

MORPAS 证据权重法找矿预测模型在郝泉沟金矿床勘查中的成功应用

高雅^{1,2}, 刘彦良^{1,2*}, 陈守余³, 李正华⁴, 郭东宝^{2,5}, 牛广德¹

(1. 甘肃省有色地质调查院; 2. 自然资源部黄河上游战略性矿产资源重点实验室;

3. 中国地质大学(武汉)资源学院; 4. 甘肃省有色金属地质勘查局白银矿产勘查院;

5. 甘肃省有色金属地质勘查局兰州矿产勘查院)

摘要:郝泉沟金矿床位于北祁连成矿带,作为白银厂铜多金属矿田及周边地区早古生代海相火山岩系中发现的首例独立金矿床,因极具代表性而备受关注。目前,该矿床控矿规模已达中型。在系统研究郝泉沟金矿床区域成矿背景、矿区地质、矿床地质、地球化学特征等控矿因素的基础上,将各因子量化并定量分析,总结成矿规律、梳理找矿模型,依托 MORPAS 软件,运用证据权重法进行金矿找矿预测工作。在对矿区划分网格单元的前提下,将地层、断裂、侵入岩、岩脉、Au 异常、Mo 异常等 6 个成矿因子与已知矿体、矿点分布进行比对并计算单个因子的成矿有利度,根据综合权重成矿有利度等值线图精准圈定 2 处找矿靶区,为进一步勘查部署工作提供论证参考依据。研究成果可为白银厂铜多金属矿田及周边地区寻找独立金矿提供借鉴,对该地区金资源量提升有重要意义。

关键词:北祁连成矿带; MORPAS; 定量分析; 证据权重法; 找矿模型; 成矿有利度; 郝泉沟金矿床; 甘肃省

中图分类号: TD15 P618.51

文献标志码: A

文章编号: 1001-1277(2025)11-0095-09

doi: 10.11792/hj20251114

引言

郝泉沟金矿床位于甘肃省白银市 330° 方向约 10 km 处,成矿区带划分归属于北祁连成矿带、白银厂—庄浪铜铅锌铁铬金银锰铁成矿亚带^[1],该成矿亚带因产出以白银厂铜多金属矿田为代表的、与海相火山岩有关的块状硫化物矿床而备受关注^[2-3]。过去数十年,在白银厂铜多金属矿及周边地区开展了大量找矿工作,发现了石青洞、猪嘴哑巴、峡沟井、中庄、朵家滩、银洞沟等一批金属矿床(点)^[4-6]。郝泉沟金矿床是白银厂铜多金属矿田及其周边地区早古生代海相火山岩系中发现的首例独立金矿床,因此,在北祁连成矿带东段具有代表意义。目前,该矿床控矿规模已达中型。前人先后对郝泉沟金矿床的赋矿地质体、控矿构造、矿体特征、矿石特征、金赋存状态、矿化富集规律、地球化学特征、地球物理特征、成矿机制等方面进行了系统研究,并对找矿标志、找矿方法、找矿前景、矿床成因等^[7-21]进行了深入探讨,综合来看,该矿床规模有望达到大型。但是,已有成果缺少对郝泉沟金矿床

成矿标志及控矿因子的综合定量分析,尤其欠缺对矿床深部和外围的定量化预测。

早在 1990 年就有学者将数学统计分析的方法引入地质矿产预测领域,建立了证据权重法预测模型,并在美国、加拿大、菲律宾等国家的成矿预测及潜力评价中成功应用^[22-28]。因此,采用证据权重法可对成矿有利区进行定量化预测、精准厘定潜在资源。本文在系统研究郝泉沟金矿床已有资料、总结成矿规律、梳理找矿预测模型的基础上,依托 MORPAS 软件,运用证据权重法,在对矿区划分网格单元的前提下,将各种成矿因子与矿体分布进行比对并计算单个因子的成矿有利度,筛选成矿有利因子,从而精准圈定金矿成矿有利地段,为进一步勘查部署工作提供论证依据。

1 区域成矿背景

郝泉沟金矿床大地构造位置为北祁连造山带东段(见图 1-A)石青洞—白银厂岩浆岛弧带内。区域经历了一系列漫长而复杂的演化过程,从古元古代到

收稿日期: 2025-07-08; 修回日期: 2025-09-12

基金项目: 甘肃省自然资源厅科技创新项目(202203); 国土资源部项目(2017025024)

