



煤炭科学技术

煤炭科学研究院 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

矿井水水化学特征及资源化利用研究

李竞赢 刘启蒙 杨明慧

引用本文:

李竞赢, 刘启蒙, 杨明慧. 矿井水水化学特征及资源化利用研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(4): 254–263.

LI Jingying, LIU Qimeng, YANG Minghui. Study on chemical characteristics and resource utilization of mine water: taking Zhangji Coal Mine as an example[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(4): 254–263.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0927>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤矿地下水库水体水化学特征及其成因解析

Analysis of hydrochemical characteristics and formation mechanism in coal mine underground reservoir

煤炭科学技术. 2020, 48(11): 223–231 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ae02bb14-6d13-449b-9e8a-db869c52bf74>

煤矿矿井水资源化综合利用体系与技术创新

Comprehensive utilization system and technical innovation of coal mine water resources

煤炭科学技术. 2018(9) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d3dd27fe-2e46-4e8a-a1a9-eb7c24502158>

榆神矿区地表水水化学特征及其影响因素分析

Hydrochemical characteristics of surface water and analysis on influence factors in Yushen Mining Area

煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/8c9a8236-1686-4eb2-9b20-a888822f0b39>

榆林市矿区浅层含水层水质现状及水化学特征研究

Study on water quality status and hydro-chemical characteristics of shallow aquifer in mining area of Yulin City

煤炭科学技术. 2018(12) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/60366c09-b4e2-42fe-9d6a-a10673715266>

任楼煤矿地下水化学组成及其控制因素分析

Analysis of chemical composition and control factors of groundwater in Renlou Coal Mine

煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6c22ecb4-d7eb-43e1-819b-3d71abf26bfc>

基于PCA-RA的滨海矿井水源识别技术研究

Technological research on water source identification of coastal coal mines based on PCA-RA

煤炭科学技术. 2021, 49(2): 217–225 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.025>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

李竞赢, 刘启蒙, 杨明慧. 矿井水水化学特征及资源化利用研究——以张集煤矿为例[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(4): 254–263.

LI Jingying, LIU Qimeng, YANG Minghui. Study on chemical characteristics and resource utilization of mine water: taking Zhangji Coal Mine as an example[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(4): 254–263.

矿井水水化学特征及资源化利用研究

——以张集煤矿为例

李竞赢¹, 刘启蒙², 杨明慧¹

(1. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102200; 2. 安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 由于煤炭开采活动大量矿井水被抽排至地面, 造成严重水资源浪费和环境污染, 为发展“绿色矿业”理念, 探寻矿井水资源化利用的有效途径。以淮南煤田张集煤矿为研究对象, 采集了矿区不同来源矿井水共 82 个水样, 并选取 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 $\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$ 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^{-} 七大离子和 pH、TDS、EC、TH 共 11 个指标作为水质检测依据, 探讨了张集煤矿矿井水的一般水化学特征、主要离子成分、离子含量动态变化特征, 并利用相关性和主成分分析方法深入探究矿区水样的水化学特征, 然后依据水化学分析结果对矿井水进行水质评价, 并按照“分级分类”标准进行水质等级划分, 得到矿井水初步利用途径, 最后计算水样钠吸附比(SAR), 建立钠吸附比(SAR)和 EC 关系, 划分张集煤矿矿井水盐渍化和钠毒害风险等级, 最终判定研究区矿井水资源化利用的途径。得出结论: 张集煤矿矿井水 TDS 含量为 255.47~7 291.74 mg/L, 平均值高达 2 346.60 mg/L, 严重超标, 其中离子组成含量贡献度最高的是 Na^{+} 和 K^{+} ; 按照“分级分类”标准划分的水质分级结果为研究区 V 类矿井水占比高达 81%; 钠吸附比(SAR)和 EC 关系显示, 79.3% 的水样点分布在 S3-E4 区和 S4-E4 区, 说明张集煤矿矿井水存在较高的盐渍化和钠毒害风险, 不适宜用做农业用水, 矿井水水域只可作为一般工业用水区、人体非直接接触娱乐用水区或者一般景观水域。

关键词: 淮南煤田; 矿井水资源化; 水化学分析; 水质分级; 钠毒害风险

中图分类号: TD74;TV213.9

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)04-0254-10

Study on chemical characteristics and resource utilization of mine water: taking Zhangji Coal Mine as an example

LI Jingying¹, LIU Qimeng², YANG Minghui¹

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102200, China;

2. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Because of mining activities, a large amount of mine water was pumped to the surface, caused serious waste of water resources and environmental pollution. This paper took samples of mine water from different sources in Zhangji Coal Mine of Huainan coalfield, and selected 7 ion contents of Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$, Cl^{-} , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^{-} , added pH, TDS, EC, TH to 11 chemical indexes as the basis of water quality detection. Then, the hydrochemical characteristics of mine water had been studied such as ion composition, dynamic change, correlation, afterwards, the water quality evaluation would be carried out. Finally, according to the relationship between sodium adsorption ratio (SAR) and EC, the risk levels of salinization and sodium toxicity of mine water in Zhangji Coal Mine were divided, and the ways of resource utilization of mine water in study area were determined. It is concluded that the TDS content of well water in Zhangji Coal Mine was 255.47-7 291.74 mg/L, with an average of 2 346.60 mg/L, which was seriously over standard. The highest contribution of TDS ion composition was Na^{+} and K^{+} ; The results of water quality classification showed that the proportion of mine well water of class V in the

收稿日期: 2022-03-01

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021-0927

基金项目: 安徽省自然科学基金资助项目(1908085ME145)

作者简介: 李竞赢(1995—), 女, 安徽宿州人, 博士研究生。E-mail: 1691150139@qq.com

通讯作者: 杨明慧(1962—), 男, 河南潢川人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: yangmh@cup.edu.cn

study area was as high as 81%; The relationship between sodium adsorption ratio (SAR) and EC showed that 79.3% of the water samples were distributed in S3-E4 AND S4-E4 areas. The mine water in Zhangji Coal Mine had high risk of salinization and sodium toxicity and was not suitable for agricultural use. The mine water area could only be used as general industrial water area, indirect contact entertainment water area or general landscape water area.

