



移动扫码阅读

王世东.桌子山煤田奥灰水水化学特征及成因分析[J].煤炭科学技术,2022,50(8):180-188.

WANG Shidong. Hydrogeochemical characteristics and forming reason of Ordovician limestone groundwater in Zhuoshan Coalfield[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(8): 180-188.

桌子山煤田奥灰水水化学特征及成因分析

王世东

(中煤科工西安研究院(集团)有限公司,陕西 西安 710054)

摘要:桌子山煤田奥陶系灰岩地下水是区域煤层开采的主要充水水源,同时也是乌海市重要的地下水水源,研究该区域水文地球化学特征及成因,对矿井水害防治及地下水资源开发利用均具有重要意义。以奥陶系灰岩水为研究对象,采集煤田奥陶系灰岩地下水样 37 组,综合利用 piper 三线图、Gibbs 图及离子比例关系分析了奥陶系灰岩地下水化学特征及其形成作用。研究结果表明:桌子山煤田奥陶系灰水水化学组分的分布特征与地下水径流方向密切相关, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 HCO_3^- 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的离子浓度及理化指标 TDS、pH 值由补给区向排泄区呈现增大的趋势, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度呈现减小的趋势,并且以上指标在煤田北部和南部地区变化较大;由桌子山补给区向甘德尔山再转南北向径流的水化学类型变化较为明显,主要为“水迟缓交替作用带”,经历正向离子交换作用,而由桌子山补给区向南径流的水化学类型始终为 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}-\text{Ca} \cdot \text{Na}$ 型,控制作用由“水迟缓交替作用带”转为“水消极交替作用带”,反向离子交换作用强烈;整个桌子山煤田可划分为北、中、南 3 个水化学特征区,煤田北部因地质构造的缘故使地下水形成滞留区,径流过程紊乱且形成过程较复杂,中部未受到地质构造阻挡,径流方向不变,地下水化学形成过程简单,而南部因地层加深和断层阻隔的缘故形成滞留带,使地下水水化学形成过程较复杂。

关键词:桌子山煤田;水化学特征;水化学形成作用;奥陶系灰岩地下水;地下水水源地

中图分类号:TD741

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2022)08-0188-09

Hydrogeochemical characteristics and forming reason of Ordovician limestone groundwater in Zhuoshan Coalfield

WANG Shidong

(Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China)

Abstract: The ordovician limestone groundwater in Zuoshan Coalfield is the main water source of regional coal mining and also an important water source of Wuhai city. Thus, The research on hydrogeochemical characteristics and formation mechanism of Ordovician limestone water in Zhuozishan Coalfield is of great significance for prevention and control of mine water as well as development and utilization of water resources. In this study, 34 groups of Ordovician limestone water samples were collected in Zhuizishan Coalfield, and the chemical characteristics and control factors of groundwater were analyzed through comprehensive use of Piper trilinear diagram, Gibbs diagram, and the ratio relationship of ions. The research results show that ionic concentration of $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, HCO_3^- , Cl^- and SO_4^{2-} in Ordovician limestone water increases from the recharge area to the discharge area, while that of Ca^{2+} and Mg^{2+} Decrease. Each indicator varied greatly in the north and south of the Coalfield. The hydrochemical type of runoff from Zhuozishan Mountain to Gongdeer Mountain and then to the north and south varied significantly, which was mainly controlled by rock weathering type and experienced positive ion exchange. While the hydrochemical type of the runoff from Zhuozishan Mountain to the south was always $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}-\text{Ca} \cdot \text{Na}$ type, and the control effect changed from rock weathering to evaporation concentration. It mainly experienced reverse ion exchange. The Ca^{2+} and Mg^{2+} in Ordovician limestone water in coal mine were mainly from silicate dissolution, while the Na^+ and K^+ were mainly from ion exchange and less from rock-salt dissolution. The whole Zizuishan Coalfield can be divided into three hydrochemical characteristic regions: north, middle and south. In the northern part

收稿日期:2022-04-17 责任编辑:周子博 DOI:10.13199/j.cnki.est.2022-0526

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(2016YFC0501104)

作者简介:王世东(1981—),男,河南南阳人,研究员。E-mail:wsdde@126.com

of the Coalfield, due to geological structure, a retention area was formed with groundwater, and the runoff process was disordered with a complicated formation process. The middle part was not blocked by the geological structure, the runoff direction did not change, and the formation of groundwater was a simple process. In the southern part, due to the deepening stratum and fault blocking, a retention zone was formed, making the formation of groundwater a more complicated process.

Key words: Zhuoshan Coalfield; hydrochemical characteristics; hydrochemical formation; Ordovician limestone groundwater; groundwater source

0 引言

煤炭是我国的主体能源,然而我国煤矿水文地质条件复杂,矿井水害时有发生,据统计,2011—2019年,我国煤矿发生较大以上水害事故70余起,经济损失达数亿元^[1]。且煤层开采扰动导致岩体结构破坏及地下水循环状态改变,破坏了原来的平衡,水化学条件发生改变^[2],影响地下水质,引发矿区水资源管理利用的问题。地下水的化学组分是地下水与其周围长期作用的产物^[3],研究地下水的水化学特征可以掌握地下水的水质,研究其形成原因可阐明地下水的起源及演化过程。因此研究煤矿区地下水水化学特征及其演化过程十分必要。

