基于 Piper-GRA 的矿井涌水水源识别研究*

刘茂新[1,2]，张义平[3]，郑禄林[3]

（1.六盘水市自然资源局， 贵州 六盘水市 553000；
2.六盘水市自然资源储备交易中心， 贵州 六盘水市 553000；
3.贵州大学 矿业学院， 贵州 贵阳 550025）

摘要：为解决贵州明泥湾磷矿井下出现的大量涌水问题，在确定地表河流水量出现大量损失的情况下，采集井下6个涌水点、白云岩含水层及洋水河的水样进行水化学特征分析。选取 Ca^{2+}、Mg^{2+}、$Na^{+}+K^{+}$、SO_4^{2-}、Cl^{-}、HCO_3^{-} 共6种水化学成分作为判别指标，应用 Piper 三线图结合灰色关联分析（GRA）的方法判别井下涌水水源。结果表明，洋水河、368 m 沉砂池、490 m 水仓、440 m 采空场、524 m 水仓、520 m 平巷水样的水化学类型均为 $HCO_3^{-}\cdot SO_4^{2-}-Ca^{2+}\cdot Mg^{2+}$ 型，650 m 主斜坡面与白云岩含水层水样为 $HCO_3^{-}-Ca^{2+}\cdot Mg^{2+}$ 型；440 m 采空场涌水水源为洋水河水流的可能性最大，与洋水河关联度最高，为0.94；650 m 主斜坡面与洋水河关联度最低，但与白云岩含水层关联度达0.86，属强关联等级，表明其涌水水源为白云岩含水层的可能性较高。Piper-GRA 联合分析法为涌水来源识别提供了有效技术方案，可为后续制定防治水措施提供科学依据。

关键词：矿井涌水；水源识别；水化学特征；Piper 三线图；灰色关联度分析

中图分类号：TD745；P641　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2026)08-0143-08

Identification of Mine Inflow Water Sources Based on Piper-GRA

Liu Maoxin[1,2], *Zhang Yiping*[3], *Zheng Lulin*[3]

(1.Liupanshui Municipal Natural Resources Bureau, Liupanshui, Guizhou 553000, China;
2.Liupanshui Municipal Natural Resources Reserve Trading Center, Liupanshui, Guizhou 553000, China;
3.Mining College of Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract: To address the severe water inflow issue in the underground workings of the Mingniwan Phosphate Mine in Guizhou, after confirming substantial water loss from the surface river, water samples were collected from six underground water inflow points, the dolomite aquifer, and the Yangshui River for hydrochemical analysis. Six hydrochemical components, Ca^{2+}, Mg^{2+}, $Na^{+}+K^{+}$, SO_4^{2-}, Cl^{-} and HCO_3^{-}, were selected as discrimination indicators. The Piper trilinear diagram combined with Grey Relational Analysis (GRA) was applied to identify the sources of underground water inflow. The results show that the hydrochemical types of water samples from the Yangshui River, the 368 m grit chamber, the 490 m water sump, the 440 m goaf, the 524 m water sump, and the 520 m drift are all $HCO_3^{-}\cdot SO_4^{2-}-Ca^{2+}\cdot Mg^{2+}$ type, while those from the 650 m main slope surface and the dolomite aquifer are $HCO_3^{-}-Ca^{2+}\cdot Mg^{2+}$ type. The water inflow source in the 440 m goaf is most likely from the Yangshui River, with the highest correlation degree of 0.94. The 650 m main slope surface shows the lowest correlation with the Yangshui River, but its correlation degree with the dolomite aquifer reaches 0.86, indicating a strong correlation, suggesting that the dolomite aquifer is a highly probable water inflow source. The Piper-GRA combined analysis method provides an effective technical solution for identifying water inflow sources and can serve as a scientific basis for subsequent formulation of water prevention and control measures.

Key words: Mine water inflow, Water source identification, Hydrochemical characteristic, Piper trilinear diagram, Grey Relational Analysis

---

* **收稿日期**：2026-06-02

基金项目：国家自然科学基金项目(52474127)；贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑〔2022〕一般248)；贵州省六盘水市“十五五”规划前期重大课题(六盘水发改规划2024-88)；贵州省科技合作支持项目(黔科合支撑〔2022〕一般001)

作者简介：刘茂新(1989—)，男，贵州石阡人，硕士，高级工程师，主要从事地质勘查、矿产资源开发与管理研究。E-mail:978948028@qq.com

通信作者：张义平(1970—)，男，湖南邵东人，博士，教授，主要从事矿山灾害防治、岩层控制、工程爆破技术等研究。E-mail:526575370@qq.com

0 引言

在贵州省深入实施“富矿精开”的战略背景下,资源的精细化、高效化开采已成为保障区域资源安全与经济发展的关键。然而,贵州广泛分布的喀斯特地貌导致水文地质条件极为复杂,矿山水害问题突出,严重制约了矿山资源安全精准开发[1-3]。近年来,随着开采深度的增加,贵州明泥湾磷矿井下多处出现大量涌水,单点最大涌水量达 5 845 m^3/h,平均涌水量 316 m^3/h,涌水量随季节呈周期性变化。2023 年 1 月至 5 月,井下泵站平均排水量为 2 109 m^3/h,其中 1 号泵站为 1 532 m^3/h,2 号泵站为 577 m^3/h。同期,对地表洋水河的流量进行测量,得出明泥湾段平均流量损失为 1 964 m^3/h。矿井涌水问题已严重影响井下的正常作业与安全运行。解决该问题的前提是,结合地表河流特征与矿井地质构造,选取矿井涌水水样、地表河流水样及含水层水样进行水化学特征分析,精准识别矿井水源,从而提前做好防治水措施,预防水害事故的发生。