Key words: Huainan coalfield; mine water resources; water chemical analysis; water quality classification; risk of sodium toxicity

0 引言

高强度、大规模的煤炭开采活动破坏矿区原始岩层结构,扰动地下含水层,产生大量矿井水^[1-3],据不完全统计,仅2014—2019年,我国由煤炭开采所产生的矿井水总量就高达288.09亿t^[4],大量未经处理的矿井水被抽排到地面,造成严重水资源浪费和环境污染,同时伴随地面塌陷和采空区积水等一系列问题,大幅增加了矿山修复与治理的成本和难度,严重制约煤矿的可持续发展^[5-6]。

矿井水资源化利用技术手段的提出,为解决煤矿水资源浪费和污染问题开辟了新的途径,该技术切实贯彻了煤矿开采“安全、高效、绿色”发展理念^[7-9]。我国关于矿井水资源化利用方面的研究,成果丰硕,武强^[10]对我国矿井水资源化利用存在的问题、研究进展、发展趋势做了详细的分析;何绪文^[11-13]一直致力于探究矿井水资源化综合利用和矿井水处理技术创新;顾大钊^[14-15]提出了煤矿地下水库的理论,为解决西部煤矿开采水资源短缺问题提供了有效的创新性技术手段;孙亚军^[5,16]根据神东矿区水文地质特征,分析了如何针对不同矿井水类型采取相应的处理手段,并提出具有针对性的保水采煤关键技术,为干旱半干旱生态环境脆弱区的煤矿开采和水资源保

护提供宝贵的实践经验。

基于以上研究成果,以淮南煤田张集煤矿为研究区,首先利用 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 $\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$ 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^{-} 七大离子含量和pH、溶解性总固体(TDS)、电导率(EC)、总硬度(TH)11个指标对矿区矿井水进行水化学特征分析,然后依据我国《地下水水质标准》,进行矿井水水质分级分类判别和评价,最后根据钠吸附比(SAR)和EC关系,并结合离子来源,探求张集煤矿矿井水资源化利用途径。张集煤矿矿井水水量大,地表积水面积广,探求张集煤矿矿井水资源化利用的途径,对矿区的可持续发展意义重大,另外,到目前为止,该矿区还未有矿井水资源化利用的相关研究,较以往研究,本研究不仅结合水化学特征分析,和遵循矿井水资源化利用“分级分类”原则,而且进一步判定了研究区矿井水实际可用途,为实现张集煤矿区矿井水资源化利用提供一定的理论依据。

1 研究区概况

张集煤矿位于中国安徽省淮南市淮南煤田潘谢矿区的西南部(图1),矿区东西走向长约12 km,南北倾斜宽约9 km,面积约71 km²。研究区地表水系发达,西淝河从西到东贯穿整个矿区,内涝区从西到东横跨了研究区,由于采矿活动矿井水抽排,积水区

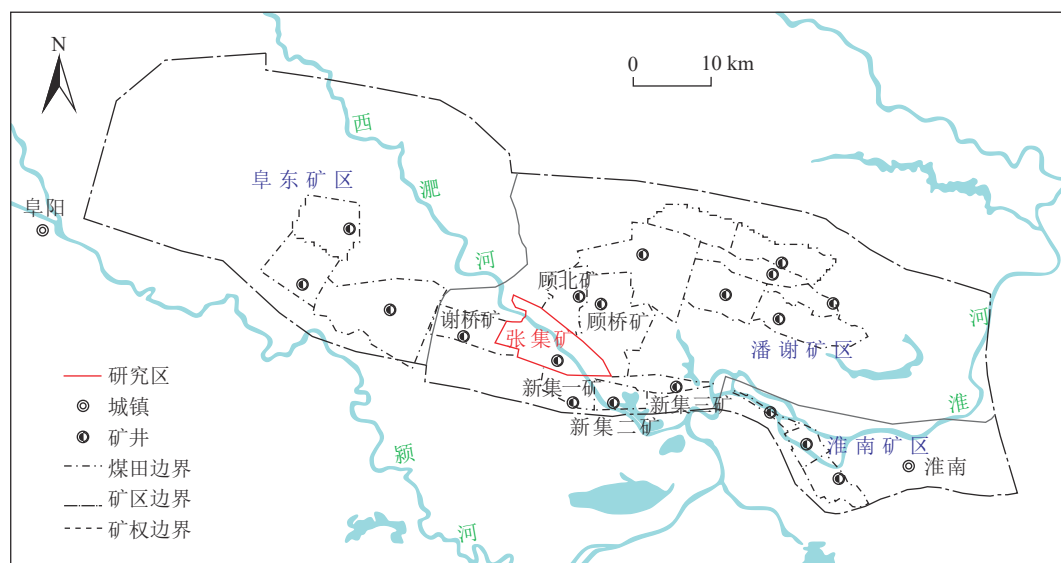


图1 研究区示意

Fig.1 Sketch map of study area

面积也不断扩大,更加重了矿区水域承载负担,截止2018年预计矿区总积水面积可达53.17万 m^2 ,积水量预计将达到25.44万t。地下水埋藏情况变化较大,张集煤矿区由3个主要充水含水层组成,分别为新生界松散含水层、煤系砂岩裂隙含水层、灰岩岩溶含水层,地下水在新生界松散层中以水平运动为主,类型上属于孔隙承压水,是本区的水源补给。

2 取样和方法

根据现有资料整理分析,分别在张集煤矿的西、中央区和北区3个分区选取33个取样点(S1~S33),如图2所示,取样时间从2017-01-18—2018-07-25,其中同一个取样点不同时间取样多次,一共取得82个矿井水水样,并按采样的先后顺序将样品从ZJ135~ZJ227进行编号,水样来源有蓄

水池、采空区、排水孔、水源井、放水孔、塌陷区等,水样来源几乎包含矿区所有矿井水来源。

研究区矿井水水样的采集和测定依照《煤矿水质分析的一般规定》及《地下水质量标准》。采取水样前需现场测定水温、pH、EC值并记录,pH采用玻璃电极法测定,水温用水温计测量,EC值用电导率仪可直接测定;现场测定结束后采集水样,采样前需用去离子水冲洗采样容器(按标准采用1L聚乙烯瓶)3次,然后用待采矿井水冲洗容器3次,最后采集水样并装样密封。将水样带回实验室进行离子含量测定,TDS值在105℃下烘干称重得到,TH值采用EDTA容量法获得,采用酸碱滴定法测定 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} ;离子色谱法应用于 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的测定; Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 采用EDTA滴定法;而 Na^+ 和 K^+ 则用火焰原子吸附分光光度法测定。

