生态脆弱矿区矿井水特征及资源化适宜性研究*

谢国良[1]，廉开元[2]，严明林[1]，韩高将[1]，王开闯[1]，蒋文[1]

（1.库车市榆树岭煤矿有限责任公司， 新疆 阿克苏市 842000；
2.中国矿业大学 矿业工程学院， 江苏 徐州市 221116）

摘要：掌握矿井水特征及功能性利用适宜性是实现矿井水分源处理、分级利用资源化的前提。以榆树岭煤矿矿井水为研究对象，采集不同区域矿井水进行水样检测，划分矿井水资源化利用类型，建立评价体系，综合分析矿井水不同利用方向的功能适宜性。研究表明：矿井水化学类型主要为 SO_4^{2-}·Cl^--Na^+型，Ⅴ类水隶属度为0.812～0.991，水化学组分含量高，存在饮用、灌溉与工业用水三种潜在利用途径；各类矿井水饮用适宜性评价结果均为Ⅲ级、Ⅳ级，不适宜饮用，在灌溉和工业用水适宜性上，不同类型矿井水评价结果差异较大，采空区积水、裂隙水的钠吸附比、雷兹纳稳定指数分别在3～10.8（mmol·L^{-1}）$^{1/2}$、6.1～6.5之间，显示对土壤理化性质影响较小且基本无腐蚀性，适宜于灌溉和工业用水；火烧区积水饱和指数为0.8～1.2，超过0.6，具有结垢倾向，一般不能直接作为灌溉水使用，但可用于工业用途；水仓水水质受污染严重，可溶性钠百分比（78.4%～84.5%）、镁危害比（62.9%～72.0%）、雷兹纳稳定指数（7.2～7.7）、拉森比率（8.0～12.0）等指标显示该类型水对土壤碱度及渗透性危害较高，并且具有严重腐蚀性，功能性利用潜力较差。

关键词：生态脆弱矿区；矿井水；资源化；功能性利用；适宜性评价

中图分类号：TD74；X752　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2025)04-0278-11

Study on Characteristics of Mine Water and Suitability for Resource Utilization in Ecologically Fragile Mining Area

XIE Guoliang[1], *LIAN Kaiyuan*[2], *YAN Minglin*[1], *HAN Gaojiang*[1], *WANG Kaichuang*[1], *JIANG Wen*[1]

(1.Kuqa Yushuling Coal Mine Co., Ltd., Aksu, Xinjiang 842000, China;
2.School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: Mastering the characteristics and functional suitability of mine water is a prerequisite for achieving resource utilization and graded utilization of mine water sources. Taking the mine water in Yushuling Coal Mine as the research object, water samples were collected from different areas for water testing, the types of mine water resource utilization were divided, an evaluation system was established, and the functional suitability of different utilization directions of mine water was comprehensively analyzed. Research results show that the chemical type of mine water is mainly SO_4^{2-}·Cl^--Na^+, with a membership degree of 0.812-0.991 for Class V water. The content of hydrochemical components is high, and there are three potential utilization pathways for drinking, irrigation, and industrial water. The suitability evaluation results of various types of mine water for drinking are grade III and IV, which are not suitable for drinking. In terms of irrigation and industrial water suitability, there are significant differences in the evaluation results of different types of mine water. The sodium adsorption ratio, Razner stability index of water accumulation in goaf and fissure water are 3-10.8 (mmol·L)$^{1/2}$ and 6.1-6.5, respectively, indicating that they have little impacts on soil physical and chemical properties and are basically non corrosive, making them suitable for irrigation and industrial water use. The saturation index of accumulated water in the burnt area is 0.8-1.2, exceeding 0.6, indicating a tendency towards scaling. Generally, it cannot be directly used as irrigation water, but can be used for industrial water use. The water quality of the water tank is severely polluted, with indicators such as soluble sodium percentage (78.4%-84.5%), magnesium hazard ratio (62.9%-72.0%), Razner stability index (7.2-7.7), and Larson ratio (8.0-12.0), indicating that this type of water poses a high risk to soil alkalinity and permeability, and has severe

* **收稿日期**：2024-05-14
基金项目：国家自然科学基金项目(52022107,52174128)
作者简介：谢国良(1983—)，男，河南淅川人，高级工程师，主要研究方向为煤炭安全开采。E-mail：xglysqmk@163.com
通信作者：廉开元(1999—)，男，山东临沂人，硕士研究生，主要研究方向为煤炭资源绿色开采。E-mail：lky571386@163.com

corrosiveness, with poor potential for functional utilization.

Key words: Ecologically fragile mining area, Mine water, Resource utilization, Functional utilization, Suitability evaluation

0　引言

煤炭作为我国主体能源和重要工业原料，对国民经济和社会高质量发展具有极其重要的作用，短期内煤炭的主体能源地位不可动摇[1-2]。然而，我国水资源与煤炭资源呈逆向分布，西部地区煤炭储量丰富，但是水资源匮乏，生态环境脆弱[3-4]。煤炭的高强度开采破坏原始岩层结构，扰动地下含水层，导致地下水流失严重，并产生大量污染性矿井水，据统计，每生产 1 t 原煤约产生 2 t 矿井水[5]。受污染矿井水直接利用或外排不仅会造成水资源浪费，还会引发河流污染、土地盐碱化、动植物死亡等一系列环境问题。因此，生态脆弱矿区矿井水功能性利用适宜性评价对实现矿井水资源化利用、缓解矿井水资源紧张以及煤炭安全高效绿色开采具有重要意义。

目前，已有学者对矿井水资源化利用可行性评价开展了一定的研究。OBIORA S C 等[6]通过检测重金属离子浓度评价矿井水的可饮用性；王昱同等[7]采用层次-综合污染指数法确定矿井水水质等级，并以此为依据评价矿井水的工业用水适宜性；石金芳等[8]利用 SAR(钠吸附比)、Kellys 指数等作为评价指标对矿井水的灌溉适宜性进行评价。这些研究仅针对单一利用模式进行评价，并且评价方法对影响因素考虑不充分，缺乏综合性的分析评价。

本文以典型生态脆弱矿区榆树岭煤矿为研究对象，根据矿井水特征划分功能性利用类型，建立饮用适宜性评价标准，并采用钠吸附比、渗透性指数、饱和指数、雷兹纳指数等为评价指标，分别对多源矿井水资源的饮用适宜性、灌溉适宜性、工业用水适宜性进行评价，最后综合评价确定各类矿井水的功能性利用适宜性，以期为研究区矿井水分源处理、分级利用的多功能资源化利用提供理论支撑。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

榆树岭矿区位于新疆维吾尔自治区阿克苏地区。该矿区降水稀少且蒸发量大，属于暖温带大陆性干旱气候，在环境条件及矿产资源开发的双重影响下，水资源短缺和土地荒漠化严重，是典型的生态脆弱矿区[9-10]。该矿区共有 5 层可采煤层，其中北部煤层露头形成火烧区。区内出露的主要地层由上到下为第四系全新统(Q_4)、下侏罗统阿合组(J_{1a})、下侏罗统塔里奇克组(J_{1t})、上三叠统黄山街组(T_{3hs})，主要含水层为第四系全新统冲、洪积砂砾石含水层(H_1)，侏罗系下统阿合组含水层(H_2)，烧变岩含水层(H_3)，侏罗系下统塔里奇克组孔隙、裂隙承压含水层(H_4)。依据矿区水文地质勘探报告，矿井水直接充水来源主要为烧变岩含水层(H_3)与孔隙、裂隙承压含水层(H_4)，矿井水文地质情况如图 1 所示。