作者简介: 高雅(1985—),女,工程师,从事数学地质和英文文献研究工作; E-mail: 442465357@qq.com

*通信作者: 刘彦良(1983—),男,高级工程师,从事地质矿产勘查和研究工作; E-mail: 317510246@qq.com

中生代,历经中国大陆形成,中祁连从华北板块南缘裂解-软碰撞,从而形成中祁连北缘沟-弧-盆体系,并发展为逆冲推覆造山及进入陆内演化等长

期剧烈的地质构造活动,形成断裂分布广泛、错综复杂的构造体系,为金属矿床的形成创造了良好的条件^[3]。

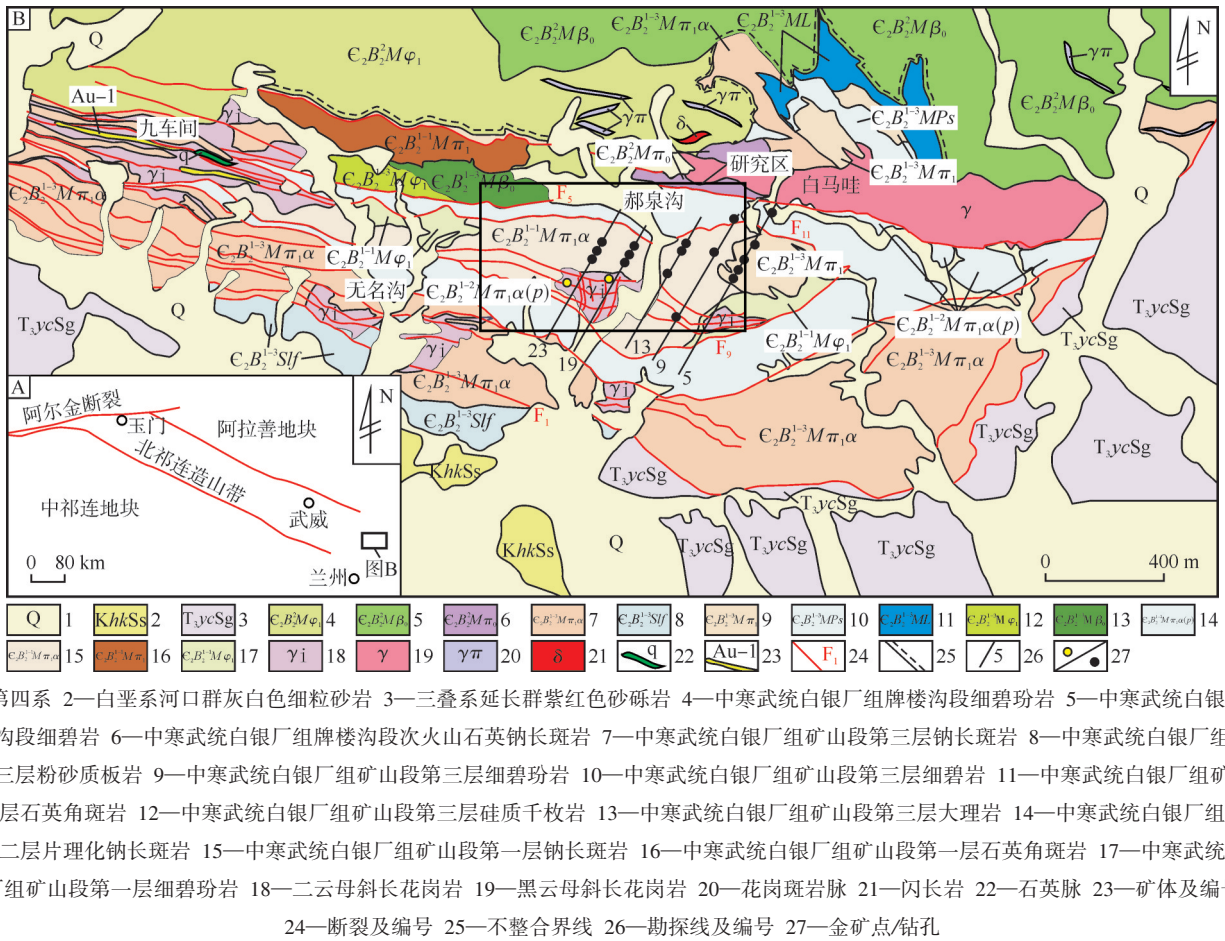


图1 郝泉沟金矿床大地构造位置图(A)及区域地质图(B)

Fig. 1 Sketch map of geotectonic locations(A) and regional geology(B) of Haoquangou Gold Deposit

区域地层分布连续性较好,从古元古界到泥盆系均有分布。早古生代火山岩极为发育,其中白银厂组中酸性火山岩系与金矿化关系密切。区域构造走向以北西向为主,断裂主要为中祁连北缘深大断裂;其伴生次级断裂石青硐—苏家湾断裂是著名的金矿成矿断裂,走向北西,倾向北东,性质为压性或压扭性,切割深,延伸长,两侧矿化蚀变程度高,沿该断裂分布有席茆水、郝泉沟、驴耳朵山、朵家滩、甘露池等多个金矿床。褶皱为白银厂复式背斜,由2个二级复式背斜和1个二级复式向斜组成。区域侵入岩分布较广,侵入时代以加里东期为主,从超基性到酸性均有出露。其中,与郝泉金矿床有关的是加里东晚期的酸性侵入岩。

2 矿区地质特征

郝泉沟金矿床位于白银厂铜多金属矿田西南部约10 km处。矿区内的地层、构造、岩浆及成矿活动

等均受黑石山穹隆控制。矿区出露地层有中寒武统白银厂组、上三叠统延长群、下白垩统河口群和第四系等(见图1-B)。其中,白银厂组与郝泉沟金矿床关系密切,进一步划分为矿山段和牌楼沟段,前者分为3层,主要由钠长斑岩和片理化钠长斑岩组成,是主要矿体赋存的二云母斜长花岗岩的围岩;后者主要由细碧岩、硅质千枚岩及少量大理岩等组成。矿区断裂发育,分为北西向、北西西向、北北东向、北东向、近南北向5组。其中,北西向断裂以F₁断裂为代表,为主要控矿构造,是石青硐—苏家湾区域大断裂的一部分,倾向北或北东;北西西向断裂最为发育,长度300~3 700 m,倾向180°~210°,倾角61°~87°,该断裂与金矿化关系密切,规模较大的往往充填有重晶石-石英-方解石脉、石英脉、花岗斑岩脉等,矿体产于其中;其余3组断裂规模较小。矿区褶皱表现为黑石山二级复式背斜的无名沟倒转背斜和白马洼倒转向斜,无名沟倒转背斜南翼倒转,北翼正常,核部地层为白银厂

组矿山段第一层钠长斑岩,向南翼依次为矿山段第二层片理化钠长斑岩、第三层钠长斑岩,北翼被断裂破坏^[14],矿体产于无名沟倒转背斜核部的二云母花岗岩中;白马洼倒转向斜南翼正常,北翼倒转,核部以白银厂组排楼沟段的基性火山岩为主,两翼则以白银厂组矿山段的酸性火山岩为主。矿区岩浆岩十分发育,侵入岩主要可以划分出3期:加里东早期细碧玢岩(与金矿化无关)、加里东中期花岗岩、加里东晚期花岗斑岩。其中,花岗岩可以划分为北、中、南3个岩带:北岩带由白马洼岩体及其分支小岩体构成^[24,29],以黑云母花岗岩为主;中岩带由郝泉沟岩体群和九车间岩体组成,岩性以二云母斜长花岗岩为主,侵位于无名沟倒转背斜核部^[7];南岩带由无名沟岩体等2个岩体构成,侵位于白银厂组矿山段第三层中,岩性以二云母斜长花岗岩为主。矿区各类岩脉发育,其中与金成矿关系密切的主要是花岗斑岩脉和石英脉,一般长几百到2 000多m,宽度2~12 m,北西西向,占半数以上已经发现金矿化。目前,已探获矿体均分布于二云母斜长花岗岩内,经钻探验证,郝泉沟岩体群在深部连为一体,具同源性且规模大,找矿前景广阔^[5]。

