

综合物探在栖霞金山金矿深边部找矿预测中的应用

李子永^{1,2}, 张利峰^{1,2}, 刘亚东^{1,2}, 谢磊^{1,2}, 王利鹏^{1,2}

1. 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 山东 烟台 264000;
2. 自然资源部黄河入海口陆海交互作用野外科学观测研究站, 山东 烟台 264000



摘要:金山金矿区位于胶东地区栖霞—蓬莱成矿带中南部,属于中小型蚀变岩型金矿床。随着地表找矿工作进入瓶颈期,开展深边部找矿的迫切性日益凸显。为开辟第二找矿空间,实现深边部找矿突破,在金山金矿区东部开展高精度磁测和CSAMT测量工作。根据测量结果,确定了磁异常极小值跳变、反演电阻率低阻异常带是指示控矿构造小庄—大庄头韧性剪切带的地球物理标志。通过钻探结果验证了高精度磁测和CSAMT测量反演解译结果的可靠性,在推断的2处成矿有利区共发现隐伏金矿体一层,金矿化体5层。综合分析认为:金山金矿区东部具有较大的找矿潜力,值得进一步开展深边部找矿工作;高精度磁法测量与CSAMT相结合的综合物探方法是开展深边部找矿工作的有效手段,具有良好的应用前景。

关键词:高精度磁测;相关成像;反演;CSAMT;金山金矿区;小庄—大庄头韧性剪切带;深边部找矿

中图分类号:P618.51 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2026)01-0115-13 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2026.01.084

引用格式:李子永,张利峰,刘亚东,等.综合物探在栖霞金山金矿深边部找矿预测中的应用[J].黄金科学技术,2026,34(1):115-127.LI Ziyong, ZHANG Lifeng, LIU Yadong, et al. Application of Integrated Geophysical Exploration Techniques in Deep and Edge Prospecting and Prediction of the Jinshan Gold Deposit in Qixia[J]. Gold Science and Technology, 2026, 34(1): 115-127.

金山金矿区位于胶东地区重要的栖霞—蓬莱成矿带中南部(王瑞良等,2019;单伟等,2023;刘强等,2024),属于中小型蚀变岩型金矿床,区内已发现金矿脉5条,含银铅锌矿脉2条,具备较好的成矿条件(赵明传等,2016)。但在地表找矿进入瓶颈期后,金山金矿区找矿工作再未取得较大突破,浅部矿床资源已趋于枯竭,亟须寻找接续资源量。目前,我国正在持续深入开展新一轮找矿突破战略行动,第二深度找矿空间(500~2 000 m)已成为主战场(滕吉文,2010;荆鹏等,2024)。区域上主要控(含)矿构造小庄—大庄头近EW向韧性剪切带延伸至金山金矿区中东部,其周边分布有数条隐伏石英闪长玢岩脉,具有良好的深边部找矿潜力。如何有效获取可靠的深部成矿信息,筛选出隐伏构造和成矿有利部位,提升深部找矿效率、降低勘查风险,是金山金矿区深边部找矿的难点所在(赵志坚等,

2024;张晓团等,2024)。

地球物理方法是开展深部矿产资源勘查的主要技术方法,通过开展地球物理勘探,可以探测地下深部构造和金属、非金属等矿产资源(李鹏等,2021)。其中,高精度地面磁测是常用的矿产勘查方法之一(李生虎,2022;王晓奇等,2022;张落毅等,2023),其包含丰富的深源地质信息,在探查隐伏构造等方面取得了良好的效果(刘尧等,2021;李涛等,2024),可通过分析磁异常特征,确定控矿构造的空间分布特征,进而间接指导找矿(张晓周等,2020;宋立伟等,2024;王开虎等,2024)。可控源音频大地电磁测深(简称CSAMT)是一种新兴的人工源电磁勘探方法,具有探测深度大、信噪比高、抗干扰能力强和横向分辨率高的特点(何继善,1990;黄力军等,2007),在确定隐伏岩体和断裂构造分布特征等方面具有良好的应用效果(吴懿豪等,2021;黄

收稿日期:2025-02-17;修订日期:2025-08-25

基金项目:中国地质调查局项目“山东栖霞台前—西陡崖金矿资源调查评价项目”(编号:DD20242294)资助

作者简介:李子永(1991—),男,山东威海人,工程师,从事地球物理勘探及数据解译方面的研究工作。E-mail:790006874@qq.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

理善等,2022;徐浩清等,2022;王逢涛等,2023;张利峰等,2025),在深部金属矿产勘查工作中具有重要地位(柳建新等,2008;王金鑫等,2021;王久良等,2022;杨彪等,2022;蒋型义等,2023)。综上所述,高精度磁测和CSAMT方法在深部矿产勘探中发挥着重要作用,基于2种方法的联合探测对第二深度找矿空间的金矿找矿突破具有重要意义。本研究选用高精度地面磁测和CSAMT方法对金山金矿区开展深部金矿资源调查评价,探测研究区内的隐伏控矿构造和含矿地层,为进一步掌握成矿地质条件、圈定找矿靶区及布设钻孔提供理论依据。

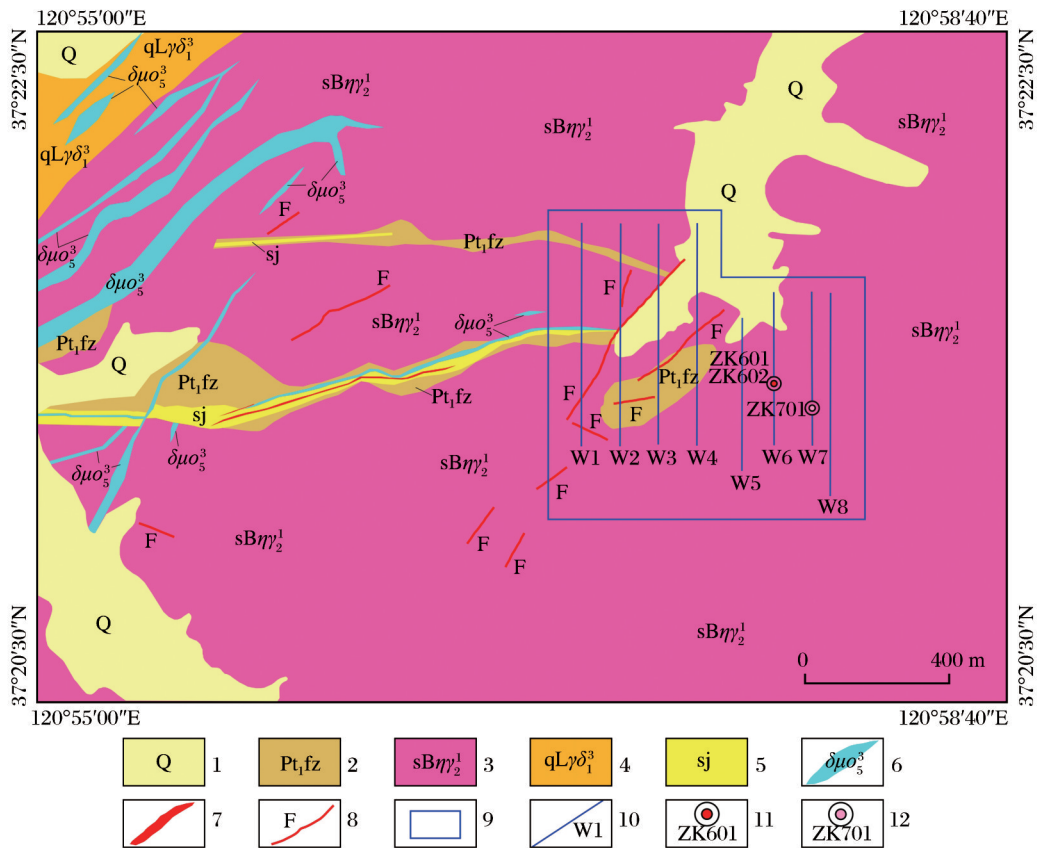
1 研究区地质与地球物理特征

1.1 研究区地质特征

研究区位于栖霞—蓬莱成矿带中南部(金山金

矿区地质简图如图1所示),区域内出露地层为古元古界粉子山群(HtF)祝家夼组(Htz),新生界第四系分布广泛。祝家夼组是胶东古老变质基底的组成部分,在区内为呈近EW向展布的变质岩系,岩性主要为黑云母片岩和二云石英片岩,其原岩为泥质碎屑岩,具有中等变质特点,属绿片岩相。第四系多分布于河谷、河床及村庄附近,岩性主要为黏土、亚黏土和砂砾石等。

