

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.01.017

潞安矿区中部煤矿充水水源水化学 特征及水源识别意义

杜金龙

(中煤地生态环境科技有限公司, 北京 100070)

摘要:采集了潞安矿区中部煤矿 5 类 80 份已知水源水样,利用 PIPER 三线图对不同来源水样水文地球化学特征进行了分析;利用聚类分析方法(Ward 法)对三线图上存在重叠的砂岩水、太灰水与奥灰水进行分类,显示奥灰水与太灰水明显聚类,局部存在两者混合,砂岩水则与上述两者难以区分;最后利用 Bayes 模型建立了不同水源判别函数(自我检验准确率达 91.5%),对采集的 19 个矿井涌水水样进行了识别,识别出顶板砂岩水样 12 个,地表水、孔隙水样 4 个,太灰水样 3 个;对于后验概率不高的水样(低于 80%)存在水源混合的可能性。

关键词:潞安矿区;充水水源;水化学特征;水源识别

中图分类号:P641.4⁺61

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2022)01-0208-08

Hydrochemical Characteristics of Water Filling Source in Central Lu'an Mining Area and Water Source Identification Significance

DU Jinlong

(CNACG Ecological Environment Technology Co., Ltd, Beijing 100070, China)

Abstract: This study collected and analyzed 5 types of 80 water samples from central Lu'an coal deposit to identify the hydrogeochemical characteristics by Piper Plots. The Cluster analysis method (Ward method) showed the obvious clustering and the partial mixing of ordovician limestone water and limestone water, while sandstone water was hard to separate from the other two. Bayes model was used to construct the discriminant functions of different water sources (self-test accuracy 91.5%) and to test the 19 samples of mine water inrush. 12 samples from roof sandstone, 4 samples from ground water and pore water and 3 samples from limestone water was then recognized. Water samples with low posterior probability (less than 80%) could indicate the mixing of the water sources.

Keywords: Lu'an mining area; water filling source; hydrochemical characteristic; water source identification

收稿日期:2021-01-11;修回日期:2021-05-23;网络发表日期:2021-12-06;责任编辑:曹佰迪,吕鹏瑞

基金项目:国家重点研发计划资助项目“矿井突水水源快速判识与水灾防控关键技术研究”(2017YFC0804104)。

作者简介:杜金龙(1980-),男,湖北枝江人,高级工程师,博士,从事煤炭绿色勘查、煤矿防治水、矿山环境修复方面研究。E-mail:19084548@qq.com。

潞安矿区位于山西省沁水煤田中段,面积为 770 km²,是中国大型煤炭矿区。主要含煤地层为上石炭统太原组(C₃t)及下二叠统山西组(P₁s)。3 号煤层位于山西组下部,厚度大且稳定,是井田主采、首采煤层。3 号煤层主要充水水源包括顶板砂岩裂隙水、顶板冒落带裂隙沟通上部第四系孔隙水、地表水,以及底板太原组灰岩水、奥陶系灰岩水、老空水。对充水水源进行水化学分析、有效识别是防治矿井突水事故的关键手段(耿建军,2019;朱雪莉,2020;陈守建等,2016)。

各类充水水源是所在含水层岩性、水动力条件、氧化-还原环境及酸碱度等综合作用的结果,各含水层在水文地球化学方面的相对独立性使得常规离子成分存在较大差异,这为水源判别提供了依据。砂岩含水层内各种长石砂岩的风化水解和离子交换作用使砂岩水多为 HCO₃-Na 型水,Ca²⁺、Mg²⁺因沉淀作用含量降低(冯绪兴,2014)。灰岩水在较纯质灰岩中运移,钙镁离子在浸蚀性二氧化碳的溶蚀作用下,会使水中的钙镁离子浓度增加,形成以 HCO₃-Ca·Mg 型为主的水质。老空水水质类型比较复杂,其和老空水的水源有关,砂岩水进入老空区后,开放环境中砂岩水溶解和吸收空气中 CO₂,使 pH 值降低,Ca²⁺、Mg²⁺有所增加。基于以上水质特征,可以利用矿井水源识别算法及软件对测试水样进行判别,该方法具有快速、准确、经济的特点(薛琮一等,2020;巨天乙等,1994)。