3 矿床地质特征

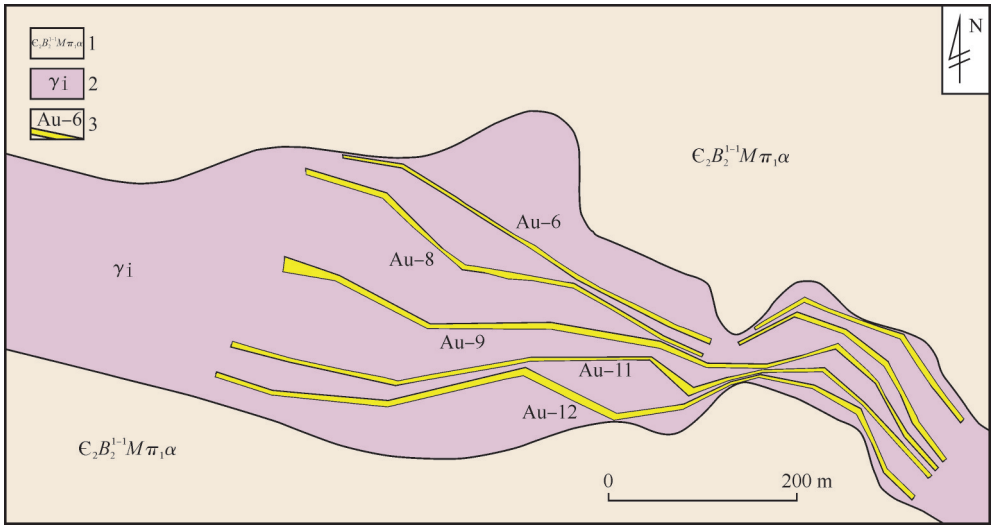
3.1 矿体特征

研究区可分为郝泉沟、九车间、白马洼、无名沟等4个矿段,共探获14条矿体。矿体形态、产状及规模严格受岩体内接触带和断裂构造破碎带控制,均产于二云斜长花岗岩中。岩体外围主要出露白银厂组矿山段地层,岩性包括钠长斑岩、石英角斑岩、细碧玢岩、千枚岩等。2011—2015年,于3勘探线—25勘探线圈定主矿体5条,矿体编号为6,8,9,11,12,矿体特征见表1。矿体形态包括似层状、囊状、透镜状等,矿体沿走向与倾向均有分支、复合、膨缩、尖灭、再现等现象(见图2)。矿体厚大部位多呈中间厚、边部薄的透镜状。

表1 郝泉沟金矿床矿体特征

Table 1 Characteristics of ore body in Haoquangou Gold Deposit

矿体 编号	长度/ m	倾向延伸/ m	厚度/ m	金品位/ 10 ⁻⁶	产状/(°)
6	580	400	1.6	5.62	7~30∠32~77
8	610	420	2.0	8.67	7~30∠30~75
9	610	530	1.8	5.63	7~30∠32~75
11	610	560	2.1	8.38	7~30∠32~78
12	610	800	1.3	7.00	7~30∠32~75



1—中寒武统白银厂组矿山段第一层钠长斑岩 2—二云母斜长花岗岩 3—矿体及编号

图2 郝泉沟金矿区隐伏矿体地质简图(1 500 m中段)

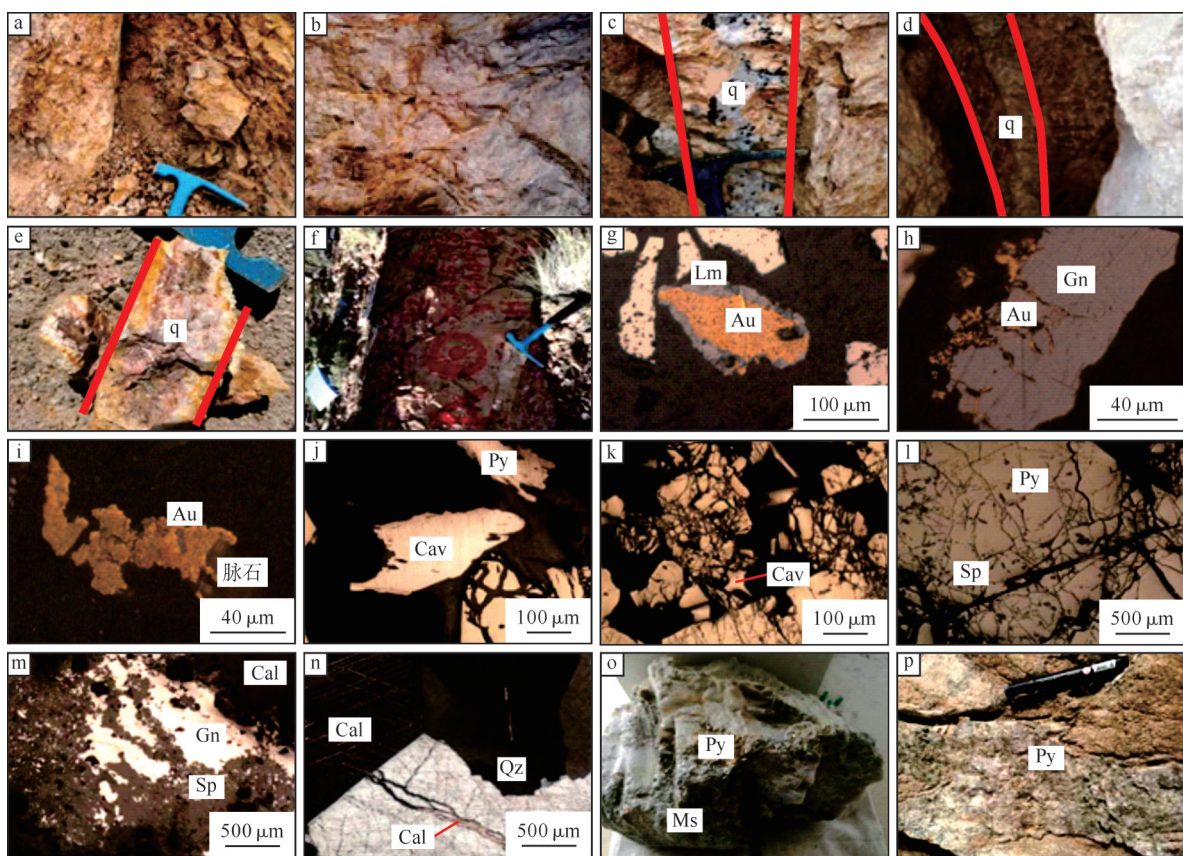
Fig. 2 Geological sketch map of hidden ore bodies in Haoquangou Ore District (middle section at 1 500 m)

3.2 矿石特征

矿石类型包括含金石英脉型和蚀变花岗岩型(见图3-a~f)^[30],石英脉型为南北向含矿带的主要矿化类型,蚀变花岗岩型为东西向含矿带的主要矿化类型。

金属矿物以黄铁矿为主,方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黝铜矿和碲金矿等次之。其中,碲金矿和黝铜矿