研究区内主要构造为近EW向韧性剪切带和NE向脆性断裂(赵瑞峰,2014),其中近EW向韧性剪切带从研究区中部穿过,是区域上小庄一大庄头韧性剪切带在研究区内的延伸,其走向为75°~100°,倾向SE,倾角约为65°,构造岩为糜棱岩、变晶糜棱岩或糜棱岩化岩石,发育有糜棱面理和拉伸线理等组构,断裂面连续,产状稳定,是研究区内主要控矿断裂。NE向脆性断裂规模均较小,是区内次一级断裂



1. 第四系;2. 粉子山群二云石英片岩;3. 双顶超单元北照单元黑云斜长片麻岩;4. 栖霞超单元细粒黑云斜长片麻岩;5. 绢英岩化碎裂岩;6. 石英闪长玢岩脉;7. 金矿体;8. 断裂;9. 研究区范围;10. 物探测线及编号;11. 见矿钻孔及编号;12. 见矿化钻孔及编号

图1 金山金矿区地质简图

Fig. 1 Geological map of Jinshan gold mining area

构造,走向为 $25^{\circ}\sim 50^{\circ}$,倾向SE或SW,倾角为 $45^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。

研究区内出露的岩浆岩为古元古界双顶超单元北照单元和栖霞超单元。古元古界双顶超单元北照单元岩性主要为黑云斜长片麻岩和含石榴角闪斜长片麻岩,原岩为黑云母二长花岗岩,遭受低角闪岩相变质作用,变质作用过程中形成的变质热液,为Au元素的活化、运移及沉淀成矿提供了有利的物理化学条件。栖霞超单元岩性主要为细粒黑

云斜长片麻岩,仅在研究区西北部少量出露。研究区内脉岩发育,主要为石英闪长玢岩、煌斑岩和石英脉,其中石英闪长玢岩脉与金成矿关系密切,常与金矿体相伴生。

1.2 研究区地球物理特征

在开展高精度地面磁测和CSAMT测量工作之前,首先对研究区内主要岩石的物性特征进行测量,得到研究区主要岩石物性特征统计结果(表1)。

表1 研究区主要岩石物性特征统计

Table 1 Statistics of main rock physical properties in the study area

岩性	电阻率/ $(\Omega\cdot m)$		极化率/(%)		磁化率/ $(\times 10^{-6}SI)$	
	变化范围	平均值	变化范围	平均值	变化范围	平均值
黑云斜长片麻岩	748~4 193	2 256	0.8~2.1	1.6	18~513	356
石英闪长玢岩	74~2 566	969	1.3~3.0	2.3	28~134	73
二云石英片岩	31~1 362	657	1.0~2.7	1.7	34~187	61

由表1可知,研究区内岩石存在较明显的电性差异,黑云斜长片麻岩电阻率平均值大于 $2\ 200\ \Omega\cdot m$,极化率平均值为1.6%,呈现出高阻低极化的特征;石英闪长玢岩电阻率平均值为 $969\ \Omega\cdot m$,极化率平均值为2.3%,呈现出中低阻高极化的特征;二云石英片岩电阻率平均值为 $657\ \Omega\cdot m$,极化率平均值为1.7%,呈现出低阻低极化的特征。研究区内各岩性岩石的磁性较弱,彼此间的磁化率差别较小,但仍存在些许差异,黑云斜长片麻岩的磁化率平均值为 $356\times 10^{-6}\ SI$,呈现相对较强的磁性;石英闪长玢岩和二云石英片岩的磁化率平均值相对较小,呈现相对较弱的磁性。不同岩性岩石间的物性差异为在研究区开展高精度地面磁测和CSAMT测量工作提供了物性前提。

2 工作方法简介

2.1 可控音频大地电磁测深基本原理和工作方法

CSAMT是在大地电磁测深(MT)和音频大地电磁测深(AMT)基础上发展起来的一种频率域电磁测深方法,其以有限长接地导线为场源,具有信号强度高、探测深度大、分辨能力强、观测效率高、兼具测深和剖面双重勘探效果等特点(孟凡兴等,2016;焦志伟等,2020)。根据麦克斯韦方程组(岳鹏,2019),在忽略电磁场内介质和空气中的位移电流,取绝对真空中的磁导率时,根据边界条件,水平

偶极源在地面上的电场 E 和磁场 H 在 x,y 分量上的公式(喻春等,2016),可表示为

$$E_x = \frac{IL_{AB}\rho}{3\pi\gamma^3}(3\cos^2\theta - 2) \quad (1)$$

$$H_y = (1+j) \frac{IL_{AB}\rho}{4\pi\gamma^3} \sqrt{\frac{2\rho}{\mu_0\omega}} \sqrt{3\cos^2\theta - 2} \quad (2)$$

式中: L_{AB} 为供电偶极的长度; γ 为接收与发射间距; ρ 为介质的电阻率; θ 为场矢量与 Z 轴间的夹角。

假设沿 X 方向布置供电偶极和测线,沿 X 方向测量各测点对应频率的 E_x 及与之正交的 H_y ,利用 E_x 和 H_y 计算远区条件下的卡尼亚视电阻率 ρ_s (许广春等,2008;何俊飞,2013)可表示为

$$\rho_s = \frac{1}{5f} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (3)$$

式中: f 为供电电流频率。

根据电磁波的趋肤效应等理论,以场强衰减到地表值 $1/e$ (约36.8%)时的深度作为趋肤深度,趋肤深度 H 的经验公式(陈焯等,2013)可表示为

$$H \approx 356 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (4)$$

式中: ρ 为介质电阻率。探测深度 H 仅与介质的电阻率 ρ 和供电电流频率 f 有关,当介质电阻率 ρ 相对稳定时,探测深度与供电电流频率 f 成反比,即供电电流频率 f 降低时,探测深度变深;反之,探测深度变浅(钟幼生等,2015)。因此,可以通过改变供电

电流频率的大小来改变探测深度,进而达到测深的目的(陈玉玲等,2015)。

本次研究工作使用美国 Zone 公司的 GDP-32^{II} 多功能电法探测系统进行数据采集,工作频率选择 1~8 192 Hz,供电电极距为 1 080 m,收发距为 7 000~9 000 m,测量极距为 40 m,供电电流低频(1 Hz)时为 8 A,高频(8 192 Hz)时为 4 A,设置 50 Hz 滤波器以降低人文电磁干扰,从最低频率 1 Hz 开始以 2 为倍数依次递增,32 Hz 后以 $\sqrt{2}$ 为倍数采集加密频点数据并采集全部 22 个频点数据。采集原始数据后,首先进行数据预处理,剔除异常频点数据并添加地形数据,然后采用 SCS2D 软件进行基于圆滑模型的反演计算,获得模型的反演结果并绘制反演结果的拟值断面图(图 2)。

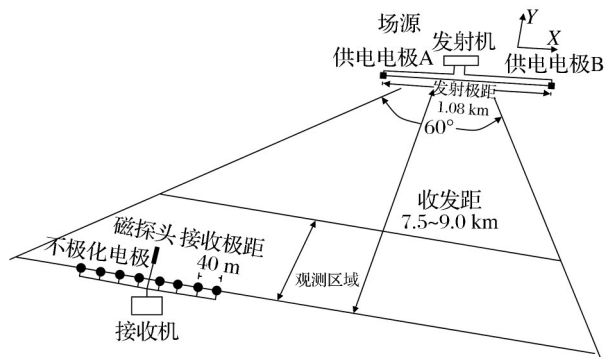


图 2 可控源音频大地电磁测量原理简图

Fig. 2 Schematic diagram of the principle of controlled source audio magnetotelluric measurement