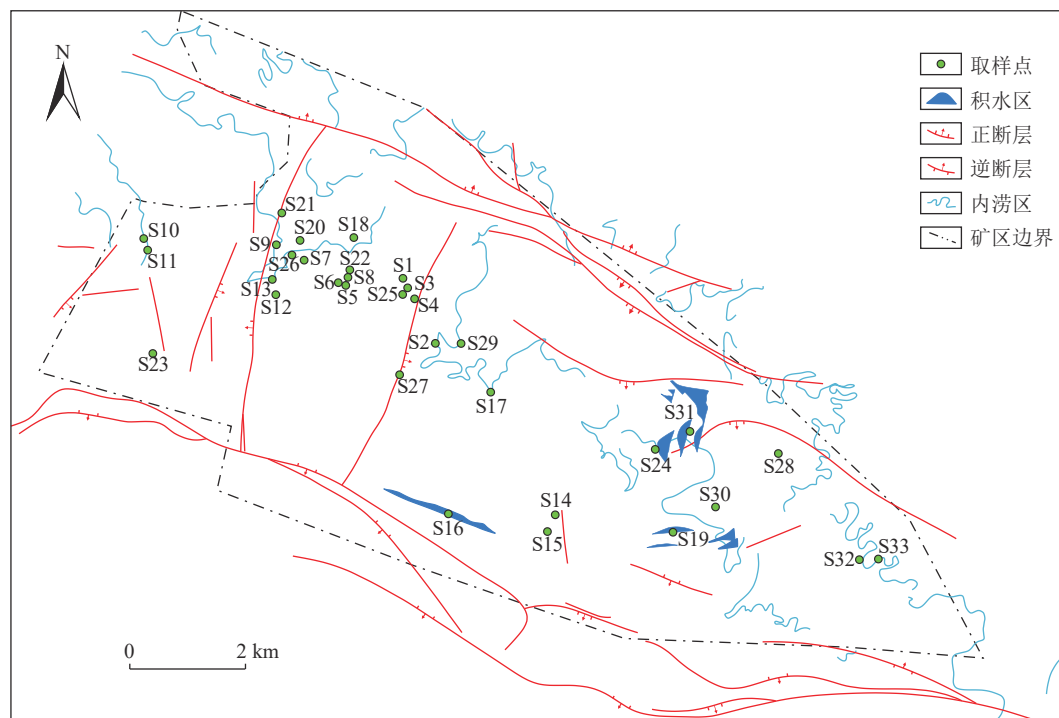


图2 研究区采样点

Fig.2 Sampling points in the study area

3 水化学特征

3.1 一般水文学

82个矿井水样品的常规水化学指标检测结果,由 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 七种离子含量和pH、TDS、EC、TH共11个指标组成,然后对检测结果做一般性的水化学特征分析,统计分析结果见表1。由表1可看出矿井水的pH于7.16~12.24,均值为8.33,中值为8.25,矿区矿井水均为碱

性水,pH最大的水样检测含有大量 OH^- ,无 HCO_3^- ,为张集煤矿锅炉房排水,另外pH的变异系数仅为0.08,说明研究区矿井水pH变化很小,基本保持在8左右。TDS含量为255.47~7291.74 mg/L,平均值为2346.60 mg/L,变异系数为0.51,多数水样的TDS与中位数2584.22 mg/L接近。

所有水样中阳离子均以 K^+ 、 Na^+ 占绝对优势, Ca^{2+} 次之, Mg^{2+} 最少,而阴离子以 Cl^- 、 HCO_3^- 为主,两者相差不多,其次是 SO_4^{2-} , CO_3^{2-} 含量最少,但研究区

表 1 张集煤矿矿井水一般水化学分析结果

Table 1 General hydrochemical analysis results of mine water in Zhangji Coal Mine

参数	最大值	最小值	平均值	中位数	标准差	变异系数
Ca ²⁺ 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	530.66	1.60	45.76	33.48	62.18	1.36
Mg ²⁺ 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	145.86	0.00	16.73	16.53	17.77	1.06
K ⁺ +Na ⁺ 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	2 964.18	1.00	887.54	1 009.40	514.69	0.58
Cl ⁻ 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	3 247.22	7.09	752.71	831.31	479.48	0.64
SO ₄ ²⁻ 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	1 594.60	0.00	269.69	186.36	295.25	1.09
CO ₃ ²⁻ 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	420.07	0.00	29.05	0.00	72.49	2.50
HCO ₃ ⁻ 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	3 368.67	0.00	690.03	395.11	698.65	1.01
TDS质量浓度/(mg·L ⁻¹)	7 291.74	255.47	2 346.60	2 584.22	1 199.76	0.51
pH	12.24	7.16	8.33	8.25	0.66	0.08
EC/(μS·cm ⁻¹)	10 560.00	466.00	3 309.66	4 310.00	1 797.41	0.47
TH/(mg·L ⁻¹)	1 321.06	8.01	183.96	176.14	183.80	1.00

所有离子含量的变异系数皆大于 0.5,说明离子含量极不稳定,极易随时间和空间的变化而发生改变,其中 CO₃²⁻含量少,但变异系数达到 2.5,在整个采样范围内随时空变化特征最为明显。

3.2 主要离子成分

piper 三线图可用来指示研究区矿井水水样的主要离子组成和化学成分,并可作为判别水样类型的方法^[17]。在研究区 33 个取样点共取得 33 组水样得

到 82 个矿井水样品,图 3 为 33 组水样的 piper 三线图,由图 3 可知,87.8% 的水样碱金属离子大于碱土金属离子,即 Na⁺+K⁺>Ca²⁺、Mg²⁺,33 组水样 (S1 ~ S33) 阳离子值绝大多数落在 Na+K 轴,比例在 80% ~ 98%,而 Ca²⁺值变化范围较大,阴离子含量则以 Cl⁻和 HCO₃⁻+CO₃²⁻为主要成分,有超过 30 组水样点分布在 Cl 轴 80% 和 HCO₃⁻+CO₃²⁻轴 80% 交界处。由图 3 可明显看出,除了第 27 组水样 2 个样品类型

