

激电测深在吉家洼金矿区找矿预测中的应用

高峰辉^{1,2,3}, 王树新^{1,2,3}, 梁新辉^{1,2,3}, 庆岩波^{1,2,3}, 高继栓^{1,2,3}

(1. 河南省第一地质矿产调查院有限公司; 2. 河南省金银多金属成矿系列与深部预测重点实验室;

3. 自然资源部贵金属分析与勘查技术重点实验室)

摘要:吉家洼金矿床位于豫西熊耳山金银多金属矿集区内,近年来其深部找矿取得了一定进展。为开展进一步找矿勘查工作,在吉家洼金矿区应用激电测深取得了较好的探测效果。视极化率对含矿地质体的反应较为敏感,激电测深在16勘探线以北探测到高极化地质体,推测深部存在自北东向南西方向延伸的隐伏含矿斑岩体。通过钻孔原生晕样品测试,发现16勘探线具有高温元素W异常,侧面验证了激电测深的预测结果。该研究结果对熊耳山金银多金属矿集区勘查脉状金银多金属矿化具有一定借鉴意义。

关键词:激电测深;吉家洼;金矿床;物探;找矿预测;视极化率

中图分类号:TD15 P612 P618.51

文章编号:1001-1277(2024)03-0078-07

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20240316

引言

激电测深是一种电法勘探手段,在寻找隐伏矿,特别是大型隐伏斑岩型矿床方面具有独特的优势。激电测深可以通过探获一定深度内极化体引起的激电异常信息,结合该区域地质、矿产及地球物理特征,圈定矿(化)体引起的异常,从而推断隐伏断裂或隐伏成矿地质体。随着地质探矿技术的不断发展,激电测深、电磁法等探测手段在隐伏金及多金属矿床的勘查中起到了重要的作用^[1-10]。

近年来,吉家洼金矿床深部找矿取得了一定进展,新增工业矿体金资源量近3 t,总体金资源量接近9 t。该矿床深部的多个钻探工程显示,其矿化明显减弱或圈闭,为开展进一步找矿勘查工作,扩大矿床规模,实施了激电测深找矿工作,以探测深部及外围含矿地质体。

1 矿区及矿床基本特征

吉家洼金矿床位于河南省洛宁县南部熊耳山金银多金属矿集区、花山—龙脖背斜东段南翼近轴部。矿区出露的地层主要为新太古界太华群、中元古界熊耳群及第四系(见图1)。其中,太华群岩性主要为角闪斜长片麻岩、黑云斜长片麻岩、浅粒岩等,熊耳群岩性主要为杏仁状安山岩、斑状安山岩等。矿区内变质作用强烈,岩浆活动频繁,断裂发育,为金矿的形成提

供了良好条件^[11-12]。

吉家洼金矿床属典型的构造蚀变岩型金矿床,矿体产出严格受断裂控制。主矿体JF₁矿体形态呈脉状、板状,局部形成厚大透镜体。矿体走向控制长910 m,最大倾斜延伸718 m。矿体平均倾向95°,平均倾角80°。0勘探线以北,500 m标高以上,矿体总体西倾,平均倾向275°,平均倾角85°(局部直立);500 m标高以下,矿体总体西倾,平均倾向95°,平均倾角87°(局部直立)。2勘探线以南,500 m标高以上,矿体总体东倾,平均倾向95°,平均倾角77°(局部直立);500 m标高以下,矿体总体西倾,平均倾向275°,平均倾角85°(局部直立)。矿体厚度0.10~5.82 m,平均值1.22 m,厚度变化系数为74%,属厚度稳定型。矿体金品位0.20~150.44 g/t,金平均品位4.31 g/t,品位变化系数106%,属品位较均匀型。矿体围岩以硅化钾化片麻岩为主,局部为辉绿岩。矿石自然类型主要为碎裂蚀变岩型、构造角砾岩型,浅部为氧化矿石,中深部为混合矿石、原生矿石。JF₂矿体形态特征与JF₁矿体类似,600 m标高以下,与JF₁矿体合并(见图2)。

热液作用形成的围岩蚀变类型多、强度大,具多期多阶段性,总体是蚀变强则金矿化强,蚀变弱则金矿化弱,由构造带中心向外,基本呈对称带状分布。与金矿化有关热液蚀变主要有黄铁绢英岩化、硅化、钾化及多金属矿化等^[13-14]。

收稿日期:2023-08-23;修回日期:2023-11-18

基金项目:河南豫地科技集团有限公司科研项目(JTZCKY2023001);河南省自然资源科研项目(2019-373-2)

作者简介:高峰辉(1981—),男,工程师,从事地质矿产勘查、矿产开发等方面的研究工作;E-mail:76935213@qq.com

*通信作者:梁新辉(1986—),男,高级工程师,硕士,从事地质矿产勘查、金属非金属矿床、地球化学等方面的研究工作;E-mail:13903794424@163.com