目前,水源识别的方法主要包括选取水化学成分作为评价指标并建立判别模型。如 Li Bo 等[4]选取 9 种水化学指标,采用主成分分析算法(Principal Component Analysis, PCA)降维后利用 K 维树(KD-tree)优化 K 最邻近(K-Nearest Neighbor, KNN)算法的搜索效率,构建 PCA-KD-KNN 判别模型,识别准确率较传统 KNN 提高 25%。华星月等[5]利用核主成分分析(Kernal Principal Component Analysis, KPCA)进行特征降维,通过灰狼优化算法(Grey Wolf Optimizer, GWO)搜寻支持向量机(Support Vector Machines, SVM)的最优参数,构建 KPCA-GWO-SVM 模型。施龙青等[6]利用主成分分析算法(PCA)进行降维,使用粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)优化极限学习机神经网络(Extreme Learning Machine, ELM),建立基于 PCA-PSO-ELM 的突水水源判别模型。于小鸽等[7]构建 Fisher 线性判别模型和朴素 Bayes 分类模型,并进行突水水源判别比较。苏玮等[8]构建了基于客观组合权法与改进集对分析模型,对不同含水层的水样进行识别。秋兴国等[9]利用 PCA 对水质离子进行方差贡献率分析,然后采用变异系数法计算权重,建立改进 Bayes 水源判别模型,并将预测结果与基础 Bayes 模型的结果进行对比。顾爱民等[10]利用层次聚类分析法(Hierarchical Clustering Analysis, HCA)对含水层进行亚类划分,在亚类划分结果的基础上建立 HCA-Bayes 矿井涌水水源识别模型,并将识别结果与单一 Bayes 模型进行对比。赵世毫等[11]基于 Piper 三线图与灰色关联度分析,结合模糊综合判别法识别近地表井壁涌水来源。耿铭等[12]对原始指标标准化后,采用 PCA 提取累积方差贡献率>85%的主成分以消除共线性,继而运用熵值法计算信息熵与权重,构建综合评价模型用于水源识别。

上述模型在水源识别中均表现出良好的适用性,有效提高了水源判别的精确性。然而,现有研究多基于含水层水样的水化学特征进行分析,对矿井周边地表水体的关注较少。为此,本文选取井下 6 处涌水点、地表洋水河渗漏河段及白云岩含水层作为采样点,系统采集水样并开展水化学特征分析。首先运用 Piper 三线图划分水样的水化学类型,继而采用灰色关联度分析法(Grey Relational Analysis, GRA)定量评估井下涌水与洋水河的相关程度,从而精准判别矿井涌水水源。

相较于已有研究,本研究的主要创新在于:首先,将 Piper-GRA 联合分析方法应用于磷矿涌水水源识别——磷矿区的岩溶水文地质条件与煤矿存在显著差异,水岩相互作用及水化学演化特征不同,丰富了该方法在磷矿区的应用案例;其次,系统构建了地表河流与井下涌水的联合分析框架,将地表洋水河实测流量损失(平均 1 964 m^3/h)作为水源识别的辅助约束条件,弥补了以往研究仅依靠含水层水样进行水源判别的不足;最后,Piper 三线图定性水化学分类与 GRA 定量关联度排序相结合的判别方法,仅需 6 项常规水化学离子指标,数据需求低、解释性强,适用于监测条件有限的矿山。

1 研究区概况

开阳县永温镇明泥湾磷矿位于贵州省开阳县城北西约 14 km 处,隶属开阳县永温镇安大村[13],明泥湾磷矿地处云贵高原的中山丘陵地区,属高原剥蚀型中山、中低山山地、河谷地貌类型,海拔 692.0~1 060.9 m,最大相对高差为 368.9 m,总体地势南东

高、北西低。明泥湾矿区气候温和，雨量充沛，干湿分明，属亚热带湿润季风气候区。最高气温 36.5 ℃，最低气温－7.6 ℃。年平均降雨量 1 132.4 mm，年平均蒸发量 1 385.1 mm。矿区地质综合特征如图 1 所示。

界	系	统	组	代号	柱状图(1∶2 000)	厚度/m	岩性描述
新生界	第四系	全新统		Q		0.00~15.00	岩性主要为黏土、亚黏土等残坡积物。
下古生界	寒武系	下统	清虚洞组	$\in_1$q		>50.00	岩性主要为薄至中厚层豹皮状细晶灰岩。
			金顶山组	$\in_1$j		200.00~340.00	岩性主要为粉砂岩。
			明心寺组	$\in_1$m		280.00~396.00	岩性主要为砂质页岩。
			牛蹄塘组	$\in_1$n		80.86~140.72	岩性主要为黑色炭质页（泥）岩。
新元古界	震旦系	上统	灯影组	Z_2dn^5		10.12~37.00	岩性主要为泥质白云岩。
				Z_2dn^4		64.47~73.27	岩性主要为厚层细晶白云岩，底部为中厚层花斑状白云岩。
				Z_2dn^3		21.69~55.67	岩性主要为中厚层碎花状及条带状细晶白云岩，底部为内碎屑谷壳状白云岩。
				Z_2dn^{1+2}		71.71~138.98	上部厚层、中厚层主要为条带状，碎花状细晶白云岩；底部为中厚层缅状细晶白云岩及中厚层含锰白云岩。
		下统	陡山沱组	Z_1d		15.13~26.25	上部为条带状细晶含锰白云岩与硅质岩互层；中部为致密状、碎屑状及条带状磷块岩；下部含磷砂质砾岩。
	南华系	上统	南沱组	Nh_2n		>100.00	岩性主要为页岩。