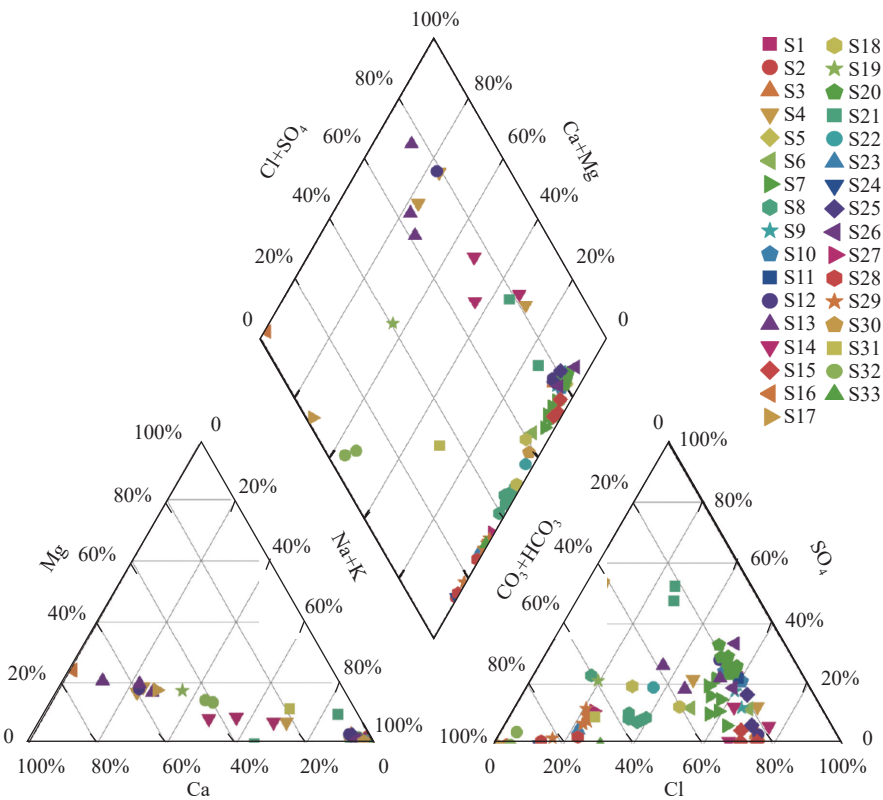


图 3 研究区矿井水主要离子 Piper 图

Fig.3 Piper diagram of main ions in mine water of study area

不同(分别是 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na+K}$ 型和 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型), 其余同一取样点所采水样类型基本一致, 研究区矿井水水样水化学类型主要有 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na+K}$ 型、 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na+K}$ 型、 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型和 $\text{SO}_4\text{-Na+K}$ 型, 所占比例分别为 59.8%、17.6%、13.4%、9.2%。

3.3 水化学特征的动态变化

通过比对于不同采样时间、同一采样点采取的

矿井水指标含量, 探讨研究区矿井水指标含量的动态变化特征, 推断矿井水指标变化规律及受控因素。选取了 1412A 工作面灰岩增补孔(图 4a)、北区水仓蓄水池(图 4b)、西二定向长钻孔(图 4c)、西二疏水巷排水孔(图 4d)、西三疏水巷定向长钻孔(图 4e)、西二封闭墙排水孔(图 4f)6 个采样点, 共采取 33 个矿井水水样作为分析对象, 绘制图 4。

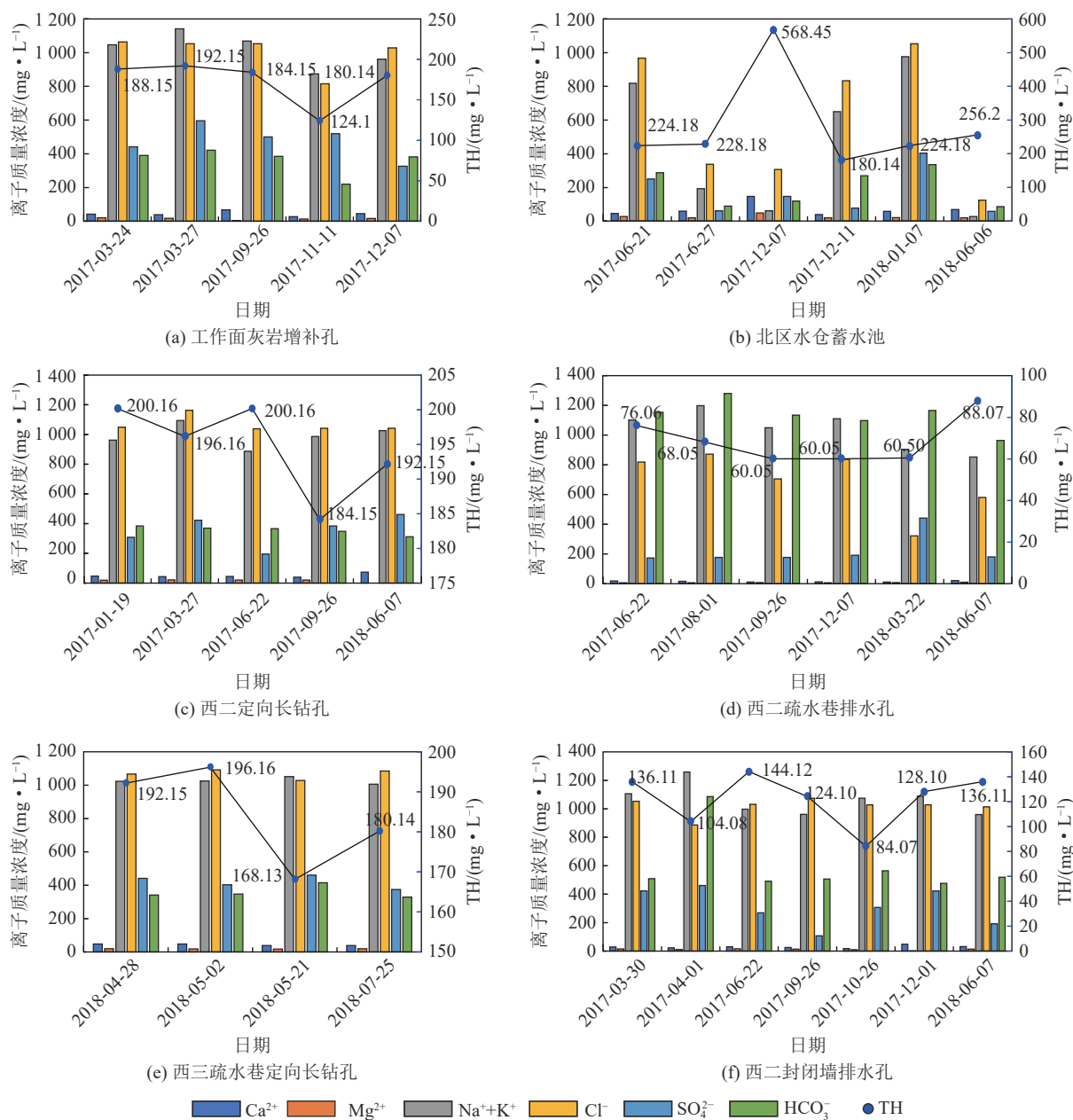


图 4 化学指标-时间变化

Fig.4 Hydrochemical indicators-time variation chart

由图 4 中 4a、4c、4d、4e、4f 五张柱状图可看出同一采样点的各项离子浓度随时间的起伏变化不明显, 范围基本在 30 mg/L 以内, 说明同一采样点的水源补给较单一、稳定, 而图 4b 蓄水池中矿井水离子