近几年来,学者们在煤矿区地下水水化学特征及成因方面做了大量工作。陈陆望^[4]分析了淮北煤田太原组灰岩地下水的水化学特征和形成作用,研究结果表明随着采煤的扰动,地下水的溶滤作用逐渐减弱而阳离子交换作用逐渐增强。杨婷婷^[5]分析了淮南潘谢矿区岩溶水化学组分规律及形成过程,研究结果为该地区的岩溶水害防治提供理论基础及参考。邱慧丽等^[6]通过离子组合比分析、基于主成分分析的方法分析了淮北煤田的水文地球化学演化特征。汪子涛等^[7]采用离子组合法、Gibbs图、氯碱指数等方法研究了淮南煤田各含水层的地下水水化学特征。以上研究成果从一定程度上揭示了煤矿区地下水水循环与水文地球化学演化机制及其影响因素等。但是这些研究均集中在两淮地下水水资源丰富的区域,针对西部干旱半干旱地下水资源短缺区域的研究较少。西部地区气候气候特征、地下水埋藏条件、地质构造及地层条件均与东部地区差别较大,因此需开展专门的研究工作。

桌子山煤田地处鄂尔多斯盆地西缘,位于华北地台的西部大陆边缘,主采石炭、二叠纪煤层。长期以来,煤层底板奥陶纪灰岩水害是威胁该区域煤炭资源安全开采的最大隐患。2010年骆驼山煤矿发生了特别重大突水事故,突水量峰值达60 036.0 m³/h,造成了巨大的经济损失^[8]。因此,开展对桌子山煤田奥陶纪灰岩水化学特征及形成机理研究对

于奥陶系灰岩水害事故防治具有重要的意义。此外,桌子山煤田行政区属于乌海市,属于干旱气候区,年均降雨量140 mm,年均蒸发量3 600 mm,且地表河流不发育,地下水资源已经是乌海市(内蒙古自治区)重要的生产、生活需水来源,具有不可替代的作用。据报道,乌海市供水量中42.43%来自于地下水,其中8%来自桌子山煤田奥陶系灰岩的疏放水,且疏放水的供给量逐年增加^[9],因此桌子山煤田奥陶系灰岩地下水是未来乌海市经济发展的重要地下水水源地。但是,采煤会改变地下水系统的补给、径流、排泄条件,进而影响地下水水质。分析奥陶系灰岩地下水的水化学特征可以直接反映其水质状况,分析其形成机理可以间接了解水质可能发生的变化。因此开展对桌子山煤田奥陶纪灰岩水化学特征及形成机理研究有助于科学规划和有效利用、保护煤田地区的地下水资源。

以桌子山煤田奥陶系灰岩水为研究对象,综合利用Piper三线图、Gibbs图及离子比例关系综合分析地下水化学特征及其成因。研究成果为该区域矿井水害防治及地下水资源的科学规划和有效利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

桌子山煤田位于内蒙古自治区乌海市,煤田主要分布在桌子山与甘德山之间以及桌子山南部棋盘井镇周边,主采石炭系上统太原组上段(C_{2t2})、二叠系下统山西组(P_{1s})煤层。2010年以前,由于对煤田奥陶系灰岩认识不足,误认为奥陶系灰岩富水性差,导致2010年骆驼山煤矿在16号煤+870 m回风大巷掘进过程中发生了特大奥灰水突出事故,最大突水量高达65 000 m³/h,此后桌子山煤田奥陶系灰岩问题引起广泛重视及关注。此后,十多年,笔者在桌子山煤田10个煤矿包括卡布其、平沟、骆驼山、白音乌素、滴力帮乌素、天誉、海融、正丰、利民和棋盘井开展专门水文地质补勘工作。基于近10 a的工作,对研究区进行总结概述如下。

桌子山煤田为独立的岩溶地下水系统属于鄂尔

多斯盆地寒武系-奥陶系碳酸盐岩溶地下水系统,根据煤田岩溶水的局部水力联系、水量分布和补径排条件的特点,可以分为 4 个较为独立的水循环系统,分别为千里山岩溶水子系统(Ⅰ)、甘德尔山岩溶水子系统(Ⅱ)、桌子山北段岩溶水子系统(Ⅲ)和桌子山南段岩溶水子系统(Ⅳ),如图 1 所示。

桌子山煤田地处中国西北部,地表河流较少且流量较小,大气降水成为奥陶系含水层的主要补给来源,降水主要在桌子山奥陶系灰岩露头区补给含

水层,向西径流,穿过卡布其向斜后至甘德尔山东缘,受到阻水断裂的阻挡,在向斜内改为向北、向南径流,最终以泉的形式排出或流向黄河和侧向排出,从而卡布其向斜把桌子山分成南北两个岩溶水子系统;另一方面,地下水也会由桌子山向南径流,但因南部地层逐步加深和正谊关平移断层阻隔的缘故,会形成滞留带,最终也是以泉的形式排出或流向黄河和侧向排出。由于奥陶系灰岩地下水补给受限,使地下水循环较为缓慢,只有在岩溶断裂构造及深切岩溶沟谷带才会形成强径流带。