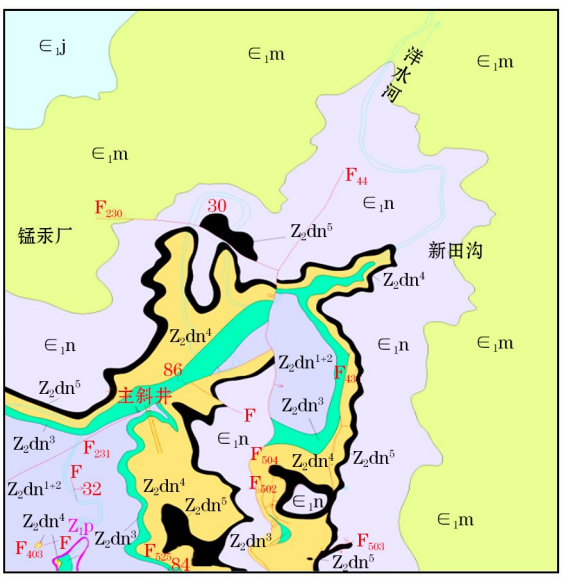
图 1　明泥湾磷矿地质综合特征

Fig.1　Comprehensive geological characteristics of Mingniwan Phosphate Mine

选取的研究范围为洋水河明泥湾段，该区域出露的含水层以震旦系上统灯影组（Z_2dn）白云岩含水层为主，如图 2 所示。区内属乌江水系，主要河流为洋水河与风岩河。洋水河发源于洋水背斜南倾伏端的洋桥附近，主要由大气降水及灯影组白云岩泉水补给[14]，最终流入乌江。洋水河明泥湾段河床海拔 694～725 m，总体流向由南向北，一般流量 14 400 m^3/h，最大流量 47 000 m^3/h，最小流量 600 m^3/h。洋水河明泥湾段贯穿矿区，全长 3.8 km，上游河宽 4～9 m，下游河宽 5～12 m，水深 0.1～0.8 m。矿区南边界至二期污水处理厂河床地层为震旦系上统灯影组（Z_2dn）白云岩含水层[15]，二期污水处理厂以北河床为寒武系下统牛蹄塘组（$\in_1$n）及明心寺组（$\in_1$m）相对隔水层。风岩河流量 30～800 m^3/h，在主斜井入口上游 200 m 处汇入洋水河，水量受季节影响明显。

2　水化学分析及 Piper 三线图分析

结合明泥湾磷矿水文地质资料，选取 368 m 沉砂池、524 m 水仓、490 m 水仓、650 m 主斜坡面、440 m 采空场、520 m 平巷 6 个点作为地下水涌水采样点，1 个白云岩含水层采样点，主斜井入口上游渗漏河段作为地表水采样点。将不同含水层的水样资料进行编号，分别选取 $p(Ca^{2+})$、$p(Mg^{2+})$、$p(Na^+ + K^+)$、$p(Cl^-)$、$p(SO_4^{2-})$、$p(HCO_3^-)$作为水源判别模型中的水质判别指标，具体数据见表 1。



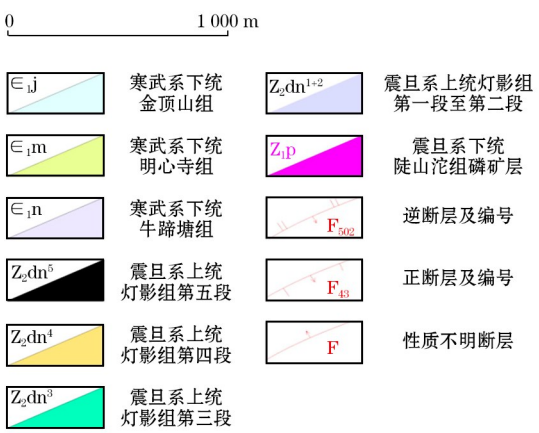


图 2　洋水河明泥湾段地质构造特征

Fig.2　Geological structure characteristics of Mingniwan section of Yangshui River

表 1 各采样点主要化学成分分析数据

Table 1 Analysis data of main chemical components at each sampling point

编号	采样点名称	$p(Ca^{2+})$/(mg/L)	$p(Mg^{2+})$/(mg/L)	$p(Na^{+}+K^{+})$/(mg/L)	$p(Cl^{-})$/(mg/L)	$p(SO_4^{2-})$/(mg/L)	$p(HCO_3^{-})$/(mg/L)
1	洋水河	61.74	26.67	31.23	23.56	138.29	191.36
2	白云岩含水层	98.47	33.37	13.89	7.64	38.65	243.28
3	368 m 沉砂池	63.28	38.24	28.42	27.38	103.48	168.32
4	524 m 水仓	73.68	23.23	23.25	26.32	97.33	157.89
5	490 m 水仓	60.24	16.37	20.39	16.31	108.15	181.49
6	650 m 主斜坡面	82.35	25.46	21.08	8.53	55.48	233.16
7	440 m 采空场	54.32	27.53	33.67	19.47	119.27	172.73
8	520 m 平巷	58.36	16.25	16.73	33.36	74.18	164.37
均值(Mean)		69.055 0	25.890 0	23.582 5	20.321 2	91.853 8	189.075 0

