结论可作为乡宁矿区研究区 2 号煤层涌水水源快速识别的有效依据。

基金项目

陕西省“大学生创新创业训练计划”项目(S202112715035); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JM-182)。

致谢

本论文获得了陕西省“大学生创新创业训练计划”项目(S202112715035)、陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JM-182)的支持与资助, 在此深表感谢!

参考文献

- [1] 杨俊哲, 杨茂林, 许峰, 李鹏, 姬亚东, 宋桂军, 吴燕军. 双巷掘进老空水超前探查方法[P]. 中国, CN107843940B. 2020-01-31.
- [2] 李泉新, 方俊, 褚志伟, 许超, 刘飞, 赵建国, 陈盼. 基于井下束状定向钻孔的矿井老空水精确探放方法[P]. 中国, CN108468566A. 2018-08-31.
- [3] 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.
- [4] 侯恩科, 姚星, 文强. 柠条塔煤矿水化学特征及水源识别模型[J]. 西安科技大学学报, 2021, 41(4): 624-631.
- [5] 房日荣, 李晓豪, 陈伯辉. 福建煤矿突水水源水化学特征的实验研究[J]. 华北科技学院学报, 2019, 16(4): 12-19.
- [6] 张好, 姚多喜, 鲁海峰, 等. 煤矿地下水化学特征分析及涌水水源判别模型建立[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2017, 37(1): 36-32.
- [7] 杨聘卿. 孔家沟煤矿水文地球化学特征及水源识别研究[J]. 能源与环保, 2020, 42(7): 120-125.
- [8] 杨志, 王来斌. 孙疃矿突水水源化学特征及判别模型[J]. 煤矿安全, 2015, 46(11): 39-42.
- [9] 郭瑞, 王永申, 徐刚. 不连沟煤矿充水水源水化学特征分析及突水水源判别模型研究及应用[J]. 煤炭科技, 2018(3): 128-131.
- [10] 陈绍杰, 刘久潭, 汪锋, 等. 基于 PCA-RA 的滨海煤矿水源识别——以龙口梁家煤矿为例[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(2): 217-225.
- [11] 吕文生. 山西河东煤田乡宁矿区 2 号煤稀土元素地球化学特征[J]. 华北国土资源, 2018(4): 18-21.
- [12] 李晓龙, 穆鹏飞. 复采条件下远距离截引老空水技术[J]. 煤矿安全, 2020, 51(12): 79-84.
<https://doi.org/10.13347/j.cnki.mkaq.2020.12.015>
- [13] 刘明军, 李晓龙, 杨忠, 张甲迪. 复杂地质条件下远距离定点探放老空水技术[J]. 煤矿安全, 2020, 51(7): 86-91.
<https://doi.org/10.13347/j.cnki.mkaq.2020.07.017>
- [14] 李晓龙, 董书宁, 刘恺德. 多层含水层分层止水技术研究进展[J]. 煤矿安全, 2020, 51(2): 84-90.
<https://doi.org/10.13347/j.cnki.mkaq.2020.02.019>
- [15] 陈文飞, 李晓龙. 韩咀煤矿水文地质及矿井充水因素分析[J]. 陕西煤炭, 2019, 38(3): 128-131+183.