是主要成矿阶段的产物(见图3-j,k),其富集地段代表了金的富矿段。脉石矿物中石英占据多数,伴生有钾长石、白云母、绢云母和方解石等(见图3-a~f,n)。研究表明,矿石金品位与金属矿物的含量正相关,说明金矿化与硫化物关系密切(见图3-h~p)^[30]。矿石有用组分主要是金,伴生银,金的赋存形式主要为自然金,多见于黄铁矿、黝铜矿、闪锌矿、石英、碲铅矿



a、b—蚀变岩型金矿(化)体 c—石英脉型金矿(化)体 d—蚀变岩+石英脉复合型金矿(化)体 e—蚀变石英脉型金矿(化)体 f—蚀变花岗岩型金矿(化)体 g—褐铁矿半包裹自然金 h—方铅矿中裂隙金 i—充填在脉石中的裂隙金 j、k—碲金矿分布于黄铁矿网状裂隙或晶粒之间,呈不规则粒状 l—网状结构,形成于黄铁矿颗粒中的网状裂隙被闪锌矿等金属矿物交代 m—闪锌矿沿方铅矿的解理或边缘交代呈溶蚀交代结构 n—石英脉中的方解石 o—白云母、黄铁矿集合体呈团块状构造 p—黄铁矿呈星散状分布于石英脉中,呈浸染状构造 Lm—褐铁矿 Au—自然金 Py—黄铁矿 Gn—方铅矿 Sp—闪锌矿 Cav—碲金矿 Cal—方解石 Ms—白云母 Qz—石英 q—石英

图3 郝泉沟金矿床主要矿石结构构造照片

Fig. 3 Major ore structure in Haoquangou Gold Deposit

等主要载金矿物中(见图3-g~p);分布形式多呈粒间金、裂隙金,偶见少量包裹金;微细粒级嵌布,形态以不规则脉状、枝杈状等为主(见图3-g~i)^[16,31]。

矿石结构显示为典型的热液成因矿石结构,包括自形一半自形粒状结构、网状结构、压碎—压溶结构、充填结构、固溶体分离结构和溶蚀交代结构等。其中,黄铁矿颗粒分布于石英脉中,呈自形一半自形粒状,部分因构造应力作用呈棱角状破碎(见图3-p),破碎裂隙中分布压碎—压溶结构或溶蚀交代结构,多数形成于石英、闪锌矿等矿物充填交代;当黄铁矿颗粒中的网状裂隙被闪锌矿等金属矿物交代时,可形成网状结构和充填结构(见图3-l);自形黄铁矿的内部和边缘被闪锌矿等溶蚀交代,但仍保留了黄铁矿的自形形态即为骸晶结构^[16]。

矿石多见浸染状构造(见图3-o),细脉—网脉状、团块状构造(见图3-e)等次之。

3.3 围岩蚀变特征

围岩蚀变类型多样,各类型蚀变呈过渡关系,作

用强度从矿体向围岩呈递减趋势,并具有一定的分带特征。通常石英脉两侧及构造破碎带内蚀变作用强烈,以硅化、黄铁矿化、黄铜矿化、褐铁矿化(见图3-e~g)、绿泥石化、绢云母化、方铅矿化、高岭土化、云英岩化、黄钾铁矾化等为主,多呈碎裂状或泥状,原岩构造已不复存在,具备蚀变岩型矿体的形成条件;矿体外围以弱黄铁云(绢)英岩化、绿泥石化、碳酸盐化(见图3-n~o)等轻度蚀变为主,伴随较弱的金矿化;远离构造破碎带或矿体的围岩,以硅化、弱绢云母化、碳酸盐化为主。

4 地球物理、地球化学特征

区域重力场特征分析表明:矿区存在北西(西)向的局部重力高异常梯度带,与区域航磁局部串珠状高值异常带及高磁异常梯度带基本吻合,重磁同源异常带基本反映了深大断裂带的深部延伸特征等。矿石类型以石英脉型和构造蚀变岩型为主,前者为高阻体,而后者为与构造紧密相关的金属硫化物,富含黄

铁矿等,具低阻高极化率特征。

矿区共获得 1:10 000 岩屑地球化学测量样品 3 466 件,对样品进行了 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb、Hg、Rb、Sr、Ni、Co、Ba、W、Sn、Bi、Mo 等 17 种元素的分析测试,结果与质量精准可靠。结果显示:白银厂组矿山段第一层绢云母石英片岩中 Au 平均质量分数为 28.05×10^{-9} ,高于本区 Au 平均质量分数 5.74 倍,变异系数为 2.20,富集系数为 13.82,表明该地层及岩体大概率为含矿母岩之一^[15];二云母花岗岩 Au 质量分数为 $21.87\times10^{-9}\sim435.10\times10^{-9}$,显著高于祁连东段平均质量分数(2.03×10^{-9}),富集系数 10.78~214.33,变异系数 1.23~6.81,且二者呈正相关关系,说明该岩体对金成矿具有显著贡献,部分成矿物质来自岩浆分异;细碧玢岩、细碧岩 Au 平均质量分数分别为 12.33×10^{-9} 、 19.11×10^{-9} ,高于区域平均水平,变异系数分别为 1.14,2.04,富集系数分别为 6.08,9.41,表明细碧玢岩可能是成矿母岩之一。其次,与矿化带相应的断裂富集 Au、Ag、Pb、As、W、Bi、Mo 等 7 种元素,其中 Au、Bi 强烈富集;变异系数较大的为 Au、Ag、Pb、Mo、Bi 等 5 种元素,其中 Au 最大,断裂中元素富集系数与元素变异系数呈正相关关系,说明岩浆期后深部含金成矿热液

对金矿的形成也有一定的贡献,与 Au 异常套合的构造破碎带是找金矿的重要标志。钙质千枚岩、大理岩、钠长斑岩、石英角斑岩、次火山石英钠长斑岩、次细碧玢岩、紫红色砂岩、黑石山花岗岩、钾长石化花岗斑岩脉、岩体外部石英脉、花岗斑岩脉、重晶石石英脉等的 Au 平均质量分数小于或者接近区域平均质量分数,成矿概率较小。

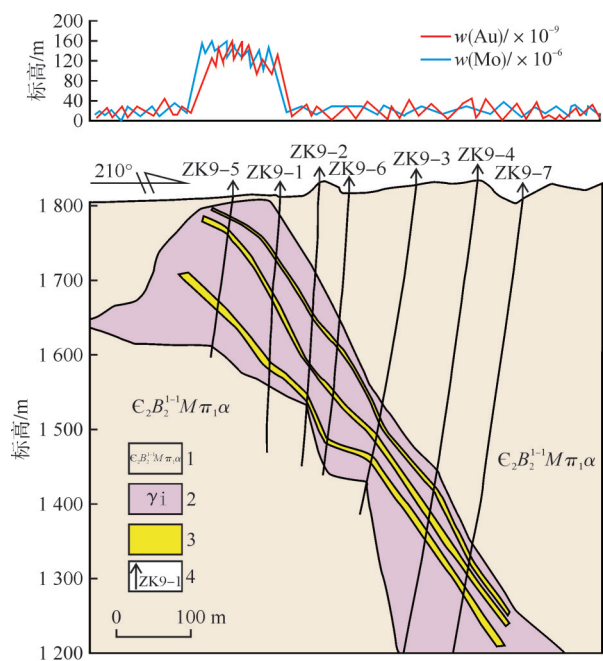
5 成矿预测

综上所述,郝泉沟金矿床产于二云母斜长花岗岩内,与构造破碎带关系极为密切。Ag 平均质量分数、矿体厚度、构造叠加程度、硅化程度(石英脉发育程度)、黄铁矿化程度(硫化物发育程度)及其破碎变质程度均与成矿富集程度呈正相关。矿区内矿(化)体及地球化学异常的空间分布受火山通道、构造与岩体三位一体联合控制。据此梳理出郝泉沟金矿床综合信息找矿预测模型(见表 2、图 4)。在此基础上,依托 MORPAS 软件,运用证据权重法对矿区内尚未发现矿体的区域开展金找矿预测,圈定找矿靶区,为下一步勘查部署工作提供论证参考依据。