突水水源利用地下水提供的地球化学信息来进行判别(许汉学等,1991;杨海军等,2012;李燕等,2010)。水化学方法是水源识别的常用方法(高卫东等,2001),具有快速、准确、经济特点,可分为简易水化学分析、多元统计法和非线性分析法。简易水化学分析包括水质分析和同位素分析,前者利用水质指标,后者采用同位素示踪来判别突水水源(韩永等,2009;Clark I D,1997)。多元统计法主要包括聚类分析(方沛等,2002;魏军等,2006)和判别分析(张春雷等,2010;陈红江等,2009)2 类,前者利用数学方法判断研究对象之间的亲疏关系(即相似性),从而对其进行分类,后者包括逐步判别、序贯判别、二次判别、距离判别、贝叶斯(Bayes)多类线性判别和 Fisher 判别分析(FDA)理论。其中,Bayes 判别模型是从样本多元分布出发,充分利用多元正态分布概率密度提供的信息计算后验概率,确定样本归属。

非线性分析方法主要有灰色系统理论、模糊数学综合评判、人工神经网络、地理信息系统(GIS)、SVM 支持向量机、可拓识别法等(巨天乙等,1994)。

笔者以潞安矿区中部代表性煤矿采集的 99 份水样为样本,对水化学特征进行了 Piper 三线图分析,揭示了不同来源水样的水文地球化学演化特征;之后利用聚类分析方法对三线图难以区分的水样进行了分类;最后利用 Bayes 判别模型建立了水源判别公式,对采集的矿井涌水水样的水源类型进行了识别。

1 数据采集

笔者搜集了潞安矿区中部(文王山断层与二岗山断层之间)代表性煤矿——王庄煤矿、常村煤矿及古城煤矿(图 1)的水文地质类型划分报告,从中采集了各煤矿不同类型水样水化学数据 99 份。其中,已知来源 80 份,包括地表水 4 份、第四系孔隙水 17 份(以下简称孔隙水,采自农用水井)、二叠系砂岩裂隙水 28 份(以下简称砂岩水,来自钻孔、大巷涌水点或超前探放水点)、太原组灰岩水 8 份(以下简称太灰水,来自钻孔)、奥陶系上部灰岩水 23 份(以下简称奥灰水,来自钻孔);未知来源的矿井涌水 19 份(采掘面)。水化学数据主要包括八大离子及其他离子、矿化度、pH 值(表 1)。

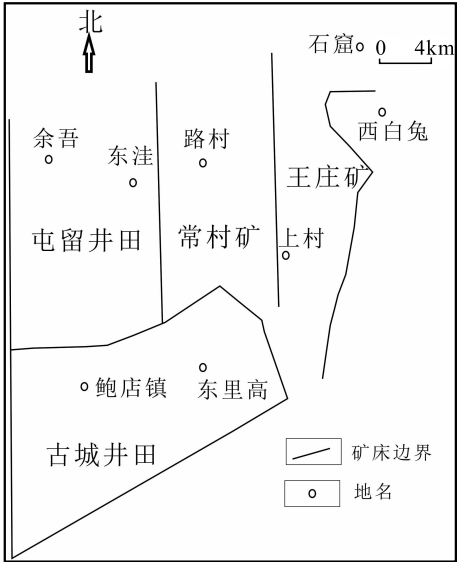


图 1 采样矿床位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling location

表 1 采集水样分布情况一览表(份)

Tab. 1 Distribution of collected water samples

水样类型	王庄矿	常村矿	古城矿	小计
地表水(B)	3	0	1	4
孔隙水(Q)	2	0	15	17
砂岩水(P)	12	4	12	28
太灰水(C)	2	3	3	8
奥灰水(O)	12	4	7	23
矿井涌水(Y)	7	0	12	19
小计	38	11	50	99

2 水化学特征

2.1 总体特征

对 5 种类型水样主要离子的毫克当量百分数 (meq%)进行统计(剔除异常值),发现如下特征(图 2)。

(1)地表水、孔隙水水化学特征相似,阳离子以 Ca^{2+} 、 Na^{+} 为主,阴离子以 HCO_3^- 为主;水化类型以 $\text{H}-\text{C}$ 、 $\text{H}-\text{C}\cdot\text{N}$ 型为主。