2.2 地面高精度磁测野外工作和数据处理方法

地面高精度磁测是一种以岩(矿)石磁性差异为基础的非接触式被动勘探方法(张志勇等,2023),以其仪器轻便、工作效率高、成本低廉和信息丰富等特点(刘仕刚等,2024),逐渐成为矿产勘查的重要技术手段之一(黄宁等,2019)。地面高精度磁测在了解隐伏控矿构造和含矿破碎蚀变带分布等间接找金方面发挥着重要的作用(李波等,2017)。

本次研究工作使用加拿大 GEM 公司的 GSM-19T 质子磁力仪进行数据采集,测量点距为 20 m。在研究区进行数据采集获得地磁场总强度 T 后,对其进行日变改正、正常场改正和高度改正,并与基点值求差值获得磁异常 ΔT , ΔT 经化极处理后得到化极磁异常。对化极磁异常进行相关成像反演计算,获

得模型的反演结果并绘制反演结果的拟值断面图。

相关成像反演是一种求取地下空间概率意义上等效偶极子源分布的反演方法(李子永,2018)。该方法通过计算实测的磁异常与地下待成像的偶极子扫描函数间的归一化互相关系数(黄双龙等,2023),并将相关系数的分布情况等效地下异常体的分布情况(李金朋等,2016),具有无需先验信息约束、不需要进行迭代计算以及计算简便稳定的优点(沈铭成等,2017)。根据归一化互相关系数公式(郭良辉等,2010),实测磁异常 ΔT 与第 q 个磁偶极子的相关系数 C_q (孟小红等,2012)可表示为

$$C_q = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta T(x_i, y_i, z_i) \Delta T_q(x_i, y_i, z_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta T^2(x_i, y_i, z_i) \sum_{i=1}^n \Delta T_q^2(x_i, y_i, z_i)}} \quad (5)$$

式中: $\Delta T(x_i, y_i, z_i)$ 为观测点 (x_i, y_i, z_i) 处的磁异常; n 为观测点总数; $\Delta T_q(x_i, y_i, z_i)$ 为第 q 个偶极子在观测点 (x_i, y_i, z_i) 处的磁异常。

根据柯西不等式,磁异常的相关系数 C_q 的大小介于 -1 和 1 之间(郭良辉等,2009),相关系数 C_q 表征实测磁异常 ΔT 由第 q 个偶极子产生的可能性。 C_q 绝对值越高,表明 q 点存在磁偶极子的概率越大(兰天,2023); C_q 值为正,表明磁偶极子磁性高; C_q 为负,表明磁偶极子磁性低。地下空间地质体的分布情况可由相关系数等效表示。

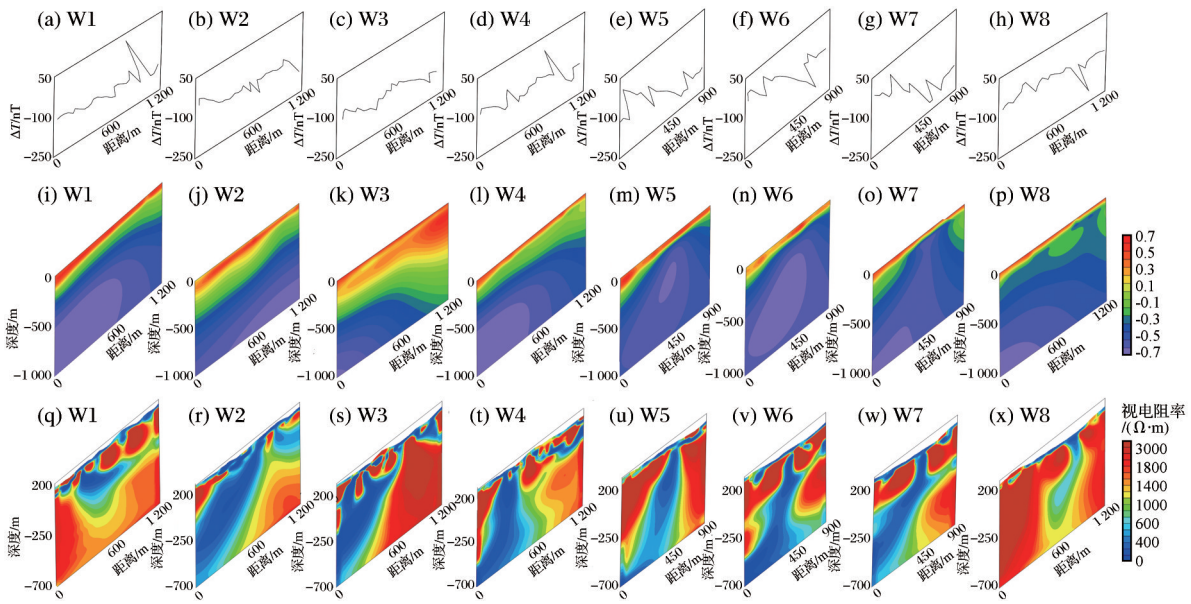
3 资料分析与解释

3.1 测线布设

根据本次研究工作的目的,在研究区东部沿垂直韧性剪切带方向布设高精度地面磁测剖面与 CSAMT 测线 8 条(W1~W8),剖面方向 0° ,其中 W1~W7 间各剖面间距为 200 m, W7 与 W8 间距为 100 m, W1~W4 线长 1.16 km, W5~W8 线长 840 m。各剖面同时进行高精度地面磁测和 CSAMT 观测,其中地面高精度磁测测点间距为 20 m, CSAMT 测点间距为 40 m,测线布设位置详见图 1。

3.2 数据处理结果及解释

本次研究工作各条剖面的地面高精度磁测和 CSAMT 观测及反演结果如图 3 所示, W1~W8 线的磁异常曲线[图 3(a)~3(h)]整体呈现跳变的特征; W1~W8 线的磁异常相关成像反演等值线[图 3(i)~



(a)~(h) W1~W8线化极磁异常曲线图;(i)~(p) W1~W8线磁异常相关成像反演等值线图;(q)~(x) W1~W8线CSAMT反演电阻率等值线图

图3 研究区各测线高精度磁法和CSAMT观测及反演结果

Fig. 3 Observation and inversion results of high-precision magnetic method and CSAMT for each survey line in the study area

3(p)]呈现出的地层磁性结构均可划分为较明显的上下两层,表层为相对的磁性高,深层为相对的磁性低;W1~W8线的CSAMT反演电阻率等值线[图3(q)~3(x)]的地层电性结构中均存在一条较明显的低阻异常带,该低阻异常带呈近EW向展布,推测该低阻异常带处发育一条走向近EW向、倾向S的隐伏断裂。