为验证水化学分析数据的可靠性,对所有水样进行了离子平衡误差(Ion Balance Error, IBE)检验[16-17],计算公式为:

$$IBE=[(\Sigma\text{cations}-\Sigma\text{anions})/(\Sigma\text{cations}+\Sigma\text{anions})]\times 100\% \quad (1)$$

式中:Σcations 为所有主要阳离子的当量浓度之和;Σanions 为所有主要阴离子的当量浓度之和;离子浓度均换算为 meq/L。

国际通行标准以$|IBE|\leqslant\pm 5\%$为数据可靠性判据。本次 8 组水样的 IBE 值范围为$-4.2\%\sim+4.8\%$,平均$|IBE|$为 3.1%,均满足可靠性要求,表明水化学分析数据质量良好。各水样的 pH 范围为 7.2~8.1,呈弱碱性,与碳酸盐岩含水层地下水特征一致;水中总溶解固体含量 TDS 值范围为 218~456 mg/L,属低至中等矿化度淡水。

Piper 三线图可直观反映水样的基本水化学特征及水化学类型[18-19]。分析时,首先将表 1 数据中的离子质量浓度全部换算为毫克当量,分别计算各离子在阳离子或阴离子总量中的占比,得到毫克当量百分数;再将整理好的各类水样常规离子毫克当量浓度占比导入 Origin 表格中,自动生成 Piper 三线图,如图 3 所示。图 3 左下方的三角形代表阳离子的毫克当量百分数,右下角的三角形代表阴离子的毫克当量百分数。两个三角形中的点延伸到菱形中得到交点,代表水样的阴阳离子毫克当量百分数。根据各水样数据落点在图形中所处的位置,能够明显地呈现出各类含水层的水质特征。

图 3 分析表明:在阳离子三角形中,所有水样均落入 $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ 优势区,Ca^{2+} 毫克当量百分数集中在 40%~60%之间,表明碱土金属离子($Ca^{2+}+Mg^{2+}$)显著高于碱金属离子($Na^{+}+K^{+}$),体现了碳酸盐岩含水层地下水的典型特征;洋水河、368 m 沉砂池、490 m 水仓、440 m 采空场、524 m 水仓、520 m 平巷 6 个水样在阳离子三角形中落点邻近,Mg^{2+} 毫克当量百分数集中于 25%~40%,具有相似的水岩相互作用背景。

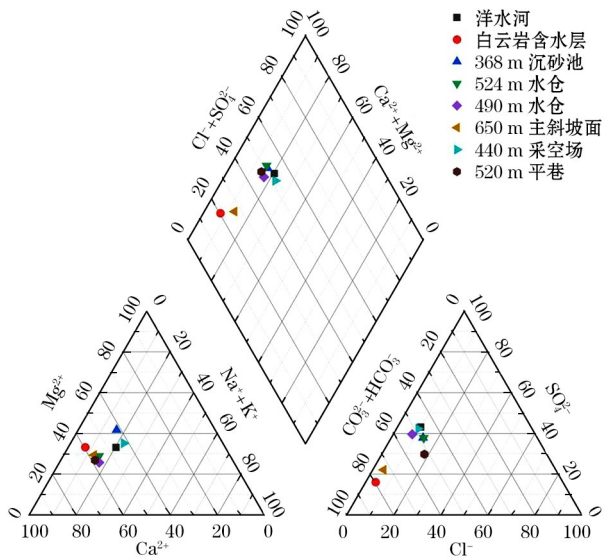


图 3 各水样 Piper 三线图

Fig.3 Piper three line diagram of each water sample

在阴离子三角形中,洋水河和与其水力联系密切的 5 个涌水点水样 HCO_3^- 毫克当量百分数为 50%~55%、SO_4^{2-} 毫克当量百分数为 35%~45%,呈现以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主的混合阴离子特征;而 650 m 主斜坡面和白云岩含水层水样的 HCO_3^- 毫克当量百分数超过 65%,SO_4^{2-} 毫克当量百分数低于 20%,反映了更深层地下水以碳酸盐溶解为主的水化学过程。

在菱形投影图中,洋水河、368 m 沉砂池、490 m 水仓、440 m 采空场、524 m 水仓、520 m 平巷 6 个水样集中分布于左上方区域(混合碳酸盐-硫酸盐型),而 650 m 主斜坡面与白云岩含水层水样则落于其左下方(碳酸盐型),这一空间分布格局直观地指示了两组水样具有不同的补给来源与水化学演化路径。用舒卡列夫分类法分析得出,洋水河、368 m