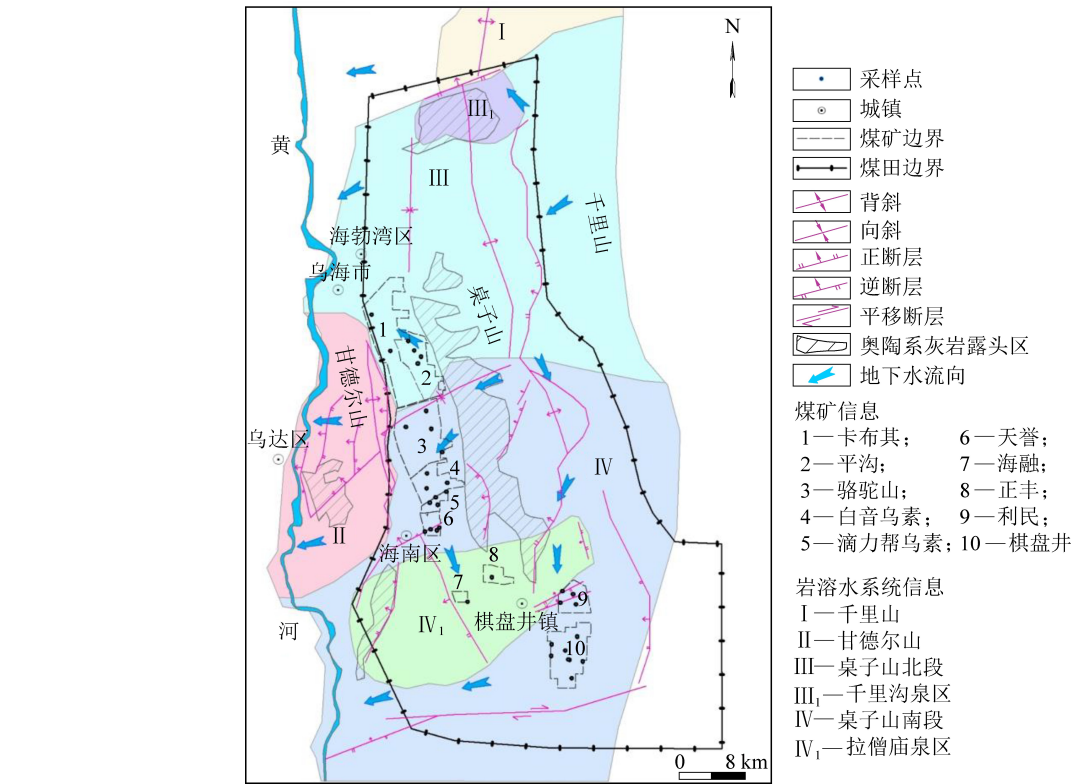


图 1 桌子山煤田奥陶系灰岩地下水概况

Fig.1 General of Ordovician limestone groundwater in Zhuoshan Coalfield

1.2 样品采集与检测

2011—2020 年,陆续通过水文地质补勘在桌子山煤田 10 个煤矿(卡布其、平沟、骆驼山、白音乌素、滴力帮乌素、天誉、海融、正丰、利民和棋盘井)采集奥陶系灰岩水样 34 组,水样采集分布如图 1 所示。水样的采集在抽水实验期间进行,且采集之前至少抽水 30 min,待稳定后开始取样,装入 2.5 L 的塑料桶中,贴上标签密封保存,运送至陕西省水害重点防治实验室进行检测。其中,使用 ICP-AES (Thermo) 检测主要阳离子,包括 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ;使用 ICP-MS (Thermo) 检测主要阴离子,包括 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 采用化学滴定法检测。每个水样重复检测 3 次取平均值,标准偏差控制在 10%以内,最

后,进行阴阳离子平衡误差计算,相对误差控制在 5%以内。

2 结果与讨论

2.1 水化学组分分布特征

根据水化学检测结果,分别统计 10 个煤矿区地下水的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、TDS(溶解性固体总量)、pH 的最大浓度、最小浓度及平均浓度,见表 1。

由表 1 可知,桌子山煤田主要的水化学指标浓度范围变化较大,阳离子中主要为 Na^+ ,质量浓度为 35.19~900.40 mg/L,平均为 274.38 mg/L;阴离子中主要为 Cl^- ,为 62.17~1 237.81 mg/L,平均为

表 1 桌子山煤田奥陶系灰岩水水化学指标检测结果										
Table 1 Test results of water and hydrochemical indicators of Ordovician limestone in Zhuoshan Coalfield										
矿井	水样编号	离子浓度/(mg·L ⁻¹)							TDS质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	pH
		K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻		
卡布其	K1	7.77	176.57	37.50	26.53	277.78	169.58	137.76	834.00	7.75
	K2	10.87	160.00	102.35	39.80	402.05	27.58	255.10	1 027.07	8.40
平沟	P1	1.50	230.00	59.17	18.63	188.45	330.93	123.78	995.69	7.85
	P2	5.95	147.00	157.78	61.61	255.72	209.92	353.66	1 225.48	7.35
	P3	4.28	250.00	90.72	54.45	258.62	249.43	353.66	1 283.55	7.57
	P4	7.68	149.00	123.44	69.17	274.13	389.37	195.94	1 244.93	8.18
骆驼山	L1	32.00	489.00	52.86	63.04	247.02	555.66	503.97	1 960.00	8.10
	L2	3.00	61.25	67.06	35.34	218.03	117.55	88.42	600.00	7.40
	L3	6.40	35.19	95.40	51.97	126.09	118.13	88.42	511.00	8.45
	L4	3.55	68.00	59.38	34.59	240.00	109.07	86.84	621.44	8.25
白音乌素	B1	2.20	197.00	603.51	23.40	32.47	213.21	1 237.81	2 335.41	8.80
	B2	6.20	288.00	35.50	23.40	211.65	190.98	282.93	1 052.20	7.77
	B3	3.40	58.90	27.61	47.28	55.67	126.77	114.94	464.75	8.35
滴力帮乌素	D1	2.04	76.65	65.99	32.29	265.03	108.86	82.99	643.51	8.15
	D2	2.56	63.50	67.86	22.31	270.30	80.65	62.17	581.00	7.01
	D3	3.08	63.47	58.14	30.07	275.72	90.97	68.83	597.35	7.66
天誉	T1	2.94	74.20	73.59	26.28	264.00	102.60	79.50	633.00	7.48
	T2	1.49	63.52	54.88	28.12	232.24	88.10	72.21	557.51	8.22
	T3	4.32	80.00	59.60	26.08	267.20	97.75	76.02	622.00	7.76
	T4	0.66	101.43	99.43	44.23	296.56	136.86	99.37	848.49	7.30
海融煤矿	H1	2.32	210.05	77.51	40.24	271.29	217.34	205.80	1 065.00	7.77
正丰煤矿	Z1	3.84	112.20	67.50	34.71	287.00	200.90	62.50	782.00	7.76
利民	L1	29.80	230.00	63.11	42.51	249.92	293.88	247.56	1 183.99	7.95
	L2	2.00	254.00	27.61	25.79	110.17	229.67	176.83	922.18	8.09
	L3	3.20	425.00	59.17	40.12	226.15	470.87	380.18	1 643.77	8.90
	L4	3.60	150.02	67.07	40.12	242.38	156.41	194.51	872.36	7.86
棋盘井	Q1	24.89	583.00	134.11	68.77	206.43	569.65	804.58	2 415.34	7.64
	Q2	40.00	633.66	145.95	56.83	223.83	680.79	813.42	2 610.99	7.70
	Q3	4.20	504.00	98.61	78.33	240.64	530.96	627.75	2 112.10	8.17
	Q4	6.15	580.00	138.06	44.89	252.82	719.48	583.54	2 358.46	11.45
	Q5	5.60	680.00	94.67	85.49	142.07	694.78	822.26	2 586.58	8.05
	Q6	84.06	630.00	82.83	75.94	131.05	629.75	751.53	2 413.05	7.93
	Q7	81.48	900.40	69.42	88.36	188.45	953.27	1 069.82	3 366.52	7.76
	Q8	3.50	604.00	114.39	121.31	212.23	617.40	884.15	2 588.60	7.94
统计项目	最小值	0.66	35.19	27.61	18.63	32.47	27.58	62.17	464.75	7.01
	最大值	84.06	900.40	603.51	121.31	402.05	953.27	1 237.81	3 366.52	11.45
	平均值	11.96	274.38	95.05	47.12	224.80	308.21	352.61	1 339.98	8.02