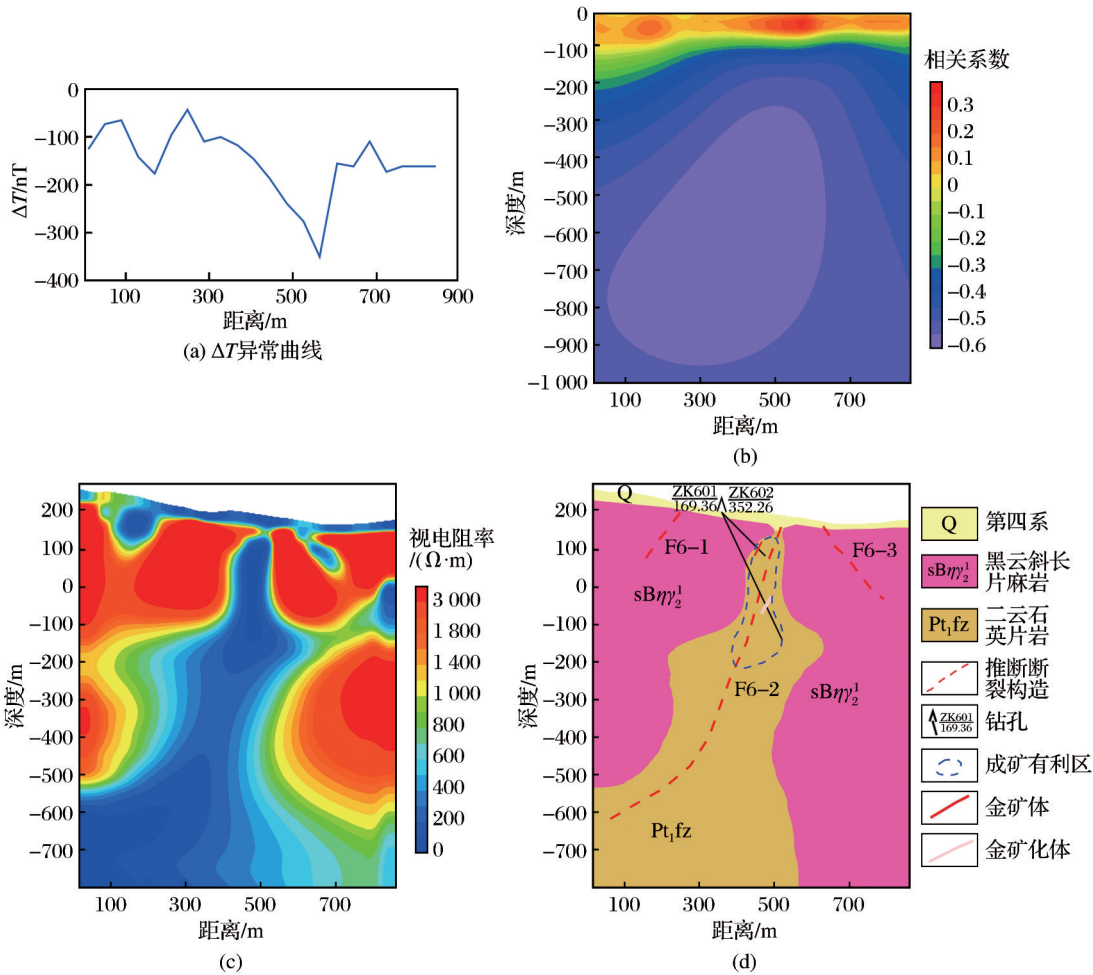
(1) W6线物探数据反演结果及地质解释

W6测线位于研究区东部,测线长度为840 m,测线方位角为0°。从W6测线化极磁异常 ΔT 曲线图[图4(a)]中可见,W6剖面的磁异常以负值为主,磁异常幅值范围为-30~-380 nT,磁异常曲线整体呈现出跳变的特征。磁异常极小值出现在剖面580 m附近,推测该磁异常突变是由F6-2断裂引起;在剖面170 m附近存在一处磁异常次极小值,推测该磁异常突变由F6-1断裂引起;在剖面680 m附近存在一处磁异常次极大值,推测该磁异常突变由F6-3断裂引起。

在W6线磁异常相关成像反演等值线图[图4(b)]中,W6线的磁性结构大致可划分为两层,表层100 m的相关系数大于0,表明表层100 m内的磁性相对较高,推测为第四系覆盖的相关成像反演表现;

100 m以深的相关系数小于0,表明深部的岩石磁性相对较低,推测其为基岩的相关成像反演表现。100 m以深的地磁性层根据相关系数的高低可大致划分为3段,南段和北段相关系数介于0~-0.5,中段相关系数小于-0.6。剖面0~560 m为南段,在磁异常剖面上主要表现为大于-150 nT的较为平稳的负磁异常,推测该段为第四系下覆的黑云斜长片麻岩;剖面560~600 m为中段,在磁异常剖面上表现为低于-150 nT的负磁异常,推测该段为二云石英片岩;剖面600~840 m为北段,磁异常剖面上表现为大于-150 nT的平稳负磁异常,推测该段为黑云斜长片麻岩。

从W6测线CSAMT反演电阻率等值线图[图4(c)]中可见,W6测线的电性结构大致可划分为两层三段,标高200 m以浅区域电阻率相对较低,电阻率值小于 $500 \Omega \cdot m$,主要岩性为第四系覆盖层。标高200 m以深区域按电阻率大小可划分为南、中、北三段。剖面0~560 m,标高200~-500 m为南段高阻区域,电阻率值大于 $800 \Omega \cdot m$,推断该段岩性为黑云斜长片麻岩,在剖面约170 m处发育F6-1断裂,其倾向S,倾角较缓;剖面560~600 m,标高200~-800 m为中段,电阻率值小于 $800 \Omega \cdot m$,推断其岩性为二云石



(a)化极磁异常曲线图;(b)磁异常相关成像反演等值线图;(c)CSAMT反演电阻率等值线图;(d)综合解译成果图

图4 W6线高精度磁法、CSAMT综合解译成果图

Fig. 4 Comprehensive interpretation results maps of W6 line high-precision magnetic method and CSAMT

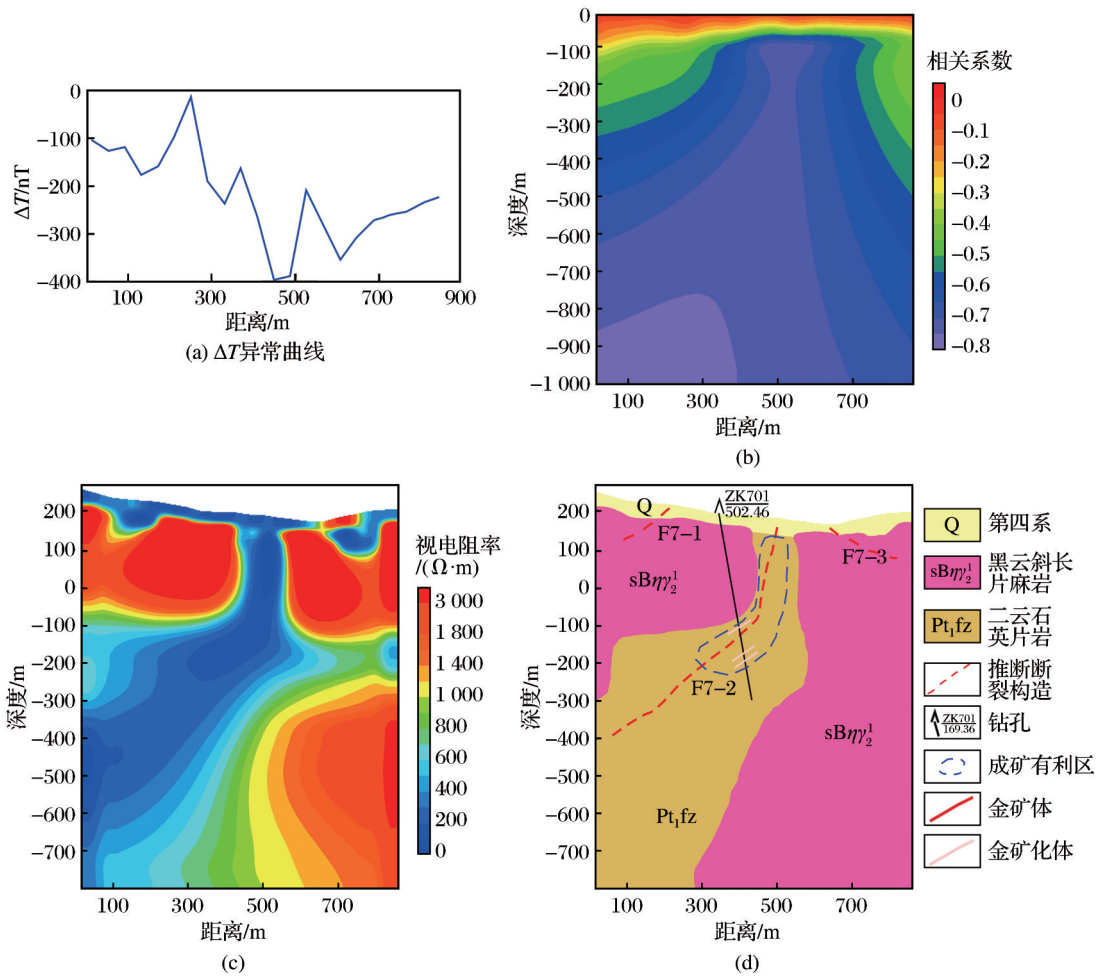
英片岩,在剖面约580 m处发育F6-2断裂,倾向S,倾角较为陡立,该断裂为区域上EW向韧性剪切带在研究区内的延伸;剖面600~840 m,标高150~800 m为北段,电阻率大于800 Ω·m,推断该段岩性为黑云斜长片麻岩,在剖面约680 m处发育F6-3断裂,倾向N,倾角较缓。