(2)砂岩水阳离子以 Na^{+} 为主,阴离子以 HCO_3^- 为主, Cl^- 次之;二叠系岩性以石英、斜长石

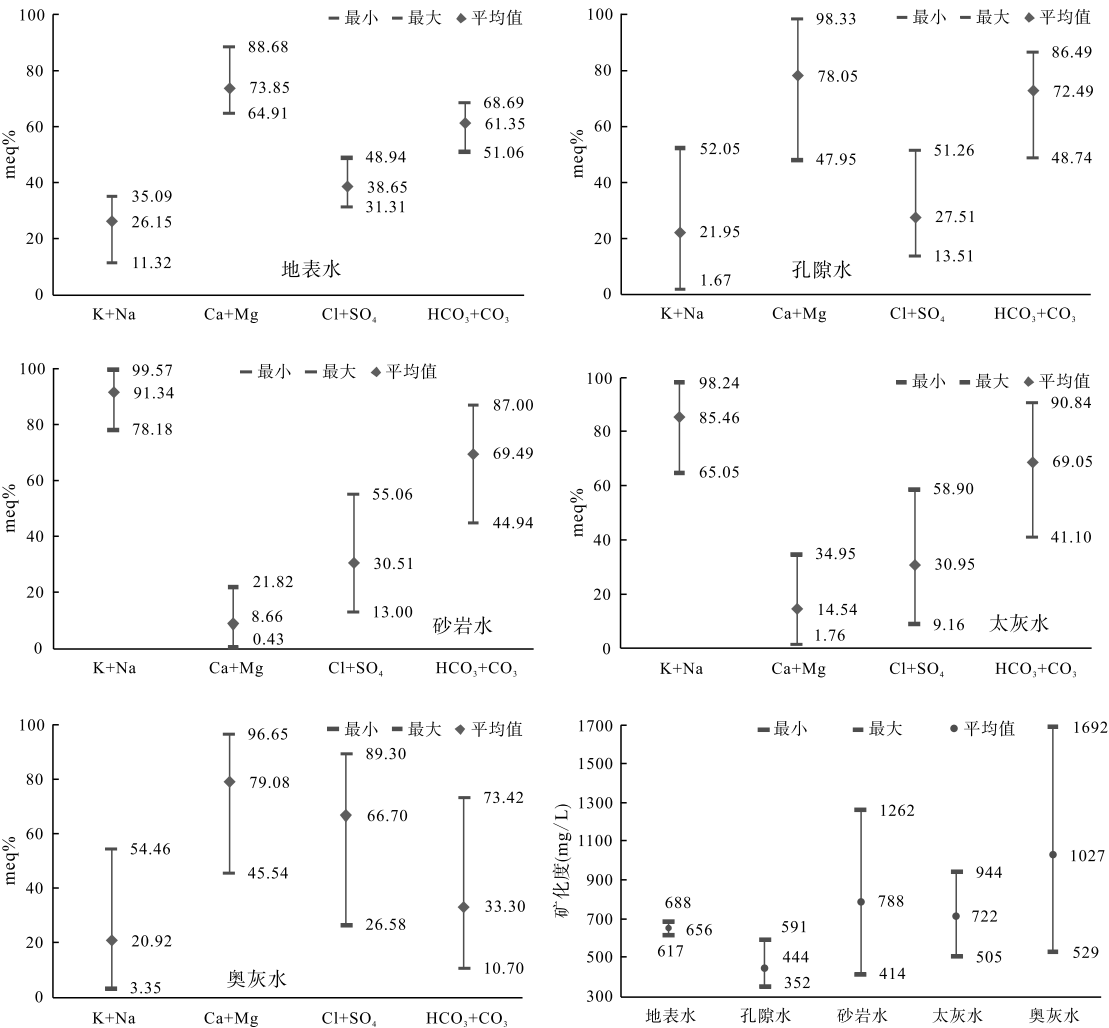


图 2 采集的已知水源水样水质指标统计图

Fig. 2 Statistical charts of water quality indexes of known water samples collected

为主,故砂岩水中 Na^{+} 离子含量高;水化类型以 $\text{H}-\text{N}$ 、 $\text{H}\cdot\text{CL}-\text{N}$ 为主。

(3)太灰水化学特征与砂岩水相似,太原组为砂岩夹薄层灰岩,岩溶裂隙不发育,侧向补给条件差,

以垂向补给为主,径流滞缓,阳离子仍以 Na^+ 为主,阴离子中 SO_4^{2-} 有所增加,但仍以 HCO_3^- 为主;水化学类型主要为 H-N 型。

(4)奥灰水阳离子以 Ca^{2+} 为主, Mg^{2+} 次之,阴离子以 SO_4^{2-} 为主, HCO_3^- 次之。岩溶含水层含水介质为碳酸盐岩与硫酸盐岩的混合建造,主要矿物为方解石、白云石和石膏;在岩溶发育过程中,由于石膏的溶解度远大于方解石和白云石,使得灰岩地层中的石膏不断溶解,而方解石往往处于过饱和状态而出现沉淀,这使得长期赋存于灰岩地层中的地下水为水化学组分以 Ca^{2+} 离子和 SO_4^{2-} 离子为主的 $\text{SO}_4^{2-}-\text{Ca}^{2+}$ 型地下水。奥灰水主要为 S·H-C·M(滞留区),局部为 H-C·M(活跃区)。奥灰岩溶