指标含量从 2017 年 6 月至 2017 年 12 月出现显著增加而后又明显减少, 据分析其原因可能是与研究区气候变化有关, 6 月到 12 月研究区自然降水逐渐减少, 采样点位于蓄水池, 受外界影响显著, 池中矿

井水经过 6 个月的蒸发作用,离子浓度逐步升高,而后突然降低可能是受采矿活动矿井水排放增大,水量增多使离子浓度在短时间内降低。

3.4 相关性分析

对变量进行相关性分析的目的,在于表征两个变量之间的相互关系和变化趋势^[18],另外能够反映变化趋势的方向和程度,并在一定程度上对试验样本做来源预测分析^[19]。试验对 82 个水样的 10 组指标数据依次采取双变量进行相关分析,由于 Pearson 和 Spearman 相关系数只能应用于连续变量,而水样数据为无序离散变量,因此,选用 Kendall 公式计算水化学指标参数的相关系数^[20-21],然后依据所得相关系数值对样品水化学指标数据之间的关联性进行分析,推断各离子指标之间的相互关系度,每种水化学指标的影响作用范围,水质检测标准 TDS 最主要

的控制因素是哪项指标,并根据实际取样环境进一步推断离子来源。

由计算结果(表 2)可得,矿井水水样品中对 TDS 值贡献度最高的是钠离子和钾离子,相关系数值高达 0.821,结果极显著,且 TDS 总体上与各离子指标含量相关性最大,阴离子中与 TDS 相关系数值比较高的是 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- ,反映这 3 种离子在 TDS 中所占比重较高;而水质检测标准 TH 与钙、镁离子密切相关,这也与实际测量结果一致,同时,钙、镁离子之间呈正相关,两者的来源应该多是碳酸盐岩溶解,而二者与 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 的含量呈负相关关系也证实了这一点,前者与后者会生成沉淀,因此 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 的含量越多, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量越少,而碳酸盐岩溶解度也与游离离子含量成反比。

表 2 水化学指标相关系数矩阵

Table 2 Correlation coefficient matrix of hydrochemical indexes

离子	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	Cl^-	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}	HCO_3^-	EC	TH	PH
TDS	-0.229**	-0.215**	0.821**	0.456**	0.465**	0.225**	0.435**	0.786**	-0.196**	0.100
Ca^{2+}		0.509**	-0.403**	0.063	0.080	-0.357**	-0.523**	-0.210**	0.847**	-0.268**
Mg^{2+}			-0.307**	0.148	-0.071	-0.219*	-0.466**	-0.200**	0.663**	-0.133
$\text{Na}^+ + \text{K}^+$				0.341**	0.307**	0.301**	0.555**	0.681**	-0.368**	0.160*
Cl^-					0.413**	-0.061	0.009	0.461**	0.129	-0.046
SO_4^{2-}						-0.193*	0.060	0.357**	0.027	-0.221
CO_3^{2-}							0.275**	0.207*	-0.316**	0.653**
HCO_3^-								0.428**	-0.515**	0.133
EC									-0.189*	0.094
TH										-0.231**

注: **相关性在 0.01 水平上显著, *相关性在 0.05 水平上显著。

PH 对水质是否合格至关重要,而根据计算结果发现, CO_3^{2-} 离子是决定本次水样 PH 的最主要因素,这也为后期矿井水水处理提供理论依据,如果想要改变矿井水的酸碱度,可通过去除矿井水中的 CO_3^{2-} 来达到目的; EC 一点程度上可反应 TDS,同样可作为水质检验的标准,由相关系数值也可看出, EC 与 TDS 的值大致相同,说明二者作用意义基本一致; SO_4^{2-} 跟所有指标的相关性皆小于 0.5,即与其他指标的关联性都不大,说明其缘由可能是农业灌溉、生活污水等人类活动而产生的废水汇入矿井水,属于外来物质,与矿区矿井水本身来源关系不显著。

3.5 主成分分析

完成了以上样品指标的水化学特征分析,我们还需要总体把握研究区矿井水水样的水化学特征,由于本次试验选取的样品指标较多,为减少变量个

数,降低工作强度,同时尽可能完整保留原始数据信息,达到综合研究全部样品数据的目的,我们采用了主成分分析方法。将水样重新进行组分分析,得到 2 个新的综合变量 F_1 、 F_2 ,主成分 F_1 、 F_2 的方差贡献率分别为 35.121%、25.503%,然后对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 七个离子指标的主成分综合得分值再分析,并绘制分析变量荷载分布图(图 5)。

由图 5 可知, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Cl^- 在 2 个主成分上都有较高荷载值,即 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Cl^- 是研究区矿井水的主要离子组分,反映张集矿矿井水出现高度“咸化”,水质逐渐恶化,结合采样点水文地质资料获悉, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 离子含量较高由于煤炭开采、钻井勘探等原因,导通各含水层,富含 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 离子的地下水流经岩土层将 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 置换出来,不断地进行阳离子交换作用,使

得矿井水含盐量逐渐增高;综合来看, HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 荷载得分值与 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 荷载得分值在 2 条主成分轴上均相反, 反映在水样中 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 离子的含量与 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 离子的含量之间存在明显的相互作用, 原始的封闭还原环境中, SO_4^{2-} 发生脱硫酸作用被还原成 H_2S , 使得 HCO_3^- 含量增高, 而由于采矿活动, 使还原环境变为氧化环境, 水中携带了大量的 O_2 和 CO_2 , 导致碳酸盐岩被溶解产生 Ca^{2+} , 而 HCO_3^- 与 CO_3^{2-} 是相辅相成的存在。