表 2 郝泉沟金矿床综合信息找矿预测模型

Table 2 Synthetic information-based prospecting prediction model for Haoquangou Gold Deposit

成矿要素		描述内容	成矿要素分级	
矿床类型		构造蚀变岩型、石英脉型金矿床		
成矿地质背景	大地构造位置	北祁连造山带东段(Ⅳ-1)走廊弧后盆地(Ⅳ-1-1, O-S)石青洞—白银厂岩浆岛弧带	重要	
	区域成矿带	北祁连成矿带(Ⅲ-21)白银厂—庄浪铜铅锌铁铬金银锰铁成矿亚带(Ⅳ-21⑥)	重要	
	构造环境	早古生代大陆边缘裂谷火山带	重要	
	成矿时代	早加里东期	必要	
矿床特征	成矿地质体	二云母花岗岩、石英脉、花岗斑岩脉等	必要	
	成矿构造及成矿结构面	成矿构造为石青洞—苏家湾断裂,成矿结构面包括地层与岩体不整合接触界面、火山岩相界面	必要	
	矿体特征	层状、块状、脉状	重要	
	矿物组合	金属矿物为黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、黝铜矿和碲金矿等,非金属矿物为石英、白云母、钾长石、绢云母	重要	
	成矿作用特征标志	矿石结构构造	自形—半自形粒状结构、网状结构、压碎—压溶结构、溶蚀交代结构、充填结构和固溶体分离结构等,浸染状构造、细脉—网脉状构造、团块状构造等	重要
	蚀变类型	硅化、褐铁矿化、绢云母化、黄铁矿化、方铅矿化、绿泥石化、高岭土化、黄钾铁矾化、黄铜矿化、绿泥石化、云英岩化、碳酸盐化等	次要	
	主成矿元素	Au	次要	
	控矿因素	矿体受构造破碎带控制明显,北西(西)向断裂和褶皱严格控制矿体的展布;已发现矿体全部产于二云母斜长花岗岩内	重要	
找矿标志	地质找矿标志	二云母斜长花岗岩,北西(西)向断裂和褶皱,石英脉、花岗斑岩脉等,硅化、绢云母化、绿泥石化、褐铁矿化、黄铁矿化、黄铜矿化、方铅矿化、云英岩化、高岭土化、黄钾铁矾化、绿泥石化、碳酸盐化等	必要	
	地球物理标志	局部重力高异常带和航(地面)磁异常中的磁力高带,通过重磁同源异常可以从宏观上反映深大断裂的深部延伸特征等,激电异常表现为高阻(硅化带)高极化(硫化物带)		
	地球化学标志	Au、Mo等组合异常为重要找矿标志		



1—中寒武统白垩组矿山段第一层钠长斑岩 2—二云母斜长花岗岩
3—矿体 4—钻孔编号及孔深(m)

图4 郝泉沟金矿床综合信息找矿预测模型

Fig. 4 Synthetic information-based prospecting prediction model for Haoquangou Gold Deposit

5.1 证据权重法原理

证据权重法基本原理是把每一种独立的地质信息看作用于成矿预测的因子,每一个因子对成矿预测的贡献决定了该因子的权重。首先,通过对比不同地质与已知矿点的关系,计算不同因子的权重(W^+ 和 W^-),从而得到具有不同矿化信息的图层,进而应用贝叶斯概率定理的线性对数对这些证据层进行叠加操作,根据不同图层对某一地区可能存在矿床的贡献大小不同(先验概率),计算出该区域存在矿床的可能性大小(后验概率)(见图5)。后验概率等值线图即为成矿潜力图,反映已知矿床和未经证实预测矿床的空间分布^[32-34]。

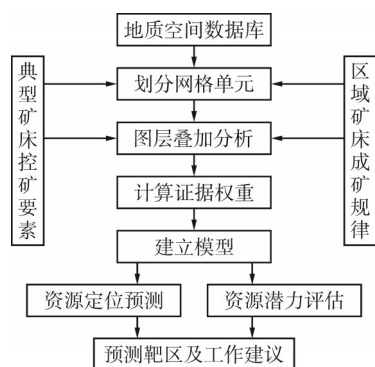


图5 证据权重法预测流程

Fig. 5 Evidence weight-based prediction process

其数学原理如下:假设矿区被划分成为 T 个面积无穷小且相等的网格单元,确保每个网格单元只包含

1种地质信息,称之为证据因子。其中,含有已知矿(床)点的网格单元数记为 D ,含有某一独立证据因子的网格单元数记为 B ,则对于任意一个证据因子,其对成矿贡献的权重为:

$$W^+ = \ln \left\{ \frac{P(B|D)}{P(B|\bar{D})} \right\} \quad (1)$$

$$W^- = \ln \left\{ \frac{P(\bar{B}|D)}{P(\bar{B}|\bar{D})} \right\} \quad (2)$$

式中: W^+ 、 W^- 分别为证据因子存在和不存在的权重值,如果原始数据缺失,那么权重值为0; P 表示证据因子(B)与已知矿点(D)之间关系的条件概率; D 为存在已知矿(床)点的网格单元数; \bar{D} 为不存在已知矿(床)点的网格单元数; B 为某一证据因子存在的网格单元总数, \bar{B} 为该因子不存在的网格单元总数^[35-36]。