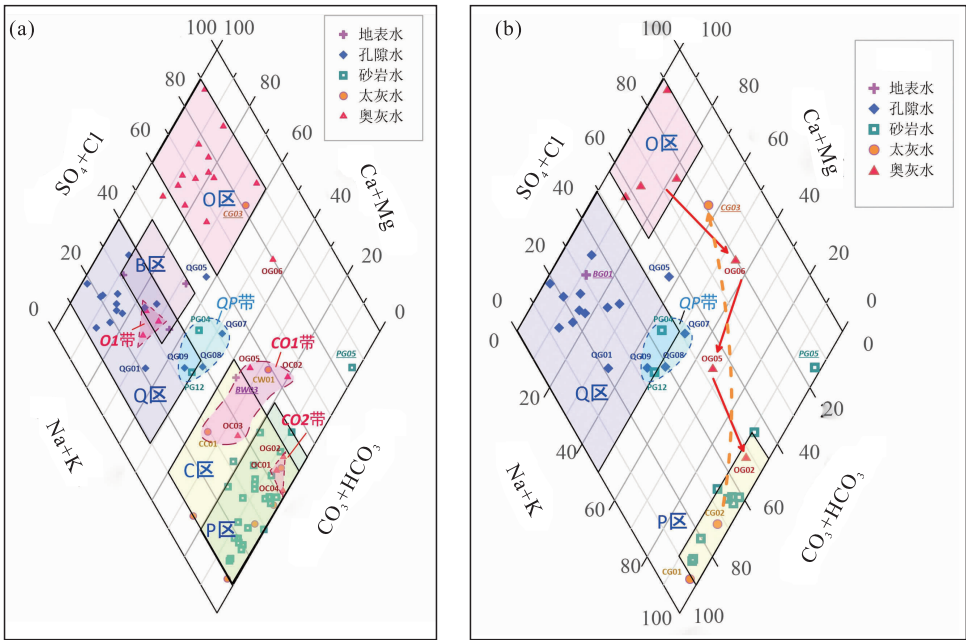
裂隙水由于自身的补、径、排条件的差异,水化学特征存在明显的差异。当岩溶裂隙发育时,钻孔涌水量大,其水质矿化度、硬度明显减小(图 2)。

(5)所有水样均呈碱性特征,pH 值一般为 7~9,个别大于 10;从矿化度看,孔隙水<地表水<太灰水<砂岩水<奥灰水。

2.2 三线图分析

通过绘制 Piper 三线图,可形成如下认识。

(1)地表水、孔隙水分布于图 3a 的 B、Q 区,存在重叠,且前者 $\text{Cl}+\text{SO}_4$ 略总体上高于后者,表明两者具有同源性,地表水受到孔隙水补给,且后期有其他水混入。



a. 潞安矿区; b. 古城煤矿

图 3 采集水样 Piper 三线图

Fig. 3 Piper three-line diagram of water sample collection

(2)地表水样 BW03 的 $\text{Na}+\text{K}$ 含量明显高于其他水样,毫克当量百分数可达到 64%, Cl^- 离子含量也偏高,推测该水样已受到污染,不具有水化学意义。

(3)砂岩水、太灰水分布于图 3a 及图 3b 的 P、C 区,存在重叠,且前者 Na^+ 含量更高、后者 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 较高,体现出两者所在含水层的岩性差别,前者为砂岩,后者为砂岩夹薄层灰岩。

(4)砂岩水样出现 3 处异常:水样 PG4 与 PG12

水质接近孔隙水特征(位于图 3a 的 QP 带),疑似有孔隙水混入;PG05 水样(图 3a 右部孤点) $\text{Cl}+\text{SO}_4$ 毫克当量百分数高达 85%(主要是 Cl^- ,为 82%),矿化度达 1 870 mg/L,明显高于其他水样,呈现高 Cl^- 高 Na^+ 特征(CL-N 型水)。

(5)太灰水样出现 2 处异常:CG3 水样 $\text{Cl}+\text{SO}_4$ 毫克当量百分数达 82%(以 Cl^- 为主), $\text{Ca}+\text{Mg}$ 达 64%(以 Ca^{2+} 为主),呈奥灰水特征(落在图 3a 中 O 区),但 Cl^- 含量明显高于后者,属 CL-CN 型水;