352.61 mg/L。TDS 的浓度为 464.75~3 366.52 mg/L,平均为1 339.98 mg/L,属于淡水~咸水,主要为淡水,pH 值为 7.01~11.45,平均为 8.02,属于中性

水~弱碱性水,主要为中性水^[9]。
根据检测结果,分别绘制 Na+K、Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、TDS、pH 的浓度等值线图如图 2 所

示。根据前文的介绍奥陶系灰岩水的补给径流方向分为2类,一类是由桌子山补给区向甘德尔山再转向北、向南径流,另一类是由桌子山补给区向南径流。通过与水化学指标的等值线的变化趋势发现,离子浓度的变化特征与径流方向密切相关。沿着径流方向,由补给区至排泄区 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 均呈现出增大的趋势,这与地下水

的溶滤作用增强有关。而随着径流的变化, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度呈现出逐渐降低的趋势,这与阳离子交换作用有关。

同时,由图2可知,离子等值线在煤田的北部和部地区分布较为密集,中部相对稀疏,这是由于受采煤影响北部与南部水-岩溶滤作用较强,中部较弱所致,表现出中部离子较低所致。

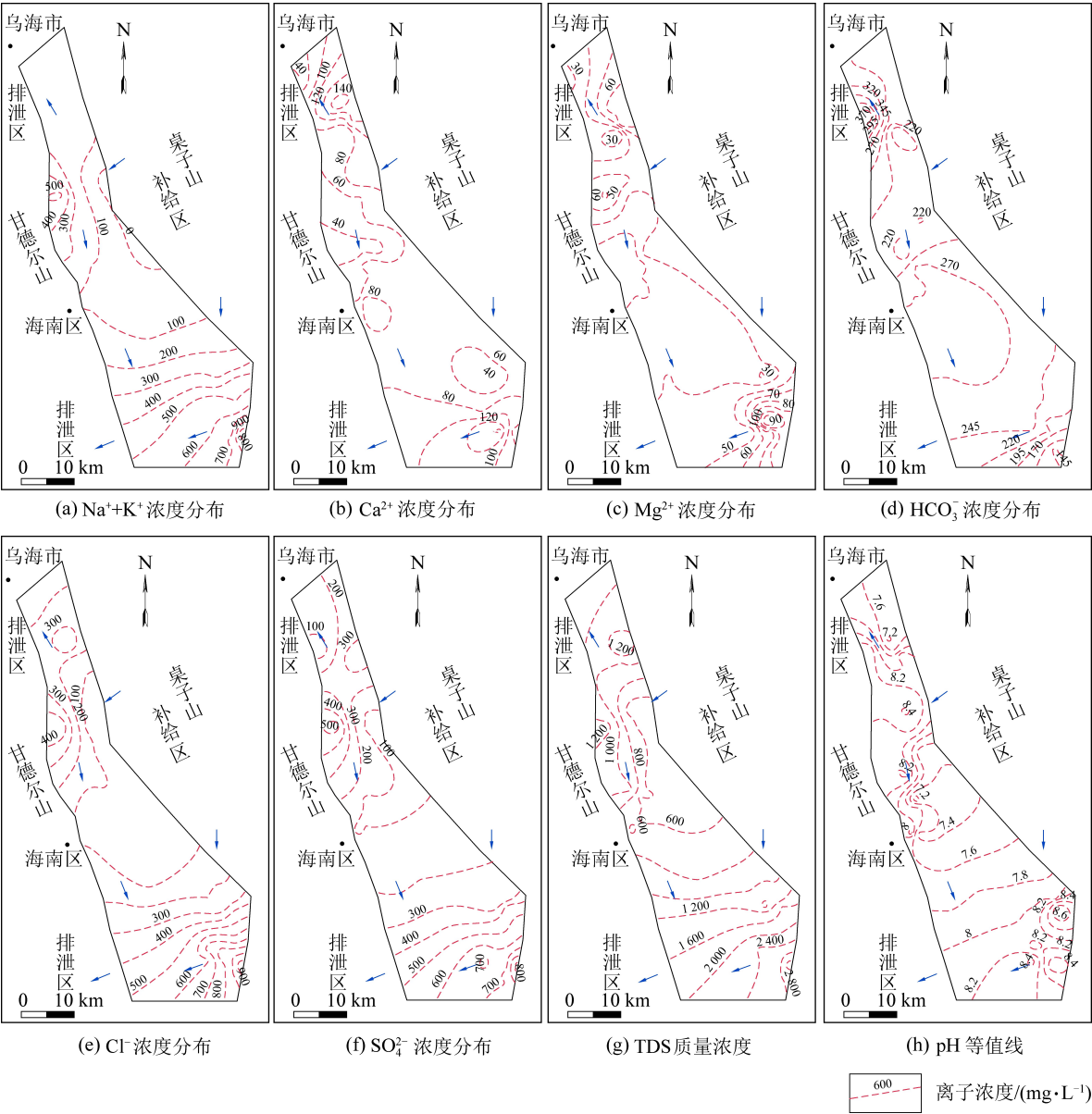


图2 水化学指标等值线图

Fig.2 Contour map of water chemical indicators

2.2 水化学类型

根据研究区主要离子浓度绘制水化学类型 Piper 三线图^[9-11] (图3)。桌子山煤田奥陶系灰岩水水化学类型主要包括: $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}-\text{Ca} \cdot \text{Na}$ 、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}-\text{Ca} \cdot \text{Na}$ 、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}-\text{Ca} \cdot \text{Na}$ 、 $\text{HCO}_3-\text{Ca} \cdot \text{Na}$,根据地下水的径流方向,水化学类型的变化可分为2类(图3):一类为为由桌子山补给区向甘德