(2)W7线物探数据反演结果及地质解释

W7测线位于研究区东部,测线长度为840 m,测线方位角为0°。从W7测线化极磁异常ΔT曲线图[图5(a)]中可见,W7剖面的磁异常以负值为主,磁异常幅值范围为5~-400 nT,磁异常曲线整体呈现出跳变的特征。磁异常极小值出现在剖面460 m附近,推测该磁异常突变是由F7-2断裂引起;在剖面230 m附近存在一处磁异常极大值,推测该磁异

常突变由F7-1断裂引起;在剖面610 m附近存在一处磁异常次极小值,推测该磁异常突变由F7-3断裂引起。

在W7线磁异常相关成像反演等值线图[图5(b)]中,W7线的磁性结构大致可划分为两层,表层100 m的相关系数大于-0.3,表明表层100 m内的磁性相对较高,推测为第四系覆盖的相关成像反演表现;100 m以深的相关系数小于-0.3,表明深部的岩石磁性相对较低,推测其为基岩的相关成像反演表现。100 m以深的地磁性层根据相关系数的高低大致可划分为三段,南段和北段相关系数介于-0.3~-0.6,中段相关系数小于-0.7。剖面0~420 m为南段,在磁异常剖面上主要表现为大于-300 nT的负磁异常,推测其为第四系下覆的黑云斜长片麻岩;剖



(a)化极磁异常曲线图;(b)磁异常相关成像反演等值线图;(c)CSAMT反演电阻率等值线图;(d)综合解译成果图

图5 W7线高精度磁法和CSAMT综合解译成果图

Fig. 5 Comprehensive interpretation results maps of W7 line high-precision magnetic method and CSAMT

面420~600 m为中段,在磁异常剖面上表现为低于-300 nT的跳变负异常,推测该段为二云石英片岩;剖面600~840 m为北段,在磁异常剖面上表现为大于-300 nT的负磁异常,推测该段为黑云斜长片麻岩。

由W7测线CSAMT反演电阻率等值线图[图5(c)]可知,W7测线的电性结构大致可划分为两层三段,标高200 m以浅区域电阻率相对较低,电阻率值小于500 Ω·m,主要岩性为第四系覆盖层。标高200 m以深区域按电阻率大小可划分为南、中、北三段。剖面0~420 m,标高200~-100 m为南段高阻区域,电阻率值大于800 Ω·m,推断该段岩性为黑云斜长片麻岩,在剖面约230 m处发育F7-1断裂,倾向S,倾角较缓;剖面420~600 m,标高150~-800 m为中

段,电阻率值小于800 Ω·m,推断其岩性为二云石英片岩,在剖面约460 m处发育F7-2断裂,倾向S,倾角较为陡立,该断裂为区域上EW向韧性剪切带在研究区内的延伸;剖面600~840 m,标高180~-800 m为北段,电阻率大于800 Ω·m,推断该段岩性为黑云斜长片麻岩,在剖面约610 m处发育F7-3断裂,倾向N,倾角较缓。

3.3 讨论

区域上EW走向的小庄一大庄头韧性剪切带是金山金矿区的主要控矿构造,已发现的金矿脉均位于该韧性剪切带内,准确查明隐伏的小庄一大庄头韧性剪切带在研究区东部的延伸情况,是实现金山金矿区深边部找矿突破的关键所在。W6测线560~600 m处在化极磁异常曲线上呈现明显极小值

跳变特征,在CSAMT反演电阻率断面呈现出明显的低阻异常,电阻率值小于 $500\ \Omega\cdot\text{m}$,推测发育F6-2隐伏断裂;W7测线420~600 m处化极磁异常曲线出现明显极小值跳变特征,在CSAMT反演电阻率断面呈现出明显的低阻异常,电阻率值小于 $500\ \Omega\cdot\text{m}$,推测发育F7-2隐伏断裂。结合区域上小庄一大庄头韧性剪切带的地质特征,W6和W7测线发育的F6-2和F7-2隐伏断裂应为区域上的小庄一大庄头韧性剪切带在研究区东部的延伸,构造破碎带内呈现明显的低阻异常特征,具有一定的成矿潜力,低阻异常区域即是本次工作筛选出的成矿有利区。

4 钻孔验证

根据研究区W6和W7线化极磁异常、CSAMT反演解译剖面 and 化极磁异常曲线的异常特征,圈定磁异常剖面中负值磁异常跳变区域对应的低阻异常区域为成矿有利区进行钻探验证。在W6测线布设钻孔ZK601和ZK602[图1和图4(d)]进行异常查证,ZK601与ZK602钻孔位于W6测线360 m附近,ZK301孔深352.26 m,倾角为 75° ,位于推测成矿有利区范围内,在263.90 m处见金矿化体一层,金品位为 0.13×10^{-6} ,在265.40 m处见金矿化体一层,金品位为 0.11×10^{-6} ,金矿化体主要赋矿地质体均为二云石英片岩;ZK302孔深169.36 m,倾角为 45° ,位于推测成矿有利区范围内,在121.63 m处见金矿化体一层,金品位为 1.31×10^{-6} ,层厚1.3 m,金矿体赋矿空间主要在碎裂蚀变岩内。在W7测线布设钻孔ZK701[图1和图5(d)]进行异常查证,ZK701钻孔位于W7测线320 m附近,孔深502.46 m,倾角为 80° ,在推测成矿有利区范围内,在361.1 m处见金矿化体一层,金品位为 0.16×10^{-6} ,在434.9 m处见金矿化体一层,金品位为 0.32×10^{-6} ,在444.6 m处见金矿化体一层,金品位为 0.12×10^{-6} ,金矿化体主要赋矿地质体均为二云石英片岩。

5 结论

应用高精度磁测和CSAMT方法对金山金矿区开展深边部找矿预测,初步查明了金山金矿区深部地质体和断裂的磁性特征、地电特征及空间分布情

况,根据物探异常圈定了成矿有利区,经钻孔验证,成矿有利区内共见金矿化体5层,厚度为1.3 m的金矿体一层,物探综合解译结果与钻孔验证结果吻合度较高,说明高精度磁测和CSAMT方法在金山金矿区深边部找矿预测工作中应用效果良好。结合物探、地质和钻探资料综合分析得出以下结论:

(1)应用高精度磁法测量能够较准确地探测金山金矿区东部隐伏韧性剪切带和断裂发育部位;通过化极磁异常相关成像反演计算得到的相关系数可等效反映地质体的磁性特征,进而有效的对岩性进行初步划分。

(2)应用CSAMT反演电阻率能够准确探测金山金矿区东部隐伏韧性剪切带和断裂深部产状及延伸情况,确定韧性剪切带的空间展布特征;利用反演电阻率形态特征,可有效对岩性进行初步划分,并根据电阻率低值异常间接指示深部金矿化体和金矿体的赋存位置。

(3)应用高精度磁测与CSAMT相结合的综合物探方法总结出金山金矿区深边部找矿目标体小庄一大庄头韧性剪切带呈现“低磁性—低电阻率”的物性特征,确定了该韧性剪切带呈近EW走向,倾向由近乎直立南倾逐渐变缓至 $45^\circ\sim 60^\circ$ 南倾。根据磁异常相关成像反演和CSAMT反演结果圈定了成矿有利区,经钻孔验证,成矿有利区碎裂蚀变岩内见厚度为1.3 m的隐伏金矿体一层,二云石英片岩内见隐伏金矿化体5层,证了解译推断结果的准确性,为后续钻孔布设和矿体预测提供了可靠依据。