CW02 水样阴阳离子极不平衡(毫克当量相差 24%),矿化度为 1 857 mg/L,是其他水样 2~3 倍,明显偏高。

(6)奥灰水呈现分化特征,除了集中于图 3a 中的 O 区,还出现在 O1 带、下部(CO1 带、CO₂ 带)。O1 带包括 3 个水样 OW8、OW9、OW10,其 HCO₃⁻ 含量明显高于 O 区水样,而矿化度明显偏低,表明此处岩溶发育,水流交替活跃,水质较好。

部分奥灰水呈现太灰水特征,集中于 CO1 带(OC2、OC3、OG5 水样)和 CO₂ 带(OG2、OC1、OC4 水样),矿井水文地质资料显示 OG2 采自破碎带,属奥灰、太灰混合水,因此判断上述水样可能均受断层影响,与太灰水沟通,且从水质上看,CO₂ 带混合更为完全。

OG6 水样 Cl⁻ 和 Na⁺ 含量较高,根据煤矿水文地质资料推断,可能是临时止水封闭不严,上部太灰水、砂岩水渗入所致。

图 3b 为古城矿各类水样分布情况,从中可以看出奥灰水与太灰水混合过程,红色线上的 OG06→OG05→OG02 代表奥灰水逐渐混入更多太灰水,直至最终呈现太灰水特征;橙色线上的 CG02→CG03 则显示太灰水逐渐混入更多奥灰水。

2.3 聚类分析

从 Piper 图可以看出(图 3),砂岩水、太灰水与奥灰水(局部)存在重叠现象,利用系统聚类分析法进行分析。鉴于奥灰水易与太灰水沟通,利用系统聚类分析法,对太灰水与奥灰水进行聚类分析,进一步分析两者联系。采用的变量为 Na+K、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻+CO₃²⁻ 的毫克当量百分数,采用的聚类方法为 Ward 法,度量标准为平方欧式距离。

从图 4 可见,原属奥灰水的样品 OC1、OC2、OC3、OC4、OG2、OG5 明显与太灰水更为接近;原属太灰水的样品 CG3 和奥灰水更为接近,且与 OG6 性质相似,应同属混合水;OW8、OW9、OW10 性质接近,上述结果与 Piper 图分析结果高度一致。

由以上数据特征可见,砂岩水与太灰水由于水质接近,两者聚类现象差别甚微,在聚类分析图上两者几乎一样(图 4)。

3 判别分析

根据 piper 三线图分析与聚类分析,地表水样

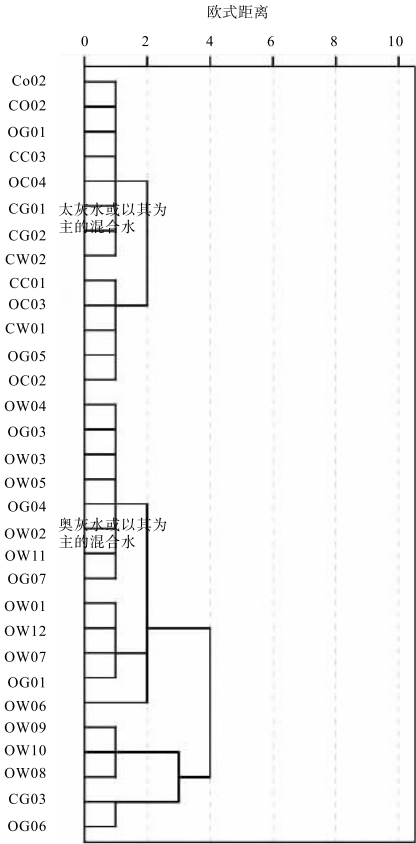


图 4 太灰水与奥灰水聚类分析图
Fig. 4 Cluster analysis of Taiyuan limestone water and Ordovician limestone water

BW03 可能受到污染,奥灰水样 OG7 矿化度异常低,砂岩水样 PG4、PG12,太灰水样 CG03、奥灰水样 OG06 为混合水样,均剔除处理。奥灰水样 OW07、08、09 为径流活跃期水样,与一般奥灰水不同,不纳入判别分析。因此共有 71 组水样参与判别分析建模。

奥灰水样 OC1、OC2、OC3、OC4、OG2、OG5 与太灰水高度混合,且考虑到太灰水样品较少,将这些水样作为太灰水处理。

利用贝叶斯判别模型,将水样编为 4 组(地表水和孔隙水合并、砂岩水、太灰水、奥灰水),将 Na+K、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、CO₃²⁻ 等 7 类水质浓度指标(mg/L)作为自变量,采用贝叶斯模型(Fisher 函数)建立各组水样的判别函数。