尔山再转向北、向南径流,水化学类型由上游区的 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}-\text{Ca} \cdot \text{Na}$ 型转为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}-\text{Ca} \cdot \text{Na}$ 或 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}-\text{Ca} \cdot \text{Na}$ 或 $\text{HCO}_3-\text{Ca} \cdot \text{Na}$;另一类为由桌子山补给区向南径流,水化学类型始终为 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}-\text{Ca} \cdot \text{Na}$ 型。

由图2(TDS等值线图)可知,由桌子山补给区向甘德尔山再转向北径流 TDS 浓度在 1 200~1 400

mg/L,转向南径流 TDS 质量浓度相对较小在 600~1 000 mg/L,由桌子山补给区向南径流 TDS 浓度在 1 200~2 800 mg/L,且逐渐增大。由此,可知由桌子山补给区向甘德尔山再转向北、向南径流过程中 HCO_3^- (毫克当量) 比例有所增加,TDS 浓度变化较小,由桌子山补给区向南径流过程中水化学类型不变,但 TDS 浓度逐渐增大,说明地下水在径流的过程中水岩作用增强,导致进入地下水中的化学组分增加。

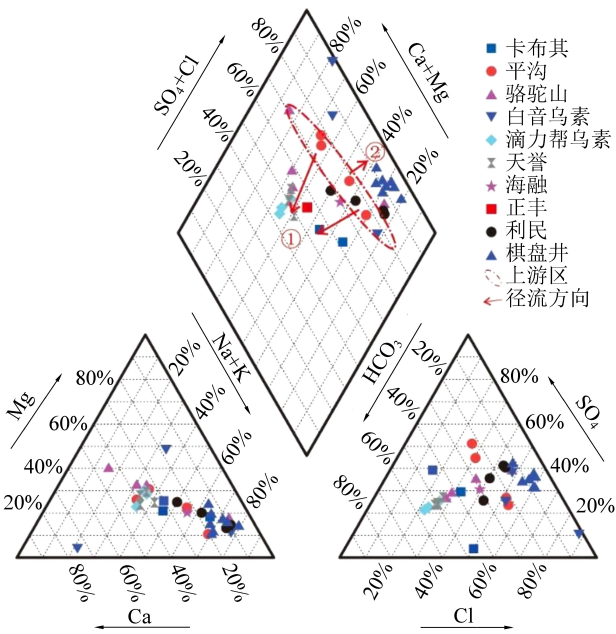


图3 桌子山煤田奥陶系灰岩水 Piper 三线图
Fig.3 Piper three-line diagram of Ordovician limestone water in Zhuoshan Coalfield

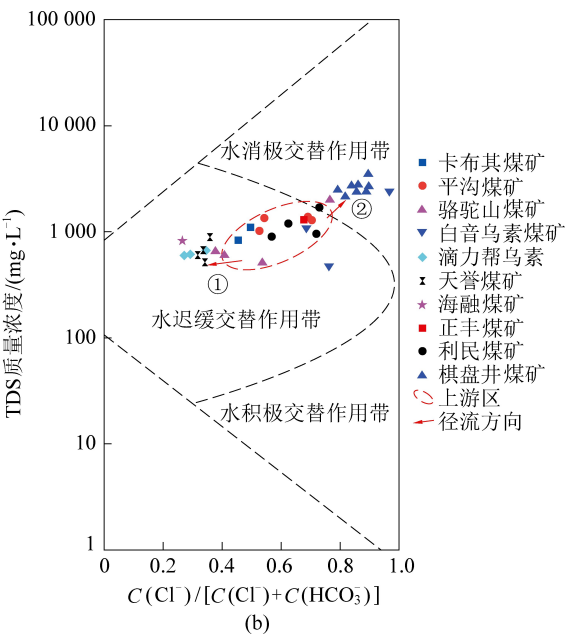
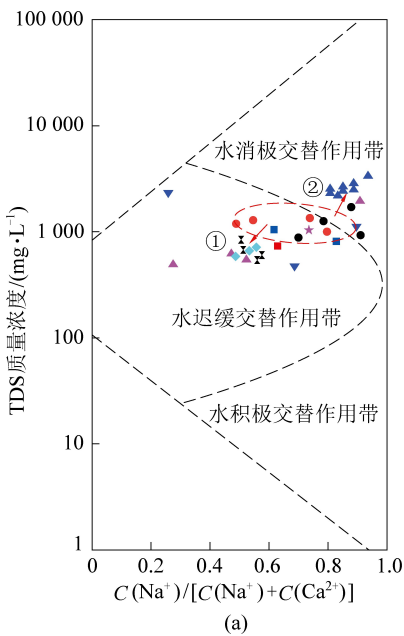


