



河南省嵩县九仗沟金矿综合找矿模型

谢彦军, 曹杰, 李水平, 张爱玲, 冯攀, 宋永利

河南省第二地质矿产调查院有限公司, 河南 郑州 450001

摘要: 以河南省嵩县九仗沟构造蚀变岩型金矿床地质、地球物理和地球化学等多源找矿信息为基础, 全面系统地总结该矿床综合找矿流程和勘查模型。通过区域重磁测量异常筛选找矿远景区; 1:50 000 水系沉积物异常选定找矿靶区; 靶区 1:10 000 专项地质填图, 发现与金成矿有关的断裂构造带, 进一步确定找矿靶区; 1:10 000 土壤地球化学异常确定断裂含矿性, 缩小找矿靶区; 原生晕剖面微量元素峰值部位确定 F1 构造矿化蚀变带位置; 大功率激电测深和 EH-4 双源大地电磁测深查明深部构造蚀变带和矿(化)体延伸特征, 二者相互补充、佐证, 定位预测深部找矿靶区。

关键词: 容矿构造; 勘查地球物理; 勘查地球化学; 找矿勘查模型; 金矿床; 河南省

Integrated prospecting model of Jiuzhanggou gold deposit in Songxian County, Henan Province

XIE Yan-jun, CAO Jie, LI Shui-ping, ZHANG Ai-ling, FENG Pan, SONG Yong-li

Henan No. 2 Institute of Geological and Mineral Resources Survey Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China

Abstract: Based on the multi-source prospecting information of geology, geophysics, and geochemistry on Jiuzhanggou gold deposit of structural altered rock type in Songxian County, Henan Province, this study comprehensively summarizes the integrated prospecting process and exploration model as follows: Screening the prospecting prospective areas by regional gravity and magnetic survey anomaly; Selecting the prospecting targets through the anomaly of 1:50 000 stream sediment survey; Finding the fault belts related to gold mineralization with the 1:10 000 specific geological mapping, further determining the prospecting target areas; Determining the ore-bearing potential of faults based on the anomaly of 1:10 000 soil geochemical survey to narrow down the target areas; Locating the F1 structural mineralized zone according to trace element peak position in primary halo profile; Applying high-power induced polarization (IP) sounding and EH-4 dual-source magnetotelluric (MT) sounding to identify deep structural alteration zone and orebody extension characteristics, with both methods complementing and verifying each other for positioning and prediction of deep prospecting targets.

Key words: ore-host structure; exploration geophysics; exploration geochemistry; prospecting model; gold deposit; Henan Province

收稿日期: 2023-12-20; 修回日期: 2024-01-25. 编辑: 李兰英.

基金项目: 河南省“两权价款”地质科研项目“河南省嵩县东湾-槐树坪金矿床地球化学特征及成矿预测研究”(豫国土资函[2015]258号); 河南省地质矿产勘查开发局地质科研项目“河南省嵩县九仗沟-东湾金矿区深部找矿预测研究”(豫地矿勘查[2022]04号).

作者简介: 谢彦军(1981—), 男, 工程师, 从事地质与地球物理矿产勘查工作, 通信地址 河南省郑州市高新区莲花街 56 号, E-mail//592510049@qq.com

通信作者: 李水平(1963—), 男, 正高级工程师, 从事地球物理矿产勘查和研究工作, 通信地址 河南省郑州市高新区莲花街 56 号, E-mail//hndzslp@126.com

引用格式: 谢彦军, 曹杰, 李水平, 张爱玲, 冯攀, 宋永利. 河南省嵩县九仗沟金矿综合找矿模型[J]. 地质与资源, 2025, 34(2): 177-191.

Xie Y J, Cao J, Li S P, Zhang A L, Feng P, Song Y L. Integrated prospecting model of Jiuzhanggou gold deposit in Songxian County, Henan Province [J]. *Geology and Resources*, 2025, 34(2): 177-191.

0 引言

熊耳山-外方山矿集区是我国重要的金、银及多金属产区之一,区内矿种齐全,类型丰富,构造、岩浆活动强烈,成矿条件优越^[1-2]。近年来,随着整装勘查工作的进行,本区的找矿取得了重要突破,九仗沟金矿是其中的典型,它的发现为区内找矿开拓了新思路。河南省嵩县九仗沟金矿位于熊耳山-外方山矿集区内的蛮峪-店房金矿带之北段,累计探明金储量 13 934 kg,矿床规模达大型。

九仗沟金矿是在综合分析研判区域重磁异常筛选找矿远景区基础上,以 1:50 000 水系沉积物异常确定的找矿靶区,在靶区内开展常规的地质、地球物理、地球化学相结合的综合勘查技术方法而发现的。1:10 000 矿产专项地质填图,发现九仗沟 M_1 含金构造破碎蚀变带,沿该构造蚀变带开展土壤地球化学测量,在土壤地球化学异常部位布置大功率激电测深查明深部构造蚀变带和矿(化)体延伸特征。经过不同类型的探矿工程对土壤地球化学和地球物理异常进行检查验证,取得了找矿突破性进展。

以往九仗沟矿区内及区域上的勘查研究成果主要侧重于矿床地质、地球化学特征、矿床成因、控矿条件、成矿规律和找矿预测等方面^[3-14],尚未对矿区找矿勘查工作进行全面的系统性综合总结,至今缺乏对该矿床综合找矿模型研究。本研究在对九仗沟金矿床综合总结基础上,以地质、地球物理和地球化学等多源找矿信息为依据,建立该矿区多源信息找矿模型,确立构造蚀变型金矿找矿方法组合和 workflows,为深、边部找矿勘查提供理论依据,为国家新一轮找矿突破战略行动提供支持。

1 区域成矿背景

九仗沟金矿区位于华北地台南缘,熊耳山断隆与潭头-嵩县断陷盆地的接合部位(图 1)。区域地层主要由新太古界太华岩群、中元古界长城系熊耳群及新生界组成。太华岩群是华北地台的结晶基底,为一套以片麻岩为主的中深变质岩系,混合岩化作用强烈,变质程度达角闪岩相—麻粒岩相。长城系熊耳群是本区最主要的盖层岩系,区域内大面积出露,自下而上由许山组、鸡蛋坪组、马家河组组成,与下伏地层呈角度不整合或断层接触,为一套中基性—中酸性火山熔岩组成

的双峰式火山岩,局部见火山碎屑岩及沉积岩夹层。鸡蛋坪组为区域内的主要赋矿地层。新生界分布于潭头-大章新生代断陷盆地,主要岩性为紫红色黏土岩、黄色厚层状砾岩、砂质砾岩等,与下伏地层呈角度不整合或断层接触。

区域构造按产出形态分为褶皱、断裂、火山机构 3 种主要类型,其中褶皱不发育,以断裂构造最为发育,火山机构多达数十个^[16-18]。规模不同的断裂构造纵横交错,分为近东西、北东、北北东、北北向 4 组,以近东西向和北东向断裂最发育。近东西向断裂多为成矿前断裂,以马超营断裂为主体,自北向南近于平行排列。北北东向断裂是区域最主要的控矿断裂之一,区域内金矿床均直接或间接受该组断裂控制。

区域岩浆活动频繁且强烈,主要表现为火山喷发和岩浆侵入活动,且具有长期性、多期次活动的特点。岩浆岩分布极广,多呈岩基产出。根据岩浆活动时代不同可划分为晋宁期、印支期和燕山期 3 个时期,其中尤以燕山期岩浆活动最为频繁而强烈,印支期—燕山期岩浆活动与金-钼成矿关系较为密切。前人通过研究发现,区域上多金属矿产的形成与早白垩世中酸性岩浆的侵入活动关系密切,现有矿床分布比较集中的区域,深部都有隐伏岩体赋存。布格重力低异常推断是由规模巨大的隐伏花岗侵入岩体引起^[19-20]。

区域矿产以贵金属金、银为主,次为有色金属铅、锌、铜等,非金属矿产有萤石、瓷石、石墨、硫、钾长石等。金矿是本区的主要矿种,其分布严格受断裂构造破碎带控制。目前,区域内已发现大、中型金矿数十处,主要有北岭、前河、店房、崔香洼、庙岭、九仗沟、槐树坪等大中型金矿床。

1:100 000 区域布格重力表现为非常明显的重力低异常,位于旧县-花山一线,重力低异常呈北北西向宽缓带状展布,与两侧高重力场之间具有明显的梯度带。九仗沟金矿区位于旧县-花山重力低值区的南东段重力等值线梯度带上。

受热液活动蚀变强烈、同类岩石磁性差别较大、地形复杂等因素影响,区域航磁反映的磁场特征较复杂,航磁 ΔT 总体表现为杂乱的正负波动磁场。九仗沟金矿区位于航磁 ΔT 负磁区。