地表水、孔隙水:
$$R1 = 0.015[Na + K] + 0.091[Ca^{2+}] + 0.146[Mg^{2+}] - 0.006[Cl^{-}] - 0.023[SO_4^{2-}] - 0.028[CO_3^{2-}] - 5.403.$$

砂岩水：
 $R2=0.085[Na+K]+0.020[Ca^{2+}]+0.037[Mg^{2+}]-0.035[Cl^{-}]-0.009[SO_4^{2-}]-0.053[CO_3^{2-}]-8.700。$

太灰水：
 $R3=0.071[Na+K]+0.003[Ca^{2+}]-0.003[Mg^{2+}]-0.035[Cl^{-}]+0.009[SO_4^{2-}]-0.032[CO_3^{2-}]-7.560。$

奥灰水：
 $R4=0.013[Na+K]+0.148[Ca^{2+}]+0.202[Mg^{2+}]-0.009[Cl^{-}]+0.033[SO_4^{2-}]-0.032[CO_3^{2-}]-32.565。$

由上式可见,当所有样本分为 4 类时,通过逐步判别分析,将每个样本原有的 7 个指标优选为 6 个,需要进行判别分类时,将样本的 Na+K、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、CO₃²⁻ 浓度带入函数中,分别计算各类的 Y 值,取最大 Y 值,将样本归入该类即可。

通过对样品进行自我检验,准确率达到 91.5%(表 2)。

表 2 样品预测分组表						
Tab. 2 Sample prediction grouping table						
项目	原分组	预 测 分 组				合计
		1	2	3	4	
计数	1	20				20
	2	22		4	26	
	3	2		11	13	
	4	12				12
样品 占比 (%)	1	100				
	2	84.6		15.4		
	3	15.4		84.6		
	4	100				

对于多类判别的情况可利用基于马氏广义距离的 F 检验,对判别函数的辨别能力进行评价。当计算所得 F 值大于相应临界值时,两类间有显著差异,且 F 值越大差异越显著,判别函数辨别能力越强,判别效果越好。任意两类水源间的 F 值见表 3。

由表 3 可知,在检验水平 $\alpha=0.05$ 时, $F>F_{\alpha}(5,63)$,类间差异显著,说明选入的 6 个变量构建的函数判别能力强、效果较好,能有效地判别王庄煤矿 4 个主要突水水源。但同时也发现,由于 2 类砂岩水和 3 类太灰水的类间 F 值相对较小,相对容易产

生误判。

表 3 判别效果的 F 检验表		
Tab. 3 F-test of discriminant effect		
类别	类间 F 值	$F_{0.05}(5,63)$
1 与 2	28.69	2.71
1 与 3	20.55	
1 与 4	54.59	
2 与 3	3.64	
2 与 4	100.24	
3 与 4	65.04	

4 水源识别

本次搜集了 2014~2019 年以来的矿井涌水数据 19 组,水化学数据见表 4。

利用贝叶斯判别模型对各水样进行计算,结果见表 5。从表 5 可知,矿井涌水以砂岩水为主,少量为地表水或孔隙水、太灰水。

5 结论与讨论

(1)水质分析显示,研究区地表水、孔隙水水质相似,阳离子以 Ca²⁺、Na 为主,阴离子以 HCO₃⁻ 为主;砂岩水阳离子以 Na⁺ 为主,阴离子以 HCO₃⁻ 为主;太灰水化学特征与砂岩水相似,但由于径流滞缓,SO₄²⁻ 有所增加;奥灰水阳离子以 Ca²⁺ 为主,Mg²⁺ 次之,阴离子以 SO₄²⁻ 为主,总体呈滞留区(裂隙不发育)特征,局部呈活跃区(裂隙发育)特征,水质矿化度、硬度明显减小。各水源均呈碱性特征,pH 值一般为 7~9,个别大于 10;从矿化度看,孔隙水<地表水<太灰水<砂岩水<奥灰水。

(2)Piper 三线图显示,地表水、孔隙水位于左部,存在重叠,前者 Cl+SO₄ 高于后者,表明两者具有同源性;砂岩水、太灰水分布于下部,前者 Na⁺ 含量高,后者 Ca²⁺、Mg²⁺ 较高,体现两者所在含水层岩性差别(前者为砂岩,后者为砂岩夹薄灰岩);奥灰水呈现分化特征,主要集中于上部,呈现高 Ca+Mg 与高 Cl+SO₄ 特征,局部出现在左部与下部(CO1 带、CO₂ 带)。左部区域 HCO₃⁻ 含量明显偏高,而矿化度明显偏低,表明此处岩溶发育,水流交替活跃。下部区域与太灰水特征重合,结合相关资料,此处存