沉砂池、490 m 水仓、440 m 采空场、524 m 水仓、520 m 平巷的 Ca^{2+}、Mg^{2+}、HCO_3^-、SO_4^{2-} 离子毫克当量浓度均大于 25%,水化学类型为 HCO_3^- · SO_4^{2-} —Ca^{2+} · Mg^{2+} 型;650 m 主斜坡面、白云岩含水层 Ca^{2+}、Mg^{2+}、HCO_3^- 离子毫克当量浓度均大于 25%,水化学类型为 HCO_3^- —Ca^{2+} · Mg^{2+} 型。

3 灰色关联度分析

灰色关联度分析(GRA)适用于信息量少、关系模糊的对象间关联性研究。该方法通过计算母序列与特征序列共有信息的关联程度,将定性关系定量化,关联度数值越大,相关程度越高,反之相关程度越低[20-22]。本研究首先以地表水洋水河水样作为母序列,各个涌水水样、白云岩含水层水样作为特征序列,求出各水样与洋水河的关联度;再以白云岩含水层水样作为母序列,各个涌水水样、洋水河水样作为特征序列,求出各水样与白云岩含水层水样的关联度。具体分析过程如下。

(1) 对水样中离子的质量浓度进行均值化无量纲处理,使其原始数据归一化,即:

$$X'_i(k)=X_i(k)/\left(\frac{1}{6}\sum_{k=1}^{6}X_i(k)\right) \tag{2}$$

式中:$X'_i(k)$ 为均值化处理后的值;$X_i(k)$ 为第 i 组水样第 k 类离子的质量浓度,mg/L。

(2) 计算母序列与特征序列的关系系数 ξ_{ij},即:

$$\xi_{ij}=\frac{\Delta_{ij}(k)_{\min}+\rho\Delta_{ij}(k)_{\max}}{|X_i(k)-X_j(k)|+\rho\Delta_{ij}(k)_{\max}} \tag{3}$$

其中:

$$\Delta_{ij}(k)_{\min}=\min\min|X_i(k)-X_j(k)| \tag{4}$$

$$\Delta_{ij}(k)_{\max}=\max\max|X_i(k)-X_j(k)| \tag{5}$$

$$\Delta_{ij}(k)=|X_i(k)-X_j(k)| \tag{6}$$

式中:ρ 为分辨系数,一般取值范围为[0,1],本次计算中取 $\rho=0.5$;$\Delta_{ij}(k)$ 为数列的绝差数列;$\Delta_{ij}(k)_{\min}$ 和 $\Delta_{ij}(k)_{\max}$ 为数列两极差。

(3) 母序列与特征序列的灰色关联度记为 r_{ij},表达式为:

$$r_{ij}=\frac{1}{k}\sum_{k=1}^{6}\xi_{ij}(k) \tag{7}$$

根据计算步骤,将矿井下不同地点涌水水样与洋水河水样的主要离子质量浓度代入式(7),得到矿井下不同地点涌水水样的离子与洋水河水样的离子之间的关联系数。各水样主要离子质量浓度均值化无量纲处理结果见表 2。

表 2 各水样主要离子质量浓度均值化无量纲处理结果

Table 2 Dimensionless treatment results of mean mass concentrations of major ions in each water sample

编号	采样点名称	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^++K^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
1	洋水河	0.894 1	1.030 1	1.324 3	1.159 4	1.505 5	1.012 1
2	白云岩含水层	1.426 0	1.288 9	0.589 0	0.376 0	0.420 8	1.286 7
3	368 m 沉砂池	0.916 4	1.477 0	1.205 1	1.347 4	1.126 6	0.890 2
4	524 m 水仓	1.067 0	0.897 3	0.985 9	1.295 2	1.059 6	0.835 1
5	490 m 水仓	0.872 3	0.632 3	0.864 6	0.802 6	1.177 4	0.959 9
6	650 m 主斜坡面	1.192 5	0.983 4	0.893 9	0.419 8	0.604 0	1.233 2
7	440 m 采空场	0.786 6	1.063 3	1.427 8	0.958 1	1.298 5	0.913 6
8	520 m 平巷	0.845 1	0.627 7	0.709 4	1.641 6	0.807 6	0.869 3

为定量评价灰色关联度值的强弱程度,参考灰色系统理论相关文献,建立如下关联度分级标准:$r\geqslant0.85$ 为强关联(Grade Ⅰ),表明水化学特征高度相似,水力联系密切;$0.75\leqslant r<0.85$ 为中等关联(Grade Ⅱ),表明水化学特征较为相似,存在一定水力联系;$0.65\leqslant r<0.75$ 为弱关联(Grade Ⅲ),表明水化学特征相似性有限,水力联系较弱;$r<0.65$ 为极弱关联(Grade Ⅳ),表明水化学特征差异明显,无明显水力联系。

洋水河水样与各水样间的关联度评价结果见表 3。其中 440 m 采空场水样与洋水河水样关联度最为密切,关联度值为 0.94,白云岩含水层水样与洋水河水样的关联度值为 0.60,关联度较弱。

表 3 洋水河水样关联度排序结果

Table 3 Ranking results of correlation degree of Yangshui River water samples

序号	涌水点名称	关联度值	排名
1	440 m 采空场	0.94	1
2	368 m 沉砂池	0.84	2
3	524 m 水仓	0.84	3
4	490 m 水仓	0.83	4
5	520 m 平巷	0.74	5
6	650 m 主斜坡面	0.67	6
7	白云岩含水层	0.60	7