区域 1:50 000 水系沉积物测量发现主要异常 8 处,九仗沟金矿处在 11-丙-Au 异常内。该异常位于

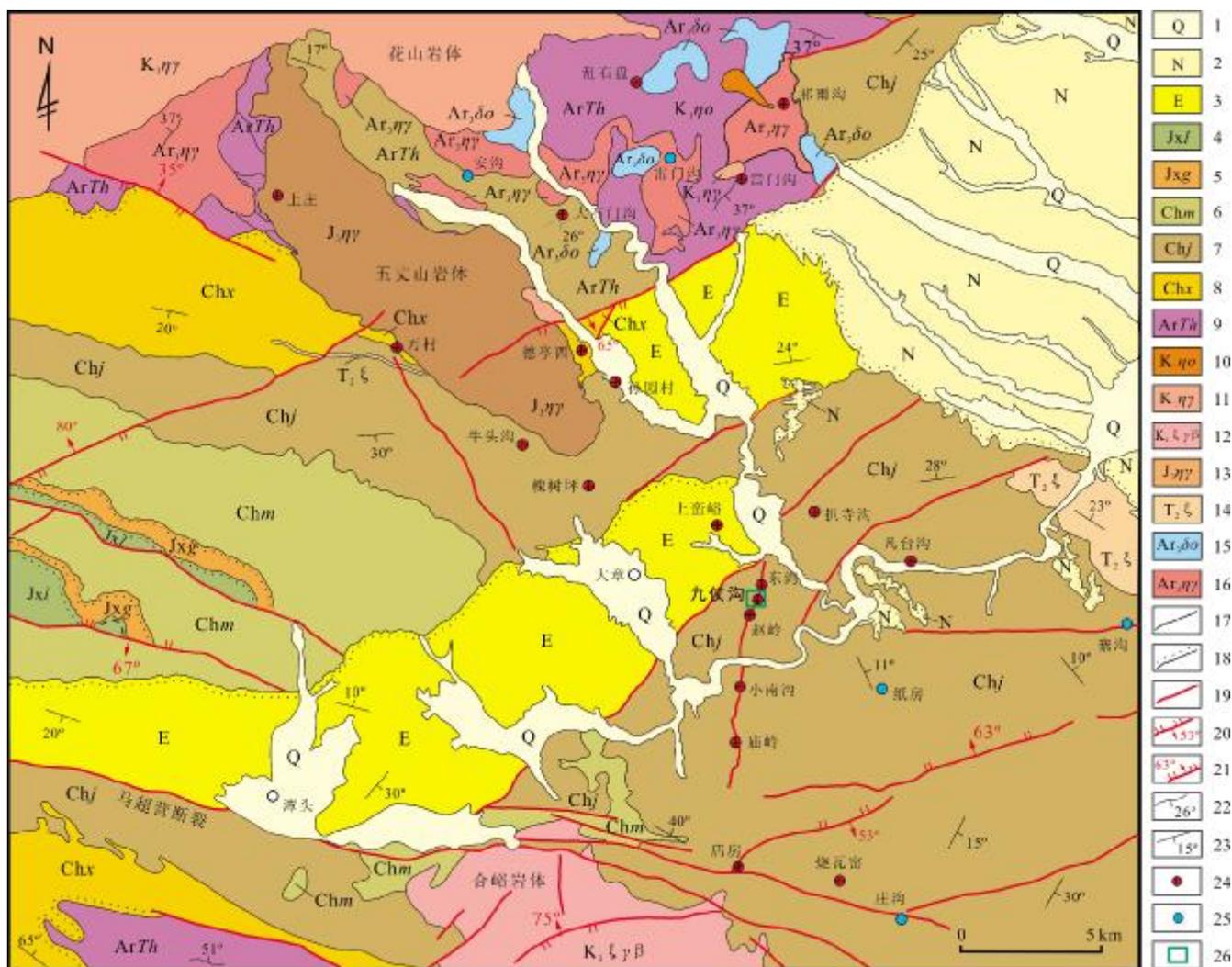


图1 河南嵩县九仗沟地区地质图
(据文献[15]修改)

Fig. 1 Geological map of Jiuzhanggou area in Songxian County, Henan Province
(Modified from Reference [15])

1—第四系(Quaternary); 2—新近系(Neogene); 3—古近系(Paleogene); 4—长城系龙家园组(Changchengian Longjiayuan fm.); 5—长城系高山河组(Changchengian Gaoshanhe fm.); 6—长城系马家河组(Changchengian Majiahe fm.); 7—长城系鸡蛋坪组(Changchengian Jidanping fm.); 8—长城系许山组(Changchengian Xushan fm.); 9—太古宇太华群(Archean Taihua gr.); 10—早白垩世石英二长岩(Early Cretaceous quartz monzonite); 11—早白垩世二长花岗岩(Early Cretaceous monzogranite); 12—早白垩世黑云正长花岗岩(Early Cretaceous biotite syenite granite); 13—晚侏罗世二长花岗岩(Late Jurassic monzogranite); 14—晚三叠世正长岩(Late Triassic syenite); 15—新太古代石英闪长岩(Neoproterozoic quartz diorite); 16—新太古代二长花岗岩(Neoproterozoic monzogranite); 17—地质界线(geological boundary); 18—不整合界线(unconformity); 19—断裂(fault); 20—逆断层及产状(reverse fault and occurrence); 21—正断层及产状(normal fault and occurrence); 22—片麻理产状(gneissic schistosity); 23—地层产状(stratigraphic occurrence); 24—金矿床(Au deposit); 25—钼矿床(Mo deposit); 26—研究区位置(study area)

位于万岭-沙岭一带,异常形态呈北西走向的椭圆状,面积 4.1 km². Au 最高强度值 0.043×10⁻⁶, 平均值 0.0168×10⁻⁶.

2 矿床地质

矿区出露地层主要为中元古界长城系熊耳群鸡

蛋坪组上段(图 2),岩层呈单斜状产出,倾向 15~25°, 倾角 20~25°,岩性为英安岩、流纹英安岩及安山岩.

矿区构造以北北东向断裂构造为主. F1 断裂是区内主要含矿断裂构造,已知金矿体即赋存于该断裂中. 断裂总体北北东走向,总长度 10 km 以上,矿区出露约 4 km,走向 20~30°,倾向北西,倾角 50~75°. 断裂带

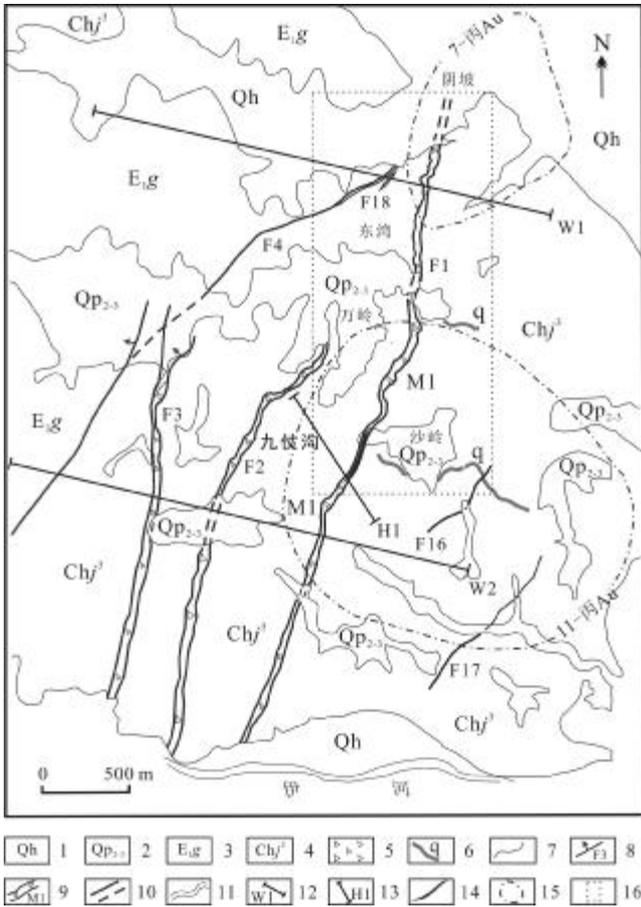


图2 九仗沟矿区地质图
(据文献[21]修改)

Fig. 2 Geological map of Jiuzhanggou orefield
(Modified from Reference [21])

1—第四系全新统 (Quaternary Holocene); 2—第四系中-上更新统 (Quaternary Middle-Upper Pleistocene); 3—古近系古新统高峪沟组 (Paleogene Paleocene Gaoyugou fm.); 4—长城系熊耳群鸡蛋坪组上段 (upper mem. of Jidanping fm., Xiong'er gr., Changchengian); 5—构造角砾岩 (tectonic breccia); 6—石英脉 (quartz vein); 7—地质界线 (geological boundary); 8—断裂及编号 (fault and number); 9—含矿构造带及编号 (ore-bearing structural belt and number); 10—实测及推测断层 (surveyed/inferred fault); 11—河流 (river); 12—物探测量剖面及编号 (geophysical section and number); 13—岩石地球化学剖面及编号 (lithochemical section and number); 14—金矿脉 (gold vein); 15—水系沉积物异常 (stream sediment anomaly); 16—土壤地球化学测量范围 (range of soil geochemical survey)

内角砾岩、碎裂岩发育,硅化、钾化、绢云母化、碳酸盐化强烈. 金属矿化主要为褐铁矿化、方铅矿化、黄铁矿化等,并伴随有金矿化. 该断裂具多期活动特点,构造性质表现为左行平移断层.

矿区内侵入岩不发育.

M1含矿构造带严格受F1断裂控制(图3),其中已发现工业矿体数条, M1-Ⅱ矿体为主要矿体,也是金矿主采矿体. 矿体呈脉状主要产于破碎带的中部,产状较陡,倾角一般65~85°. 矿体分支复合、膨大收缩现象普遍.

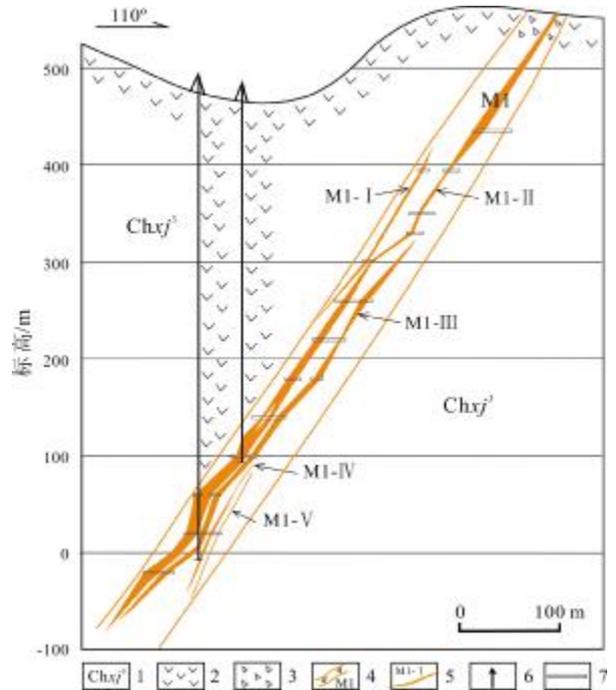


图3 九仗沟金矿00勘探线剖面图^①

Fig. 3 Profile of Jiuzhanggou gold deposit along exploratory line No. 00

1—长城系熊耳群鸡蛋坪组上段 (upper mem. of Jidanping fm., Xiong'er gr., Changchengian); 2—英安岩 (dacite); 3—构造角砾岩 (tectonic breccia); 4—含矿构造带及编号 (ore-bearing structural belt and number); 5—金矿体及编号 (gold orebody and number); 6—钻孔 (borehole); 7—穿脉 (transverse drift)

M1-Ⅱ矿体总体走向20°左右,倾向北西,倾角约60°,赋存标高+573~-20 m,埋深为0~594 m. 矿体沿走向控制长度1100 m,沿倾向控制斜深710 m. 单工程最大厚度23.31 m,最小0.49 m,平均厚度6.45 m,厚度变化系数91.4%,属厚度不稳定矿体. 金品位 $1.14 \times 10^{-6} \sim 14.97 \times 10^{-6}$,平均品位 4.13×10^{-6} ,品位变化系数56.9%,属品位较均匀矿体.