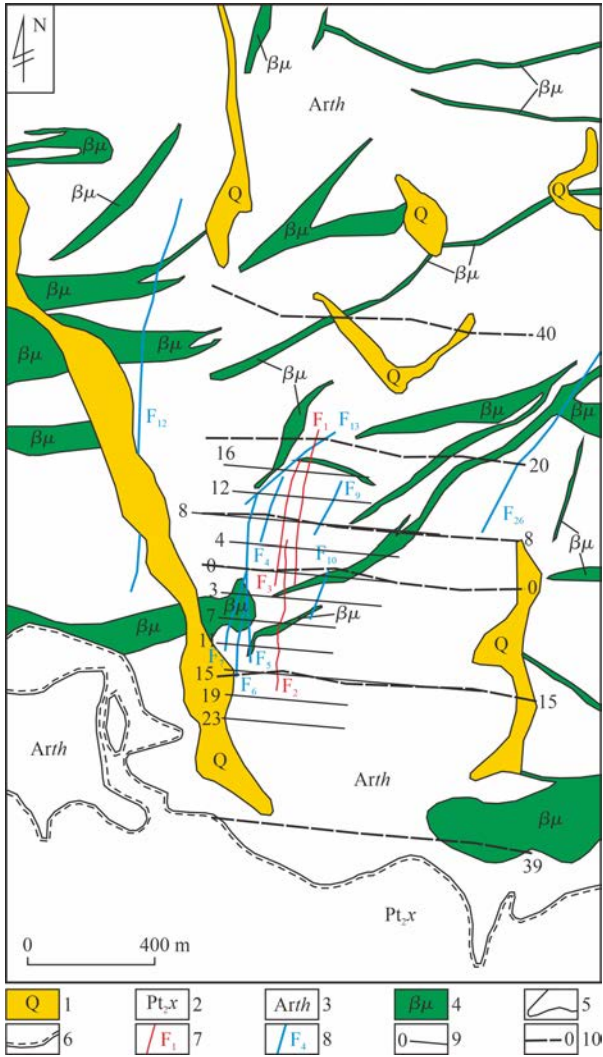


图 1 吉家洼金矿区地质图

Fig. 1 Geological map of Jijiawa Gold District

2 岩(矿)石物性特征

为了解矿区岩(矿)石物性特征,采集了 214 件岩(矿)石物性标本。标本的采集以长剖面、点状形式或无固定方式进行采集,有代表性、均匀分布于基岩出露区,重点采集了出露范围广、代表意义强的地层。依据地质图、地形图及岩性分类布置采样路线,并确定采集岩石种类、数量、位置。另外,参考了部分已施工钻孔矿化段的岩芯。电性参数测定方法采用泥团法。经过 $MN/AB = 1/3$ ($AB = 60\text{ cm}$, $MN = 20\text{ cm}$) 和 $MN/AB = 1/2$ ($AB = 40\text{ cm}$, $MN = 20\text{ cm}$) 对比试验,选用 $MN/AB = 1/2$ ($AB = 40\text{ cm}$, $MN = 20\text{ cm}$)、供电电压选用 12 V 进行标本测量。随机抽取 27 块标本进行检查,检查率 12.6%,电性测定视极化率平均相对误差 13.5%,视电阻率平均相对误差 12.8%。

3 激电测深成果分析

3.1 工作方法

激电测深共完成 6 条剖面,36 个物理点,线距 150~400 m,点距 200 m。测线布设在矿区 39 勘探线、15 勘探线、0 勘探线、8 勘探线、20 勘探线、40 勘探线,方位角大致为 94°。测点坐标采用合众思壮集思宝 G120 手持 GPS 测定,单点定位精度 3~5 m。激电测深探测采用重庆奔腾数控技术研究所有限公司生产的 WJD-3 多功能数字直流激电仪。其主要性能如下。

1)接收部分:电压通道 6 V; V_p (电压) $\geq 10\text{ mV}$ 时,测量精度 0.5%, $V_p < 10\text{ mV}$ 时,测量精度 1%;输入阻抗 $> 50\text{ M}\Omega$,视极化率测量精度 1%;电流通道 5 A, $I_p \geq 10\text{ mA}$ 时,测量精度 0.5%, $I_p < 10\text{ mA}$ 时,测量精度 1%;对 50 Hz 工频共模干扰与差模干扰压制优于 80 dB。

2)发射部分:最大发射功率 4 500 W;最大供电电压 900 V;最大供电电流 5 A;供电脉冲时间 1~60 s 占比为 1:1。

野外工作前进行了供电周期试验,供电周期分别采用 8 s、16 s、32 s、64 s。试验结果表明:视极化率地质体随供电周期增大而增大,并产生更明显的激电异常;供电周期为 32 s 时,视极化率曲线比较稳定且异常明显,趋势与其他供电周期一致,同时考虑野外施工效率,激电测深供电周期选 32 s。

激电测深最大供电电极距为 1 600 m,采用等比(4:1)装置,供电时间为 8 s,供电周期为 32 s,延时 200 ms。野外主要采集参数包括供电电流 I 、一次电位 ΔV 、视电阻率 ρ_s 、视极化率 η_s 。

3.2 工作成果

野外采集的视电阻率、视极化率,由于干扰和观测误差,尤其是村庄、公路、矿井、巷道附近的测点由于接地条件较差及地电干扰,会出现数据畸变,呈现假异常现象。因此,依据一次场电压、电流、视极化率衰减情况,剔除畸变点,保留高质量可靠数据。岩(矿)石电性特征见表 1。