同上,得到白云岩含水层水样与各水样间的关联度结果,见表 4。与白云岩含水层水样关联度最高的是 650 m 主斜坡面水样,关联度值为 0.86,其余水样关联度值均不超过 0.65,关联度较弱。

表 4 白云岩含水层水样关联度排序结果

Table 4 Ranking results of correlation degree of water samples in dolomite aquifer

序号	涌水点名称	关联度值	排名
1	650 m 主斜坡面	0.86	1
2	490 m 水仓	0.65	2
3	524 m 水仓	0.65	3
4	520 m 平巷	0.65	4
5	368 m 沉砂池	0.63	5
6	440 m 采空场	0.62	6
7	洋水河	0.61	7

为检验灰色关联度计算结果对分辨系数 ρ 取值的敏感性,在保持其他计算条件不变的前提下,分别取 $\rho=0.1$, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 进行关联度计算与排序,结果见表 5。

表 5 不同分辨系数 ρ 下灰色关联度排序稳定性分析

Table 5 Stability analysis of GRA rankings under different distinguishing coefficients ρ

采样点名称	与洋水河关联度(ρ=0.5)	排名(ρ=0.1～0.9)	与白云岩关联度(ρ=0.5)	排名(ρ=0.1～0.9)
洋水河	—(母序列)	—	0.575 3	6～7
白云岩含水层	0.522 2	7(稳定)	—(母序列)	—
368 m 沉砂池	0.776 0	2(稳定)	0.590 5	4～5
524 m 水仓	0.741 9	3～4	0.598 6	3～5
490 m 水仓	0.731 2	3～4	0.611 8	2～3
650 m 主斜坡面	0.629 6	6(稳定)	0.839 8	1(稳定)
440 m 采空场	0.852 2	1(稳定)	0.576 2	6～7
520 m 平巷	0.644 5	5(稳定)	0.607 2	2～4

由表 5 可知,在不同 ρ 取值下,各水样的灰色关联度排序具有较高的一致性:以洋水河为母序列时,440 m 采空场在所有 ρ 值下均位列第一,白云岩含水层始终居于末位,排名结构对 ρ 值不敏感;以白云岩含水层为母序列时,650 m 主斜坡面在所有 ρ 值下均排名第一,显著高于其他水样;中等 ρ 值(0.3～0.7)条件下关联度值区分度较好。综上,采用 $\rho=0.5$ 的取值合理,水源识别结论对分辨系数的选择具有良好的鲁棒性。

4 涌水水源水力联系机理分析

上述 Piper 三线图水化学分类与灰色关联度定量分析结果一致表明:440 m 采空场、368 m 沉砂池、524 m 水仓、490 m 水仓、520 m 平巷 5 处井下涌水与洋水河地表水存在密切的水力联系,而 650 m 主斜坡面涌水则与白云岩含水层关系更为紧密。现结合研究区地质构造与水文地质条件,对上述水源识别结果进行机理解析。

洋水河明泥湾段河床地层为震旦系上统灯影组(Z_2dn)白云岩含水层,岩溶裂隙发育,渗透性较强。矿区南边界至二期污水处理厂段河床直接出露 Z_2dn 白云岩,无相对隔水层阻隔,构成了地表水向地下水的优势补给通道。洋水河明泥湾段实测平均流量损失达 1 964 m^3/h,表明地表水沿河床白云岩岩溶裂隙发生大量渗漏,补给下伏含水层及井下采掘空间。440 m 采空场位于洋水河下游段,距河床最近,且位于 Z_2dn 白云岩含水层浅埋区,地表水经岩溶管道快速补给至采空区,故其水化学特征与洋水河高度相似(灰色关联度 0.94),水化学类型均为 $HCO_3^- \cdot SO_4^{2-} - Ca^{2+} \cdot Mg^{2+}$ 型。368 m 沉砂池、524 m 水仓、490 m 水仓、520 m 平巷 4 处涌水点均位于洋水河沿线附近,其水化学特征和关联度排序表明,这些涌水点同样以洋水河渗漏水为主要补给来源,但因距渗漏源距离和地下水流路径的差异,关联度略低于 440 m 采空场。

650 m 主斜坡面位于矿区主斜井入口区域,距洋水河河床较远(水平距离约 300 m),且垂向上处于较深部位。该区域 Z_2dn 白云岩含水层厚度大、岩溶发育,地下水以大气降水垂向入渗补给和含水层侧向径流为主,与洋水河地表水的直接水力联系较弱。因此,650 m 主斜坡面涌水与洋水河的灰色关联度值仅为 0.67(在所有涌水点中最低),水化学类型为 $HCO_3^- - Ca^{2+} \cdot Mg^{2+}$ 型,与白云岩含水层水样一致;其与白云岩含水层的灰色关联度高达 0.86,进一步证实 650 m 主斜坡面涌水主要来源于灯影组白云岩含水层的直接补给,而非洋水河地表水渗漏。

综上所述,洋水河明泥湾段河床出露的 Z_2dn 白云岩含水层是地表水与地下水水力联系的关键通道。井下涌水点的水源归属主要受控于两个因素:一是涌水点与洋水河河床的水平及垂直距离,距离越近,受地表水补给越显著;二是涌水点所处位置白云岩含水层的岩溶发育程度,岩溶越发育,含水层自身的储水和导水能力越强。440 m 采空场等 5 处涌水点主要受洋水河渗漏补给,而 650 m 主斜坡面涌