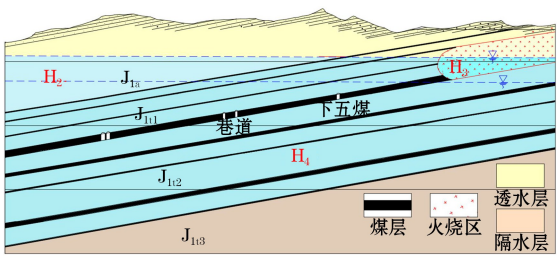


图 1　矿区水文地质剖面

Fig.1　Hydrogeological profile of the mining area

1.2　样品采集与检测

为全面了解榆树岭矿区矿井水能否适合功能性利用，分别对 11 采区顶板裂隙水(A1、A2、A3、A4)，采空区积水(B1、B2、B3、B4)，火烧区积水(C1、C2、C3、C4)，水仓水(D1、D2、D3、D4)进行采样，每类矿井水分别采集 4 个样品，总计 16 个样品。采样点覆盖研究区主采煤层下五煤的主要工作面，采样点分布如图 2 所示。

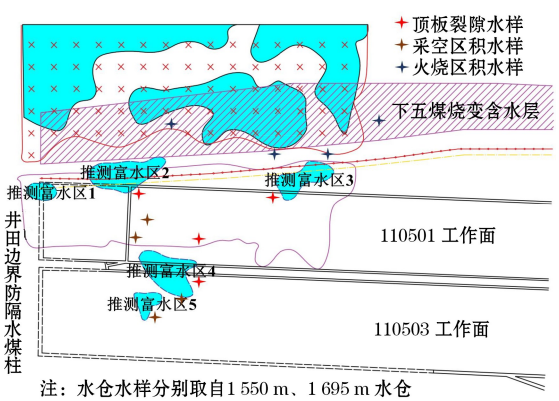


图 2　研究区水样分布

Fig.2　Water sample distribution map in study area

使用 1 L 塑料瓶采集水样。用待取水样润洗取样瓶 2～3 次后再进行取样，经过沉淀过滤处理后封

装并贴签标注取样时间和地点,送至测试中心进行检测。检测依据的标准为《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017),每组水样测试 3 次,取其平均值为最终结果,以减少误差。根据矿井水利用方向的适宜性评价指标所需项目进行检测,检测项目为:Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+、Na^+、Cl^-、HCO_3^-、CO_3^{2-}、SO_4^{2-}、Fe^{2+}、NH_4^+、TDS、pH 以及总硬度等常规指标。此外,还对 NO_3^-、F^-、Hg、As、Se、Cd、Cr 等毒理指标进行检测。

1.3 研究方法

为实现矿井水安全绿色高效利用,必须优先进行功能性利用适宜性评价。为实现对矿井水的资源化适宜性评价,首先要确定矿井水潜在利用途径,划分矿井水不同功能性利用类型,分别选取不同利用方向的适宜性评价指标,分析确定适宜性评价等级及评价标准,建立不同方向的适宜性评价指标体系(见图 3)。

通过 Piper 三线图、系统聚类分析以及模糊综合评价法将矿井水利用途径划分为饮用、灌溉与工业用水三类。建立饮用适宜性评价标准对矿井水饮用适宜性进行评价;采用钠吸附比(SAR)、可溶性钠百分比(SSP)、渗透性指数(PI)与镁危害比(MHR)作为矿井水灌溉适宜性评价指标;采用饱和指数(LSI)、侵蚀指数(AI)、雷兹纳指数(RSI)和拉森比率(LR)作为矿井水工业用水适宜性评价指标。以这些指标为基础,综合分析评价确定矿区各类矿井水资源化利用的适宜性。

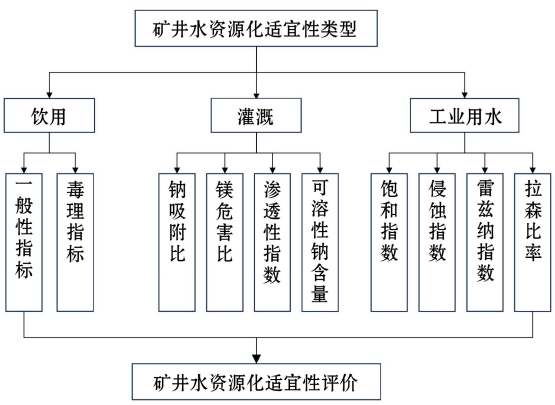


图 3 矿井水资源化利用适宜性评价流程

Fig.3 Evaluation process of suitability of mine water resource utilization

1.3.1 矿井水水质模糊综合评价法

模糊综合评价法采用隶属函数表示隶属度,进而定量描述水体"污染程度""分类指标"等模糊的概念,考虑各单项因素进行综合评价[11-12]。其评价过程包括 4 个步骤。

(1) 建立评价标准。依据《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)中的地下水质量分类指标限值制作矿井水水质评价标准,见表 1。

表 1 矿井水水质评价标准

Table 1 Mine water quality assessment standard mg/L

水质分级	评价指标						
	总硬度($CaCO_3$)	TDS	Cl^-	Fe	Al	Na^+	F^-
Ⅰ类	150	300	50	0.10	650	100	1.0
Ⅱ类	225	400	100	0.15	2 000	125	1.0
Ⅲ类	375	750	200	0.25	350	175	1.0
Ⅳ类	550	1 500	300	1.15	200	300	1.5
Ⅴ类	650	2 000	350	2.00	0.50	400	2.0

(2) 隶属度确定。对于第 j 类评价类别,当 $j=1$ 时:

$$R_{ij}=\begin{cases}1 & X_i \leqslant C_{ij}\\ \dfrac{C_{i,j+1}-X_i}{C_{i,j+1}-C_{ij}} & C_{ij}<X_i<C_{i,j+1}\\ 0 & C_{i,j+1}\leqslant X_i\end{cases} \tag{1}$$

当 $1<j<5$ 时:

$$R_{ij}=\begin{cases}0 & X_i \leqslant C_{ij};X_i \geqslant C_{i,j+1}\\ \dfrac{C_{i,j+1}-X_i}{C_{i,j+1}-C_{ij}} & C_{i,j}<X_i<C_{i,j+1}\end{cases} \tag{2}$$

当 $j=5$ 时:

$$R_{ij}=\begin{cases}0 & X_i \leqslant C_{ij}\\ 1 & C_{ij}<X_i\end{cases} \tag{3}$$

式中:R_{ij} 为第 i 个指标对第 j 类评价类别的隶属度;X_i 为第 i 个指标的实测值;C_{ij} 为第 i 个指标的第 j 类评价类别的限值。

构建模糊矩阵 $\boldsymbol{R}$:

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1j}\\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2j}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ R_{i1} & R_{i2} & \cdots & R_{ij}\end{bmatrix} \tag{4}$$

(3) 权重确定。将检测指标的各类标准值的平均值作为划分污染等级的分界点,并对其权重作归一化处理:

$$C_i=\frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k}C_{ij} \tag{5}$$

$$Q_i=X_i/C_i \tag{6}$$

$$A_i=Q_i/\sum_{i=1}^{n}Q_i \tag{7}$$

式中:C_i 为第 i 个指标的分类标准的平均值;Q_i 为第 i 个指标的实测值与第 i 个指标的分类标准的平均值的比值;A_i 为第 i 个指标的权值;k 为评价类别