根据野外收集到的点位及校正后的视电阻率、视极化率数据,采用 Surfer 软件将整理和处理后的数据绘制成激电测深视极化率等值线断面图、激电测深视电阻率等值线断面图。8 勘探线视极化率、视电阻率等值线断面见图 3。

8 勘探线位于矿区中部,剖面全段地表岩性以新太古界太华群黑云斜长片麻岩为主,局部有少量的辉绿岩脉。已知含金蚀变带从剖面西部 2,3 测点穿过,附近钻孔揭露有辉绿岩脉。由图 3 可知:600 m 标

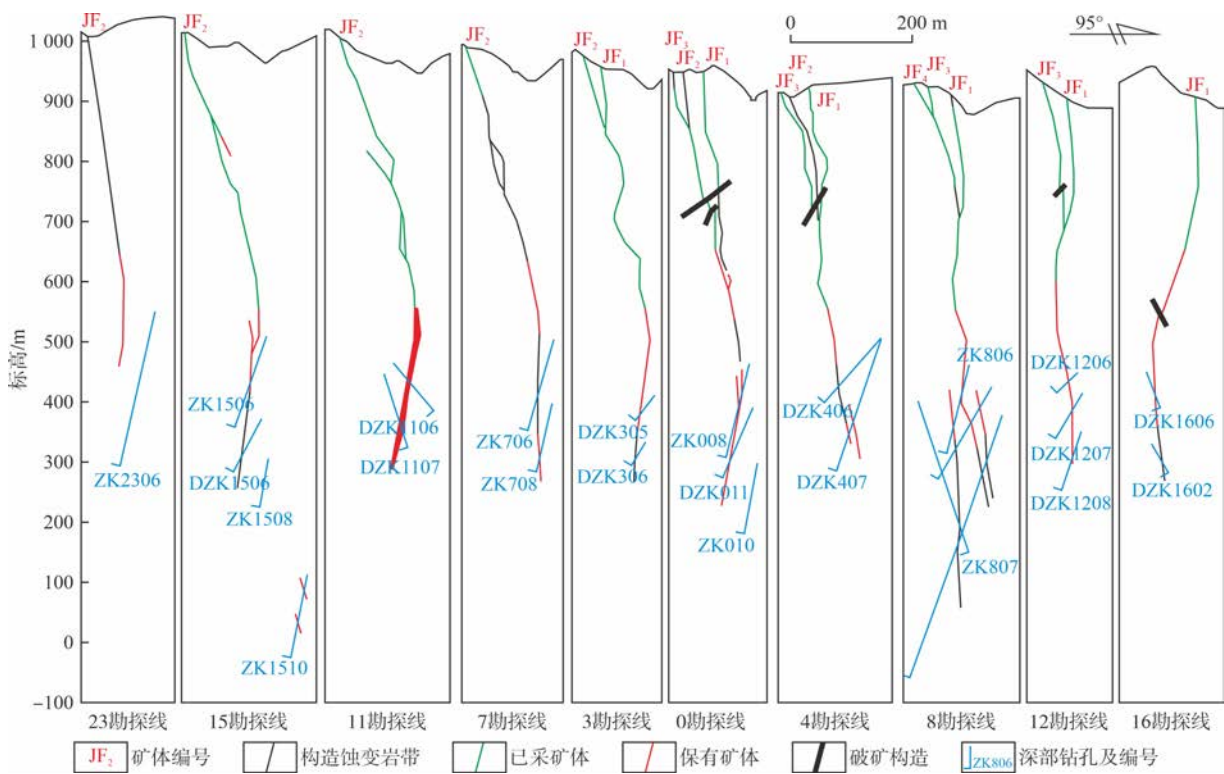


图2 矿体特征联合剖面示意图

Fig. 2 Joint profile of orebody characteristics

表1 岩(矿)石电性特征^[15]

Table 1 Electrical characteristics of rocks (ores)

岩(矿)石名称	标本数	视极化率/%		视电阻率/($\Omega \cdot m$)	
		范围	平均值	范围	平均值
安山岩	39	0.158 ~ 2.557	1.053	1 701 ~ 14 213	5 717.5
辉绿岩	35	0.204 ~ 4.500	1.487	565 ~ 11 044	4 037.7
构造角砾岩	29	0.538 ~ 12.480	2.386	1 079 ~ 54 515	10 411.4
片麻岩	41	0.507 ~ 2.958	0.991	202 ~ 10 797	2 783.6
矿化蚀变岩	40	0.926 ~ 12.910	4.401	2 109 ~ 84 089	21 474.3
碎裂岩	30	0.453 ~ 9.627	3.771	1 924 ~ 76 368	23 438.0