图4 奥陶系灰岩水 Gibbs 图
Fig.4 Gibbs diagram of Ordovician limestone water

2.3 水化学作用

Gibbs 图可以宏观地反映地下水形成过程中主要离子的控制因素^[12],一般将主要的控制因素分为蒸发浓缩控制型、岩石风化控制性、降水作用控制性 3 种^[13-14],但对于深层地下水而言,随着深度增加,蒸发作用会逐渐变弱,因此需采用“水积极交替作用带”、“水迟缓交替作用带”和“水消极交替作用带”^[15-16]分析深层地下水的控制因素(图 4)。

通过图 4 分析可知,“①”为由桌子山补给区向甘德尔山再转向北、向南径流,地下水控制作用始终位于“水迟缓交替作用带”内;“②”为由桌子山补给区向南径流,地下水控制作用由上游的“水迟缓交替作用带”转为“水消极交替作用带”,因此可以判断由桌子山补给区向南径流方向发生的反向离子交换作用较为强烈,使得 K^+ 、 Na^+ 和 Cl^- 的浓度增加,导致 TDS 浓度偏高。

利用 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}) / (\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$ 可以分析水体受离子交换作用影响的大小^[17-18]。从图 5a 中可知水样分布均落在或接近 $-(1:1)$ 直线,说明桌子山煤田奥陶系灰岩地下水均受到离子交换作用影响。位于桌子山煤田北部和中部的煤矿(“①”径流)水样主要分布在坐标轴Ⅳ象限,而位于桌子山煤田南部的煤矿(“②”径流)水样主要分布在坐标轴Ⅱ象限,且距离桌子山补给区较远。水样点距离坐标原点越远,离子交换作用越强烈,而桌子山补给区恰好位于原点附近,由此说明由桌子山补给区向甘德尔山再转向北、向南径流(“①”径流),比由桌子山补给区向南径流(“②”径流)的离

子交换作用较弱。

氯碱指数(CAI-1和CAI-2)是水中离子交换的一种检验方法^[19]。当CAI-1和CAI-2为负数时说明存在地下水中的Ca²⁺和(或)Mg²⁺置换含水介质中的Na⁺和(或)K⁺的离子交换作用,当CAI-1和CAI-2为正数时,则为反向阳离子交换作用^[20]。

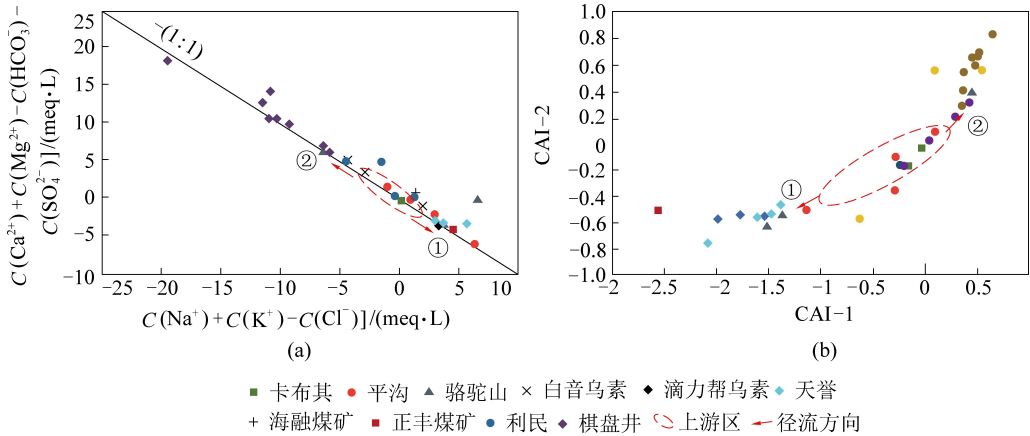
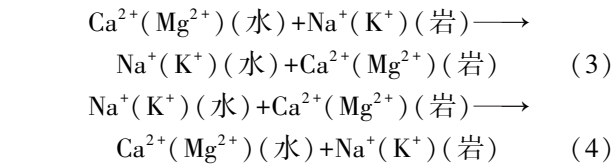


图5 $C(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}-\text{HCO}_3^{-}-\text{SO}_4^{2-})/C(\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}-\text{Cl}^{-})$ 与水氯碱指数

Fig.5 $C(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}-\text{HCO}_3^{-}-\text{SO}_4^{2-})/C(\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}-\text{Cl}^{-})$ and water chlor-alkali index

由图5b可知,桌子山煤田北部和中部的煤矿水样CAI-1和CAI-2大部分小于1,位于桌子山煤田南部的煤矿水样CAI-1和CAI-2大部分大于1,由此说明:由桌子山补给区向甘德尔山再转向北、向南径流(“①”径流)主要为正向离子交换作用(反应式(3)),桌子山补给区向南径流(“②”径流)主要为反向阳离子交换作用(反应式(4))^[21]。



2.4 水化学演化过程

根据桌子山煤田奥陶系灰岩地下水的径流特征与水化学分析的结果,归纳总结其水文地球化学特征的成因。可以将桌子山煤田奥陶系灰岩地下水分为“北”“中”和“南”3个特征区域。