根据上述地质背景及地球化学特征,本次研究工作提取的每个变量均视为独立的证据因子。对于 n 个证据因子,在保证它们都关于矿点条件独立且彼此独立时,矿区内任一网格单元 k 为有矿的后验概率对数为:

$$\ln \{O(D|B_1^k B_2^k \cdots B_n^k)\} = \sum_{j=1}^n W_j^k + \ln O(D)$$

式中: O 为后验概率; j 为证据因子数。

根据公式,后验概率为: $P=O/(1+O)$ 。后验概率 P 代表了各单元内找矿的有利度,根据后验概率提出找矿有利区^[28]。控矿地质因素与矿床产出状态之间的关联性强弱,可以通过正负权重的差值来度量,即: $C=W^+ - W^-$ ^[37]。 C 值高表示该地质信息的找矿指示性好, C 值低表示该地质信息的找矿指示性差。 $C=0$ 表示该找矿标志对矿与无矿无指示意义, $C>0$ 表示该地质信息的出现有利于成矿, $C<0$ 表示该地质信息的出现不利于成矿^[38-42]。 W^+ 值高说明该地质信息出现时有矿概率较高,反之, W^- 绝对值高说明该地质信息不存在时无矿概率较高;在具体操作中,往往会出现 C 值较高,但 W^+ 较低、 W^- 较高的现象,这种现象说明该找矿标志不存在则无矿概率较高,但不能较好反映其与成矿的关联程度。为了避免预测因子过多造成大量“假异常”或因因子过少造成部分成矿有利区被遗漏,实际操作中往往选取 C 值较高,且 W^+ 值较高的因子,以提高预测精度。

5.2 证据因子提取

本次研究分别对地层、构造、侵入岩、脉岩及Ag、As、Au、Ba、Bi、Co、Cu、Hg、Mo等单元元素异常与成矿的关系进行量化。

地层:已知矿床均产于中寒武统白银厂组矿山段地层中,因此选择该地层作为主要的预测依据之一。

构造:该矿床的形成主要受北西向苏家湾—石青砬断裂控制,该断裂旁侧发育的次级断裂是重要的容矿构造,矿体赋存于北西西向和近南北向断裂中,断裂是主要的预测依据之一。

侵入岩:已知矿床均产于二云母斜长花岗岩中,选择该类型的岩体作为预测要素之一。

脉岩:金矿化与花岗斑岩脉及石英脉关系较密切,本次也作为预测要素之一。

地球化学异常:矿体产于 Hy4 号综合异常内,和单元素异常 Au9 和 Mo11 套合最好,因此选择 Au 和 Mo 2 种元素异常和综合异常作为本次预测的依据之一。

5.3 变量二值化

对变量和矿点的关系进行分段统计,选取绝大多数已知矿点落入的区间作为阈值,区间内记 1,区间外记 0,从而对连续变化的变量进行二值化,结果分述如下:

分别对地质信息和矿点数关系分段统计,结果显示:绝大多数矿点都落入地层组合熵、侵入岩组合熵、脉岩组合熵无限趋于 0 的区间内,可见该地区成矿有利地层、侵入岩、脉岩都极度单一。断裂有条数、等密度、对称度、优益度等多个变量,彼此相关性较高。为保证变量之间彼此独立,将与断裂有关的变量相加,构成断裂综合变量,分段统计结果显示,绝大多数矿点落在-0.19~1.38。矿点在断裂两侧分布情况统计结果显示,超过 90 % 的矿点分布在距离断裂 47 m 范围内。岩屑地球化学测量数据计算得出,Au 异常下限为 20 mg/t,矿区内 3 个二云母斜长花岗岩均有高值异常分布,故将 ≥ 20 mg/t 的数据定义为 1,其他定义为 0,以达到二值化。Mo 异常下限为 5 g/t,因此将 ≥ 5 g/t 的数据定义为 1,其他定义为 0,以达到二值化。

5.4 证据因子的权重计算

各种证据因子的权重由计算机自动计算,各证据因子权重见表 3。其中,侵入岩权重最大,Au 异常权重次之,这与矿体赋存在岩体中和 Au 异常中的事实相符;其次为断裂和地层,最后为脉岩和 Mo 异常,证据因子成矿有利度等值线图见图 6。为避免过多证据因子造成假性“有利区”或证据因子过少造成部分有利区被遗漏,根据上述预测指标的权重,选取 C 值为正且 W⁺较高的因子进行预测,从而高效、精准圈定成矿有利区。

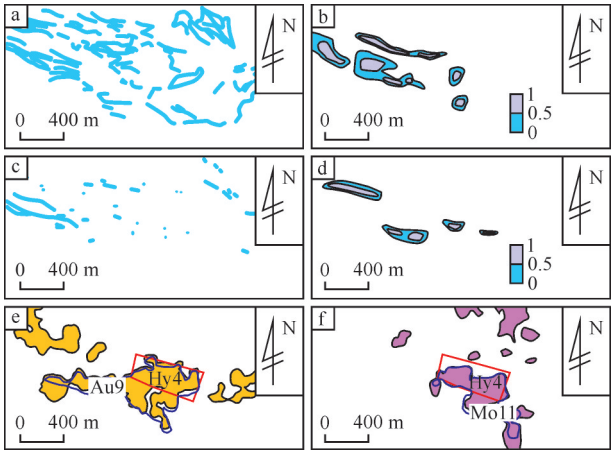
5.5 预测结果与评价

本次工作以郝泉沟金矿床为模型区,综合分析

表 3 各证据因子权重

Table 3 Weights of each evidence factor

证据因子	W ⁺	W ⁻	C	备注
侵入岩组合熵	4.748	-1.901	6.649	预测要素
侵入岩种类数	2.644	-2.577	5.221	
脉岩组合熵	0.877	-0.011	0.888	预测要素
脉岩种类数	0.278	-0.024	0.302	
白银厂组矿山段	0.083	-0.037	0.120	预测要素
二云斜长花岗岩	0.000	0.000	0.000	
石英脉	0.000	0.000	0.000	
缓冲区组合熵	0.879	-0.070	0.949	
缓冲区种类数	1.227	-39.050	40.277	
侵入岩组合熵二值化	-1.603	4.765	-6.368	
脉岩组合熵二值化	-0.012	0.883	-0.894	
缓冲区组合熵二值化	-0.063	0.827	-0.889	
Au 异常	1.788	-3.479	5.267	预测要素
断裂综合指标	2.146	-0.035	2.181	预测要素
断裂二值化	-0.034	2.047	-2.082	
Mo 异常	0.487	-0.078	0.565	预测要素
地层组合熵	-2.095	0.047	-2.143	
地层种类数	-1.640	0.955	-2.595	
地层组合熵二值化	0.047	-2.085	2.132	
断裂	1.592	-0.005	1.598	



a—地层组合熵 b—断裂缓冲区组合熵 c—脉岩组合熵
d—侵入岩组合熵 e—Au 异常 f—Mo 异常

图 6 证据因子成矿有利度等值线图

Fig. 6 Favorableness degree isogram of each evidence factor for mineralization

各成矿要素权重并生成相关等值线图。根据成矿有利度等值线图等综合圈定 2 处找矿靶区(见图 7),各个找矿靶区特征分述如下:

九车间找矿靶区:位于矿区西北部,长 1.25 km,宽 0.80 km,面积 1.00 km²。该找矿靶区内出露地层主要是白银厂组矿山段,北部少许排楼沟段。北西向断裂极为发育,褶皱属于无名沟倒转背斜的一部分。侵入岩主要是九车间二云母斜长花岗岩,脉岩主要是花

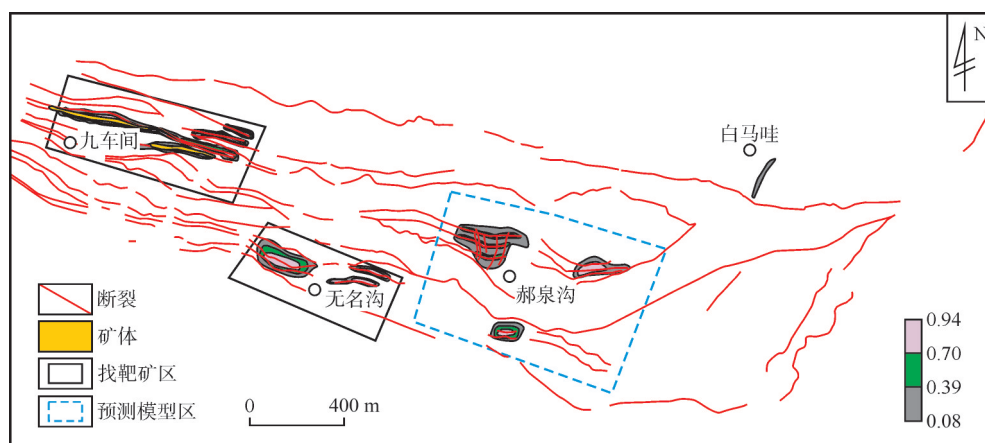


图7 MORPAS证据权重法在郝泉沟金矿床预测成果图

Fig. 7 Prediction results of evidence weight-based MORPAS in Haoquangou Gold Deposit

岗斑岩脉,石英脉较为常见。找矿靶区内圈出Au、Mo、Sr综合异常1处,以Au异常为主,局部有Mo异常,Sr异常为点异常。成矿地质条件与郝泉沟金矿床类似,具有较好的找矿前景。预测后进行了勘查验证,目前地表已圈出2条矿体,进一步找金潜力较大。

无名沟找矿靶区:位于矿区南部,长1.60 km,宽0.40 km,面积0.64 km²。出露地层主要是白银厂组矿山段。断裂较发育,西段断裂较密集,位于无名沟背斜的南翼。侵入岩为无名沟二云母斜长花岗岩体,脉岩主要是花岗斑岩脉,石英脉较为常见。地球化学异常元素组合以Au、Mo为主,W异常也有一定规模。该找矿靶区进一步找金前景较好。

6 结论

1)郝泉沟金矿床的发现和勘查过程表明,祁连山东段白银厂铜多金属矿田的早古生代海相火山岩带及其相对应的构造岩浆热事件为大中型金矿床的形成提供了良好成矿地质条件,并与区域上古亚洲洋、特提斯构造域发生的大规模金铜成矿事件遥相呼应,为中国西部地区进一步寻找金铜矿增添了新的经验启迪。

2)结合区域成矿背景分析和典型矿床研究,通过量化分析确定找矿标志并构置综合信息预测变量,有利于优化筛选找矿信息并将各成矿因素量化分析,从而选择与成矿关系最密切的变量进行成矿预测和评价,目标明确、可行。勘查成果显示,九车间找矿靶区地表已圈出2条矿体,证明本次证据权重法预测的结果合理可靠,研究思路可行。

3)九车间找矿靶区、无名沟找矿靶区是下一步找矿突破的重点地段。勘查结果表明,含矿二云母斜长花岗岩在深部连为一体,存在隐伏大规模的二云母斜长花岗岩,暗示深部找矿潜力巨大。这为进一步部署勘查找矿工作提供了参考依据。

4)基于MORPAS软件提供的证据权重法,综合成

矿信息,可以有效地对多源地学信息进行快速优化综合,并以定量方式表示出来,使得预测结果更为直观、可靠,便于再次思考、分析处理和动态调整勘查工作部署。

【参考文献】

- [1] 张新虎,任丰寿,余超,等.甘肃成矿系列研究及矿产勘查新突破[J].矿床地质,2015,34(6):1130-1142.
- [2] 高兆奎,陈守宇,韩要权,等.甘肃省白银矿田火山岩型铜多金属矿床找矿方向探讨[J].甘肃地质,2009,18(3):1-5.
- [3] 刘彦良,高雅,季文中,等.甘肃白银厂及其外围地区金属矿成矿规律及矿产预测[J].中国地质调查,2020,7(4):43-53.
- [4] 董凯.甘肃白银厂铜矿成岩—成矿环境及其找矿意义[D].武汉:中国地质大学(武汉),2018.
- [5] 覃伟.甘肃白银郝泉沟矿区埃达克质花岗岩地球化学特征及找矿意义[D].武汉:中国地质大学(武汉),2018.
- [6] 覃伟,陈守余,赵江南,等.白银厂酸性火山岩地球化学特征及成因分析[J].地质找矿论丛,2018,33(3):425-433.
- [7] 张照志,王志远.甘肃白银郝泉沟金矿控矿构造研究[J].黄金地质,2002,8(1):6-10.
- [8] 王光宁.甘肃白银地区金矿成矿规律及找矿方向[J].黄金科学技术,2000,8(3):24-28.
- [9] 王长宪.长英质浅成侵入岩体研究与白银地区地质找矿前景[J].有色金属,2003,55(2):109-112,118.
- [10] 卢文忠.甘肃郝泉沟金矿床的初步认识[J].新疆有色金属,2009,32(增刊1):39-41.
- [11] 王懋海,朱来东.郝泉沟金矿地质成矿特征及找矿前景分析[J].甘肃冶金,2013,35(3):58-61.
- [12] 王懋海,朱来东.黑石山地区金矿成矿地质条件分析及找矿方法浅析[J].甘肃冶金,2013,35(4):65-68.
- [13] 董泰山.甘肃郝泉沟金矿床地质特征及找矿标志浅析[J].世界有色金属,2018(20):102,104.
- [14] 蔡靖.白银市郝泉沟金矿控矿因素及找矿标志[J].甘肃冶金,2019,41(6):89-91,95.
- [15] 吴东.甘肃省白银市郝泉沟矿区地球化学特征及矿化富集规律[J].世界有色金属,2019(3):99-100.
- [16] 吴东.甘肃省白银市郝泉沟金矿床矿石特征浅析[J].甘肃冶金,2020,42(4):116-119.
- [17] 马亚明.甘肃成县小沟里金矿床矿体分布规律及深部找矿效果[J].黄金,2022,43(6):23-26.
- [18] 高延龙,杜等虎,王志军,等.甘肃文县安坝里金矿床地质特征及成矿作用[J].黄金,2022,43(9):28-34.
- [19] 周福钱.甘孜—理塘成矿带梭罗沟式金矿床找矿模型初探[J].黄金,2022,43(2):6-14.
- [20] 莫文毅,刘云华,刘占晋,等.冀东矿集区金厂峪金矿床“三位一

