

引用格式：柳建新，曹丽，郭振威，等，2024. 湘东北白沙窝稀有金属矿床电性特征与找矿预测研究 [J]. 地质力学学报，30 (5)：768–780. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2024060](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2024060)

Citation: LIU J X, CAO L, GUO Z W, et al., 2024. Electrical characteristics and metallogenic prediction of Baishawo rare metal deposit in northeast Hunan Province [J]. Journal of Geomechanics, 30 (5) : 768–780. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2024060](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2024060)

湘东北白沙窝稀有金属矿床电性特征与找矿预测研究

柳建新^{1,2}，曹 丽^{1,2}，郭振威^{1,2}，曹创华^{2,3}，陈 旭³

LIU Jianxin^{1,2}，CAO Li^{1,2}，GUO Zhenwei^{1,2}，CAO Chuanghua^{2,3}，CHEN Xu³

1. 中南大学地球科学与信息物理学院，湖南长沙 410083；

2. 中南大学有色资源与地质灾害探查湖南省重点实验室，湖南长沙 410083；

3. 湖南省地质调查所，湖南长沙 410016

1. *School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;*

2. *Key Laboratory of Non-Ferrous Resources and Geological Hazard Detection, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;*

3. *Geology Survey Institute of Hunan Province, Changsha 410016, Hunan, China*

Electrical characteristics and metallogenic prediction of Baishawo rare metal deposit in northeast Hunan Province

Abstract: [Objective] The aim of this study is to characterize the deep electrical structure of the Baishawo pegmatite-type deposits, explore the spatial distribution of rare metal mineralization models and ore-conferring carriers, and elucidate the relationship between the location of ore veins to provide a basis for prediction in rare metal mineral exploration. [Methods] Through the controlled-source audio-geomagnetic method (CSAMT) and the conjugate gradient method of inverse measurement of three exploration profiles, deep hidden rock (ore) bodies were detected. Then, by combining these results with the information from drill holes and elemental geochemical anomalies, a comprehensive analysis was carried out to reveal the distribution of the hidden dikes and the mineralization characteristics. [Results] The study showed that the concealed pegmatite veins are mainly located in the Lengjiayi Group, where they are concentrated on the top of the granite body and around tectonic fissures and have burial depths ranging from 50 to 300 m. The geophysical signature of pegmatite vein mineralization is a high-resistance vein-like geologic body intruded from a deep high-resistance body into a shallow low-resistance body. [Conclusion] The determined distribution and burial depth of concealed pegmatite veins, identified potential concealed veins in the study area, and geophysical characteristics of the pegmatite vein mineralization provide a basis for understanding the formation mechanism of fracture zone-constrained pegmatite veins. **Significance** The research results provide a scientific basis for follow-up exploration of the Baishawo deposit, reveal the formation mechanism of the pegmatite veins, and provide reliable physical exploration and prediction technology and experience useful for rare metal exploration in northeast Hunan and south China.

Keywords: pegmatite; Lianyunshan mountain; CSAMT; lithium-beryllium-niobium-tantalum deposit; rare metal

基金项目：国家自然科学基金项目（42130810）；湖南省自然科学基金项目（2023JJ60164，2023JJ60166）；湖南省地质院科研项目（HNGS202201）；湖南省地质院领军人才科研项目（HNGSTP202318）

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42130810), Provincial Natural Science of Foundation of Hunan (Grants No. 2023JJ60164, 2023JJ60166), Scientific Research Project of the Geological Bureau of Hunan Province, China (Grant No. HNGS202201), and Scientific Research Project of Leading Talents of the Geological Bureau of Hunan Province, China (Grant No. HNGSTP202318).

第一作者：柳建新（1962—），男，博士，教授，主要从事电磁法理论和深部矿产资源勘探等方面的科研和教学工作。

Email: ljx6666@126.com

通讯作者：曹创华（1985—），男，博士，正高级工程师，主要从事地球物理勘查技术研究、项目管理等工作。Email: 0404050825@163.com

收稿日期：2024-05-29；修回日期：2024-09-01；录用日期：2024-09-03；网络出版日期：2024-09-03；责任编辑：范二平

摘要: 花岗伟晶岩型稀有金属矿床是最重要的稀有金属矿床类型之一。连云山东部新发现了白沙窝伟晶岩型矿床,初步评估白沙窝矿床深部稀有金属资源潜力巨大,但该矿床的矿产开采程度很低,围绕深部隐伏花岗伟晶岩脉的研究程度不高。通过研究白沙窝伟晶岩型矿床的深部电性结构特征,探讨稀有金属成矿模型及赋矿载体的空间分布,阐明矿脉就位关系,旨在为稀有金属找矿预测提供依据。通过可控音频大地电磁法(CSAMT)在白沙窝岩体东南方向开展深部隐伏岩(矿)体的探测工作,采用共轭梯度法反演实测3条探测剖面数据,探测深部隐伏岩(矿)体,并结合钻孔信息和元素地球化学异常特征信息进行综合分析,揭示隐伏岩脉的分布及成矿特征。研究结果表明,隐伏伟晶岩脉主要位于冷家溪群中,集中分布在花岗岩体顶部及构造裂隙周围,埋深在50~300 m;伟晶岩脉的成矿地球物理标志为深部高阻体侵入浅部低阻体中的高阻脉状地质体。研究成果为白沙窝矿床后续勘查工作提供了科学依据,揭示了伟晶岩脉的形成机理,并为湘东北及华南地区的稀有金属勘查提供了可靠的物探预测技术和经验。