高以上,矿化破碎带对应的视极化率为1.4 % ~ 1.8 % ,属于中低极化;视电阻率为400 ~ 1 200 $\Omega \cdot m$,属于中低阻,形成中低阻中低极化异常组合。600 m 标高以下,视极化率有所升高且高极化率倾斜方向同矿化破碎带延伸方向基本一致。根据物性测定成果,矿化破碎带附近应当为中低阻高极化组合。600 m 标高以上,视极化率指示与实际矿化破碎带赋存情况呈现出较大差异,推测其原因主要是600 m 标高以上矿体已经全部采空,部分地段已采用充填采矿法进行了充填,充填膏体难以引起高极化率异常。

3.3 成果有效性分析

为判断该区视极化率和视电阻率参数在探测深部含矿地质体的有效性,收集了邻区干树金矿床

ZK3704 等4个钻孔的激电测井资料。激电测井采用井-井工作方式,电极系三级梯度排列,采用电极系为底部梯度电极系,装置系数 $K = 78.5$ 、 $AO = 2.5 m$,电阻率 $Ra = KU/I$,采样间隔1 m,供电电压180 V,供电时间8 s。激电测井采用下钻时进行原始测量,提升时检查测量方式进行测井质量检查工作。原始数据经计算机处理,形成视极化率、视电阻率和自然电位曲线(见图4)。由图4可知,矿化蚀变带特别是工业矿体部位均显示视极化率异常,而矿化蚀变带附近视电阻率异常显示并不明显,因此可以判断在区域上以安山岩、流纹岩为基本地层的金矿床内探测深部含矿地质体,视极化率异常成果明显优于视电阻率。

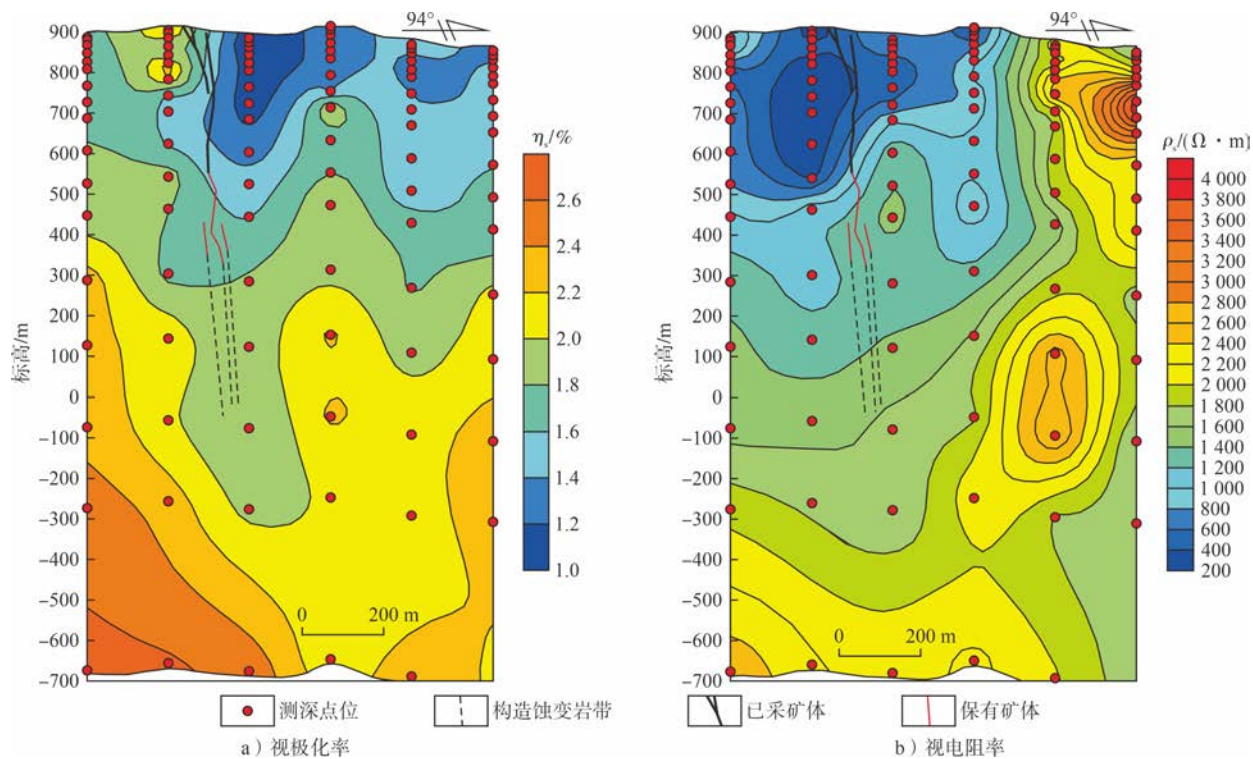


图 3 8 勘探线视极化率、视电阻率等值线断面图

Fig. 3 Contour section of apparent polarizability and apparent resistivity of Exploration Line 8

3.4 成果优化

根据对激电测深工作成果的分析,600 m 标高以上矿体采空区已充填,激电异常指示效应较弱,而测井数据显示,视极化率异常指示效应明显优于视电阻率。为此,对激电测深垂直断面成果进行了优化,采用 Surfer 软件反演出 300 m、500 m 标高断面视极化率等值线图(见图 5)。