数量;n 为评价指标数量。

构建权重矩阵 $\boldsymbol{A}$:

$$\boldsymbol{A}=[A_1 \quad A_2 \quad \cdots \quad A_n] \tag{8}$$

(4) 模糊综合评价。矿井水水质模糊综合评价数学模型为:

$$\boldsymbol{W}=\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{R} \tag{9}$$

式中,$\boldsymbol{W}$ 为综合评价值。

本文计算除特殊说明外,单位均为 mg·L^{-1}。

1.3.2 矿井水饮用适宜性评价标准

依据国标《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)和《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017),建立矿井水饮用适宜性评价标准,见表 2。

表 2 矿井水资源饮用适宜性分级评价标准

Table 2 Standard for grading evaluation of drinking suitability of mine water resources

水质分级	分级标准	水质评价
Ⅰ	各指标均满足Ⅲ类标准①。	适宜饮用
Ⅱ	总硬度、TDS、Cl^-、SO_4^{2-}、Na^+、Fe 等一般指标满足Ⅳ类水标准;毒理指标满足地下水质量Ⅲ类水标准。	基本适宜饮用
Ⅲ	总硬度、TDS、Cl^-、SO_4^{2-}、Na^+、Fe 等常规指标达到Ⅲ类水标准,但在Ⅲ类水标准值 3 倍以下;毒理指标满足地下水质量Ⅲ类水质标准。	一般不宜饮用,如饮用一般须经相应处理。
Ⅳ	总硬度、TDS、Cl^-、SO_4^{2-}、Na^+、Fe 等常规指标为Ⅲ类水标准值 3 倍以上,或有一项毒理指标超过地下水质量Ⅲ类水质标准。	不宜饮用,如饮用必须经过严格处理,毒理指标超标时要进行水质的监测控制。

注:①矿井水饮用适宜性评价标准中Ⅲ类标准与生活饮用水标准相一致,此表中的分级仅针对拟作饮用水的矿井水进行饮用适宜性评价。

1.3.3 矿井水灌溉适宜性评价指标

钠吸附比(SAR)表征水中 Na^+ 含量及其与土壤中阳离子交换作用,可以衡量灌溉水的咸度及造成土壤碱化程度[13]。依据 SAR 值可将灌溉用水分为 4 类[14]:非常适宜灌溉[$M_{SAR}<10$ (mmol·L^{-1})$^{1/2}$]、适宜灌溉[10 (mmol·L^{-1})$^{1/2}\leqslant M_{SAR}\leqslant$18 (mmol·L^{-1})$^{1/2}$]、不确定[18 (mmol·L^{-1})$^{1/2}<M_{SAR}\leqslant$26 (mmol·L^{-1})$^{1/2}$]及不适宜灌溉[$M_{SAR}>$26 (mmol·L^{-1})$^{1/2}$]。其计算公式为:

$$M_{SAR}=\frac{c(Na^+)}{\sqrt{(c(Ca^{2+})+c(Mg^{2+})/2}} \tag{10}$$

式中:M_{SAR} 为 SAR 计算值,(mmol·L^{-1})$^{1/2}$;$c(Na^+)$、$c(Ca^{2+})$、$c(Mg^{2+})$分别 Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+} 的浓度,mmol·L^{-1}。

可溶性钠百分比(SSP)反映灌溉水中 Na^+、K^+ 浓度的百分占比,当其浓度过高时会导致土壤渗透性较低,阻挡土壤水分运移,当 $M_{SSP}>60\%$ 时,则不宜用于农田灌溉[15]。其计算公式为:

$$M_{SSP}=\frac{c(Na^+)+c(K^+)}{c(Na^+)+c(K^+)+c(Ca^{2+})+2c(Mg^{2+})}\times 100\% \tag{11}$$

式中:M_{SSP} 为 SSP 计算值,%;$c(K^+)$ 为 K^+ 浓度,mmol·L^{-1}。

渗透性指数(PI)表示水体对土壤渗透性的影响程度,根据 PI 值将矿井水灌溉适宜性划分为 3 类[16-17]:适宜灌溉($M_{PI}>75\%$)、比较适宜灌溉($25\%\leqslant M_{PI}\leqslant 75\%$)、不适宜灌溉($M_{PI}<25\%$)。PI 的计算公式为:

$$M_{PI}=\frac{2c(Na^+)+2\sqrt{c(HCO_3^-)}}{2c(Na^+)+c(Ca^{2+})+c(Mg^{2+})}\times 100\% \tag{12}$$

式中:M_{PI} 为 PI 计算值,%;$c(HCO_3^-)$ 为 HCO_3^- 浓度,mmol·L^{-1}。

采用镁危害比(MHR)表征 Mg^{2+} 对灌溉适宜性的影响,根据 MHR 值将地下水的灌溉适宜性分为两类[18]:适宜灌溉($M_{MHR}\leqslant 50\%$),不适宜灌溉($M_{MHR}>50\%$)。其计算公式为:

$$M_{MHR}=\frac{c(Mg^{2+})}{c(Ca^{2+})+c(Mg^{2+})}\times 100\% \tag{13}$$

式中,M_{MHR} 为 MHR 计算值,%。

1.3.4 矿井水工业利用适宜性评价指标

饱和指数(LSI)表征碳酸钙固体与含二氧化碳溶液之间的平衡关系,其值等于水样实测的 pH(w_{pH})减去饱和 pH(s_{pH})所得的值[19]。根据 LSI 的值,将水样分为 5 类[20]:严重腐蚀性($-2.0\leqslant M_{LSI}\leqslant -0.5$)、轻微腐蚀性($-0.5<M_{LSI}<0$)、稳定性($M_{LSI}=0$)、轻微结垢($0<M_{LSI}<0.5$)、结垢($0.5\leqslant M_{LSI}\leqslant 2$)。其计算公式为:

$$M_{LSI}=w_{pH}-s_{pH} \tag{14}$$

$$s_{pH}=(9.3+A+B)-(C+D) \tag{15}$$

$$A=(\lg[c'(TDS)]-1)/10 \tag{16}$$

$$B=-13.2\times(\lg[T+273])+34.55 \tag{17}$$

$$C=\lg[c'(Ca^{2+})]-0.4 \tag{18}$$

$$D=\lg[c'(CaCO_3)] \tag{19}$$

式中:M_{LSI} 为 LSI 计算值;A 为总溶解固体系数;B 为温度系数;C 为钙离子浓度系数;D 为碱度系数;T 为温度,℃;$c'(TDS)$、$c'(Ca^{2+})$、$c'(CaCO_3)$分别