水则以灯影组白云岩含水层自身地下水为主。这一机理认识为后续制定分区防治水措施提供了科学依据：对洋水河沿线涌水区应以地表水截流和河床防渗为主，对 650 m 主斜坡面等深层涌水区应以含水层疏水降压为主。

需要指出的是，本研究对各采样点仅进行了单次采样分析，受此限制，尚无法对不同涌水点进行常规统计显著性检验（如 t 检验或方差分析）。灰色关联度分析本质上为基于距离度量的相似性排序方法，与统计假设检验回答的科学问题不同。为弥补这一不足，通过离子平衡误差验证了数据质量，并借助不同分辨系数（$\rho=0.1\sim0.9$）下的敏感性分析，验证了关联度排序的鲁棒性。未来研究可考虑在丰水期和枯水期开展多时间点的系统采样，以获取重复测量数据，支持统计检验，从而进一步增强水源识别结论的稳健性。

5　结论

本研究利用 Piper 三线图和灰色关联度分析法对贵州明泥湾磷矿井下涌水进行联合分析，有效提高了水源判别精确度，得到以下主要结论。

（1）368 m 沉砂池、490 m 水仓、440 m 采空场、524 m 水仓、520 m 平巷涌水点与洋水河水样水化学类型为 $HCO_3^-\cdot SO_4^{2-}-Ca^{2+}\cdot Mg^{2+}$ 型，表明这 5 处井下涌水与洋水河的水力联系较为密切。650 m 主斜坡面与白云岩含水层水样的水化学类型为 $HCO_3^-\cdot SO_4^{2-}-Ca^{2+}$ 型，表明该处涌水与白云岩含水层存在一定的水力联系。

（2）以洋水河为母序列的灰色关联分析表明：440 m 采空场与洋水河的关联度最高（$r=0.94$），368 m 沉砂池、524 m 水仓、490 m 水仓、520 m 平巷、650 m 主斜坡面、白云岩含水层与洋水河关联度较低。

（3）综合两种方法分析结果，368 m 沉砂池、490 m 水仓、440 m 采空场、524 m 水仓及 520 m 平巷涌水的补给水源为洋水河的可能性较高，其中以 440 m 采空场的可能性最高。650 m 主斜坡面涌水与白云岩含水层的灰色关联度为 0.86，达到强关联等级（Grade Ⅰ，$r\geqslant0.85$），表明其补给水源为白云岩含水层的可能性最高。

本研究提出的 Piper 三线图-GRA 联合分析方法，通过定性水化学分类与定量关联度排序的互补，实现了地表河流与井下多涌水点水源的高效识别。与基于机器学习的判别模型相比，该方法仅需常规水化学离子数据，无需大量训练样本，且结合地表水流量损失的实测约束，为水文地质条件复杂的岩溶矿区提供了一种实用可靠的水源识别技术方案，具有良好的推广应用价值。

参考文献(References)：

[1] 武强，朱慧聪，胡辰睿，等.我国煤层水害基本架构及发展情势[J].煤炭工程，2024，56(10)：12-21.
Wu Qiang，Zhu Huicong，Hu Chenrui，et al. The basic structure and development situation of coal seam water disaster in China[J]. Coal Engineering，2024，56(10)：12-21.

[2] 赵志鹏，郑凯歌，祁晓东，等.缓倾斜坚硬顶板水力压裂响应特征及破坏规律研究[J].矿业研究与开发，2026，46(5)：151-163.
Zhao Zhipeng，Zheng Kaige，Qi Xiaodong，et al. Study on the response characteristics and failure law of hydraulic fracturing in gently inclined hard roofs[J]. Mining Research and Development，2026，46(5)：151-163.

[3] 赵翠，覃红亮，朱昱桦，等.贵州龙潭组地层煤矿开采引发的地质灾害特点及成因机理[J].中国地质灾害与防治学报，2025，36(1)：182-190.
Zhao Cui，Qin Hongliang，Zhu Yuhua，et al. Characteristics and causal mechanism analysis of geological hazards induced by underground mining in the Longtan formation coal mine group in Guizhou[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control，2025，36(1)：182-190.

[4] Li Bo，Zhang Huiling，Zhang Wenping，et al. The PCA-KD-KNN-based water chemistry identification model of water inrush source type in mine and its application[J]. Arabian Journal of Geosciences，2021，492(14)：06878-x.

[5] 华星月，邵良杉.基于 KPCA-GWO-SVM 的矿井突水水源识别[J].煤矿安全，2023，54(2)：195-200.
Hua Xingyue，Shao Liangshan. Mine water inrush source identification model based on KPCA-GWO-S[J]. Safety in Coal Mines，2023，54(2)：195-200.

[6] 施龙青，董晨磊，衡培国，等.煤矿突水水源判别的 PCA-PSO-ELM 模型[J].中国科技论文，2021，16(9)：919-924.
Shi Longqing，Dong Chenlei，Heng Peiguo，et al. Discriminant model of coal mine water inrush based on PCA-PSO-ELM[J]. China Sciencepaper，2021，16(9)：919-924.