1)北部区域。桌子山煤田北部地下水由桌子山奥陶系灰岩地下水露头区补给后向西径流,沿卡布其向斜流至甘德尔山东缘,受甘德尔正断层的阻挡,改为向北、向南径流。由于地下水径流方向突然改变,在卡布其向斜会形成地下水“滞留区”,又因

CAI-1和CAI-2的计算公式如下:
$$\text{CAI-1}=[C(\text{Cl}^{-})-C(\text{Na}^{+})C(\text{K}^{+})]/C(\text{Cl}^{-})\quad (1)$$
$$\text{CAI-2}=[C(\text{Cl}^{-})-C(\text{Na}^{+})-C(\text{K}^{+})]/[C(\text{HCO}_3^{-})+C(\text{SO}_4^{2-})+C(\text{CO}_3^{2-})+C(\text{NO}_3^{-})]\quad (2)$$
式中:C为各离子浓度,meq/L。各含水层水样的氯碱指数图如图5b所示。

地下水的不断补给,使该“滞留区”地下水径流方向出现紊乱的情况(图7),很长时间内才能流向下游地区,致使出现水化学指标等值线(图2)较为密集且变化不均的特征,水化学类型与水化学作用较为复杂。

2)中部区域。桌子山煤田中部地下水由北部或桌子山奥陶系灰岩地下水露头区补给区径流而来,之后沿断裂带流向下游的桌子山煤田南部区域。因此桌子山煤田中部地区地下水未受到地质构造阻挡,径流方向不变,使水化学指标等值线(图2)呈规律性变化,水化学类型以HCO₃·Cl-Ca·Na型为主(图3),水化学作用处于水迟缓交替作用带(图5)且经历正向离子交换作用(图6)。

3)南部区域。桌子山煤田南部地下水由中部或桌子山奥陶系灰岩地下水露头区补给区径流而来,但因南部地层逐步加深和正谊关平移断层阻隔的缘故,会形成地下水“滞留区”(图7),之后再转向西南方向径流,致使水化学指标等值线(图2)呈现出规律性、密集性的特征,水化学类型始终以SO₄·Cl-Ca·Na型为主(图3)且反向离子交换作用强烈(图6)。

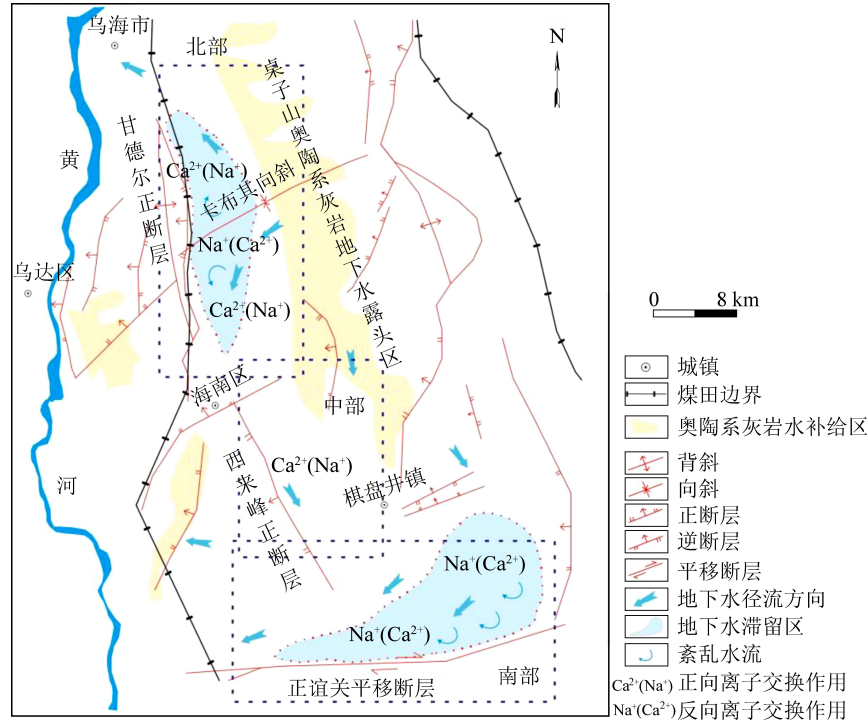


图 7 桌子山煤田奥陶系地下水水化学成因机制概念
Fig.7 Conceptual map of hydrochemical genesis mechanism of Ordovician groundwater in Zhuoshan Coalfield

3 结 论

1)桌子山煤田奥陶系灰岩水化学组分的分布特征与地下水径流方向密切相关,整体上 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、TDS、pH 呈现由补给区向排泄区增大的特征,而 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 恰恰相反。在煤田北部和南部地区水化学组分等值线分布较为密集,为水岩作用较强所致。

2)桌子山煤田 2 个径流方向(由桌子山补给区向甘德尔山再转南北向径流和由桌子山补给区向南径流)的水化学类型变化呈现不同特征,前者变化较为明显,而后者始终为 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} - \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 型,说明两者在径流过程中发生的水化学作用不同。Gibbs 图及氯碱指数结果表明 2 个径流方向地下水形成的过程控制作用不同,前者为“水迟缓交替作用带”,主要为正向离子交换作用,后者控制作用由“水迟缓交替作用带”转为“水消极交替作用带”,反向离子交换作用较为强烈。

3)将桌子山煤田划分为北、中、南 3 个水化学特征区,北部因地质构造的缘故使地下水形成滞留区,径流方向出现紊乱,水化学类型与水化学作用较为复杂;中部未受到地质构造阻挡,径流方向不变,使水化学类型较为简单,受岩石风化作用及正向离子交换作用控制;南部因地层加深和断层阻隔的缘故形成滞留带,水化学类型与补给区相似且反向离

子交换作用强烈。

参考文献 (References) :

[1] 刘 基.复合含水层疏放水钻孔与工作面粉水量预测方法研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2020.
LIU Ji. Study on the prediction method of water inflow of drainage boreholes and working faces in compound Aquifers[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2020.