为 TDS、Ca^{2+}、$CaCO_3$ 质量浓度,mg·L^{-1}。

侵蚀指数(AI)可表征水体对金属的侵蚀程度[21],按照水质腐蚀能力强弱,分为严重腐蚀(M_{AI}<10)、中等腐蚀(10≤M_{AI}≤12)、不腐蚀(M_{AI}>12)。其计算公式为:

$$M_{AI}=s_{pH}+\lg[c'(Ca^{2+})\cdot c'(CaCO_3)] \quad (20)$$

式中,M_{AI}为 AI 计算值。

雷兹纳稳定指数(RSI)能够表征水中碳酸钙的析出与溶解倾向,根据 RSI 值将水样分为 3 类[22]:结垢水(M_{RSI}<6)、基本稳定(6≤M_{RSI}≤7)、腐蚀性水(M_{RSI}>7)。其计算公式为:

$$M_{RSI}=2s_{pH}-w_{pH} \quad (21)$$

式中,M_{RSI}为 RSI 计算值。

拉森比率(LR)表征水体减缓腐蚀的能力[23]。基于 LR 的分类标准,当 M_{LR}<0.8 时,水体属于结垢水质;当 0.8≤M_{LR}≤1.2 时,属于轻微结垢水质;当 M_{LR}>1.2 时,属于腐蚀水质。其计算公式为:

$$M_{LR}=\frac{c(Cl^-)+c(SO_4^{2-})}{c(HCO_3^-)} \quad (22)$$

式中:M_{LR}为 LR 计算值;$c(Cl^-)$、$c(SO_4^{2-})$分别为 Cl^-、SO_4^{2-} 浓度,mmol·L^{-1}。

2 结果与讨论

2.1 矿井水资源化利用途径

2.1.1 矿井水水化学特征

矿井水水质指标检测结果见表 3、表 4。根据矿井水水质检测结果绘制 Piper 三线图,如图 4 所示,图中每个点代表一个水质样品。

表 3 矿井水水质常规指标检测结果

Table 3 Test results of conventional water quality indications of mine water

序号	总硬度/(mg/L)	pH	TDS/(mg/L)	Na^+/(mg/L)	K^+/(mg/L)	Ca^{2+}/(mg/L)	Mg^{2+}/(mg/L)	NH_4^+/(mg/L)	SO_4^{2-}/(mg/L)	Cl^-/(mg/L)	HCO_3^-/(mg/L)	CO_3^{2-}/(mg/L)	Fe/(mg/L)
A1	1 025.8	7.56	2 626	525.0	14.8	183.0	106.0	0.12	696.4	850.8	468.0	5	0.14
A2	800.6	7.85	2 198	463.0	17.6	179.0	87.0	0.03	576.4	638.1	462.0	5	<0.05
A3	770.6	7.89	2 189	467.0	19.3	150.0	125.0	<0.02	643.6	602.6	455.0	5	<0.05
A4	950.8	7.68	2 537	521.0	23.7	229.0	123.0	<0.02	912.6	631.0	463.0	5	<0.05
B1	960.8	7.37	2 657	345.8	70.8	423.0	163.0	0.03	522.2	562.9	244.0	12	0.18
B2	388.0	7.46	2 125	401.0	42.0	429.0	163.0	0.13	532.0	592.0	258.0	12	<0.05
B3	698.0	7.31	2 337	272.0	43.4	320.0	163.0	<0.02	515.0	551.0	293.0	14	<0.05
B4	859.0	7.25	2 921	315.0	84.1	470.0	200.0	0.15	687.0	517.0	276.0	14	<0.05
C1	130.1	8.09	3 780	745.4	96.9	244.0	186.0	0.68	896.0	557.0	405.0	5	0.17
C2	860.7	7.86	3 675	669.8	17.6	200.1	106.6	2.11	826.1	503.6	417.3	0	0.18
C3	993.0	7.82	3 874	650.0	30.7	204.3	133.6	0.92	829.0	525.0	453.9	0	<0.05
C4	1 469.0	7.99	3 349	629.0	9.70	232.1	122.0	<0.02	1 225.0	650.0	407.8	0	<0.05
D1	1 667.0	6.97	4 611	2 198.0	29.0	172.1	265.2	0.21	865.0	1 672.0	427.1	0	<0.05
D2	1 727.0	6.72	4 858	2 338.0	29.9	208.4	211.8	<0.02	1 794.0	1 304.0	280.7	0	<0.05
D3	1 250.0	6.82	4 516	2 572.0	25.5	150.3	203.3	6.47	1 454.0	1 297.0	384.4	0	2.15
D4	1 341.0	6.84	5 078	1 902.0	19.8	180.4	219.7	<0.02	1 311.0	1 371.0	390.5	0	<0.05

表 4 矿井水水质毒理指标检测结果

Table 4 Test results of toxicological indices of mine water quality mg/L

序号	NO_3^-	F^-	Hg	As	Se	Cd	Cr
A1	12.2	0.40	<0.000 1	<0.001	<0.01	0.004	0.024
A2	17.6	0.40	<0.000 1	0.002	<0.01	0.005	0.026
A3	18.3	0.40	<0.000 1	0.002	<0.01	0.003	0.028
A4	15.9	0.40	<0.000 1	0.005	<0.01	0.005	0.050
B1	0.6	0.30	<0.000 1	<0.001	<0.01	0.004	0.012
B2	0.3	0.49	<0.000 1	<0.001	<0.01	0.003	0.032
B3	1.8	0.41	<0.000 1	0.003	<0.01	0.001	0.008
B4	1.6	0.52	<0.000 1	0.002	<0.01	0.003	0.003
C1	1.0	0.34	<0.000 1	<0.001	<0.01	0.001	0.012
C2	1.2	0.40	<0.000 1	<0.001	<0.01	0.003 2	0.024
C3	5.6	0.24	<0.000 1	<0.001	<0.01	0.001 6	0.001
C4	11.9	0.28	<0.000 1	0.0002	<0.01	0.006	0.003
D1	2.6	0.27	<0.000 1	<0.001	<0.01	0.001	0.032
D2	47.2	0.23	<0.000 1	<0.001	<0.01	0.001	0.024
D3	40.6	0.79	<0.000 1	0.0002	<0.01	0.001	0.016
D4	131.9	0.30	<0.000 1	0.0002	<0.01	0.032	0.001

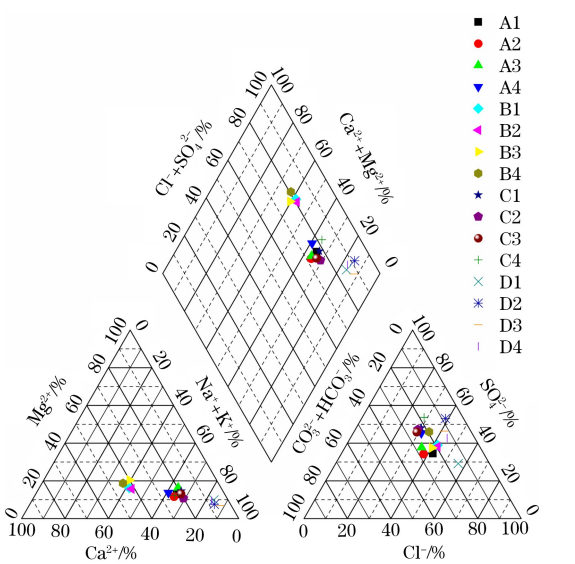


图 4 矿井水水质 Piper 三线图

Fig.4 Piper triplex map of mine water quality

从表 3 可知，裂隙水、采空区积水、火烧区积水 pH 在 7.25～8.09 之间，呈弱碱性，水仓水 pH 在 6.72～9.97 之间，呈弱酸性。各类型矿井水 TDS 均远大于 1 000 mg·L^{-1}，属于苦咸水，其中裂隙水、采空区积水 TDS 在 2 125～2 921 mg·L^{-1}之间，为淡咸水，火烧区积水、水仓水 TDS 在 3 349～5 078 mg·L^{-1}之间，为咸水，水仓水矿化度远高于其他类型矿井水。在 Piper 三线图中，同类型水样点分布密集，水化学特征基本相同，不同类型水样点分布相对分散，显示差异性。矿井水中阳离子 Na^+具有明显优势，质量浓度在 37%～88%之间，由采空区积水向水仓水优势显著增强，阴离子中 $SO_4^{2-}+Cl^-$浓度较高，质量浓度在 72%～92%之间，矿井水水化学类型主要为 SO_4^{2-}·Cl^--Na^+型。