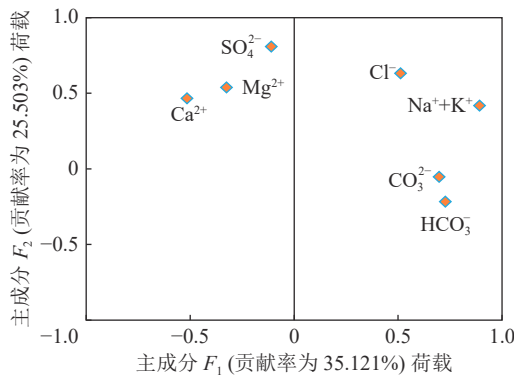


图5 矿井水分析变量荷载分布
Fig.5 Distribution of variable load of mine water analysis

为消除变量之间的量纲影响, 使其具有可比性, 对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^++K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 指标含量数据作标准化处理, 将标准化处理后的数据代入主成分计算公式 (式 (1) 和式 (2)), 求得共 82 组主成分得分数据, 并得到研究区离子指标主成分得分散点图 (图 6)。

主成分计算表达式如下:

$$F_1 = -0.209x_1 - 0.132x_2 + 0.363x_3 + 0.209x_4 - 0.044x_5 + 0.284x_6 + 0.296x_7 \quad (1)$$

$$F_2 = 0.261x_1 + 0.302x_2 + 0.234x_3 + 0.354x_4 - 0.453x_5 - 0.030x_6 - 0.122x_7 \quad (2)$$

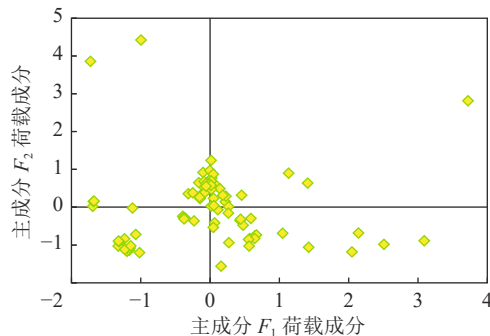


图6 主成分计算结果荷载投影图
Fig.6 Load projection of principal component calculation results

式中: F_1 、 F_2 为两个主成分; x_i ($i = 1, 2, \dots, 7$) 为标准化处理后的 7 个离子指标含量。

图 6 显示, 水样整体沿主成分 F_1 轴展布, 说明水样来源含水层中存在脱硫酸作用和阳离子交换作用, 导致矿井水盐度增高; 另有多数水样点集中在 F_2 轴上半部分, 结合图 5 可知, 矿井水流经碳酸盐岩层, 伴随石灰岩、白云岩溶解, 水质发生“硬化”, 综上所述, 张集煤矿矿井水存在“咸化”、“硬化”现象, 水质情况不容乐观。

4 结果与分析

4.1 矿井水水质评价及离子来源分析

为遵循矿井水“分级应用”的原则, 本研究参照以上研究结果及现行《地下水质量标准》(表 3), 分别对研究区矿井水水样中的 TH、TDS、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Na^+ 指标含量进行判别分类, 然后根据单个指标分类, 得到 82 个样品的综合水质分级结果。

表3 地下水质量一般化学指标及限值 (部分)

类别	I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类
TH/(mg·L ⁻¹)	≤150	≤300	≤450	≤650	>650
TDS/(mg·L ⁻¹)	≤300	≤500	≤1 000	≤2 000	>2 000
SO ₄ ²⁻ /(mg·L ⁻¹)	≤50	≤150	≤250	≤350	>350
Cl ⁻ /(mg·L ⁻¹)	≤50	≤150	≤250	≤350	>350
Na ⁺ /(mg·L ⁻¹)	≤100	≤150	≤200	≤400	>400

图 7 显示, SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Cl^- 和 TDS 指标的分类结果中第 V 类所占例较大, V 类的样品个数分别为 27、65、63 和 57, 水质较差, 而 TH 指标等级较低, 共有 36 和 40 个 I 类和 II 类, 说明研究区 TH 指标良好。每组样品水质等级划分如图 7b 所示, 张集煤矿矿井水水样均不符合 I 类水质标准, 而 II、III 类占 13%, V 类占比高达 81%, IV 类为 6%。

由水质评价结果, 可知研究区离子组分含量较高, 为判断研究区矿井水中主要组分的来源, 了解研究区的水环境条件, 以便为矿井水水质改善和资源化利用提供理论依据。

研究采用 Gibbs 半对数图探究离子成因机制, 由张集煤矿矿井水水样 Gibbs 图 (图 8) 显示, 水样点主要分布在图的上半部分, 多数落在蒸发结晶作用带, 少数在岩石风化带, 说明研究区矿井水受蒸发结晶和岩石风化控制作用明显, 这也与矿井水的实际来源相符, 研究区矿井水水样多数从地下抽排至地表,

离子来自含水层围岩和第四纪松散层土壤,到达地表后被蒸发结晶,另外,取样时间几乎都在研究区降

水较少时节,受大气降水作用影响较小,这也解释了检测结果中矿井水 TDS 含量偏高的原因。

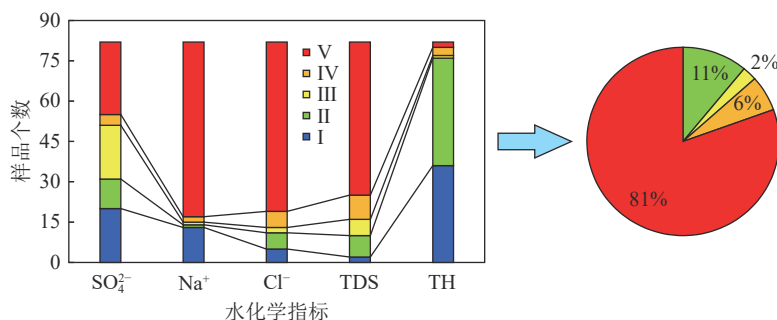


图7 水化学指标类别堆积柱形图及样品水质分类饼图

Fig.7 Stacked column chart of hydrochemical index categories and pie chart of sample water quality classification