(4)高精度磁法测量、CSAMT和钻探结果证明,隐伏的小庄一大庄头韧性剪切带在金山金矿区东部仍有延伸,具有较大的找矿潜力,值得进一步开展深边部找矿工作。

(5)高精度磁法测量与CSAMT相结合的综合物探方法在金山金矿区深边部找矿预测工作中取得了较好的效果,在该区及邻区深部找矿方面具有良好的应用前景。

参考文献(References):

陈焯,胡树林,郭志,等,2013.可控源音频大地电磁测深法在永定河隧道勘察中的应用[J].工程勘察,41(1):81-

- 85, 91. Chen Xuan, Hu Shulin, Guo Zhi, et al, 2013. Application of controlled-source audio magnetotelluric method in geological exploration of Yongdinghe tunnel [J]. *Geotechnical Investigation and Surveying*, 41(1): 81-85, 91.
- 陈玉玲, 韩凯, 陈贻祥, 等, 2015. 可控源音频大地电磁法在岩溶塌陷勘察中的应用[J]. *地球物理学进展*, 30(6): 2616-2622. Chen Yuling, Han Kai, Chen Yixiang, et al, 2015. The application of CSAMT in Karst collapse investigation [J]. *Progress in Geophysics*, 30(6): 2616-2622.
- 郭良辉, 孟小红, 石磊, 2010. 磁异常 ΔT 三维相关成像[J]. *地球物理学报*, 53(2): 435-441. Guo Lianghui, Meng Xiaohong, Shi Lei, 2010. 3D correlation imaging for magnetic anomaly at data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(2): 435-441.
- 郭良辉, 孟小红, 石磊, 等, 2009. 重力和重力梯度数据三维相关成像[J]. *地球物理学报*, 52(4): 1098-1106. Guo Lianghui, Meng Xiaohong, Shi Lei, et al, 2009. 3-D correlation imaging for gravity and gravity gradiometry data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(4): 1098-1106.
- 何继善, 1990. 可控源音频大地电磁法[M]. 长沙: 中南工业大学出版社. He Jishan, 1990. *Controlled source audio magnetotelluric method* [M]. Changsha: Central South University Press.
- 何俊飞, 2013. 可控源音频大地电磁法在凡口铅锌矿中的应用[J]. *工程地球物理学报*, 10(6): 763-770. He Junfei, 2013. Application of controlled source audio-frequency magnetotelluric method in Fankou lead-zinc deposit [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 10(6): 763-770.
- 黄理善, 侯一俊, 陈远荣, 等, 2022. 基于物探—化探技术快速精确定位评价城市及周边隐伏断层: 以广西桂林市临桂区为例[J]. *中国地质*, 49(3): 929-942. Huang Lishan, Hou Yijun, Chen Yuanrong, et al, 2022. Rapid and accurate positioning concealed fault using geophysical and geochemical techniques in cities and surrounding areas: a case study of Lingui District, Guilin City, Guangxi [J]. *Geology in China*, 49(3): 929-942.
- 黄力军, 张威, 刘瑞德, 2007. 可控源音频大地电磁测深法寻找隐伏金属矿的作用[J]. *物探化探计算技术*, 29(增刊1): 55-59, 13, 12. Huang Lijun, Zhang Wei, Liu Ruide, 2007. An application of CSAMT to prospecting for hidden mineral deposits [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 29(Suppl. 1): 55-59, 13, 12.
- 黄宁, 邵奎, 2019. 广东中坝地区磁场特征及找矿远景区预测[J]. *工程地球物理学报*, 16(4): 508-515. Huang Ning, Shao Kui, 2019. Characteristics of magnetic field and prediction of ore prospective areas in Zhongba area of Guangdong [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 16(4): 508-515.
- 黄双龙, 邱景, 孙赫轩, 等, 2023. 基于自适应滤波的磁梯度数据三维相关成像[J]. *数字海洋与水下攻防*, 6(4): 442-449. Huang Shuanglong, Qiu Jing, Sun Hexuan, et al, 2023. 3D correlation imaging of magnetic gradient data based on adaptive filtering [J]. *Digital Ocean and Underwater Warfare*, 6(4): 442-449.
- 蒋型义, 蔡克杰, 杨朋, 等, 2023. 可控源音频大地电磁法在鄂东南封三洞铜矿深部找矿中的应用[J]. *地质找矿论丛*, 38(2): 249-255. Jiang Xingyi, Cai Kejie, Yang Peng, et al, 2023. Application of CSAMT to deep ore prospecting in Fengshandong Cu mine, in southeast Hubei Province [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 38(2): 249-255.
- 焦智伟, 艾虎, 李英宾, 等, 2020. 激发极化法和可控源音频大地电磁法在黔西北铅锌矿勘查中的综合应用[J]. *矿产与地质*, 34(5): 962-968. Jiao Zhiwei, Ai Hu, Li Yingbin, et al, 2020. Comprehensive application of induced polarization method and controlled source audio magnetotelluric method for the exploration of Pb-Zn deposits in Northwest Guizhou [J]. *Mineral Resources and Geology*, 34(5): 962-968.
- 荆鹏, 孙进, 李水平, 等, 2024. 大地微动测深与时间域激电测深在金矿床中的勘查应用: 以河南省嵩县东湾金矿床为例[J]. *地质与勘探*, 60(5): 982-992. Jing Peng, Sun Jin, Li Shuiping, et al, 2024. Application of geodetic micro-tremor sounding and time-domain IP sounding to the exploration of the Dongwan gold deposit in Songxian County, Henan Province [J]. *Geology and Exploration*, 60(5): 982-992.
- 兰天, 2023. 基于磁梯度张量的铁磁性目标三维反演方法研究[D]. 重庆: 重庆大学. Lan Tian, 2023. *Research on 3D inversion method of ferromagnetic target based on magnetic gradient tensor* [D]. Chongqing: Chongqing University.
- 李波, 长孙月雷, 张选朋, 2017. 高精度磁测在陕西省秋树坪地区金矿勘查中的应用[J]. *工程地球物理学报*, 14(2): 199-205. Li Bo, Zhangsun Yuelei, Zhang Xuanpeng, 2017. The application of high-precision magnetic prospecting to gold mine exploration in Qiushuping area of Shaanxi [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 14(2): 199-205.