3.5 优化成果分析及预测

由图 5 可知,视极化率等值线分布与已查明矿(化)体赋存情况基本一致,500 m 标高已知矿(化)体基本位于中极化区附近,视极化率为 1.8 % ~ 1.9 %,并无明显的高极化异常,这实际上与该标高 15 勘探线—20 勘探线已有大量坑道开拓工程有关;300 m 标高远离坑道开拓工程,已知矿(化)体均位于中—高极化区附近,视极化率为 2.0 % ~ 2.4 %。结合矿(化)体的高极化特性,对矿床深部作出以下几点预测:

- 1)300 m 标高高极化异常中心位于矿(化)体东侧,预测矿床深部矿体总体产状应为东倾。
- 2)500 m 标高高极化异常中心位于矿(化)体西侧,该标高已有坑道控制矿体赋存情况,预测在主矿体 JF₁、JF₂ 西侧存在与主矿体平行的矿脉,可通过水平坑道钻孔进行探索和验证。
- 3)300 m、500 m 标高水平断面视极化率等值线

图显示,在已知矿(化)体东北侧(40 勘探线)存在面状高极化异常区,视极化率达 2.4 % ~ 2.6 %。在该区域地表岩性以片麻岩、辉绿岩脉为主,根据物性测定资料,辉绿岩视极化率为 1.5 %,片麻岩视极化率为 1.0 %,不足以引起大面积视极化率高达 2.4 % 的激电异常,故推测深部存在蚀变岩或高硫化物岩矿石,结合不同断面异常形态(300 m 标高异常范围大于 500 m 标高)、已知矿体形态及区域金矿床成矿模式,推断该处存在自北东向南西方向延伸的隐伏含矿斑岩体。根据物探成果预测的隐伏含矿斑岩体赋存位置,在矿区 40 勘探线东部偏北位置设计了验证钻孔 ZK01,钻孔设计孔深 950 m(见图 5)。

4 预测成果验证

鉴于施工投入、施工周期等因素,验证隐伏含矿斑岩体的钻孔暂未施工。但是,主矿体 16 勘探线—15 勘探线已施工多个深部钻孔,在钻孔岩芯中采集了岩石原生晕样品。测试结果显示,主成矿元素 Au、Ag、Pb 等伴生元素变化趋势基本一致,但是高温元素 W 自北向南呈现出明显衰减趋势,北侧 16 勘探线上的钻孔 ZK1606 测试结果显示,有 2 层钨矿化体(钨品位大于 0.04 %),视厚度累计达 37.46 m,个别样品甚至达到钨矿床工业品位(0.12 %)(见表 2)。普遍认为,金矿床中的 W 元素属于高温成矿元素,因此