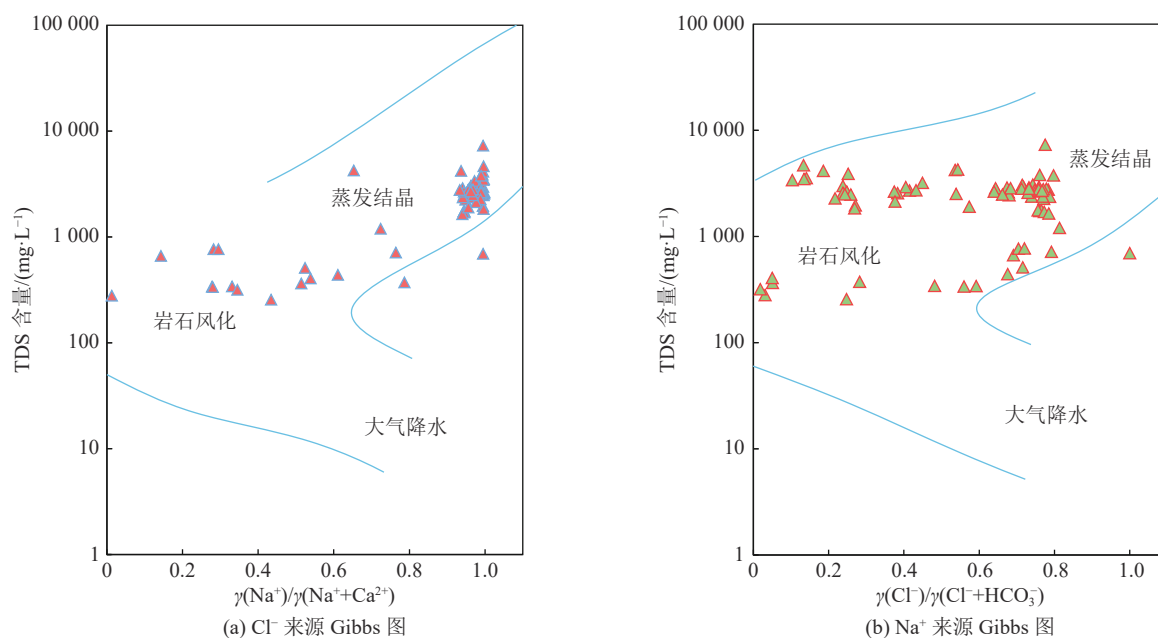


图8 矿井水 Gibbs 半对数图

Fig.8 Gibbs semilogarithmic diagram of mine water

4.2 矿井水资源化利用

根据水质分级结果,研究区矿井水样品等级有Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ类4个等级,但由于指标不全,不能保证研究区矿井水其他指标达标,因此作为Ⅱ、Ⅲ类用水功能有待进一步研究,而可以确定的是,水样全部符合《地下水质量标准》Ⅴ类标准,即不宜做生活饮用水,水域功能可作为一般工业用水区、人体非直接接触娱乐用水区、农业用水或者一般景观水域等。

矿井水在地面积聚以后受蒸发作用明显,常规离子含量过高,植物生长需要适宜的水化学环境,因此需进一步判断是否可做农业灌溉用水。从相关性分析可知,组成TDS的主要离子是 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$,由主成分分析可知研究区矿井水咸化严重,钠离子或钾离

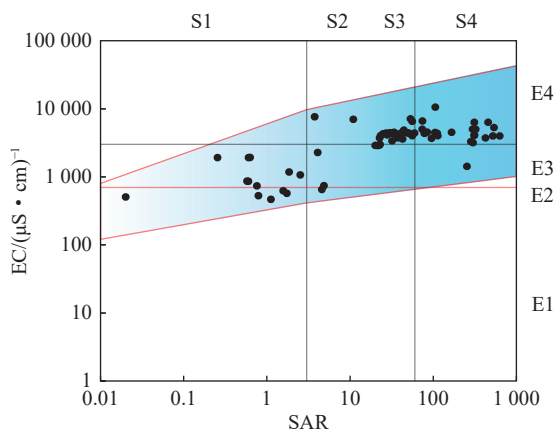
子含量过高对土壤和植物存在毒害作用,从而限制矿井水资源化利用,因此,采用钠吸附比(SAR)来进行水质检测,钠吸附比常应用于地表及地下水灌溉性水质评价^[22],计算公式如下:

$$\text{SAR} = \frac{c(\text{Na}^+)}{[c(\text{Ca}^{2+}) + c(\text{Mg}^{2+})]^{1/2}} \quad (3)$$

式中: SAR为钠离子吸附比; c 为离子浓度, mg/L。

研究利用 SAR 与 EC 之间的关系,进行张集矿矿井水盐渍化和钠离子毒害效应评价,并作为判断矿井水资源化利用可行性的依据。图9显示,整体来看研究区矿井水 SAR 和 EC 值基本偏高,虽然水样中有钠毒害较低风险的存在,但 EC 值皆在 E1-E2 界线之上,钠毒害风险较低但会受到盐渍化威胁,另

外, 79.3% 的水样点分布在 S3-E4 区和 S4-E4 区, 说明钠毒害及盐渍化风险均较高。即研究区矿井水不适宜用做农业灌溉用水, 可作为工业生产、城市绿化、水体景观等用途。



E1、E2、E3、E4—盐渍化低、中、较高、高风险;
S1、S2、S3、S4—钠毒害低、中、较高、高风险

图9 SAR-EC 风险判别分区

Fig.9 Risk discrimination division of SAR-EC

5 结 论

1) 张集煤矿矿井水 TDS 主要贡献阳离子为 Na^+ 和 K^+ , 阴离子主要组成是 Cl^- 和 HCO_3^- , 水化学类型中 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na+K}$ 型占总数的 59.8%, 水中离子主要来源为蒸发结晶和岩石风化作用。

2) 研究区矿井水仅达到 V 类水质标准, 且水质“咸化”“硬化”现象严重, 存在较高的钠离子毒害与盐渍化风险, 不适宜用做农业灌溉用水, 参考历来煤矿矿井水资源化利用的成功案例和研究区自身特点, 张集煤矿矿井水实际可用作道路洒水、矿区绿化、冷却降温、洗煤, 向周边煤化工或工业园区提供工业用水等。

3) 位于地面下的采样点, 受外界环境影响较小, 矿井水来源稳定, 在治理过程中, 严格把控水源, 针对 TDS 及 Na^+ 、 K^+ 、 HCO_3^- 含量较高的特点, 选取合适的物理、化学或生物方法进行净化处理, 提高水质, 使矿井水得到更广泛的应用。

参考文献(References):