2.1.2　矿井水系统聚类

选取 HCO_3^-、SO_4^{2-}、Cl^-、CO_3^{2-}、Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+、Fe、NH_4^+、Na^+作为指标，对水化学数据进行系统聚类分析，分类结果见图 5。

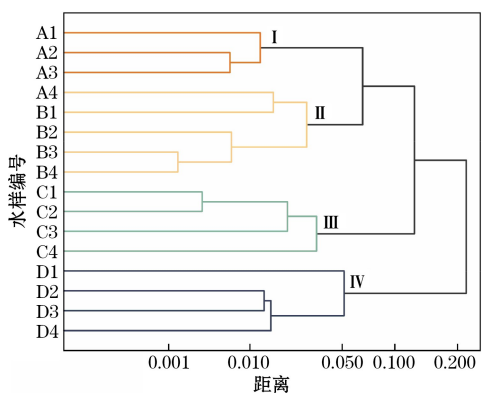


图 5　矿井水系统聚类谱系图

Fig.5　Cluster pedigree of mine water system

根据图 5 分析可知，系统聚类最大距离为 0.22，研究区同类型水样水质相似，据此可将矿井水划分为 4 个分类，Ⅰ类为裂隙水，Ⅱ类为火烧区积水，Ⅲ类为采空区积水，Ⅳ类为水仓水，其中Ⅱ类水包含 A4 水样，裂隙水与火烧区积水水质较为接近。

2.1.3　矿井水模糊综合评价

根据模糊综合评价法步骤对榆树岭矿区各样品水质进行评价，评价结果见表 5。由表 5 可知，模糊综合评价矿井水Ⅴ类水隶属度在 0.812～0.991 之间，水质评价结果均为Ⅴ类，水化学组分含量高，需要经过处理后才能用于各个场景。因此，初步分析该研究区矿井水存在饮用、灌溉以及工业三种利用途径，根据使用目的需要进一步对分源矿井水分析、评价，以确定其饮用适宜性、灌溉适宜性以及工业用水适宜性。

表 5　矿井水模糊综合评价结果

Table 5　Results of fuzzy comprehensive evaluation of mine water resources

序号	水样类型	隶属度					评价结果
		Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类	Ⅳ类	Ⅴ类	
A1	裂隙水	0.029	0.000	0.000	0.000	0.971	Ⅴ类
A2		0.036	0.000	0.000	0.000	0.964	Ⅴ类
A3		0.037	0.000	0.000	0.000	0.963	Ⅴ类
A4		0.033	0.000	0.000	0.000	0.967	Ⅴ类
B1	采空区积水	0.029	0.000	0.000	0.087	0.884	Ⅴ类
B2		0.051	0.000	0.110	0.009	0.830	Ⅴ类
B3		0.040	0.000	0.033	0.113	0.812	Ⅴ类
B4		0.047	0.000	0.000	0.127	0.827	Ⅴ类
C1	火烧区积水	0.061	0.000	0.000	0.000	0.939	Ⅴ类
C2		0.030	0.000	0.000	0.000	0.969	Ⅴ类
C3		0.021	0.000	0.000	0.000	0.978	Ⅴ类
C4		0.020	0.000	0.000	0.000	0.980	Ⅴ类
D1	水仓水	0.009	0.000	0.000	0.000	0.991	Ⅴ类
D2		0.009	0.001	0.000	0.000	0.991	Ⅴ类
D3		0.022	0.000	0.024	0.007	0.946	Ⅴ类
D4		0.009	0.006	0.000	0.000	0.984	Ⅴ类

2.2　矿井水饮用适宜性评价

依据表 2 分别对裂隙水、采空区积水、火烧区积水、水仓水进行饮用适宜性评价分析，具体评价结果见表 6。

表 6　矿井水饮用适宜性评价结果

Table 6　Evaluation results of mine water suitability for drinking

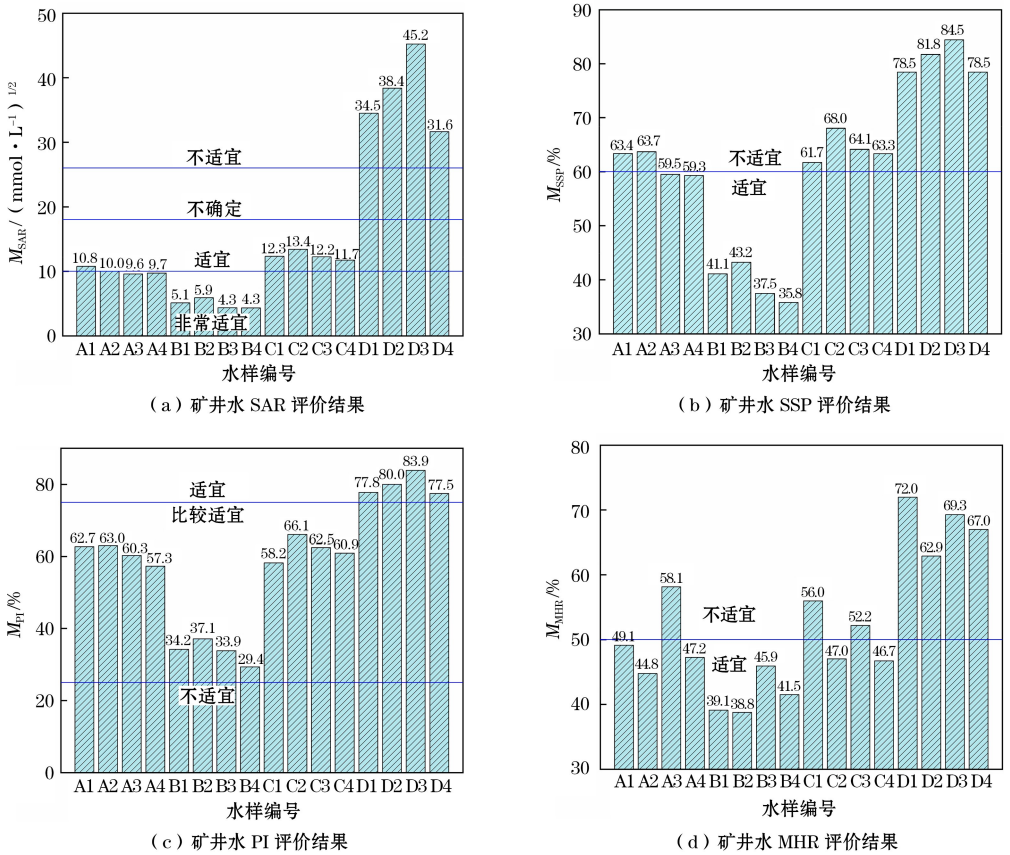
序号	水样类型	分级	评价结果	综合评价
A1	裂隙水	Ⅳ	不宜饮用	不宜饮用
A2		Ⅲ	一般不宜饮用	
A3		Ⅲ	一般不宜饮用	
A4		Ⅳ	不宜饮用	
B1	采空区积水	Ⅲ	一般不宜饮用	一般不宜饮用
B2		Ⅲ	一般不宜饮用	
B3		Ⅲ	一般不宜饮用	
B4		Ⅲ	一般不宜饮用	
C1	火烧区积水	Ⅳ	不宜饮用	不宜饮用
C2		Ⅳ	不宜饮用	
C3		Ⅳ	不宜饮用	
C4		Ⅳ	不宜饮用	
D1	水仓水	Ⅳ	不宜饮用	不宜饮用
D2		Ⅳ	不宜饮用	
D3		Ⅳ	不宜饮用	
D4		Ⅳ	不宜饮用	