表 4 2014~2019 年矿井涌水水化学数据表 (mg/L)

Tab. 4 Chemical data of mine water inflow in 2014~2019(mg/L)

水样编号	K ⁺ +Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻
YW01	303.0	10.5	0.5	62.9	0.0	43.2
YW02	305.0	8.0	0.5	54.5	0.0	48.0
YW03	305.0	37.6	15.1	98.5	48.7	33.9
YW04	178.4	30.0	67.0	333.0	258.0	1.0
YW05	92.4	30.0	67.0	333.0	79.0	10.0
YW06	390.8	34.2	29.9	82.1	90.2	0.0
YW07	48.9	30.0	67.0	133.0	258.0	1.0
YG01	253.1	0.0	0.0	80.0	57.8	73.2
YG02	183.0	0.0	0.0	72.0	11.0	7.3
YG03	389.5	1.6	1.5	92.8	13.5	41.3
YG04	293.9	3.2	1.0	103.4	23.2	90.9
YG05	307.0	0.8	0.5	108.6	17.4	249.8
YG06	258.9	2.0	0.6	91.6	49.2	138.2
YG07	288.0	3.9	1.2	93.6	16.4	37.2
YG08	254.0	5.9	1.2	91.6	21.1	23.9
YG09	265.1	2.9	1.8	109.2	18.8	29.2
YG10	242.9	4.9	1.8	103.3	2.3	23.9
YG11	28.8	76.4	17.5	20.6	59.5	5.6
YG12	239.0	2.0	0.6	112.0	14.3	24.3

表 5 水样贝叶斯判别模型计算数据表

Tab. 5 Calculation data of water sample Bayes discrimination model

水样编号	P1	P2	P3	P4	MAX(P)	对应类型
YW01	0.00	91.63	8.37	0.00	91.6	砂岩水
YW02	0.00	90.69	9.31	0.00	90.7	砂岩水
YW03	0.00	94.18	5.81	0.00	94.2	砂岩水
YW04	99.60	0.18	0.20	0.02	99.6	地表水/孔隙水
YW05	100.00	0.00	0.00	0.00	100.0	地表水/孔隙水
YW06	0.00	98.88	1.12	0.00	98.9	砂岩水
YW07	99.90	0.01	0.05	0.04	99.9	地表水/孔隙水
YG01	0.00	45.66	54.34	0.00	54.3	太灰水
YG02	0.05	74.44	25.52	0.00	74.4	砂岩水
YG03	0.00	96.40	3.60	0.00	96.4	砂岩水
YG04	0.00	67.77	32.23	0.00	67.8	砂岩水
YG05	0.00	8.56	91.44	0.00	91.4	太灰水
YG06	0.00	22.33	77.66	0.00	77.7	太灰水
YG07	0.00	87.32	12.67	0.00	87.3	砂岩水
YG08	0.00	84.32	15.68	0.00	84.3	砂岩水
YG09	0.00	85.08	14.92	0.00	85.1	砂岩水
YG10	0.01	86.65	13.35	0.00	86.6	砂岩水
YG11	99.96	0.02	0.02	0.00	100.0	地表水/孔隙水
YG12	0.01	81.70	18.30	0.00	81.7	砂岩水

在断层导通,形成奥灰、太灰混合水。

(3)利用聚类分析(Ward 法)对三线图上存在重叠现象的砂岩水、太灰水与奥灰水进行分类,结果显示,奥灰水与太灰水明显聚类,但局部存在奥灰水与太灰水穿插现象,表明此类存在水源混合;砂岩水与太灰水聚类现象不明显,两者区分难度较大。

(4)经上述分析,对水样进行了剔除与变换,最后基于 71 个水样,采用贝叶斯模型进行了判别分析,建立了地表水+孔隙水、砂岩水、太灰水、奥灰水等 4 种类型水样的判别函数,经自我检验,准确率达到 91.5%。不足的是,函数对砂岩水与太灰水的判别能力不够显著。

(5)利用贝叶斯判别函数对采集的 19 个矿井涌水水样进行了水源识别,结果显示主要为顶板砂岩水(12 个),局部可能由于导水通道存在,为来自上部地表水、孔隙水(4 个),或者煤层底板以下太灰水(3 个)。对于后验概率不高的水样(低于 80%)存在水源混合的可能性较大。