- [1] 陈苏社, 黄庆享, 薛 刚, 等. 大柳塔煤矿地下水库建设与水资源利用技术[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(8): 21-28.
CHEN Sushe, HUANG Qingxiang, XUE Gang, *et al.* Technology of underground reservoir construction and water resource utilization in Daliuta Coal Mine[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(8): 21-28.
- [2] 张溪彧, 杨 建, 王 皓, 等. 露天矿地下水人工回灌介质渗透性与水质变化规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(6): 291-297.
ZHANG Xiyu, YANG Jian, WANG Hao, *et al.* Study on the regular pattern of medium permeability and water quality variation during artificial recharge of open-pit mine groundwater reservoir[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(6): 291-297.
- [3] 范立民, 马雄德, 吴群英, 等. 保水采煤技术规范的技术要点分析[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 81-87.
FAN Limin, MA Xiongde, WU Qunying, *et al.* Analysis on technical points of water-preserving coal mining technical specifications[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 81-87.
- [4] 王行军. 我国2014年以来煤矿矿井水资源研究[J]. 中国煤炭地质, 2019, 31(12): 85-88, 114.
WANG Xingjun. Coalmine mine water resources study in China since 2014[J]. Coal Geology of China, 2019, 31(12): 85-88, 114.
- [5] 孙亚军, 陈 歌, 徐智敏, 等. 我国煤矿区水环境现状及矿井水处理利用研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 304-316.
SUN Yajun, CHEN Ge, XU Zhimin, *et al.* Research progress of water environment, treatment and utilization in coal mining areas of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 304-316.
- [6] SONG Hongqing, XU Jianjian, FANG Jie, *et al.* Potential for mine water disposal in coal seam goaf: Investigation of storage coefficients in the Shendong mining area[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 244(1): 118646.
- [7] 李寿考. 综合开发利用矿井水资源的探讨: 以焦作矿区为例[J]. 中原地理研究, 1985(2): 48-56.
LI Shoukao. Discussion on comprehensive development and utilization of mine water resources: Taking Jiaozuo mining area as an example[J]. Geographical Research of Central Plains, 1985(2): 48-56.
- [8] 顾大钊, 张建民, 王振荣, 等. 神东矿区地下水变化观测与分析研究[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(4): 35-39.
GU Dazhao, ZHANG Jianmin, WANG Zhenrong, *et al.* Observations and analysis of groundwater change in Shendong mining area[J]. Coal Geology and Exploration, 2013, 41(4): 35-39.
- [9] WANG Qiqing, LI Wenping, LI Tao, *et al.* Goaf water storage and utilization in arid regions of northwest China: A case study of Shennan coal mine district[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 202(8): 33-44.
- [10] 武 强. 我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展望[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 795-805.
WU Qiang. Progress, problems and prospects of prevention and control technology of mine water and reutilization in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 795-805.
- [11] 何绪文, 杨 静, 邵立南, 等. 我国矿井水资源化利用存在的问题与解决对策[J]. 煤炭学报, 2008, 33(1): 63-66.
HE Xuwen, YANG Jing, SHAO Linan, *et al.* Problem and counter measure of mine water resource regeneration in China[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(1): 63-66.
- [12] 何绪文, 员 润, 吴 娟, 等. 焦化废水深度处理新技术及其相互耦合特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 175-182.
HE Xuwen, YUAN Run, WU Xu, *et al.* Research on characterist-

- ics of new technologies and intercoupling technologies for advanced treatment of coking wastewater[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(1): 175–182.
- [13] 何绪文, 王绍州, 张学伟, 等. 煤矿矿井水资源化利用技术创新[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(1): 523–530.
- HE Xuwen, WANG Shaozhou, ZHANG Xuewei, *et al.* Coal mine drainage resources utilization technology innovation[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 523–530.
- [14] 顾大钊, 颜永国, 张 勇, 等. 煤矿地下水库煤柱动力响应与稳定性分析[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(7): 1589–1597.
- GU Dazhao, YAN Yongguo, ZHANG Yong, *et al.* Experimental study and numerical simulation for dynamic response of coal pillars in coal mine underground reservoir[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(7): 1589–1597.
- [15] 顾大钊. 煤矿地下水库理论框架和技术体系[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(2): 239–246.
- GU Dazhao. Theory framework and technological system of coal mine underground reservoir[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(2): 239–246.
- [16] 孙亚军. 矿区水资源保护与水灾害防治技术[Z]. 江苏省, 中国矿业大学, 2008-03-25.
- [17] 武亚遵, 潘春芳, 林 云, 等. 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[J]. *地质科技情报*, 2018, 37(5): 191–199.
- WU Yazun, PAN Chunfang, LI Yun, *et al.* Hydrogeochemical characteristics and controlling factors of main water filled aquifers in the typical North China coalfield[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2018, 37(5): 191–199.
- [18] 黎 妍, 张晓飞, 易 鸣, 等. 基因调控网络的边预测[J]. *数学物理学报*, 2015, 35(5): 1018–1024.
- LI Yan, ZHANG Xiaofei, YI Ming, *et al.* Link prediction for the Gene regulatory Network[J]. *Acta Mathematica Scientia*, 2015, 35(5): 1018–1024.
- [19] AKLIMA Nargis, AHSAN Habib, RASHID-Or-Harun, *et al.* Status of multielement in water of the river Buriganga, Bangladesh: Aquatic chemistry of metal ions in polluted river water[J]. *Emerging Contaminants*, 2021, 7(3): 99–115.
- [20] 韩 晟, 韩坚舟, 赵 璇, 等. 距离权重改进的Pearson相关系数及应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2019, 54(6): 1363–1370, 1177.
- HAN Shen, HAN Jianzhou, ZHAO Xuan, *et al.* A pearson correlation coefficient improved by spatial weight[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2019, 54(6): 1363–1370, 1177.
- [21] 杨 盼, 卢 路, 王继保, 等. 基于主成分分析的spearman秩相关系数法在长江干流水质分析中的应用[J]. *环境工程*, 2019, 37(8): 76–80.
- YANG Pan, LU Lu, WANG Jibao, *et al.* Analysis of water quality trend in the main stream of the Yangtze river based on principal component analysis[J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(8): 76–80.
- [22] 孔晓乐, 杨永辉, 曹 博, 等. 永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析[J]. *环境科学*, 2021(4): 1–13.
- KONG Xiaole, YANG Yonghui, CAO Bo, *et al.* Hydrochemical characteristics and factors of surface water and groundwater in the upper Yongding river basin[J]. *Environmental Science*, 2021(4): 1–13.