由表 6 可知，由于受地层矿物溶滤以及采矿活动等因素的影响，矿区各类型矿井水水质较差，饮用适宜性较低。其中，采空区积水饮用适宜性均为Ⅲ

级,综合评价一般不宜饮用,如需饮用,需经相应的处理;火烧区积水和水仓水饮水适宜性均为Ⅳ级,裂隙水饮用适宜性部分Ⅲ级、部分Ⅳ级,以上三类水综合评价为不宜饮用,如需饮用必须经过严格处理,毒理指标超标时要进行水质的监测控制。

2.3 矿井水灌溉适宜性评价

根据式(10)至式(13)对各类矿井水的 SAR、SSP、PI 与 MHR 值进行计算,评价结果见图 6。



(a) 矿井水 SAR 评价结果　(b) 矿井水 SSP 评价结果

(c) 矿井水 PI 评价结果　(d) 矿井水 MHR 评价结果

图 6 矿井水灌溉适宜性评价结果

Fig.6 Evaluation result of irrigation suitability of mine water

由图 6(a)可知,裂隙水、采空区积水、火烧区积水 SAR 值在 4.3～13.4 (mmol·L^{-1})$^{1/2}$之间,碱危害性较小,适宜灌溉,而水仓水 SAR 最小值为 31.6 (mmol·L^{-1})$^{1/2}$,大于 26 (mmol·L^{-1})$^{1/2}$,直接用于灌溉可能会造成土壤碱化,从而影响植物生长和农业生产。

由图 6(b)可知,采空区积水可溶性钠百分比(SSP 值)为 35.8%～43.2%,符合要求,可直接用于灌溉,裂隙水 SSP 值为 59.3%～63.7%,其中 A3、A4 水样适宜灌溉,A1、A2 水样不适宜灌溉,计算值处于评价分界线附近,导致评价结果出现显著差异,而火烧区积水、水仓水 SSP 值在 61.7%～84.5%之间,均不符合要求,其中水仓水可溶性钠百分比较高,用于灌溉会使得土壤渗透性降低,导致土壤中水分运移受阻。

由图 6(c)可知,矿井水渗透指数(PI 值)在 29.4%～83.9%之间,均大于 25%,以该指标进行评价,显示各类型水资源均适宜灌溉,基本不会影响土壤的渗透性。

由图 6(d)可知,采空区积水镁危害比指数(MHR 值)为 38.8%～45.9%,均小于 50%,适合作为灌溉用水;水仓水的 MHR 值为 62.9%～72.0%,碱度危害较大,直接用于灌溉会影响农作物和植物的生长;裂隙水 MHR 值在 44.8%～58.1%之间,仅 A3 水样超过灌溉适宜性阈值,推测为取样地点不同所导致的;火烧区积水镁危害比指数为 46.7%～56.0%,C2、C4 水样小于 50%,C1、C3 水样大于 50%,该类型水 MHR 值在评价界限范围附近波动,具备灌溉利用潜力。

以上述 4 种评价指标为依据,对矿井水灌溉适宜性进行综合评价,综合评价结果见表 7。

表 7　矿井水灌溉适宜性综合评价结果

Table 7　Comprehensive evaluation results of irrigation suitability of mine water

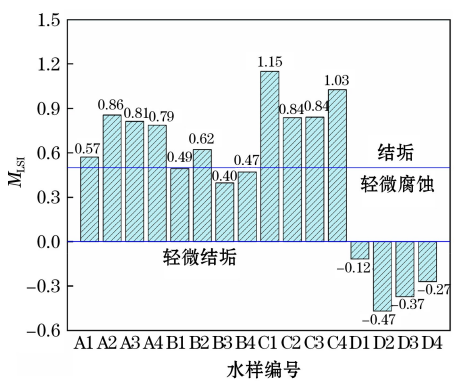
序号	水样类型	单指标评价				评价结果	综合评价
		SAR	SSP	PI	MHR		
A1	裂隙水	适宜	不适宜	比较适宜	适宜	比较适宜	比较适宜
A2		适宜	不适宜	比较适宜	适宜	比较适宜	
A3		非常适宜	适宜	比较适宜	不适宜	比较适宜	
A4		非常适宜	适宜	比较适宜	适宜	适宜	
B1	采空区积水	非常适宜	适宜	比较适宜	适宜	适宜	适宜
B2		非常适宜	适宜	比较适宜	适宜	适宜	
B3		非常适宜	适宜	比较适宜	适宜	适宜	
B4		非常适宜	适宜	比较适宜	适宜	适宜	
C1	火烧区积水	适宜	不适宜	比较适宜	不适宜	不适宜	基本不适宜
C2		适宜	不适宜	比较适宜	适宜	比较适宜	
C3		适宜	不适宜	比较适宜	不适宜	不适宜	
C4		适宜	不适宜	比较适宜	适宜	比较适宜	
D1	水仓水	不适宜	不适宜	适宜	不适宜	不适宜	不适宜
D2		不适宜	不适宜	适宜	不适宜	不适宜	
D3		不适宜	不适宜	适宜	不适宜	不适宜	
D4		不适宜	不适宜	适宜	不适宜	不适宜	

由表 7 可知，不同类型矿井水灌溉适宜性差异显著，采空区积水最适宜灌溉，裂隙水次之，而火烧区积水和水仓水的灌溉适宜性相对较差。裂隙水 A1、A2、A3 水样均仅有一项指标为不适宜，评价结果为比较适宜；A4 水样各指标均无不适宜评价，评价结果为适宜；综合评价该类型水比较适宜灌溉，可作为常规灌溉用水使用。采空区积水各水样单项评价指标均为比较适宜及以上水平，综合评价为适宜，该类型水的灌溉适宜性较好，可用于灌溉对水质要求较高的植被及农作物。火烧区积水 C1、C3 水样均有两项指标为不适宜，评价结果为不适宜，C2、C4 水样评价结果为比较适宜，综合评价该类型水基本不适宜灌溉，不能直接作为灌溉水利用，但根据图 5 分析可知，该类型水指标评价不适宜为 SSP 和 MHR 两项，并且其值主要在评价分界线附近，说明火烧区积水具备潜在灌溉适宜性，当该地区水资源匮乏并且植被抗逆性较强时，可作为灌溉用水，或者在经过一定程度处理达标后再进行利用。水仓水 SAR、SSP、MHR 评价指标均为不适宜，综合评价为不适宜灌溉，直接使用该类型水进行浇灌会破坏土壤理化性质，导致土壤劣化，严重限制种植植被的成活和生长发育，所以作为灌溉水利用前必须进行深度处理。