致谢:感谢中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院刘守强教授及所在项目组成员的指导。

参考文献(References):

- 许汉学,王杰. 煤矿突水预报研究[M]. 北京:地质出版社,1991.
- 杨海军,王广才. 煤矿突水水源判别与水量预测方法综述[J]. 煤田地质与勘探,2012,40(3):48-54.
- YANG Haijun, WANG Guangcai. Summarization of methods of distinguishing sources and forecasting inflow of water intrush in coal mines[J]. Coal Geology & Exploration, 2012,40(3):48-54.
- 李燕,徐志敏,刘勇. 矿井突水水源判别方法概述[J]. 煤炭技术,2010,29(11):87-89.
- LI Yan, XU Zhimin, LIU Yong. Summary on methods of distinguishing sources of mine water-invasion[J]. Coal Technology, 2010,29(11):87-89.
- 高卫东,何元东,李新社. 水化学法在矿井突水水源判断中的应用[J]. 矿业安全与环保,2001,28(5):44-45.
- 韩永,王广才,邢立亭,等. 地下水放射性同位素测年方法研究进展[J]. 煤田地质与勘探,2009,37(5):37-42.
- HAN Yong, WANG Guangcai, XING Liting, et al. Advances in studying groundwater radioisotope dating methods[J]. Coal Geology & Exploration, 2009,37(5):37-42.
- 方沛,孟祥领,孙长龙. 聚类分析在任楼矿水源判别中的具体应用[J]. 煤炭技术,2002,21(11):59-60.
- 魏军,题正义. 灰色聚类评估在煤矿突水预测中的应用[J].

辽宁工程技术大学学报,2006,25(S2):44-46.

- WEI Jun, TI Zhengyi. Application of grey system clustering evaluation in forecast of water intrush in coal mine[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2006,25(S2):44-46.
- 张春雷,钱家忠,赵卫东,等. Bayes 方法在矿井突水水源判别中的应用[J]. 煤田地质与勘探,2010,38(4):34-37.
- ZHANG Chunlei, QIAN Jiazhong, ZHAO Weidong, et al. The application of bayesian approach to discrimination of mine water-inrush source[J]. Coal Geology and Exploration, 2010, 38(4):34-37.
- 陈红江,李夕兵,刘爱华,等. 用 Fisher 判别法确定矿井突水水源[J]. 中南大学学报(自然科学版),2009,40(4):1114-1120.
- CHEN Hongjiang, LI Xibing, LIU Aihua, et al. Determination of mine water intrush source by Fisher's discrimination[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2009,40(4):1114-1120.
- 朱雪莉. 山西沁水煤田煤中铀的含量分布特征及开发前景研究[J]. 中国煤炭地质,2020,32(01):22-27.
- ZHU Xueli. Study on Coal Uranium Content Distribution Features and Exploitation Prospect in Qinshui Coalfield, Shanxi. [J]. Coal Geology of China, 2020,32(01):22-27.
- 耿建军. 基于系统聚类分析的煤矿突水水源识别技术——以潞安矿区王庄煤矿为例[J]. 中国煤炭地质,2019,31(08):54-59.
- GENG Jianjun. Coalmine Water Bursting Source Identification Technology Based on Hierarchical Cluster Analysis—A Case Study of Wangzhuang Coalmine, Lu'an Mining Area[J]. Coal Geology of China, 2019,31(08):54-59.
- 薛琰一,王嘉伟,杨征,等. 新疆和田布雅煤矿一带水系沉积物测量地球化学特征及找矿方向[J]. 西北地质,2020,53(04):66-71.
- XUE Zongyi, WANG Jiawei, YANG Zheng, et al. A Review of Geochemical Characteristics and Prospecting Direction of Stream Sediment of Buya Coal Mine in Hectian, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2020,53(04):66-71.
- 陈守建,王永,伍跃中. 西北地区煤炭资源及开发潜力[J]. 西北地质,2006,39(04):40-56.
- CHEN Shoujian, WANG Yong, WU Yuezong. Coal Resources and Development Potential in Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2006,39(04):40-56.
- 巨天乙,夏玉成,侯恩科,等. 霍州曹村矿下组煤底板高承压水突出条件剖析[J]. 西北地质,1994,(02):13-17.
- 冯绪兴,郝少伟. 浅析潞安矿区王庄煤矿后备区构造特征[J]. 煤,2015,24(01):63-65.
- Clark I D, Fritz P. Environmental isotopes in hydrogeology [M]. New York: Lewis Publishers, 1997:35-37.