- 李金朋,张英堂,范红波,等,2016.基于磁梯度张量的地下小目标相关成像方法[J].探测与控制学报,38(3):75-78.Li Jinpeng, Zhang Yingtang, Fan Hongbo, et al, 2016. Correlation imaging method of small subsurface target based on magnetic gradient tensor[J].Journal of Detection and Control, 38(3):75-78.
- 李鹏,罗玉钦,田有,等,2021.深部地质资源地球物理探测技术研究发展[J].地球物理学进展,36(5):2011-2033. Li Peng, Luo Yuqin, Tian You, et al, 2021. Research progress of geophysical exploration technology for deep geological resources [J]. Progress in Geophysics, 36(5):2011-2033.
- 李生虎,2022.综合物探方法在东昆仑东段益克郭勒斑岩型钼矿找矿中的应用研究[J].矿产勘查,13(10):1484-1490.Li Shenghu, 2022. Application of integrated geophysical prospecting method in Yikeguole porphyry molybdenum deposit, eastern segment of East Kunlun [J]. Mineral Exploration, 13(10):1484-1490.
- 李涛,杨明,王伟,等,2024.AMT与高精度磁测在红石泉地区铀矿勘查中的应用[J].物探化探计算技术,46(1):103-110.Li Tao, Yang Ming, Wang Wei, et al, 2024. Application of AMT and high precision magnetic survey in uranium exploration in Hongshiquan area [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 46(1):103-110.
- 李子永,2018.基于三维相关成像法的磁梯度张量数据目标体三维重建研究[D].北京:中国地质大学(北京).Li Ziyong, 2018. 3D Reconstruction of magnetic gradient tensor data target based on 3D correlation imaging [D]. Beijing: China University of Geosciences.
- 刘强,张岩,蔡娜,等,2024.山东栖霞笏山—西陡崖金矿地质特征及资源潜力分析[J].山东国土资源,40(3):33-41.Liu Qiang, Zhang Yan, Cai Na, et al, 2024. Analysis on geological characteristics and resource potential of Hushan-Xidouya gold deposit in Qixia City in Shandong Province [J]. Shandong Land and Resources, 40(3):33-41.
- 刘仕刚,陈向平,袁霆,等,2024.地面高精度磁法测量在青海某区地质矿产调查中的应用[J].矿产勘查,15(5):827-836.Liu Shigang, Chen Xiangping, Yuan Ting, et al, 2024. Application of high precision ground magnetic survey in geological and mineral survey in a district of Qinghai [J]. Mineral Exploration, 15(5):827-836.
- 刘尧,孟贵祥,吕庆田,等,2021.新疆准噶尔北缘覆盖区深部地质结构及其地质意义:来自综合地球物理探测的证据[J].地球物理学报,64(11):4075-4089.Liu Yao, Meng Guixiang, Lü Qingtian, et al, 2021. Deep structure beneath the overburdened area of the northern margin of Junggar Basin and its geologic implications: evidence from 3D inversion of integrated geophysical data [J]. Chinese Journal of Geophysics, 64(11):4075-4089.
- 柳建新,郭荣文,韩世礼,等,2008.CSAMT法在西北深部探矿中的应用研究[J].矿产与地质,22(3):261-264.Liu Jianxin, Guo Rongwen, Han Shili, et al, 2008. Application of controllable source acoustic-frequency magnetotelluric method (CSAMT) to prospecting in deep part of Northwest China [J]. Mineral Resources and Geology, 22(3):261-264.
- 孟凡兴,乔勇,胡鉴,等,2016.可控源音频大地电磁测量在花岗岩型铀矿勘查中的应用[J].物探与化探,40(3):488-492,513.Meng Fanxing, Qiao Yong, Hu Jian, et al, 2016. The applications of CSAMT to the exploration of granite type uranium deposits [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 40(3):488-492,513.
- 孟小红,刘国峰,陈召曦,等,2012.基于剩余异常相关成像的重磁物性反演方法[J].地球物理学报,55(1):304-309.Meng Xiaohong, Liu Guofeng, Chen Zhaoxi, et al, 2012. 3-D gravity and magnetic inversion for physical properties based on residual anomaly correlation [J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(1):304-309.
- 单伟,迟乃杰,熊玉新,等,2023.山东省蓬莱—栖霞金成矿带地壳结构对金成矿的约束[J].山东国土资源,39(3):5-13.Shan Wei, Chi Naijie, Xiong Yuxin, et al, 2023. Constraint of crustal structures on gold mineralization in Peng-lai-Qixia gold metallogenic belt [J]. Shandong Land and Resources, 39(3):5-13.
- 沈铭成,冉军林,2017.起伏地形磁异常三维相关成像方法及应用[J].工程地球物理学报,14(1):50-55.Shen Mingcheng, Ran Junlin, 2017. The application of 3D correlation imaging method of magnetic anomaly to rugged terrains [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 14(1):50-55.
- 宋立伟,王会军,王铁强,等,2024.综合地球物理探测在金矿预测中的应用:以胶东郑家金矿为例[J].中国地质调查,11(2):43-50.Song Liwei, Wang Huijun, Wang Tieqiang, et al, 2024. Application of integrated geophysical methods in gold deposit prediction: a case study of Zhengjia gold deposit in Jiaodong area [J]. Geological Survey of China, 11(2):43-50.
- 滕吉文,2010.强化第二深度空间金属矿产资源探查,加速发展地球物理勘探新技术与仪器设备的研制及产业化

- [J].地球物理学进展,25(3):729-748.Teng Jiwen,2010. Strengthening exploration of metallic minerals in the second depth space of the crust, accelerating development and industrialization of new geophysical technology and instrumental equipment [J]. Progress in Geophysics, 25 (3) : 729-748.
- 王逢涛, 郗昭, 张东, 等, 2023. CSAMT法在柴凯湖北砂岩型铀矿砂体探测中的应用研究[J]. 工程地球物理学报, 20(3):358-364. Wang Fengtao, Xi Zhao, Zhang Dong, et al, 2023. Application of CSAMT method in sand-body detection of sandstone type uranium deposit in north Chaikai Lake [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 20(3):358-364.
- 王金鑫, 张嵩松, 赵文广, 等, 2021. 综合地球物理勘探方法在安徽范水洼地区金矿找矿中的应用[J]. 中国地质调查, 8(5):35-44. Wang Jinxin, Zhang Songsong, Zhao Wenguang, et al, 2021. Application of comprehensive geophysical methods in gold deposits prospecting in Fanshui-wa area of Anhui Province [J]. Geological Survey of China, 8(5):35-44.
- 王久良, 杨超, 许曼, 等, 2022. 长城金矿电阻率异常特征及其找矿意义[J]. 矿产勘查, 13(6):777-784. Wang Jiuliang, Yang Chao, Xu Man, et al, 2022. Characteristics of resistivity anomaly in the Great Wall gold deposit and its prospecting significance [J]. Mineral Exploration, 13(6):777-784.
- 王开虎, 杨言辰, 陈天文, 等, 2024. 高精度磁法测量在矽卡岩型铜锌矿床深部找矿预测中的应用: 以大兴安岭南端浩布高铜锌矿床为例[J]. 黄金, 45(10):9-15. Wang Kaihu, Yang Yanchen, Chen Tianwen, et al, 2024. Application of high-precision magnetic survey in deep exploration prediction of skarn-type copper-zinc deposits: a case study of Haobugao copper-zinc deposit in the southern Greater Khingan Range [J]. Gold, 45(10):9-15.
- 王瑞良, 张招崇, 曾庆栋, 等, 2019. 胶东栖霞金矿集区早白垩世花岗岩形成时代及地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 43(1):186-198. Wang Rui-liang, Zhang Zhao-chong, Zeng Qingdong, et al, 2019. Ages of the Early Cretaceous granites in Qixia gold concentration area, Shandong Province and implications for gold mineralization [J]. Geotectonica et Metallogenia, 43(1):186-198.
- 王晓奇, 郭恒飞, 王常东, 等, 2022. 用综合物探方法在内蒙古广兴源找隐伏铀钼矿浅析[J]. 矿产勘查, 13(增刊1):258-265. Wang Xiaoqi, Guo Hengfei, Wang Changdong, et al, 2022. Analysis of finding hidden uranium-molybdenum deposits by comprehensive geophysical methods in Guangxingyuan area, Inner Mongolia, China [J]. Mineral Exploration, 13(Suppl.1):258-265.
- 吴懿豪, 韩江涛, 刘云鹤, 等, 2021. 内蒙古双尖子山矿集区三维电性结构及成矿意义[J]. 地球物理学报, 64(4):1291-1304. Wu Yihao, Han Jiangtao, Liu Yunhe, et al, 2021. Three-dimensional electrical structures and mineralization significance in the Shuangjianzishan ore-concentrated area, Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Geophysics, 64(4):1291-1304.
- 徐浩清, 杨彪, 王文杰, 等, 2022. 内蒙古包头市哈达门沟金矿地球物理综合方法找矿实例分析[J]. 矿产与地质, 36(4):805-813. Xu Haoqing, Yang Biao, Wang Wenjie, et al, 2022. Analysis of prospecting case by comprehensive geophysical method in Hadamengou gold deposit in Baotou City, Inner Mongolia [J]. Mineral Resources and Geology, 36(4):805-813.
- 许广春, 习铁宏, 段洪芳, 2008. 可控源音频大地电磁法(CSAMT)在隧道勘察中的应用[J]. 工程勘察, 36(6):68-71. Xu Guangchun, Xi Tiehong, Duan Hongfang, 2008. Application of CSAMT method on tunnel exploration [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 36(6):68-71.
- 杨彪, 陈孝强, 王文杰, 等, 2022. 内蒙古哈达门沟金矿区深部找矿方法综合应用研究[J]. 物探化探计算技术, 44(2):261-270. Yang Biao, Chen Xiaoqiang, Wang Wenjie, et al, 2022. Comprehensive application of deep prospecting methods in Hadamengou gold deposit, Inner Mongolia [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 44(2):261-270.
- 喻春, 陈永凌, 李建忠, 等, 2016. 可控源音频大地电磁法在高楼山金矿深部找矿中的应用[J]. 黄金科学技术, 24(1):59-63. Yu Chun, Chen Yongling, Li Jianzhong, et al, 2016. Application of CSAMT to deep mine prospecting in the Gaoloushan gold mine [J]. Gold Science and Technology, 24(1):59-63.
- 岳鹏, 2019. 可控源音频大地电磁二维约束反演研究与应用[D]. 太原: 太原理工大学. Yue Peng, 2019. Research and application of 2D constrained inversion of controllable source audio magnetotelluric [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology.
- 张利峰, 段留安, 王志军, 等, 2025. CSAMT在胶东前垂柳矿区金矿资源调查评价中的应用[J]. 黄金科学技术, 33(1):44-54. Zhang Lifeng, Duan Liu'an, Wang Zhijun, et al, 2025. Application of CSAMT in gold resource investigation and evaluation in Qianchuilu mining area, Jiaodong