九仗沟矿区金矿体连续性较好,无矿窗、无后期构造破坏及脉岩穿插,目前该矿体已开采至-20 m标高.

^①河南省地质矿产勘查开发局第二地质矿产调查院. 河南省嵩县九仗沟-东湾金矿区深部找矿预测研究. 2022.

矿区内金矿石分为原生硫化物型金矿石和氧化型矿石. 金以微—细粒自然金为主,角砾状、脉状构造及浸染状、粒状结构为主. 浅部为氧化矿, 435 m 水平以下逐步过渡到原生矿. 矿石中金属矿物以硫化物为主,黄铁矿占矿物总量的 4%,可回收的有用矿物为自然金,矿石工业类型属贫硫化物金矿石.

矿石矿物以黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、自然金为主,有少量自然银;脉石矿物以石英、钾长石、方解石、绢云母、白云石为主,高岭石、绿帘石、绿泥石少量.

矿石主要结构有自形—半自形晶粒状结构、他形粒状结构、斑状结构、交代残余结构和碎裂结构. 矿石主要构造有角砾状、浸染状、细脉浸染状、脉状—网脉状构造等,地表氧化矿石发育蜂窝状构造.

主要蚀变类型有硅化、绢云母化、黄铁矿化、黄铁绢英岩化、钾长石化、碳酸盐化、绿帘石化、绿泥石化. 热液活动受构造破碎带控制, 热液从断裂带中心向两

侧交代蚀变,蚀变强度逐渐减弱,具有一定的分带性. 根据矿化、蚀变强度及蚀变矿物组合划分为内蚀变带和外蚀变带,以蚀变岩型矿体最为典型(图 4).

内蚀变带分布在构造破碎带内. 蚀变带的宽度与破碎带宽度基本一致. 带内蚀变强度大, 矿物蚀变类型复杂,主要矿化及蚀变有黄铁矿化、硅化、黄铁绢英岩化,次有高岭石化、绢云母化、绿帘石、碳酸盐化、钾长石化等. 金矿体分布于内蚀变带的近底板的部位.

外蚀变带分布于构造破碎带以外的一定范围内,主要蚀变类型为绢云母化、绿帘石化及钾化. 由顶底板向外蚀变逐渐减弱, 蚀变宽度受围岩裂隙发育程度控制,一般宽度 10~20 m.

矿床划分为构造热液期(包括成矿前期、成矿期、成矿后期)和表生期.

成矿前期:为黑云母—石英阶段,黑云母沿构造带对其两侧围岩进行面状交代蚀变作用.

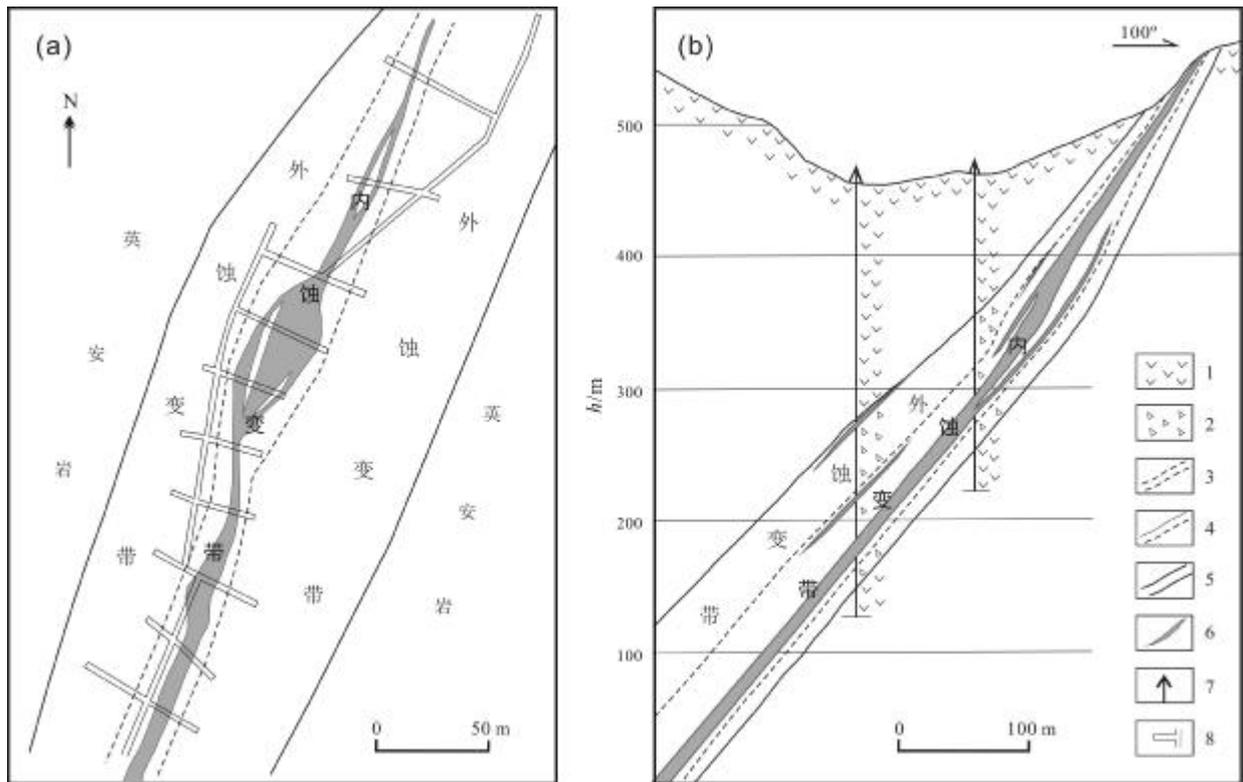


图 4 九仗沟金矿 300 m 中段第 05 勘探线围岩蚀变分带图

(据文献[9]修改)

Fig. 4 Wall rock alteration zoning maps of 300-meter level of Jiuzhanggou gold deposit along exploratory line No. 05

(Modified from Reference [9])

a—平面图(plane view); b—剖面图(profile); 1—英安岩(dacite); 2—构造角砾岩(tectonic breccia); 3—内蚀变带(inner alteration zone); 4—外蚀变带(outer alteration zone); 5—含矿构造带(ore-bearing structural belt); 6—金矿脉(gold vein); 7—钻孔(borehole); 8—穿脉洞(transverse drift)

成矿期(包括3个成矿阶段): 1)石英-细脉浸染状黄铁矿阶段,是金矿形成的开始阶段,黄铁矿多呈自行一半自形,结晶程度较好,并伴有金矿化,但金含量较低; 2)金-多金属硫化物阶段,是金形成的重要阶段,形成自然金、石英、绢云母、含金黄铁矿的特征矿物,黄铁矿颗粒较细,自形晶程度较差,伴随有硅化; 3)金-白云石阶段,表现为白云石细脉沿岩石和矿石裂隙穿插和交代,形成脉状或者网脉状。

成矿后期:石英-碳酸盐阶段,表示矿化已进入末期,成矿元素金基本没有。

表生期:表现为硅铝矿物次生变化为高岭石、多水高岭石等,黄铁矿等硫化物及含铁矿物变为褐铁矿、赤铁矿及其氧化物。

3 地球化学找矿信息

3.1 土壤地球化学测量

沿 F1 断裂开展了 23 条 1:10 000 土壤地球化学剖面测量,剖面间距 100 m,测量范围如图 2 所示。根据各元素异常下限(表 1),圈定出多处 Au、Ag、Cu、Pb、As、Hg 等元素综合异常: ①甲₁Bi-Ni-As-Hg-Cu-Pb-Ag-Au; ②乙₁Au-Cu-Hg-Pb-Ag; ③甲₁Au-Pb-Ag-Cu-Hg; ④乙₁Au-Pb-Cu-Ag-Bi-Hg; ⑤丙₁Ag-As-Hg; ⑥丙₁Ag-As-Ni; ⑦乙₁Au-Pb-Ag-Hg-Co; ⑧乙₁Pb-Ag; ⑨丙₁Au-Hg-Ag-Pb; ⑩乙₁Au-Ag-Hg-Cu-Pb; ⑪乙₁Au-Hg-Cu-Pb。其中异常强度最大者为九仗沟①甲₁异常(图 5)。异常明显沿 F1 断裂及其两侧分布,浓集区长 300~500 m,经后期工程揭露,在异常浓集区的构造带中均发现较好的金矿体。

3.2 岩石地球化学异常

原生晕样品采自不同中段巷道和钻孔不同孔深岩心。采样介质为英安岩、安山岩、石英脉、矿石以及构造角砾岩或碎裂岩等,其中可供轴向分带研究的矿体或构造蚀变岩样品有 103 件。