[7] 于小鸽，裴富华，刘燚菲，等.贝叶斯判别和 Fisher 判别在矿井突水水源判别中的应用比较[J].中国科技论文，2022，17(1)：9-14.
Yu Xiaoge，Pei Fuhua，Liu Yifei，et al. Application comparison of Bayes and Fisher discrimination in mine inrush water source[J]. China Sciencepaper，2022，17(1)：9-14.

[8] 苏玮，姜春露，查君珍，等.基于客观组合权-改进集对分析模型的矿井突水水源识别[J].煤炭科学技术，2022，50(4)：156-164.
Su Wei，Jiang Chunlu，Zha Junzhen，et al. Identification of mine water inrush source based on objective combined weight-improved set pair analysis model[J]. Coal Science and Technology，2022，50(4)：156-164.

[9] 秋兴国,刘杰,李娜,等.改进贝叶斯判别法的矿井水源识别模型[J].西安科技大学学报,2022,42(2):237-244.
Qiu Xingguo, Liu Jie, Li Na, et al. Identification model of mine water source based on improved Bayesian discrimination[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2022,42(2):237-244.

[10] 顾爱民,刘德民.基于 HCA-Bayes 的矿井涌水水源识别[J].华北科技学院学报,2022,19(5):20-27.
Gu Aimin, Liu Demin. Identification of mine gushing water source based on HCA-Bayes[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology,2022,19(5):20-27.

[11] 赵世毫,高林,陈原望,等.基于水化学特征分析的近地表井壁涌水来源识别技术[J].矿业研究与开发,2023,43(11):150-156.
Zhao Shihao, Gao Lin, Chen Yuanwang, et al. Source identification technology of water inrush in near-surface wall based on hydrochemical characteristics analysis[J]. Mining Research and Development,2023,43(11):150-156.

[12] 耿铭,王欢,徐青云.基于 PCA-熵值法模型的深部巷道顶板涌水评价及动态防控[J].矿业研究与开发,2026,46(2):147-157.
Geng Ming, Wang Huan, Xu Qingyun. Evaluation and dynamic prevention and control of roof water inrush in deep roadway based on PCA-entropy method model[J]. Mining Research and Development,2026,46(2):147-157.

[13] 陶小郎,张旭.贵州开阳县明泥湾磷矿矿区水文地质特征及治理前景[J].西部资源,2019(5):117-118.
Tao Xiaolang, Zhang Xu. Hydrogeological characteristics and treatment prospects of Mingniwan Phosphate Mine in Kaiyang County, Guizhou Province[J]. Western Resources, 2019(5):117-118.

[14] 张岳,颜丹平,赵非,等.贵州开阳磷矿地区下寒武统牛蹄塘组地层层序及其 As、Sb、Au、Ag 丰度异常与赋存状态研究[J].岩石学报,2016,32(11):3252-3268.
Zhang Yue, Yan Danping, Zhao Fei, et al. Stratigraphic sequences,abundance anomalies and occurrences of As, Sb, Au, Ag in the lower cambrian Niutitang formation in Kaiyang Phosphate Mine[J]. Acta Petrologica Sinica,2016, 32(11):3252-3268.

[15] 郭建江.开阳磷矿西翼深部延伸矿段地质特征与找矿前景研究[J].采矿技术,2019,19(2):142-145.
Guo Jianjiang. Study on geological characteristics and ore-prospecting prospects of the deep extension ore block in the west wing of Kaiyang Phosphate Mine[J]. Mining Technology,2019,19(2):142-145.

[16] Zou Yinxian, Chu Xuewei, Liu Pu, et al. Hydrochemical characteristics of groundwater in karst mountainous areas of Guizhou province[J]. Geology and Resources,2024,33(6): 846-854.

[17] 陈新攀.地下水舒卡列夫水化学分类法的一些改进[J].地下水,2022,44(2):25-28.
Chen Xinpan. Improvement on shukalev groundwater hydrochemical classification method[J]. Ground Water,2022,44 (2):25-28.

[18] 蔡小虎,康丛轩.钱塘江下游滨江地区地下水水化学特征与水质评价[J].人民长江,2023,54(6):27-33.
Cai Xiaohu, Kang Congxuan. Hydrochemical characteristics and water quality evaluation of groundwater in lower reaches of Qiantang River[J]. Yangtze River,2023,54(6):27-33.

[19] 施龙青,史雅迪,邱梅,等.基于 Piper 图、灰色关联度和三维高密度电法的断层水源判别[J].中国科技论文,2022,17(1):1-8.
Shi Longqing, Shi Yadi, Qiu Mei, et al. Identification of fault water source based on Piper diagram, grey correlation degree and 3D high-density rlectrical resistivity method[J]. China Sciencepaper,2022,17(1):1-8.

[20] 张绍良,张国良.灰色关联度计算方法比较及其存在问题分析[J].系统工程,1996(3):45-49.
Zhang Shaoliang, Zhang Guoliang. Comparison between computation models of grey interconnet degree and analysis on their shortages[J]. Systems Engineering,1996(3):45-49.

[21] Yang Hao, Bian Kai, Wang Tieji, et al. Risk assessment and water inrush mechanism study of through-type fault zone based on grey correlation degree[J]. Applied Sciences, 2023,13(11):6828.

[22] Qing Shilong, Ma Xiaoxuan, Han Jin, et al. Identification of limestone aquifer inrush water sources in different geological ages based on trace components[J]. Sustainability,2023,15 (15):11646.