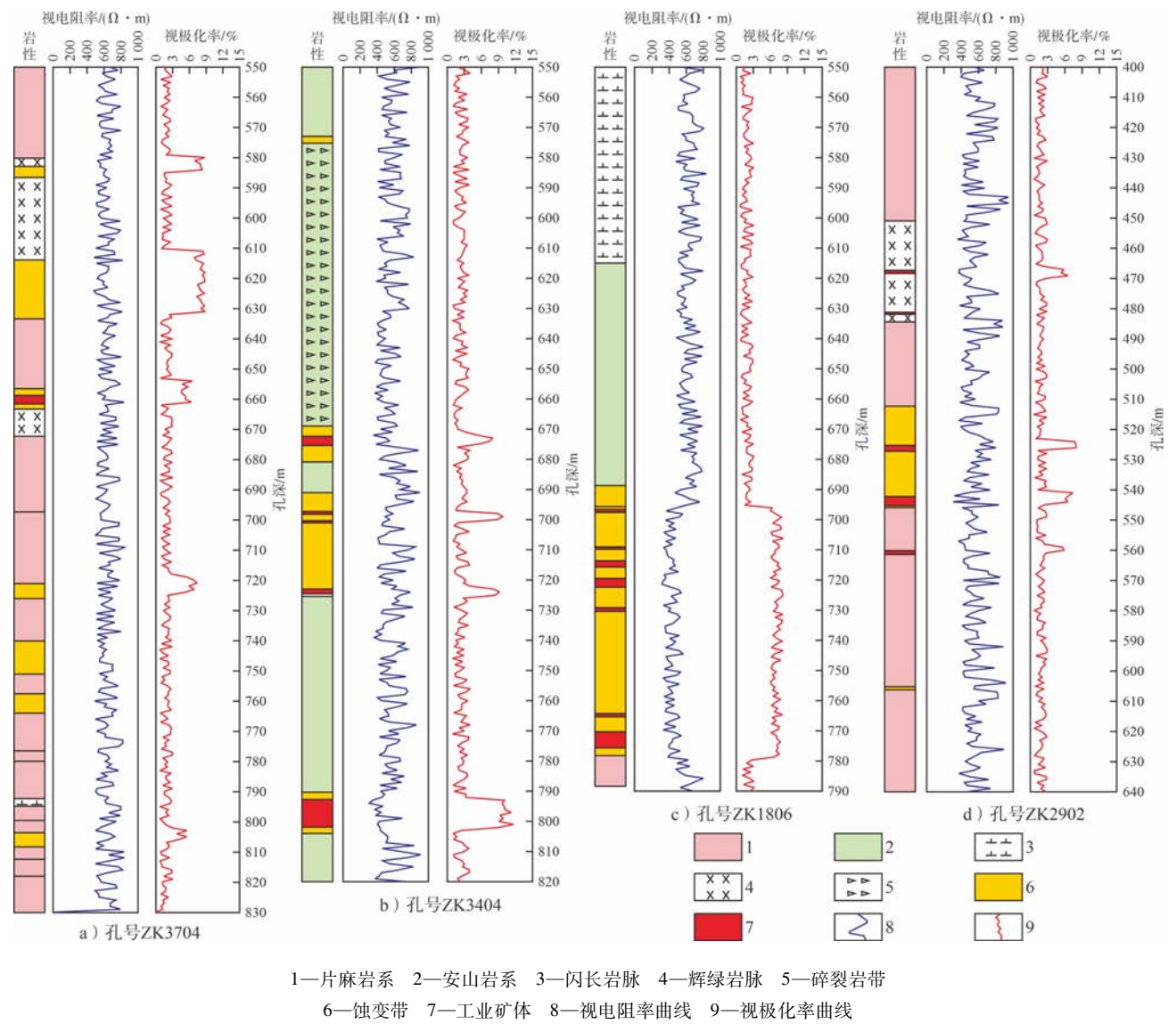


图4 激电测井成果图

Fig. 4 IP logging result chart

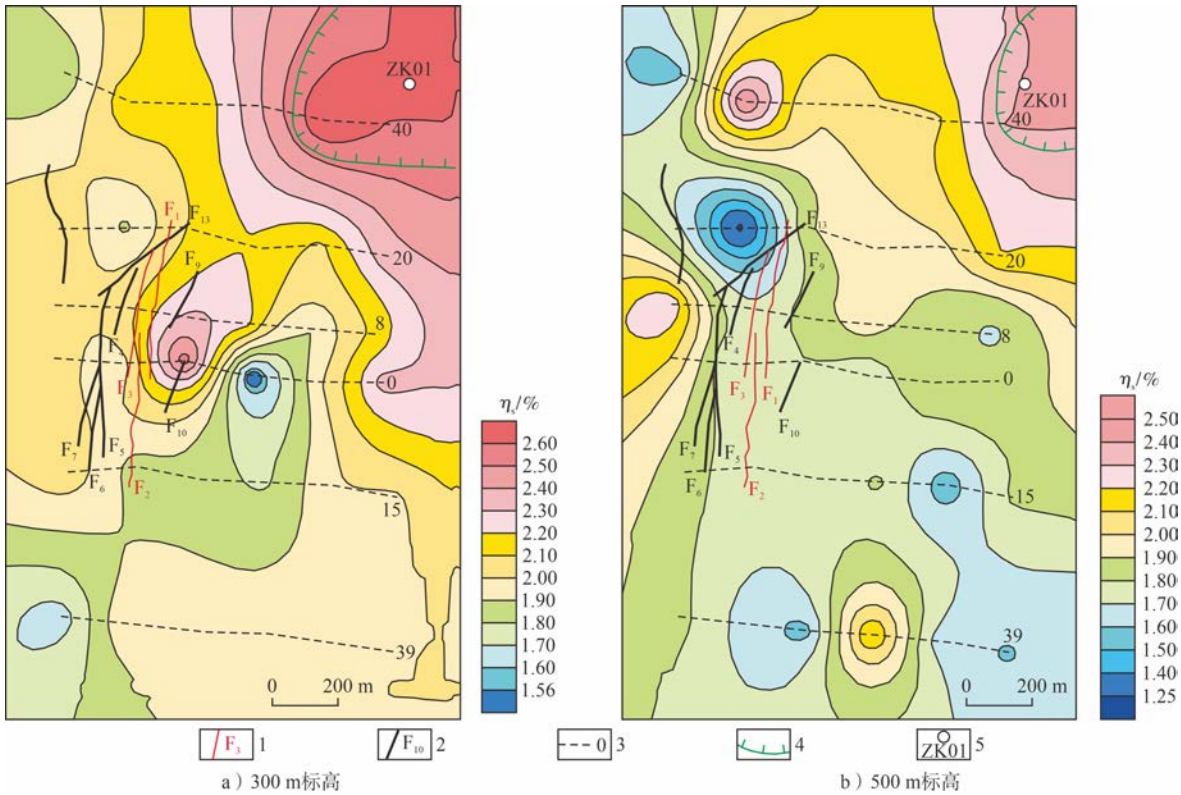
W 元素的衰减方向代表了含矿热液流体的运移方向,钻孔岩石原生晕测试结果从含矿热液流体运移的角度侧面验证了激电测深的预测结果。