3.2.1 原生晕剖面异常特征

沿矿体倾向布置原生晕横剖面 H1(图 2),样品采自地表,样品间距 20 m 左右,分析元素为 Au、Hg、Co、Cu、Mo、Ni、Pb、Sb、V、W、Zn、Ag、As、Bi。横剖面 H1 微量元素高值区与 F1 矿化蚀变带对应较好,说明原生晕剖面对构造破碎带,尤其是硅化构造蚀变带有较好的识别效果,可以成为一个好的找矿方法(图 6)。

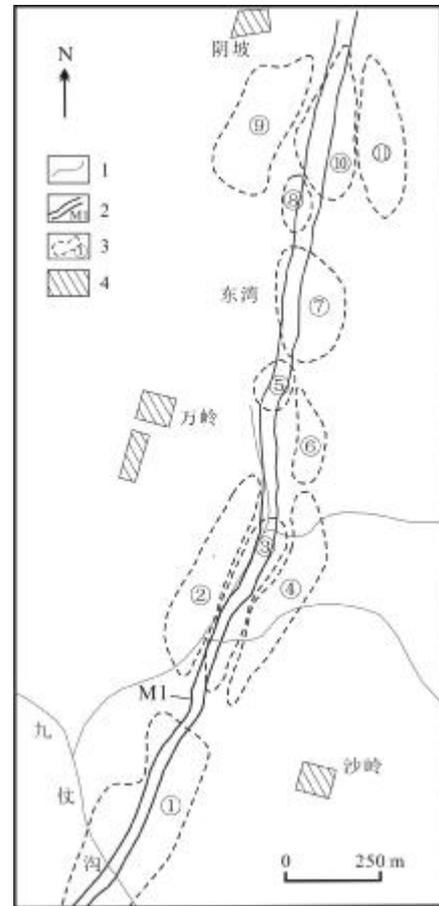


图 5 九仗沟金矿区土壤地球化学综合异常图
(据文献[22]修改)

Fig. 5 Comprehensive anomaly map of soil geochemistry in Jiuzhanggou gold field
(Modified from Reference [22])

1—水系 (river system); 2—含矿构造破碎带 (ore-bearing structural fracture zone); 3—土壤地球化学异常及编号 (soil geochemical anomaly and number); 4—村镇 (town)

3.2.2 微量元素组合特征

(1) 相关分析

应用 SPSS20 软件计算出元素之间的相关系数(表 2)。根据相关系数, Au 与 Hg、Ag 元素呈显著正相关(相关性系数分别为 0.80、0.73),表明 Au 与 Hg、Ag 关系密切。因此,除 Au 之外,Hg 和 Ag 对找矿也有较大的指示意义。

(2) R 型聚类分析

R 型聚类分析谱系图(图 7)显示 Pb、Ag、Zn、Au、Hg 关系较为密切,结合相关分析,它们可作为金矿体的主要近矿指示元素。不同的元素组合,显示出矿区金矿化特点和伴生元素的关系特点。

表 1 九仗沟金矿区 F1 构造蚀变带土壤地球化学异常特征值
Table 1 Eigenvalues of soil geochemical anomaly in F1 tectonic alteration zone

元素	样品数	平均值	样标准差	背景值	异常下限	异常浓度分带		
						外带	中带	内带
Au	363	5.690	4.298	3.0	6.0	6.01~12.0	12.0~24.0	>24.0
Ag	369	0.140	0.074	0.10	0.20	0.2~0.4	0.4~0.8	>0.8
Cu	358	27.620	9.366	25.0	45.0	45~90	90~180	>18.0
Pb	330	44.959	23.574	40.0	90.0	90~180	180~360	>360
Co	397	12.390	3.679	14.0	20.0	20~40	40~80	>80
Ni	398	21.253	8.928	20.0	40.0	40~80	80~160	>160
As	393	11.890	5.146	12.0	20.0	20~40	40~80	>80
Bi	383	0.393	0.128	0.4	0.7	0.7~1.4	1.4~2.8	>2.8
Hg	389	0.055	0.030	0.03	0.07	0.07~0.14	0.14~0.28	>0.28

注:样品数为逐步剔除含量值大于 $\bar{x}+3S$ 后的剩余样品数; Au 背景值以直方图分布特征确定; Au 含量单位为 10^{-9} ,其他元素为 10^{-6} .

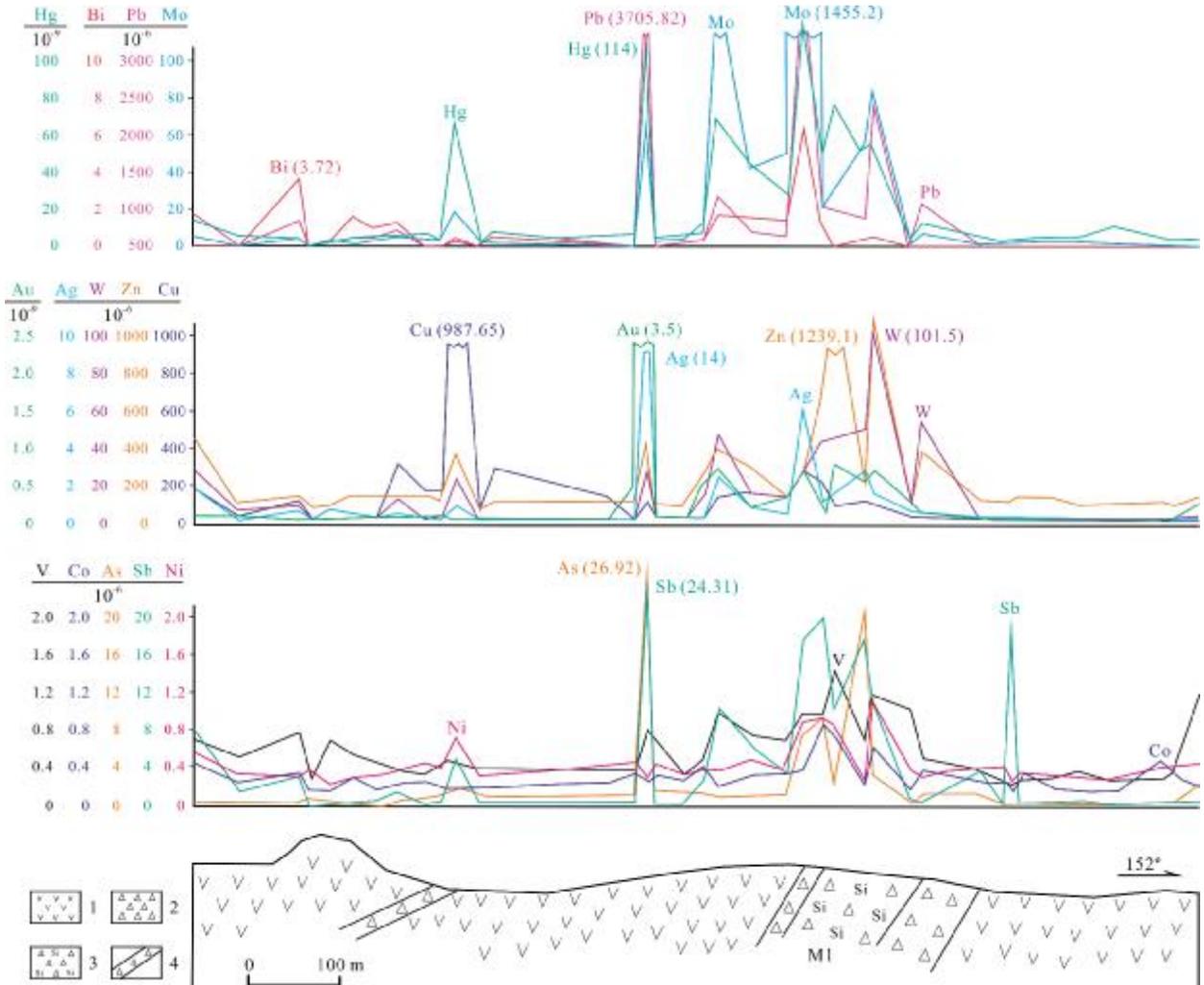


图 6 九仗沟金矿床 H1 横剖面微量元素异常特征

Fig. 6 Anomaly characteristics of trace elements in H1 cross section of Jiuzhanggou gold deposit
 1—英安岩 (dacite); 2—碎裂岩 (cataclastic rock); 3—硅化蚀变岩 (silicified rock); 4—构造蚀变带 (tectonic alteration zone)

3.2.3 原生晕轴向变化特征

九仗沟矿区地球化学微量元素原始数据符合对数正态分布,利用迭代法确定其背景值,见表 3。

(1)原生晕的轴向分带

采用格里戈良分带指数法计算 M1 含矿构造带的原生晕轴向分带序列。首先找出各元素分带指数最大值所在的中段,按照高程自上而下初步确定九仗沟金矿体的分带序列为 Cu—Bi—Co—Ni—W—Au—Hg—Sb—As—Pb—V—Mo—Ag—Zn。对于同一中段出现多个元素分带指数最大值时,用变化指数梯度(ΔG)进行排序,各中段计算结果如表 4。通过剔除火山喷发高温成岩元素 Co、Ni,最终得到 M1 含矿构造带自上而下原生晕分带

序列为 Cu—Bi—W—Au—Hg—As—Sb—Pb—V—Mo—Ag—Zn。根据上述原生晕元素垂向分带序列,参考一般热液矿床原生晕轴向分带模式,将 Hg、Sb、As 视为前缘晕元素,Mo、W、Bi 视为尾缘晕元素,其他元素 Au、Ag、Pb、Zn 则属于近矿指示元素。原生晕轴向分带序列里 Hg、Sb、As 等前缘晕元素在头部和尾部均有出现,Mo 作为尾部元素又出现在分带序列的上部,呈现明显的“反(向)分带”现象,说明矿体的形成经历多期成矿作用的叠加。

(2)矿体剥蚀参数

根据元素分带序列,利用“前缘晕指示元素的浓度标准化累乘/尾缘指示元素的浓度标准化累乘”,作

表 2 九仗沟金矿床 M1 含矿构造带原生晕元素相关系数表

Table 2 Correlation coefficients of primary halo elements in M1 ore-bearing structural zone