- 体”成矿预测模型及找矿预测[J].黄金,2024,45(11):1-8.
- [21] 张长征.金厂沟梁金矿田“三位一体”成矿模式[J].黄金,2022,43(4):23-26.
- [22] 李向文,白令安,王可勇,等.上黑龙江成矿带基于证据权重法的金矿综合信息成矿预测[J].黄金,2017,38(3):19-24.
- [23] BOLENEUS D E, RAINES G L, CAUSEY J D, et al. Assessment method for epithermal gold deposits in northeast Washington State using weights of evidence GIS modeling[R]. Washington: U S Geological Survey, 2001:30-39.
- [24] AGTERHERG F P. A modified weights-of-evidence method for regional mineral resource estimation[J]. Natural Resources Research, 2011, 20(2):95-101.
- [25] PORWAL A, CARRANZA E J M. Introduction to the special issue: GIS-based mineral potential modelling and geological data analyses for mineral exploration[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 71:477-483.
- [26] CARRANZA E J M, LABORTE A G. Data-driven predictive mapping of gold prospectivity, Baguio district, Philippines: Application of Random Forests algorithm [J]. Ore Geology Reviews, 2015, 71: 777-787.
- [27] 刘世翔,薛林福,孙丰月,等.地理信息系统在黑龙江西北部金矿成矿预测中的应用[J].黄金,2007,28(7):7-12.
- [28] BEHERA S, PANIGRAHI M K. Gold prospectivity mapping and exploration targeting in Huttí-Maski schist belt, India: Synergistic application of Weights-of-Evidence (WOE), Fuzzy Logic (FL) and hybrid (WOE-FL) models[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2022, 235: 106963.
- [29] 赵国斌,杨合群,任华宁,等.北祁连黑石山花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J].地质通报,2013,32(10): 1 575-1 583.
- [30] 田光礼.甘肃白银郝泉沟矿区成矿地质条件及找矿预测[D].武汉:中国地质大学(武汉),2018.
- [31] 朱来东,王光宁,张青草.甘肃白银郝泉沟金矿的赋存状态研究[J].矿冶,2013,22(3):119-122.
- [32] 刘芳,王雷,王飞.凤太矿集区基于 MRAS 证据权重法的金矿床找矿预测[J].黄金,2022,43(7):17-21.
- [33] 赵志伟,刘锐,蔺鹏飞,等.基于 MORPAS 的敖汉旗林家地金多金属成矿远景区预测[J].矿产勘查,2022,13(6):785-796.
- [34] 邓军,战明国,周伟金,等.基于模糊证据权法的广西典型金矿矿产定量预测[J].地质力学学报,2021,27(3):374-390.
- [35] 耿瑞瑞,范洪海,孙远强.基于证据权法的鹿井铀矿床三维预测研究[J].地质论评,2021,67(增刊1):225-226.
- [36] 滕菲,彭丽娜,孟庆龙,等.证据权法在河北丰宁地区银铅锌多金属成矿预测中的应用[J].华北地质,2021,44(1):21-26.
- [37] 刘亚洲,申维.基于 GIS 的证据权法在铁力-二股地区铅锌多金属矿床预测中的应用[J].地质与勘探,2018,54(1):59-68.
- [38] WANG Z J, CHENG Q M. GIS-based (W^+ - W^-) weight of evidence model and its application to gold resources assessment in Abitibi, Canada [J]. Journal of China University of Geosciences, 2006, 17(1):71-78.
- [39] 赵江南,陈守余,商伟.基于 GIS 证据权重法的祁连山地区铜矿床成矿预测[J].地质找矿论丛,2009,24(1):41-46.
- [40] 肖克炎,樊铭静,孙莉,等.矿床成矿系列综合信息预测理论方法及其应用[J].地球学报,2023,44(5):769-780.
- [41] 薛顺荣,肖克炎,丁建华.基于 MRAS 的证据权重法在香格里拉地区的综合信息成矿预测[J].吉林大学学报(地球科学版),2008,38(5):738-744.
- [42] FU C L, CHEN K X, YANG Q H, et al. Mapping gold mineral prospectivity based on weights of evidence method in southeast Asmara Eritrea [J]. Journal of African Earth Sciences, 2021, 176: 104143.

MORPAS-based weights of evidence method for mineral prospecting modeling and its successful application in exploration of Haoquangou Gold Deposit

Gao Ya^{1,2}, Liu Yanliang^{1,2}, Chen Shouyu³, Li Zhenghua⁴, Guo Dongbao^{2,5}, Niu Guangde¹

(1. Gansu Nonferrous Metal Geological Survey Institute;

2. Key Laboratory of Mineralization and Exploration of the Upper Yellow River, MNR;

3. School of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan);

4. Baiyin Mineral Exploration Institute, Gansu Nonferrous Metal Geological Exploration Bureau;

5. Lanzhou Mineral Exploration Institute, Gansu Nonferrous Metal Geological Exploration Bureau)

Abstract: The Haoquangou Gold Deposit, located in the North Qilian Metallogenic Belt, represents the first independent gold deposit discovered in the Early Paleozoic marine volcanic sequence of the Baiyinchang Copper-Polymetallic Ore Field and surrounding areas, attracting significant attention due to its representative nature. Currently, this deposit has reached medium-scale ore-control capacity. Based on systematic studies of regional metallogenic background, mining area geology, deposit geology, and geochemical characteristics as ore-control factors in the Haoquangou Gold Deposit, various factors were quantified and quantitatively analyzed to summarize metallogenic patterns and establish a prospecting model. By using the MORPAS software platform, gold prospecting prediction was conducted through the weights of evidence method. Under the premise of dividing the mining area into grid units, six metallogenic factors including strata, faults, intrusive rocks, dikes, Au anomalies, and Mo anomalies were compared with known ore bodies and mineral occurrence distributions to calculate the metallogenic favorability of individual factors. According to the comprehensive weight metallogenic favorability contour map, two prospecting target areas were precisely delineated, providing a demonstration reference for further exploration deployment. This research offers valuable insights for exploring independent gold deposits in the Baiyinchang Copper-Polymetallic Ore Field and surrounding areas, holding significant importance for enhancing gold resources in this region.

Keywords: North Qilian Metallogenic Belt; MORPAS; quantitative analysis; weights of evidence method; prospecting model; metallogenic favorability; Haoquangou Gold Deposit; Gansu Province