5 成矿模式

根据前人研究成果,吉家洼金矿床主成矿阶段闪锌矿 Rb - Sr 等时线年龄为 $118.2 \text{ Ma} \pm 2.4 \text{ Ma}$,表明矿床形成时代为早白垩世,该成矿年龄与区域内上官、祁雨沟等金矿床的成矿年龄基本一致,同属燕山期中国东部构造体制大转换的产物。成矿流体主要来源于岩浆热液,并有大气降水的加入,成矿流体经历了早期中低温、中低盐度 $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O} - \text{NaCl}$ 体系向晚期的低温、低盐度 $\text{H}_2\text{O} - \text{NaCl}$ 体系的演化。流体混合、流体不混溶作用及水 - 岩反应促进了金的沉淀和富集^[16-20]。

吉家洼金矿床已知热液脉状矿体及物探工作推

测的斑岩型矿体均形成于早白垩世,期间由于扬子陆块和秦岭造山带向北的陆内俯冲,华北陆块南缘持续不断隆起抬升,并在陆内造山作用下,形成一系列岩浆侵入活动,地幔及下地壳太华群变质基底岩石熔融而形成花岗质岩浆向上侵位。在岩体上侵过程中由于岩浆的浅成、超浅成就位形成花岗斑岩,岩体浅成、超浅成就位为大量的流体混合及水 - 岩反应提供了有利条件,随着温度、压力等条件的改变及大气降水混入而发生矿化作用,含矿热液沿构造带运移、富集、沉淀形成热液脉状金矿床,在岩体中心部位及岩体接触带附近形成斑岩型矿体。浅成—中浅成金矿化属中低温成矿序列,中深部岩体及接触带矿床属中高温成矿序列(斑岩体是否存在、斑岩体岩性及矿化类型尚需进一步工作验证)。吉家洼金矿床成矿模式见图 6。



1—含矿断裂 2—不含矿断裂 3—激电测深测线及编号 4—预测岩体位置 5—设计验证钻孔及编号
图 5 水平断面视极化率等值线图

Fig. 5 Contour of apparent polarizability of horizontal section

表 2 ZK1606 钻孔钨矿化段测试结果

Table 2 Test results of tungsten mineralization section of ZK1606

样品编号	标高/m	视厚度/m	钨品位/%	备注
Y6	842.19	2.00	0.048 4	钨矿化
Y7	840.26	2.00	0.012 6	
Y8	838.33	2.00	0.032 4	
Y9	836.39	2.00	0.020 6	
Y10	834.46	2.00	0.022 6	
Y11	832.53	2.00	0.098 5	低品位钨矿化
Y12	830.60	2.00	0.086 8	低品位钨矿化
Y13	828.67	2.00	0.052 4	钨矿化
Y14	826.73	2.00	0.038 2	
Y15	824.80	2.00	0.071 7	钨矿化
Y16	822.87	2.00	0.029 6	
Y17	820.94	2.00	0.101 4	低品位钨矿化
Y18	819.01	2.00	0.049 1	钨矿化
Y19	817.07	2.00	0.022 1	
Y20	815.14	2.00	0.030 7	
Y21	813.21	2.00	0.014 1	
Y22	811.28	1.46	0.047 2	钨矿化
Y78	410.46	2.00	0.140 7	钨工业矿
Y79	408.53	2.00	0.170 4	钨工业矿

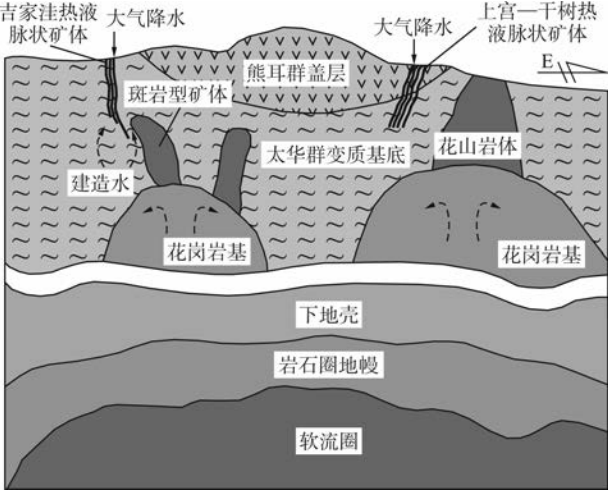


图 6 吉家洼金矿床成矿模式示意图

Fig. 6 Diagram of metallogenic pattern of Jijiawa Gold Deposit

6 结 论

1) 激电测深成果有效性分析显示, 视极化率对含矿地质体的反映较为敏感, 在以安山岩、流纹岩为基本地层的金矿床内探测深部含矿地质体, 视极化率异常成果明显优于视电阻率。

2) 根据优化后的激电测深成果, 16 勘探线以北探测到高级化地质体, 推测矿床深部存在自北东向南西方向延伸的隐伏含矿斑岩体。通过钻孔原生晕样

品测试发现 16 勘探线钻孔内的高温元素 W 异常,侧面验证了预测结果。

3)建立了矿床成矿模式:燕山期陆内造山作用下,形成一系列岩浆侵入活动,岩浆的浅成—超浅成就位形成花岗斑岩,在流体混合、水—岩反应及适当的温度、压力条件下发生矿化作用,含矿热液沿构造带运移、富集、沉淀形成热液脉状金矿床,在岩体中心部位及岩体接触带附近形成斑岩型矿体。

[参考文献]

[1] 李敏,赵忠海,李海军,等. 内蒙古科右前旗复兴屯银铅锌多金属矿床的发现及其意义[J]. 黄金,2022,43(11):5-12.