元素	Au	Hg	Co	Cu	Mo	Ni	Pb	Sb	V	W	Zn	Ag	As	Bi
Au	1.00													
Hg	0.80	1.00												
Co	0.35	0.29	1.00											
Cu	0.05	0.35	0.04	1.00										
Mo	-0.15	0.13	-0.07	0.48	1.00									
Ni	-0.29	-0.08	0.18	0.24	0.25	1.00								
Pb	0.54	0.74	0.27	0.63	0.33	0.15	1.00							
Sb	0.42	0.68	0.24	0.57	0.32	0.29	0.75	1.00						
V	0.45	0.62	0.32	0.48	0.26	0.26	0.64	0.65	1.00					
W	0.33	0.52	0.32	0.30	0.22	0.27	0.60	0.76	0.57	1.00				
Zn	0.58	0.73	0.41	0.40	0.10	0.14	0.77	0.65	0.55	0.56	1.00			
Ag	0.73	0.83	0.25	0.58	0.29	0.00	0.86	0.71	0.65	0.52	0.74	1.00		
As	0.17	0.35	0.27	0.31	0.27	0.22	0.35	0.4	0.62	0.32	0.27	0.30	1.00	
Bi	-0.27	0.04	-0.12	0.65	0.70	0.31	0.30	0.29	0.26	0.11	-0.01	0.25	0.20	1.00

注:样品数 $n=103$,表中数据均是化探元素原始数据取对数后的数据。

表 3 九仗沟矿区微量元素背景值

Table 3 Background values of trace elements in Jiuzhanggou gold field

元素	Au	Hg	Co	Cu	Mo	Ni	Pb	Sb	V	W	Zn	Ag	As	Bi
背景值	20.5	25.77	4.62	21.6	3.86	2.91	204	0.22	103	34.3	237	2.32	12.4	6.23

含量单位: Au、Hg 为 10^{-9} ,其余元素为 10^{-6} 。

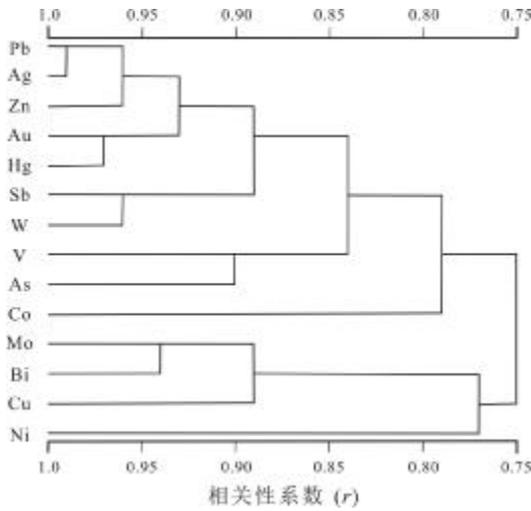


图 7 地球化学元素 R 型聚类谱系图
(据文献[23])

Fig. 7 The R-type cluster of geochemical elements
(From Reference [23])

为矿体剥蚀程度评价指标 (I_{Au}). $I_{Au}=[w(Hg) \times w(Sb) \times w(As)]/[w(Mo) \times w(W) \times w(Bi)]^{[24]}$, 结果显示九仗沟金矿的形成经历多期地质作用和成矿作用的叠加, 矿

体向深部仍将有较大的延伸. I_{Au} 从矿体上部到矿体下部由小到大再减小, 最后又增大, 整体呈振动波状(表 5). 矿体下部 $I_{Au} > 2$, 数值较高. 早期形成的第一个矿化段(浅表)基本被剥蚀, 仅剩尾部; 中期形成的第二矿化段(中浅部)得以较完整地保留, 形成中上部的主矿体; 晚期形成的第三个矿化段(深部)仍将有较大延深. 综上, 九仗沟金矿床经历了多期次矿化叠加, 矿床地球化学轴向分带、各中段的平均品位与矿体剥蚀系数相对应. 矿区化探异常显示九仗沟矿体剥蚀程度较低, 深部找矿潜力较大.

4 地球物理找矿信息

断裂带 F1 控制了九仗沟矿区的金矿(化)体产出, 为地球物理方法探测目标体. 与容矿围岩(英安岩)相比, 探测目标体(构造蚀变岩)存在着一定的电性和激发极化特性差异, 表现为相对较低的电阻率和较高的极化率(表 6). 因此, 可以借助地球物理场实现对构造破碎蚀变带和矿体进行识别和定位.

我国新一轮找矿突破战略行动正在加速推进, 第

表 4 M1 含矿构造带元素分带指数及变化(梯度)计算

Table 4 Zoning indexes and variation (gradient) calculation of elements in M1 ore-bearing structural zone

项目	高程/m	Au	Hg	Co	Cu	Mo	Ni	Pb	Sb	V	W	Zn	Ag	As	Bi
分带 指数	地表	0.0008	0.0001	0.0000	0.0437*	0.5072	0.0646	0.0292	0.0105	0.0384	0.1097	0.0035	0.0250	0.0203	0.1468*
	380	0.0000	0.0017	0.2058*	0.0240	0.2036	0.0864*	0.0005	0.0121	0.0405	0.3506*	0.0347	0.0000	0.0281	0.0120
	300	0.4549*	0.0247*	0.0429	0.0000	0.0000	0.0000	0.0336	0.0429*	0.0237	0.0000	0.0000	0.3149	0.0625*	0.0000
	260	0.1498	0.0053	0.1527	0.0039	0.0565	0.0087	0.1108*	0.0109	0.0800*	0.0822	0.0199	0.2827	0.0289	0.0077
	220	0.0488	0.0015	0.0971	0.0125	0.3721	0.0063	0.0236	0.0050	0.0214	0.0819	0.0175	0.2871	0.0119	0.0132
	180	0.0683	0.0074	0.0638	0.0066	0.6222*	0.0040	0.0401	0.0052	0.0283	0.0430	0.0106	0.0823	0.0077	0.0107
	140	0.2763	0.0092	0.0059	0.0044	0.0469	0.0114	0.0156	0.0259	0.0000	0.1226	0.0360	0.3942*	0.0512	0.0003
	100	0.3635	0.0041	0.1352	0.0156	0.0003	0.0129	0.0422	0.0113	0.0419	0.0093	0.0371*	0.3124	0.0117	0.0026
变化 指数	G _上	541.88	261.24	0.0000	0.0000	16.973	1.3371	252.03	7.6265	7.4343	3.1972	20.046	24.590	2.4496	0.0000
	G _下	21.923	33.099	47.944	35.978	2463.4	59.739	17.191	26.141	8.4777	57.325	0.0000	1.2616	9.2196	575.07
	ΔG	519.96	228.14	-47.944	-35.978	-2446.4	-58.402	234.84	-18.514	-1.0435	-54.128	20.046	23.329	-6.7700	-575.07

注: * 代表各元素的分带指数最大值.

表 5 九仗沟金矿床 M1 主矿体剥蚀评价指标

Table 5 Evaluation indexes for erosion of M1 main orebody in Jiuzhanggou gold deposit

标高/m	部位	Hg	Sb	As	Mo	W	Bi	I_{ω}
地表	矿体上部	26.1	5.84	25.1	48.2	40.3	1.36	0.00
380	矿体上部	39.0	6.28	29.8	19.1	59.0	0.13	0.05
300	矿体上部	69.2	4.04	18.0	2.54	30.4	0.03	1.93
260	矿体中部	73.6	6.42	33.3	7.71	38.0	0.10	0.52
220	矿体中部	54.2	6.07	29.8	74.2	46.2	0.29	0.01
180	矿体中部	154	5.49	20.2	111	38.0	0.22	0.02
140	矿体下部	54.8	4.69	23.2	4.04	34.3	0.04	1.23
100	矿体下部	64.5	7.28	18.1	2.56	31.3	0.06	1.81
60	矿体下部	118	5.12	124	9.90	35.4	0.82	0.26
20	矿体下部	43.8	2.38	53.1	2.15	34.8	0.05	1.52
-20	矿体下部	119	4.89	111	4.69	48.0	0.11	2.51

含量单位:元素 Hg 为 10^{-9} ,其余元素为 10^{-6} .

二空间找矿正是主战场^[25]. 目前九仗沟矿区找到的金矿体主要位于 500 m 以浅,深部仍有找矿空间和潜力. 电磁法是探测深部金矿的核心方法之一,是寻找和圈定深部隐伏矿床的重要工具^[26-28],激电测深法也是探测深部金矿的重要方法. 为了查明九仗沟矿区深、边部找矿潜力,实现接替资源找矿突破,在 W1 和 W2 剖面开展了大功率激电测深,在 W2 剖面还开展了大地电磁测深(图 8、9),剖面位置详见图 2. 两种方法用于深部找矿预测,可以互为佐证.

W1 剖面:根据浅中部 F1 容矿断裂电性特征,沿 F1 容矿断裂视电阻率表现为中低阻或陡变梯度带,视极化率表现为串珠状中高极化或陡变梯度带(图 8). 反之,根据上述电性特征可以推测 F1 容矿断裂延深部分. 根据 F1 断裂浅中部已知矿体电性特征及岩(矿)石电性参数特征,在已知矿体(低—中阻、高极化)

延深部位圈定出预测矿体靶位(图 8).

W2 剖面:布设在九仗沟矿区主矿段南端延伸方向上. 根据 F1 断裂具有“中—低阻”和中高极化或其陡变梯度带的电性特征,推测出的 F1 断裂与其产状南延位置相对应,且激电测深与电磁测深异常特征基本已知(图 9a、b). EH-4 双源大地电磁测深剖面底部的高阻体,电性较均匀,分布范围较大(图 9c),推测该高阻体为早白垩世花岗岩侵入体,这与重磁推测结果基本一致^[20].

综上所述,物探剖面测量为深部金矿预测和探矿工程部署提供了依据.

5 综合找矿模型

以地质、地球物理勘探、地球化学勘探方法为基础,建立综合找矿模型. 在矿床勘查中,可有效地选择物、化探技术方法,提高找矿勘查中的应用效果,是矿床勘查获得成功的重要途径^[29-36].