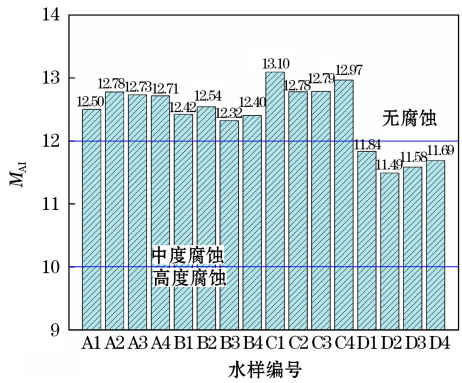
2.4　矿井水工业用水适宜性评价

根据公式(14)至式(22)对矿井水的 LSI、AI、RSI 和 LR 进行计算，评价其工业用水适宜性，计算结果见图 7。

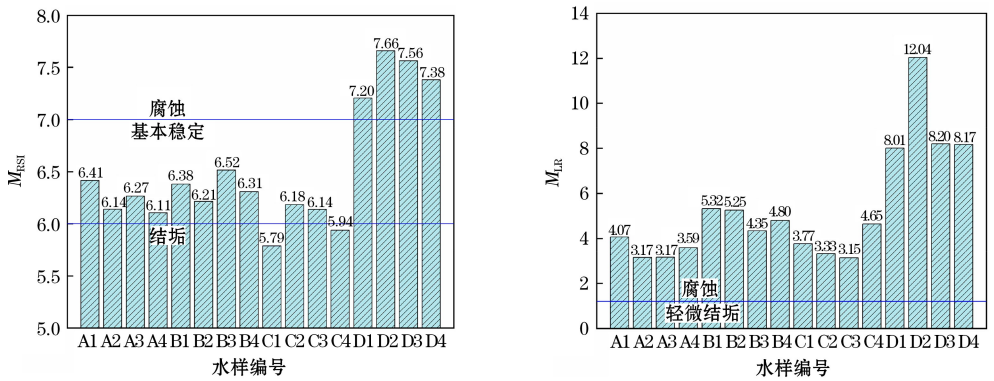
由图 7(a)、图 7(b)可知，裂隙水、采空区积水、火烧区积水 LSI 值为 0.40～1.15，AI 值为 12.32～13.10，均无腐蚀性，能够作为工业用水，并且 B1、B2、B4 水样 LSI 指标显示为轻微结垢，采空区积水的工业用水适用性较高，而水仓水的 LSI 值均小于 0，AI 值小于 12，具有腐蚀性，一般不能作为工业用水。



(a) 矿井水 LSI 评价结果



(b) 矿井水 AI 评价结果



(c) 矿井水 RSI 评价结果　　(d) 矿井水 LR 评价结果

图 7　矿井水工业利用适宜性评价结果

Fig.7　Evaluation result of suitability of mine water for industrial utilization

由图 7(c)可知,裂隙水、采空区积水 RSI 值在 6.11～6.52 之间,水质稳定,无腐蚀和结垢倾向,工业适用性较高,火烧区积水 RSI 值为 5.79～6.18,C1、C4 水样属于结垢型水,C2、C3 水样属于稳定性水,可直接进行工业利用,水仓水 RSI 值均大于 7,具备腐蚀性,直接利用会对容器及管道造成损伤。

由图 7(d)可知,矿井水 LR 值在 3.15～12.04 之间,通过该指标评价矿区各类型水样均具有腐蚀性,其中,裂隙水、采空区积水、火烧区积水 LR 值较低,处于低腐蚀性水平,水仓水 LR 值较高,腐蚀性较强,工业用水适宜性较差。

以上述四种评价指标为依据,对矿井水工业用水适宜性进行综合评价,综合评价结果见表 8。

由表 8 可知,在研究区的各类矿井水中,采空区积水的工业用水适宜性极高,裂隙水、火烧区积水亦具备工业用水适宜性,而水仓水的水质较差,不能作为工业用水直接利用。采空区积水 AI、RSI 评价均为稳定水质,LSI 评价显示仅轻微结垢,LR 值也相对较低,综合评价为非常适宜,适合用作各种工业场景的用水。裂隙水、火烧区积水仅 LR 值处于低腐蚀水平,其余评价均无腐蚀性,综合评价适宜作为工业用水,但是根据 LSI 及 RSI 评价指标,两种类型水均为结垢型水,且火烧区积水的结垢能力更强,在进行工业利用时应考虑进行定期除垢。水仓水四项评价指标均显示具有腐蚀性,综合评价结果为不适宜,该类型水的工业用水适宜性较差,一般不能直接进行工业利用,需进行水质净化处理或接触对象涂有防腐蚀镀层时,才能作为工业用水使用。

表 8　矿井水工业用水适宜性综合评价结果

Table 8　Comprehensive evaluation results of suitability of mine water for industrial utilization

序号	水样类型	单指标评价结果				评价结果	综合评价
		LSI	AI	RSI	LR		
A1	裂隙水	结垢	无腐蚀	基本稳定	腐蚀	适宜	适宜
A2		结垢	无腐蚀	基本稳定	腐蚀	适宜	
A3		结垢	无腐蚀	基本稳定	腐蚀	适宜	
A4		结垢	无腐蚀	基本稳定	腐蚀	适宜	
B1	采空区积水	轻微结垢	无腐蚀	基本稳定	腐蚀	非常适宜	非常适宜
B2		结垢	无腐蚀	基本稳定	腐蚀	适宜	
B3		轻微结垢	无腐蚀	基本稳定	腐蚀	非常适宜	
B4		轻微结垢	无腐蚀	基本稳定	腐蚀	非常适宜	
C1	火烧区积水	结垢	无腐蚀	结垢	腐蚀	比较适宜	适宜
C2		结垢	无腐蚀	基本稳定	腐蚀	适宜	
C3		结垢	无腐蚀	基本稳定	腐蚀	适宜	
C4		结垢	无腐蚀	结垢	腐蚀	比较适宜	
D1	水仓水	腐蚀	中等腐蚀	腐蚀	腐蚀	不适宜	不适宜
D2		腐蚀	中等腐蚀	腐蚀	腐蚀	不适宜	
D3		腐蚀	中等腐蚀	腐蚀	腐蚀	不适宜	
D4		腐蚀	中等腐蚀	腐蚀	腐蚀	不适宜	

3　结论

(1) 榆树岭矿区各类型矿井水 TDS 均远大于 1 000 mg·L^{-1}，属于苦咸水，Na^+ 质量浓度在 37%～88%之间，SO_4^{2-} + Cl^- 质量浓度在 72%～92%之间，水化学类型主要为 SO_4^{2-}·Cl^--Na^+ 型，系统聚类最大距离为 0.22，模糊综合评价矿井水Ⅴ类水质隶属度在 0.812～0.991 之间，水化学组分含量高，需要经过深度处理后才能应用于各个场景。

(2) 裂隙水、采空区积水、火烧区积水、水仓水饮用适宜性评价结果均为Ⅲ级、Ⅳ级，受地层矿物溶滤以及采矿活动等因素的影响，矿区各类型水资源水质较差，不适宜饮用，如需饮用必须经过严格处理，且毒理指标超标时要进行水质的监测控制。

(3) 各类型矿井水灌溉适宜性差距较大，裂隙水、采空区积水 SAR[4.3～10.8 (mmol·L^{-1})$^{1/2}$]、SSP(35.8%～63.7%)、PI(29.4%～63.0%)、MHR(38.8%～58.1%)评价结果为基本能作为灌溉水直接使用；火烧区积水 SSP 值超过 60%，MHR 值部分低于 50%，灌溉适宜性较差，但在一定条件下可作为灌溉用水；水仓水 SAR、SSP、MHR 指标评价结果均为不适宜，对土壤碱度和渗透性危害较大，必须进行处理达标后才能用于灌溉。