- [J]. *Gold Science and Technology*, 33(1): 44-54.
- 张落毅, 王西荣, 王学武, 等, 2023. 物化探在金寨县西岭冲铅锌多金属矿中的应用[J]. *中国地质调查*, 10(3): 34-40. Zhang Luoyi, Wang Xirong, Wang Xuewu, et al, 2023. Application of geophysical and geochemical exploration methods in Xilingchong Pb-Zn polymetallic deposit of Jinzhai County[J]. *Geological Survey of China*, 10(3): 34-40.
- 张晓团, 李新林, 周斌, 等, 2024. 广域电磁法在北秦岭蟒岭矿集区深部找矿中的应用: 以腰庄矿区为例[J]. *物探与化探*, 48(6): 1609-1617. Zhang Xiaotuan, Li Xinlin, Zhou Bin, et al, 2024. Application of wide-field electromagnetic sounding method to deep prospecting in the Mangling ore concentration area in North Qinling: a case study of the Yaozhuang ore district [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 48(6): 1609-1617.
- 张晓周, 高梓豪, 许宗宪, 2020. 高精度磁测在第四系覆盖地区寻找金矿靶区的应用: 以内蒙古查嘎尔崩金矿为例[J]. *地质找矿论丛*, 35(4): 462-467. Zhang Xiaozhou, Gao Zihao, Xu Zongxian, 2020. Application of high precision magnetic survey to locating gold targets in areas with quaternary cover[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 35(4): 462-467.
- 张志勇, 腰善丛, 陈聪, 等, 2023. 音频大地电磁法、地面高精度磁法在黑龙江三江盆地西部铀矿资源勘查中的应用[J]. *世界核地质科学*, 40(4): 952-962. Zhang Zhiyong, Yao Shancong, Chen Cong, et al, 2023. Application of audio-frequency magnetotelluric method and ground high precision magnetic method in uranium exploration in the western Sanjiang Basin, Heilongjiang Province [J]. *World Nuclear Geoscience*, 40(4): 952-962.
- 赵明传, 段留安, 宋耕海, 等, 2016. 山东栖霞金山金矿床地质特征及找矿预测[J]. *黄金科学技术*, 24(2): 67-75. Zhao Mingchuan, Duan Liu'an, Song Genghai, et al, 2016. Geological characteristics and ore prospecting forecast of Jinshan gold deposit in Qixia, Shandong Province [J]. *Gold Science and Technology*, 24(2): 67-75.
- 赵瑞峰, 2014. 山东栖霞金山韧性剪切带型金矿床地质特征[J]. *西部资源*, (5): 206-209. Zhao Ruifeng, 2014. Geological characteristics of Jinshan ductile shear zone type gold deposit, Qixia County, Shandong Province [J]. *Western Resources*, (5): 206-209.
- 赵志坚, 杨天春, 曹运江, 等, 2024. CSAMT在危机矿山深部勘查中的应用: 以湖南稻草湾矿区锑矿为例[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 39(3): 36-44. Zhao Zhijian, Yang Tianchun, Cao Yunjiang, et al, 2024. Application of CSAMT to deep-edge exploration in crisis mines: taking antimony exploration in the Daocaowan mining area of Hunan Province for an example [J]. *Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 39(3): 36-44.
- 钟幼生, 韩自强, 罗姣, 等, 2015. 关于可控源音频大地电磁法探测深度的探讨[J]. *物探与化探*, 39(4): 768-774. Zhong Yousheng, Han Ziqiang, Luo Jiao, et al, 2015. A tentative discussion on the detecting depth of controlled source audio magnetotelluric method [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 39(4): 768-774.

Application of Integrated Geophysical Exploration Techniques in Deep and Edge Prospecting and Prediction of the Jinshan Gold Deposit in Qixia

LI Ziyong^{1,2}, ZHANG Lifeng^{1,2}, LIU Yadong^{1,2}, XIE Lei^{1,2}, WANG Lipeng^{1,2}

1. *Yantai Center of Coastal Zone Geological Survey, China Geological Survey, Yantai 264000, Shandong, China;*
2. *Ministry of Natural Resources Observation and Research Station of Land-Sea Interaction Field in the Yellow River Estuary, Yantai 264000, Shandong, China*

Abstract: The Jinshan gold mining area is located in the central-southern segment of the Qixia-Penglai metallogenic belt within the Jiaodong region and is characterized as a medium-sized altered rock-type gold deposit. As surface prospecting efforts have reached a bottleneck, there is an increasing urgency to pursue deep-side prospecting to identify additional resources. To expand the prospecting domain and achieve breakthroughs in deep and edge exploration, geophysical techniques such as high-precision surface magnetic surveys and controlled source audio magnetotelluric (CSAMT) soundings are employed to assess and evaluate gold

resources in the eastern part of the Jinshan mining area. By processing inversion data from high-precision ground magnetic surveys and CSAMT soundings, and integrating these with previous geological research, a comprehensive geological interpretation was performed on the magnetic anomaly correlation imaging inversion results and the CSAMT inversion outcomes. This study elucidated the magnetic properties, geoelectrical characteristics, and spatial distribution of deep geological formations and fault structures in the eastern segment of the Jinshan gold mining area. It also delineated the development location, extension, and variations in the deep attitude of the regional ore-controlling structure, specifically the Xiaozhuang-Dazhuangtou ductile shear zone, within the eastern Jinshan gold mining area. Furthermore, the research identified that the minimum magnetic anomaly jump points, low-value anomaly zones in magnetic anomaly correlation imaging coefficients, and low-resistivity anomaly zones in apparent resistivity serve as geophysical indicators of the Xiaozhuang-Dazhuangtou ductile shear zone. Based on these insights, potential areas for mineralization were inferred. Subsequent drilling operations led to the discovery of one concealed gold ore body and five gold mineralization bodies within the two inferred favorable mineralization areas, thereby validating the reliability of the inversion interpretation results derived from the high-precision magnetic survey and controlled source audio magnetotelluric sounding. A comprehensive analysis indicates that the integration of high-precision magnetic surveys with CSAMT surveys enables precise detection of the spatial distribution and extension of deep geological formations and fault structures in the eastern sector of the Jinshan gold mining area. The ore-controlling structure, identified as the Xiaozhuang-Dazhuangtou ductile shear zone, is characterized by geophysical signatures of “low magnetism and low resistivity.” In the eastern region of the Jinshan mining area, this shear zone exhibits an approximately east-west orientation, with its dip angle decreasing progressively from nearly vertical to $45^{\circ}\sim 60^{\circ}$ southward. Drilling validation results suggest that the eastern section of the Jinshan gold mining area possesses substantial prospecting potential, justifying further exploration in both deep and peripheral zones. The integrated geophysical methodology, combining high-precision magnetic surveys with CSAMT surveys, is demonstrated to be an effective strategy for deep and peripheral prospecting, highlighting its promising application potential.

Key words: high-precision magnetic survey; correlation imaging; inversion; CSAMT; Jinshan gold mining area; Xiaozhuang-Dazhuangtou ductile shear zone; deep and edge prospecting