根据九仗沟金矿床地质特征、地球物理、地球化学异常等多源信息,确定找矿标志,建立了该金矿床地质—地球物理—地球化学综合找矿模型(表 7).

5.1 地质找矿标志

(1)构造标志:金矿床严格受断裂构造控制,赋存于断裂构造及其蚀变带内,构造是找矿的主要标志之一. 北北东向 F1 断裂带是区内主要含矿断裂构造,成矿有利地段为断裂带的膨大部位和构造走向转弯部位.

(2)蚀变矿化标志:含矿断裂构造带常具有明显的蚀变和矿化现象,强烈的硅化、黄铁矿化、绢云母化、黄铁绢英岩化等,一般是找矿的直接标志. 硅化蚀变强烈地段,岩石坚硬,耐风化,容易形成凸起的正地貌.

(3)岩浆岩标志:燕山期花岗岩类侵入岩与成矿有密切关系,围绕早白垩世岩体周围金矿点星罗棋布,说明在其四周是找矿的有利靶区.

(4)其他标志:容矿断裂构造带在地表常见褐铁矿化,是最常见的找矿标志. 另外,民采硐也是可靠的直

表 6 九仗沟金矿岩(矿)石电性特征

Table 6 Electrical characteristics of rock (ore) in Jiuzhanggou gold deposit

岩(矿)石名称	块数	电阻率/ Ω m	极化率/%	物性分级
英安岩	84	18500	2.36	高阻、微极化
构造蚀变岩(包括矿石、矿化岩石、构造岩、碎裂岩及蚀变岩)	263	2800	12.4	低—中阻、高极化

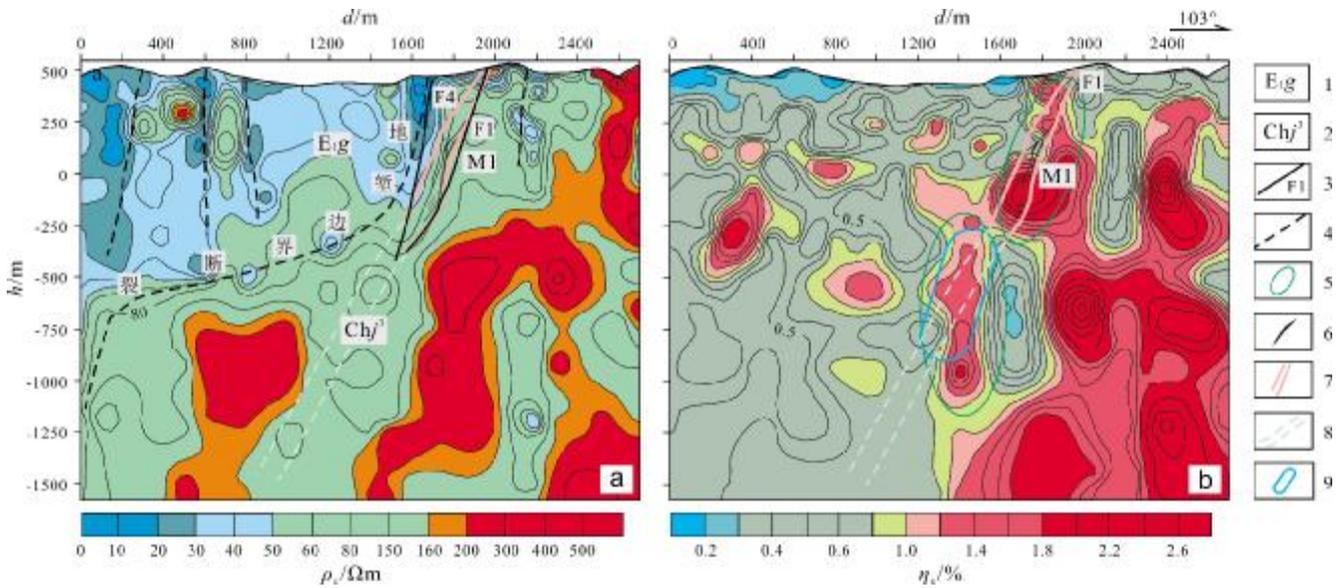


图 8 九仗沟矿区 W1 线地质-激电异常综合剖面

Fig. 8 Geological-IP anomaly comprehensive profile of Jiuzhanggou orefield along exploratory line W1

a—激电测深视电阻率断面图(profile of apparent resistivity IP sounding); b—激电测深视极化率断面图(profile of apparent polarizability IP sounding); 1—古近系古新统高峪沟组 (Paleogene Paleocene Gaoyugou fm.); 2—长城系熊耳群鸡蛋坪组上段 (upper mem. of Jidanping fm., Xiong'er gr., Changchengian); 3—已知断层 (surveyed fault); 4—推测断层 (inferred fault); 5—高极化体 (highly polarized body); 6—已知金矿体 (known gold orebody); 7—含矿构造蚀变带(ore-bearing structural alteration zone); 8—推测构造蚀变带(inferred structural alteration zone); 9—预测找矿靶区(低-中阻、高极化)(predicted prospecting target, low to moderate resistance, high polarization)

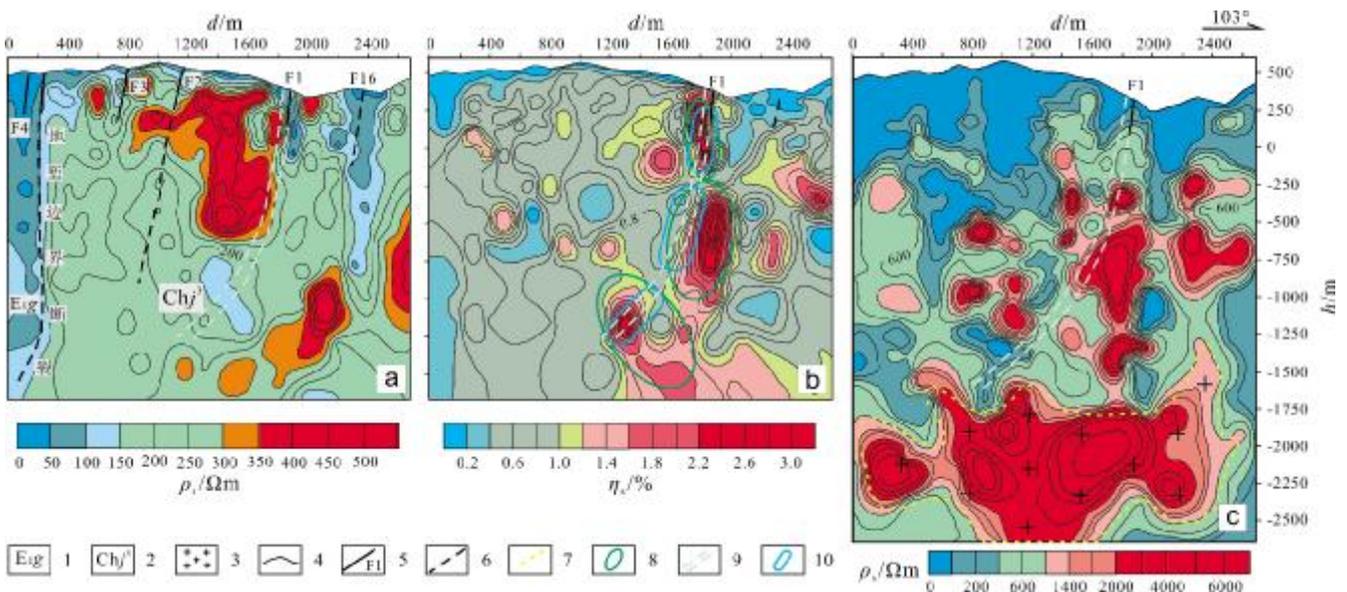


图 9 九仗沟矿区 W2 线综合地球物理找矿预测

Fig. 9 Integrated geophysical prospecting prediction of orebodies in Jiuzhanggou orefield along exploratory line W2

a—激电测深视电阻率断面图(profile of apparent resistivity IP sounding); b—激电测深视极化率断面图(profile of apparent polarizability IP sounding); c—EH-4 电磁测深视电阻率断面图 (profile of EH-4 apparent resistivity electromagnetic sounding); 1—古近系古新统高峪沟组 (Paleogene Paleocene Gaoyugou Fm.); 2—长城系熊耳群鸡蛋坪组上段 (upper mem. of Jidanping fm., Xiong'er gr., Changchengian); 3—早白垩世花岗岩 (Early Cretaceous granite); 4—地形线(terrain line); 5—已知断层(surveyed fault); 6—推测断层(inferred fault); 7—推测花岗岩边界(inferred granite boundary); 8—高极化体(highly polarized body); 9—推测构造矿化蚀变带(低中阻、高极化)(inferred structural alteration zone, low to moderate resistance, high polarization); 10—预测找矿靶区(predicted prospecting target)

表7 九仗沟金矿地质-地球物理-地球化学找矿模型

Table 7 Geological-geophysical-geochemical prospecting model of Jiuzhanggou gold deposit

勘查方法	找矿标志	矿化指示特征或信息
地质	构造	NNE 向店房-庙岭-九仗沟 F1 断裂带
	岩浆岩	早白垩世花岗岩
	围岩蚀变	硅化、绢云母化、黄铁矿化、黄铁绢英岩化
	直接找矿标志	褐铁矿等氧化矿石、民采嗣以及岩石因强烈硅化蚀变、耐风化形成的正地貌
地球物理	探测目标	构造破碎蚀变带
	目标物物性特征	中低电阻率、高极化
	深部激电异常特征	呈现高极化、低—中电阻率异常特征
	深部电磁异常特征	中—低阻线性串珠状或梯度变化带异常特征
地球化学	土壤元素异常	Au、Ag、Cu、Pb、As、Hg 等元素具有较好异常显示
	原生晕异常特征	元素高值区与构造矿化蚀变带对应较好
	元素组合特征	成矿元素 Au 与 Hg、Ag 元素呈显著正相关
	原生晕分带序列	Cu—Bi—W—Au—Hg—As—Sb—Pb—V—Mo—Ag—Zn