[2] 张 苗,陈陆望,姚多喜,等.宿县矿区石炭系太灰地下水化学特征及水岩相互作用[J].合肥工业大学学报(自然科学版), 2022, 45(3): 396-405.
ZHANG Miao, CHEN Luwang, YAO Duoxi, et al. Hydrogeochemical characteristics and water rock interaction of limestone groundwater of Carboniferous Taiyuan Formation in Suxian mining area [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2022, 45(3): 396-405.

[3] 吴吉春.地下水环境化学[M].北京:科学出版社,2021.

[4] 陈陆望,任星星,张 杰,等.淮北煤田太原组灰岩水水文地球化学形成作用及反向模拟研究[J].煤炭学报, 2021, 46(12): 3999-4009.
CHEN Luwang, REN Xingxing, ZHANG Jie, et al. Hydrogeochemical formation and inverse simulation of limestone groundwater in carboniferous Taiyuan formation of Huabei Coalfield [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(12): 3999-4009.

[5] 杨婷婷,许光泉,Anesu Mabaire.淮南潘谢矿区岩溶水化学特征及其形成机制研究[J].地球与环境, 2021, 49(3): 238-249.
YANG Tingting, XU Guangquan, Anesu Mabaire. Chemical Composition of Karst Groundwater of Panxie Coal Mining Area in Huainan

and its formation mechanism [J]. *Earth and Environment*, 2021, 49(3):238-249.

[6] 邱慧丽,桂和荣,崔琳,等.淮北煤田宿临矿区中层水水文地球化学演化特征[J].*地下空间与工程学报*, 2021, 17(6):2021-2029.

QIU Huili, GUI Herong, CUI Lin, *et al.* Hydrogeochemical evolution characteristics of mid-layer groundwater in sulin mining area of huabei Coalfield [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2021, 17(6):2021-2029.

[7] 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.

[8] 王世东,朱开鹏,汤红伟.桌子山煤田奥陶纪灰岩水演化机理和循环特征[J].*矿业安全与环保*, 2017, 44(2):116-120.

WANG Shidong, ZHU Kaipeng, TANG Hongwei. Evolution Mechanism and Circulation Characteristics of Ordovician Limestone Water in Zhuozishan Coalfield [J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2017, 44(2):116-120.

[9] 乌海市水资源公报[R]. 乌海:乌海水务局, 2018.

[10] 王甜甜,张雁,赵伟,等.伊敏矿区地下水水化学特征及其形成作用分析[J].*环境化学*, 2021, 40(5):1480-1489.

WANG Tiantian, ZHANG Yan, ZHAO Wei, *et al.* Hydrogeochemical characteristics and formation process of groundwater in Yimin mining area [J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(5):1480-1489.

[11] YANG J, DONG S, WANG H, *et al.* Mine water source discrimination based on hydrogeochemical characteristics in the Northern Ordos Basin, China [J]. *Mine Water and the Environment*; 1-9.

[12] SAKYA B M, NAKAMURA T, SHRESTHA S D, *et al.* Identifying the deep groundwater recharge processes in an intermountain basin using the hydrogeochemical and water isotope characteristics [J]. *Hydrology Research*, 2019, 50(5):1216-1229.

[13] 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.

LIU Fengxia, SHI Ziwei, QIAN Hui, *et al.* Evolution of groundwater hydrochemical characteristics and water quality evaluation in Yinchuan area [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(9):2055-2066.

[14] GIBBS R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. *Science*, 1970, 170(3962):1088-1090.

[15] PEHLIVAN R. Potability and hydrogeochemical characteristics of the Karasu Stream Water, Sakarya, Turkey [J]. *Geochemistry International*, 2020, 58(9):1075-1081.

[16] 张玉卓,徐智敏,张莉,等.山东新巨龙煤矿区场地高TDS地下水水化学特征及成因机制[J].*煤田地质与勘探*, 2021, 49(5):52-62.

ZHANG Yuzhuo, XU Zhimin, ZHANG Li, *et al.* Hydrochemical characteristics and genetic mechanism of high TDS groundwater in Xinjulong Coal Mine [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(5):52-62.

[17] 张成行,郑洁铭,徐智敏,等.基于水化学特征的顺和煤矿太灰水动力条件分析[J].*煤炭工程*, 2020, 52(6):126-129.

ZHANG Chengxing, ZHENG Jieming, XU Zhimin, *et al.* Hydrodynamic conditions analysis of Taiyuan Formation limestone aquifer in Shunhe Coal Mine based on hydrochemical characteristics [J]. *Coal Engineering*, 2020, 52(6):126-129.

[18] NAKHAEI M, Dadgar M A, Amir V. Geochemical processes analysis and evaluation of groundwater quality in Hamadan Province, Western Iran [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, 9(5):1-13.

[19] AMIRIV, NAKHAEI M, LAK R, *et al.* Investigating the salinization and freshening processes of coastal groundwater resources in Urmia aquifer, NW Iran [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188(4):1-23.

[20] CHAPELLE F H. *Geochemistry of Groundwater* [M]. Treatise on Geochemistry, 2003.

[21] QIAN C, WU X, MU W P, *et al.* Hydrogeochemical characterization and suitability assessment of groundwater in an agro-pastoral area, Ordos Basin, NW China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(20):1356.

[22] 王甜甜.矿井水中典型重金属形成机理与被动处理技术研究[D].北京:煤炭科学研究总院, 2020.

WANG Tiantian. Study on formation mechanism and passive treatment technology of typical heavy metals in mine water [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2020.