[2] 高科宁,邓居智,刘文玉,等. 黑龙江省三合屯金矿床深部电性结构与成矿模式[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2022,52(3):684-700.

[3] 包苏新,董丙元,裴易峰,等. 低温超导瞬变电磁法在内蒙古四子王旗地质勘探中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2020,50(4):1 211-1 218.

[4] 樊文鑫,李光明,梁生贤. 西藏扎西康铅锌多金属矿床控矿构造的电性特征及找矿预测[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2021,51(6):1 709-1 719.

[5] 常嘉毅,梁新辉,刘燕青,等. 熊耳山西青岗坪金矿床综合找矿方法及矿床潜力评价[J]. 有色金属(矿山部分),2020,72(4):81-87.

[6] 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.

[7] 韩晓涛,陈军典,李伯男,等. 辽东宋家堡子地区物化探综合信息与铅锌找矿前景[J]. 黄金,2021,42(11):27-32.

[8] 李冰,尚建阁,刘清泉,等. 综合物探方法寻找斑岩型钼矿床的

应用试验研究——以姚冲钼多金属矿床为例[J]. 黄金,2015,36(1):21-26.

[9] 孔含泉,王建民,张淑泉,等. 黑龙江黑河三道湾子金矿床地球物理特征分析[J]. 黄金,2006,27(9):10-13.

[10] 李兴国,周文军,门天一,等. EH4 和高密度电法在辽宁五龙金矿新区的应用[J]. 黄金,2007,28(7):17-22.

[11] 王俊德,冯绍平,李智,等. 豫西吉家洼金矿床主矿脉找矿前景分析[J]. 有色金属(矿山部分),2020,72(4):76-80,87.

[12] 李思伟,张兴康,樊玉朋,等. 河南洛宁县吉家洼金矿床矿化特征及物源分析[J]. 资源信息与工程,2019,34(4):34-35.

[13] 吴长航,方念乔,金云霄,等. 吉家洼金矿床围岩蚀变与金矿化特征研究[J]. 有色金属(矿山部分),2008,60(5):19-22.

[14] 史保堂,张苏坤,张争辉. 豫西吉家洼金矿地质及围岩蚀变特征浅析[J]. 地质与资源,2017,26(1):13-17,37.

[15] 张为民,李磊,李永超,等. 河南省西部矿集区找矿预测报告[R]. 洛阳:河南省第一地质矿产调查院有限公司,2016.

[16] 张兴康,叶会寿,颜正信,等. 豫西吉家洼金矿床成矿时代和成矿物质来源:来自闪锌矿 Rb-Sr 同位素年龄和 Pb 同位素的证据[J]. 地质学报,2018,92(5):1 003-1 018.

[17] 张兴康,叶会寿,张维,等. 豫西熊耳山地区吉家洼金矿床成矿物质来源探讨——碳、氧、硫、铅同位素地球化学证据[J]. 矿床地质,2017,36(3):595-610.

[18] 张苏坤,史保堂,汪江河,等. 豫西熊耳山吉家洼金矿床同位素特征与成矿模式[J]. 矿产勘查,2016,7(4):552-560.

[19] 张兴康,叶会寿,李正远,等. 豫西吉家洼金矿床成矿物质来源探讨[J]. 矿床地质,2014,33(增刊1):331-332.

[20] 张兴康,叶会寿,李正远,等. 豫西吉家洼金矿成矿作用过程:来自成矿流体的约束[J]. 现代地质,2014,28(4):686-700.

Application of IP sounding method to prospecting and prediction in Jijiawa Gold District

Gao Fenghui^{1,2,3}, Wang Shuxin^{1,2,3}, Liang Xinhui^{1,2,3}, Qing Yanbo^{1,2,3}, Gao Jishuan^{1,2,3}

(1. Henan First Geology and Mineral Resources Investigation Institute Co., Ltd.;

2. Key Laboratory of Gold and Silver Polymetallic Ore-forming Series and Deep Prognosis of Henan Province;

3. Key Laboratory of Precious Metal Analysis and Exploration Technology, Ministry of Natural Resources)

Abstract: Jijiawa Gold Deposit is located in Xiongershan gold-silver polymetallic ore concentration area in western Henan Province. Some progress has been made in deep prospecting in recent years. In order to carry out further prospecting, the IP sounding method has achieved good results in Jijiawa Gold District. The apparent polarizability parameters are sensitive to the ore-bearing geological bodies, and the highly polarized geological bodies are detected in the north of the No. 16 exploration line. It is inferred that there is a concealed ore-bearing porphyry body extending from northeast to southwest in the depth of the deposit. Through borehole primary halo sample testing, high-temperature element W anomalies are found on the No. 16 exploration line, indirectly verifying the prediction results of IP sounding. This study result has certain reference significance for prospecting the vein gold-silver polymetallic deposits in Xiongershan gold-silver polymetallic ore concentration area.

Keywords: IP sounding; Jijiawa; gold deposit; geophysical prospecting; prospecting prediction; apparent polarizability