接找矿标志。

5.2 地球物理找矿标志

构造蚀变带和金矿(化)体呈现高极化、低—中电阻率或陡变梯度带特征,激电测深和 EH-4 双源大地电磁测深可以此对构造蚀变带和金矿体进行空间定位。

5.3 地球化学找矿标志

(1) 土壤地球化学测量的 Au、Ag、Cu、Pb、As、Hg 等元素具有较好异常显示,是重要的找矿标志。

(2) 原生晕剖面的微量元素高值区与构造矿化蚀变带对应较好,尤其是硅化构造蚀变带,是一个较好的找矿标志。

(3) 成矿元素 Au 与 Hg、Ag 元素呈显著正相关。Au 与 Hg、Ag 关系密切,其分布对找矿有较好的指示作用。

5.4 地质-地球物理-地球化学找矿模型

在深入分析矿区金矿床的成矿地质背景、矿床特征、控矿要素等特征基础上,综合岩石物性模型、金矿床成矿模型、地球物理及地球化学异常等多源信息的特征标志,建立了九仗沟金矿地质-地球化学-地球物理综合找矿模型(表7和图10)。矿化蚀变构造带及其中的矿体在电阻率、极化率异常和地球化学元素异常

剖面下呈单向延长的脉状,依此可以实现对电阻率、极化率反演剖面内断裂构造和构造蚀变矿化带较为精细的厘定,进而推断深部或隐伏矿体赋存位置。

5.5 综合找矿方法组合工作流程

根据矿区构造蚀变岩型金矿的形成与早白垩世中酸性岩浆侵入的热液活动关系密切及构造控矿的特点,综合上述金矿找矿标志和综合找矿模型,确定矿区找矿方法技术组合和工作程序。

(1) 利用小比例尺区域重磁异常成果识别深部隐伏中酸性岩体(早白垩世花岗岩岩体),推测断裂构造带,在成矿条件有利地区,筛选找矿远景区。

(2) 分析研判 1:50 000 水系沉积物异常特征,选定找矿靶区。

(3) 在优选靶区开展 1:10 000 矿产专项地质填图,寻找与金成矿有关的断裂构造带,进一步缩小找矿靶区。

(4) 沿含矿断裂构造带,进行 1:10 000 土壤地球化学测量,发现并圈定矿化富集部位。

(5) 采用大功率时间域激电测深和 EH-4 双源大地电磁测深,二者互为补充、佐证,定位预测更深空间找矿靶区。

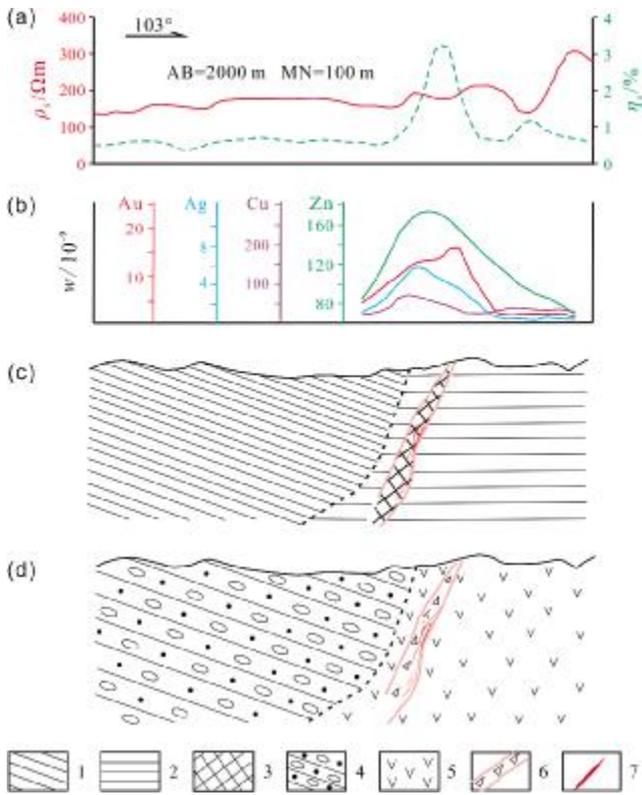


图 10 九仗沟金矿床地质-地球物理-地球化学找矿模型图
Fig. 10 Sketched geological-geophysical-geochemical prospecting model of Jiuzhanggou gold deposit

a—供电极距 2 000 m 时 ρ 、 η 剖面曲线 (profile curves of ρ and η with power supply pole distance of 2 000 m); b—土壤地球化学测量剖面 (soil geochemical survey profile); c—岩石物性剖面 (petrophysical profile); d—地质剖面 (geological profile); 1—低阻-无极化体 (low resistance, non-polarized body); 2—中-高阻、微极化体 (moderate-high resistance, weakly polarized body); 3—低-中阻、高极化体 (low-moderate resistance, highly-polarized body); 4—粉砂质黏土岩 (silty clay rock); 5—英安岩 (dacite); 6—含矿构造蚀变带 (ore-bearing structural alteration zone); 7—金矿体 (gold orebody)

6 结论

(1) 九仗沟金矿矿体严格受北北东向 F1 陡倾斜断裂构造带控制, 矿体呈脉状主要产于破碎带的中部, 强烈的硅化、黄铁矿化、绢云母化、黄铁绢英岩化等是找矿的直接标志. 构造蚀变带和金矿(化)体呈现高极化、低-中电阻率或陡变梯度带特征. Au、Ag、Cu、Pb、As、Hg 等元素具有较好异常显示, 是重要的找矿标志, 成矿元素 Au 与 Hg、Ag 元素呈显著正相关.

(2) 九仗沟金矿床经历了多期次矿化叠加, 矿床地球化学轴向分带、各中段的平均品位与矿体剥蚀系数

相对应. 物探异常显示出构造带和矿体在深部存在向下延伸特征, 化探异常显示九仗沟矿体剥蚀程度较低, 二者均表明深部找矿潜力较大.

致谢: 河南省地质矿产勘查开发局第二地质矿产调查院白德胜教授级高级工程师在成文过程中提出了建设性意见, 审稿专家对稿件提出了宝贵修改意见, 编辑部给予了指导和大力支持. 在此一并表示感谢!

参考文献 (References):

[1] 庞绪成, 辛志刚, 侯广顺, 等. 河南嵩县东湾金矿田地质特征及找矿远景[J]. 地质与勘探, 2011, 47(5): 765-771.
Pang X C, Xin Z G, Hou G S, et al. Geological characteristics of the Dongwan gold ore field in Songxian County, Henan Province and its ore-search prospect[J]. *Geology and Exploration*, 2011, 47(5): 765-771.

[2] 李国平. 河南熊耳山矿集区破碎带蚀变岩型金矿床构造控矿规律研究[J]. 黄金, 2013, 34(7): 22-26.
Li G P. Study on structural ore-controlling regularities of altered rock type gold deposit in the fracture zone of Xiong'ershan ore concentration area, Henan Province[J]. *Gold*, 2013, 34(7): 22-26.

[3] 李红兵. 河南嵩县九仗沟金矿床成因探讨[J]. 资源环境与工程, 2005, 19(1): 16-22, 58.
Li H B. The discussion about genesis of Juzhanggou gold deposit of Henan[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2005, 19(1): 16-22, 58.

[4] 白德胜, 郭景会, 冯有利, 等. 河南省嵩县东湾-蛮峪金矿床地质特征及找矿意义[J]. 资源调查与环境, 2007, 28(4): 278-284.
Bai D S, Guo J H, Feng Y L, et al. Geological features and prospecting significance in Dongwan-Manyu gold deposit, Song County, Henan Province[J]. *Resources Survey & Environment*, 2007, 28(4): 278-284.

[5] 张伟, 伍刚. 河南省九仗沟金矿控矿构造分析[J]. 有色金属, 2007, 59(2): 70-74.
Zhang W, Wu G. Structure analysis for ore body controlling of Jiuzhanggou gold deposit in Henan[J]. *Nonferrous Metals*, 2007, 59(2): 70-74.

[6] 石建喜, 王志军, 岳海泉, 等. 嵩县东湾金矿地质特征及深部盲矿预测[J]. 地质与资源, 2008, 17(1): 30-34.
Shi J X, Wang Z J, Yue H Q, et al. Geological characteristics and predicting for blind orebodies of Dongwan gold deposit in Songxian, Henan Province[J]. *Geology and Resources*, 2008, 17(1): 30-34.