(4) 研究区内裂隙水、采空区积水、火烧区积水 LSI(0.40～1.15)、AI(12.32～13.10)、RSI(5.8～6.5)评价结果为基本无腐蚀性，可直接作为工业用水使用，其中，采空区积水水质稳定，适合用作各种工业场景的用水，裂隙水、火烧区积水 LSI 值为 0.6～1.2，属于结垢型水，在利用时应考虑除垢。水仓水 AI、RSI、LR 评价结果均具有腐蚀性，一般不能直接进行工业利用，需进行水质净化或对接触体进行防腐蚀处理后，才可用作工业用水。

参考文献(References)：

[1] 刘峰，郭林峰，张建明，等.煤炭工业数字智能绿色三化协同模式与新质生产力建设路径[J].煤炭学报，2024，49(1)：1-15.
LIU Feng, GUO Linfeng, ZHANG Jianming, et al. Synergistic mode of digitalization-intelligentization-greeniation of the coal industry and it's path of building new coal productivity[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 1-15.

[2] 武强，涂坤，曾一凡，等.打造我国主体能源(煤炭)升级版面临的主要问题与对策探讨[J].煤炭学报，2019，44(6)：1625-1636.
WU Qiang, TU Kun, ZENG Yifan, et al. Discussion on the main problems and countermeasures for building an upgrade version of main energy (coal) industry in China[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6): 1625-1636.

[3] 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.

[4] 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.

[6] OBIORA S C, CHUKWU A, DAVIES T C. Contamination of the potable water supply in the lead-zinc mining communities of Enyigba, Southeastern Nigeria[J]. Mine Water and the Environment, 2019, 38(1): 148-157.

[7] 王昱同，王皓，王甜甜，等.蒙陕接壤浅埋煤层区矿井水水化学特征及资源化利用研究[J].煤炭科学技术，2022，50(增刊2)：423-432.
WANG Yutong, WANG Hao, WANG Tiantian, et al. Study on mine water hydrochemical characteristics and resource utilization in shallow buried coal seams in Shaanxi and Inner Mongolia Contiguous Area[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(Suppl.2): 423-432.

[8] 石金芳，吴攀，张瑞雪，等.煤矿排水影响下的水体水质特征及灌溉适宜性评价：以贵州织金县贯城河小流域为例[J].节水灌溉，2016(11)：71-76.
SHI Jinfang, WU Pan, ZHANG Ruixue, et al. Water quality characteristics and irrigation suitability evaluation under the influence of coal mine drainage: a case study of the river watershed in Zhijin, Guizhou[J]. Water Saving Irrigation, 2016(11): 71-76.

[9] 王晶，薛联青，张洛晨，等.阿克苏地区水资源承载力变化及驱动力生态脆弱性分析[J].水资源与水工程学报，2018，29(2)：104-109+115.
WANG Jing, XUE Lianqing, ZHANG Luochen, et al. Analysis on the changes of water resources carrying capacity and its driving force ecological vulnerability in Akesu Region[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(2): 104-109+115.

[10] YANG P, ZHANG S Q, XIA J, et al. Risk assessment of water resource shortages in the Aksu River basin of northwest China under climate change[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 305: 114394.

[11] 黄泽霖，刘允全，何乐，等.基于指数法和模糊综合评价法对盘龙铅锌矿区的水质分析与评价[J].中国科技论文，2023，18(9)：972-980.

HUANG Zelin, LIU Yunquan, HE Le, et al. Analysis and evaluation of water quality in Panlong Lead-Zinc Mine based on index method and fuzzy comprehensive evaluation method [J]. China Sciencepaper,2023,18(9):972-980.

[12] 史陈雪,刘庆庆,杨艳霞,等.黄河流域中小河流水质评价的比较研究[J].河南师范大学学报(自然科学版),2024,52(1):16-28.
SHI Chenxue, LIU Qingqing, YANG Yanxia, et al. Comparative study on water quality assessment of small and medium-sized rivers in the Yellow River Basin[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2024,52(1):16-28.

[13] 刘宏伟,胡云壮,马震,等.莱州湾南岸浅层地下水咸化特征及其指示意义[J].节水灌溉,2019(5):71-76.
LIU Hongwei, HU Yunzhuang, MA Zhen, et al. Characteristics of shallow groundwater salinization and its indication in southern Laizhou bay area[J]. Water Saving Irrigation,2019(5):71-76.

[14] JANDU A, MALIK A, DHULL S B. Fluoride and nitrate in groundwater of rural habitations of semiarid region of northern Rajasthan, India: a hydrogeochemical, multivariate statistical, and human health risk assessment perspective[J]. Environmental Geochemistry and Health,2021,43(10):3997-4026.

[15] 王甜甜,杨建,赵伟.沙地生态脆弱区矿井水资源灌溉适宜性评价[J].节水灌溉,2022(1):20-25.
WANG Tiantian, YANG Jian, ZHAO Wei. Evaluation of suitability of mine water resources for irrigation in sandy ecologically vulnerable areas[J]. Water Saving Irrigation, 2022(1):20-25.

[16] TRABELSI R, ZOUARI K. Coupled geochemical modeling and multivariate statistical analysis approach for the assessment of groundwater quality in irrigated areas: a study from north eastern of Tunisia [J]. Groundwater for Sustainable Development,2019,8:413-427

[17] 李泽岩,曹文庚,王卓然,等.内蒙古河套灌区浅层地下水化学特征和灌溉适宜性分析[J].现代地质,2022,36(2):418-426.
LI Zeyan, CAO Wengeng, WANG Zhuoran, et al. Hydrochemical characterization and irrigation suitability analysis of shallow groundwater in Hetao irrigation district, Inner Mongolia[J]. Geoscience,2022,36(2):418-426.

[18] 张雨.天津市平原区地下水水化学成因及功能性评价[D].天津:天津科技大学,2021.
ZHANG Yu. Chemical origin and functional evaluation of groundwater in Tianjin plain area [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2021.

[19] LANGELIER W F. The analytical control of anti-corrosion water treatment [J]. Journal American Water Works Association,1936,28(10):1500-1521.

[20] 沈雪,张健,林会杰,等.基于纳滤处理工艺的水质化学稳定性研究[J].给水排水,2022,58(9):13-19.
SHEN Xue, ZHANG Jian, LIN Huijie, et al. Reserch on chemical stability of water based on nanofiltration treatment process[J]. Water and Wastewater Engineering, 2022, 58(9):13-19.

[21] 代雪宁,李伟英,李悦,等.中国南北两城市饮用水水质化学稳定性对比研究[J].中国给水排水,2023,39(1):39-44.
DAI Xuening, LI Weiying, LI Yue, et al. Comparison of drinking water quality chemical stability between a northern city and a southern city in China[J]. China Water and Wastewater,2023,39(1):39-44.

[22] RYZNAR J W. A new index for determining amount of calcium carbonate scale formed by a water[J]. Journal American Water Works Association,1944,36(4):472-483.

[23] LARSON T E, SKOLD R V, et al. Laboratory studies relating mineral quality of water to corrosion of steel and cast iron[J]. Corrosion,1958,14(6):215-218.