[7] 李俊生, 王光耀, 张苗苗, 等. 河南省嵩县东湾-蛮峪地区金矿床地质特征及矿床成因分析[J]. 中国西部科技, 2009, 8(35): 1-3.
Li J S, Wang G Y, Zhang M M, et al. Geological features and deposit cause analysis of gold deposit of Dongwan-Manyu of Song County of Henan Province[J]. *Science and Technology of West China*, 2009, 8

- (35): 1-3.
- [8]杨贺杰, 庞绪成, 侯广顺, 等. 河南省九丈沟金矿地质特征及找矿标志浅析[J]. 地质与资源, 2009, 18(4): 284-287, 249.
Yang H J, Pang X C, Hou G S, et al. Geological characteristics and prospecting criteria of the Jiuzhanggou gold deposit in Henan Province [J]. *Geology and Resources*, 2009, 18(4): 284-287, 249.
- [9]杨贺杰. 河南省嵩县九丈沟金矿床地质特征[D]. 焦作: 河南理工大学, 2010.
Yang H J. Geological characteristics of Jiuzhanggou gold deposit in Songxian County, Henan Province [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2010.
- [10]杨贺杰, 秦战营, 王素爽, 等. 河南省嵩县九丈沟金矿床成矿规律及成矿远景预测[J]. 科技视界, 2013(10): 173, 212.
Yang H J, Qin Z Y, Wang S S, et al. Mineralization law and prospect forecast of Jiudonggou gold deposit in Songxian County, Henan Province [J]. *Science & Technology Vision*, 2013(10): 173, 212. (in Chinese)
- [11]王颖辉. 河南省九丈沟金矿床地质特征及成因分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
Wang Y H. The geological characteristics and genetic analysis of Jiuzhanggou gold deposit [D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.
- [12]丁培超, 王振强, 郭勤强, 等. 河南省庙岭-九丈沟金矿带矿化富集特征及深部找矿远景评价[J]. 黄金, 2020, 41(10): 7-12, 18.
Ding P C, Wang Z Q, Guo Q Q, et al. Mineralization and enrichment characteristics and deep prospecting prospect evaluation of the Miaoling-Jiuzhanggou gold metallogenic belt in Henan Province [J]. *Gold*, 2020, 41(10): 7-12, 18.
- [13]王颖辉, 韩东, 潘柏东, 等. 河南省九丈沟金矿床金矿物特征及成矿物质来源[J]. 黄金, 2022, 43(7): 3-8.
Wang Y H, Han D, Pan B D, et al. Characteristics and ore-forming material source of gold minerals in Jiuzhanggou gold deposit, Henan Province [J]. *Gold*, 2022, 43(7): 3-8.
- [14]朱随洲, 储照波, 金刚, 等. 河南九丈沟金矿地质特征及成因机制探讨[J]. 中国锰业, 2022, 40(2): 72-78.
Zhu S Z, Chu Z B, Jin G, et al. Geological characteristics and genetic mechanism of Jiuzhanggou gold deposit in southwest Henan Province [J]. *China Manganese Industry*, 2022, 40(2): 72-78.
- [15]刘玉刚, 丁培超, 徐金武, 等. 河南省嵩县庙岭-九丈沟金矿带 F_8 含矿构造成因探讨[J]. 黄金, 2022, 43(8): 5-9.
Liu Y G, Ding P C, Xu J W, et al. Discussion on genesis of F_8 ore-bearing structure in Miaoling-Jiuzhanggou gold belt in Songxian, Henan Province [J]. *Gold*, 2022, 43(8): 5-9.
- [16]严海麒, 赵五洲, 云辉. 河南汝阳熊耳群古火山机构地质特征及意义[J]. 中国地质, 2007, 34(2): 300-305.
Yan H Q, Zhao W Z, Yun H. Geological characteristics of paleovolcanic edifices in the Xiong'er Group, Ruyang County, Henan, and their significance [J]. *Geology in China*, 2007, 34(2): 300-305.
- [17]梅秀杰, 耿怡智, 庞绪成. 嵩县南部古火山机构控矿作用及找矿方向[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2008, 27(4): 410-413.
Mei X J, Geng Y Z, Pang X C. The role of ancient volcanic crater of ore-controlling structure and exploration direction in south of Song County [J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2008, 27(4): 410-413.
- [18]李云, 赵玉. 河南嵩县南部熊耳群古火山构造与成矿关系研究[J]. 华南地质与矿产, 2009(3): 28-36.
Li Y, Zhao Y. The investigating of genetic connections between fossil volcano structure of Xiong'er Group and regional mineralization in Songxian, southern Henan Province [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2009(3): 28-36.
- [19]程远, 秦曦, 赵晓晓, 等. 东秦岭铅铝锌银多金属矿集区地球物理场特征及综合信息找矿模型[J]. 地质与勘探, 2018, 54(4): 747-761.
Cheng Y, Qin X, Zhao X X, et al. Geophysical characteristics and prospecting model based on comprehensive information in the molybdenum, lead, zinc and silver polymetallic ore concentration area of the east Qinling Mountains [J]. *Geology and Exploration*, 2018, 54(4): 747-761.
- [20]王俊鹤, 李璨, 王安, 等. 豫西熊耳山地区重磁场特征与深部成矿预测[J]. 地质通报, 2020, 39(5): 735-745.
Wang J H, Li C, Wang A, et al. Characteristics of gravity and magnetic fields and deep metallogenic prediction in Xiongershan area, western Henan Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(5): 735-745.
- [21]高灶其, 李云, 梁黎春. 河南省嵩县东湾金矿成矿地质特征及成因分析[J]. 华南地质与矿产, 2008(2): 31-36.
Gao Z Q, Li Y, Liang L C. Geological characteristics and genesis of Dongwan gold deposit in Song County, Henan Province [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2008(2): 31-36.
- [22]白德胜, 郭景会, 冯有利, 等. 河南嵩县东湾-蛮峪金矿地球化学特征及其找矿意义[J]. 有色金属, 2008, 60(4): 125-130.
Bai D S, Guo J H, Feng Y L, et al. Significance of ore-prospecting and geochemical features of Dongwan-Manyu gold deposit in Songxian Country of Henan Province [J]. *Nonferrous Metals*, 2008, 60(4): 125-130.
- [23]杨春蕾. 河南省嵩县九丈沟金矿地质地球化学特征[D]. 焦作: 河南理工大学, 2017.
Yang C L. Geological-geochemical characteristics of Jiuzhanggou gold deposit, Songxian, Henan Province [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2017.
- [24]秦军强, 曲伟勋, 周宇乐, 等. 豫西九丈沟金矿床原生晕垂向分带特征及深部预测[J]. 采矿技术, 2022, 22(6): 202-206.
Qin J Q, Qu W X, Zhou Y L, et al. Characteristics and deep prediction of the primary halo dipping zone of the Jiuzhanggou gold

- deposit in western Henan Province[J]. *Mining Technology*, 2022, 22(6): 202–206. (in Chinese)
- [25]滕吉文, 薛国强, 宋明春. 第二深度空间矿产资源探查理念与电磁法找矿实践[J]. *地球物理学报*, 2022, 65(10): 3975–3985.
- Teng J W, Xue G Q, Song M C. Theory on exploring mineral resources in the second deep space and practices with electromagnetic method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(10): 3975–3985.
- [26]底青云, 朱日祥, 薛国强, 等. 我国深地资源电磁探测新技术研究进展[J]. *地球物理学报*, 2019, 62(6): 2128–2138.
- Di Q Y, Zhu R X, Xue G Q, et al. New development of the electromagnetic (EM) methods for deep exploration [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(6): 2128–2138.
- [27]荆鹏, 李水平, 曹杰, 等. 音频大地电磁测深在坦桑尼亚金矿勘查中的应用[J]. *矿产勘查*, 2019, 10(9): 2355–2361.
- Jing P, Li S P, Cao J, et al. Application of audio magnetotelluric sounding in the exploration of gold mine in Tanzania [J]. *Mineral Exploration*, 2019, 10(9): 2355–2361.
- [28]柳建新, 赵然, 郭振威. 电磁法在金属矿勘查中的研究进展[J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(1): 151–160.
- Liu J X, Zhao R, Guo Z W. Research progress of electromagnetic methods in the exploration of metal deposits[J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(1): 151–160.
- [29]李水平, 袁杨森, 司建涛, 等. 坦桑尼亚姆瓦莫拉金矿综合找矿模式[J]. *中国地质*, 2016, 43(4): 1409–1419.
- Li S P, Yuan Y S, Si J T, et al. An integrated ore prospecting model for the Mwamola gold deposit, Tanzania[J]. *Geology in China*, 2016, 43(4): 1409–1419.
- [30]Yuan Y S, Li S P, Peng J, et al. An integrated ore prospecting model for the Nyasirori gold deposit in Tanzania[J]. *China Geology*, 2019, 2(4): 407–421.
- [31]薛仲凯, 李朋伟, 常铭, 等. 西秦岭寨上卡林型金矿南矿段综合找矿模型及地质意义[J]. *西北地质*, 2021, 54(3): 174–187.
- Xue Z K, Li P W, Chang M, et al. Comprehensive prospecting model and the geological significance for Zhaishang Carlin-type gold deposit in West Qinling [J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(3): 174–187.
- [32]白德胜, 李水平, 纵瑞, 等. 豫西董家塄构造蚀变岩型银矿物化探异常特征及找矿模型[J]. *地质与勘探*, 2021, 57(2): 241–253.
- Bai D S, Li S P, Zong R, et al. Geophysical and geochemical anomalies and ore prospecting model for the Dongjianian structural altered rock type silver deposit in western Henan Province[J]. *Geology and Exploration*, 2021, 57(2): 241–253.
- [33]白德胜, 李水平, 赵志强, 等. 坦桑尼亚环维多利亚湖地区金矿勘查地球物理方法应用研究[J]. *地球物理学进展*, 2021, 36(3): 1029–1045.
- Bai D S, Li S P, Zhao Z Q, et al. Study on application of geophysics method for gold mine prospecting in around Lake Victoria region, Tanzania[J]. *Progress in Geophysics*, 2021, 36(3): 1029–1045.
- [34]刘诚, 李含, 孙彪, 等. 西秦岭寨上金矿综合地球物理研究[J]. *地质论评*, 2022, 68(2): 658–672.
- Liu C, Li H, Sun B, et al. Comprehensive geophysical study of Zhaishang gold deposit, West Qinling[J]. *Geological Review*, 2022, 68(2): 658–672.
- [35]刘礼广, 吕彧, 熊志强, 等. 辽宁孙家沟铅矿地质特征、成因及找矿标志[J]. *地质与资源*, 2023, 32(2): 201–210.
- Liu L G, Lyu Y, Xiong Z Q, et al. Geology, genesis and prospecting indicators of Sunjiagou lead deposit in Liaoning province[J]. *Geology and Resources*, 2023, 32(2): 201–210.
- [36]樊忠平, 陈小刚, 张望, 等. 陕西省山阳县刘家峡金矿床构造控矿特征及综合找矿模型[J]. *矿产勘查*, 2023, 14(8): 1367–1378.
- Fan Z P, Chen X G, Zhang W, et al. Integrated ore prospecting model and ore-controlling characteristics of Liujiaxia gold deposits of Shanyang County, Shaanxi Province[J]. *Mineral Exploration*, 2023, 14(8): 1367–1378.