关键词: 伟晶岩; 连云山; CSAMT; 锂-铍-铌-钽矿床; 稀有金属

中图分类号: P631.3+4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616(2024)05-0768-13

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2024060

0 引言

稀有金属矿产是国家发展的战略性资源,同时也是新兴产业发展必需的能源矿产(王登红等, 2016; 王登红, 2016)。稀有金属元素主要为锂(Li)、铍(Be)、铌(Nb)、钽(Ta)、铷(Rb)、铯(Cs)、锆(Zr)等,其中包含有锂-铍-铌-钽(Li-Be-Nb-Ta)等元素的矿产又被称作国家的战略性关键矿产(王登红等, 2022),因其具有耐热性、耐熔性、耐腐蚀性以及优良的光电磁等性能,在新能源、新材料、信息技术等新兴产业和国防军工等行业中具有不可替代的重大用途(侯增谦等, 2020)。花岗伟晶岩以富含稀有金属而闻名,花岗伟晶岩矿床的勘查评价和成矿理论一直以来都是地质学界研究的热点(毛景文等, 2019; 翟明国等, 2019)。

江南造山带是中国重要的稀有金属成矿带,已发现多处与锂-铍-铌-钽相关的稀有金属伟晶岩矿床,如松花岗铌-钽-锂矿、雅山414铌-钽-锂矿、仁里-传梓源铌-钽-锂矿和幕阜山锂-铌-钽资源矿集区等大型一特大型矿床。经过多年的地质调查及勘查开采,许多超大型矿集区资源的研究或开采程度高,可持续开采资源量不足,亟需就近寻找新的大型伟晶岩型矿。近年来新发现的位于江南造山带中段的白沙窝伟晶岩型矿床(文春华等, 2018a; 文志林等, 2024),初步的地表调查和勘查结果发现其稀有金属矿产资源储量潜力巨大,有望成为继仁里-传梓源矿区之后的又一大型一超大型稀有金属矿床,为进一步探测、开发湘东北锂-铍-铌-钽矿产资

源提供了新方向。

白沙窝矿床位于湘东北连云山背斜南翼地段,湖南省地质调查所(原湖南省地质调查院)在此开展了基础地质、矿床地质等一系列研究(文春华等, 2018a),主要研究勘查成果包括以下3点:①白沙窝岩体(二云母二长花岗岩)侵入新元古界冷家溪群中,发育稀有金属矿化的LCT(Li-Cs-Ta)型伟晶岩(锂-铯-钽型伟晶岩),其主要赋存于二云母二长花岗岩中(Cerný and Ercit, 2005),二者存在密切的时空关系;②二云母二长花岗岩为高分异过铝质S型花岗岩,形成于造山一晚造山环境中,伟晶岩在花岗岩体侵位后结晶,伟晶岩浆成矿物质可能来源于地壳(Wen et al., 2021);③白沙窝岩体周边伟晶岩脉发育,其整体长度介于30~750 m,宽度介于0.18~13.29 m;其中岩体中伟晶岩脉走向主要为东西向,长度一般为50~500 m、宽度为0.5~13.0 m;岩体东侧的伟晶岩脉走向主要为北北东向,长度为30~750 m、宽度为0.18~13.29 m(文春华等, 2018b)。

新一轮的工作重心已经转移至深部、隐伏矿产探测中(李廷栋, 2022)。随着探测目标体的埋藏深度不断加深,地下构造愈加复杂,传统的地质勘探方法面对深部和隐伏矿体已失去直接找矿的能力。为贯彻“攻深探盲,寻找大矿、富矿”的理念(刘光鼎, 1992),必须引入地球物理方法来进行找矿预测(范俊波等, 2022)。电磁法作为国内外最常用的地球物理探测方法(Guo et al., 2020),因其可以对地下地质结构、分层信息和控矿构造进行精细刻画,满足了高精度深部探测的要求(Jiao et al., 2021),进而可以得到地下隐伏矿脉的深部埋藏深

度、空间展布等信息(Liu et al., 2023),使得电磁法在深部隐伏找矿作业中发挥着重大作用(柳建新等, 2023)。

传统的矿产资源电磁勘探方法主要有大地电磁测深法(Magnetotelluric Sounding, MT)、瞬变电磁法(Transient Electromagnetic Methods, TEM)和可控源音频大地电磁测深法(Controlled Source Audio-frequency Magnetotelluric Method, CSAMT)等。MT通过接收天然源信号进行地下矿体的探测(Wang et al., 2024),操作方便且应用广泛,在寻找深部隐伏矿中具有不可替代的优势(曹新志等, 2009)。但是MT接收的天然源信号较弱且抗干扰能力较差(魏文博, 2002)。TEM利用人工发射线圈加以脉冲电流形成的瞬变电磁场进行矿体探测,比传统的直流电法探测深度大、垂向分辨率高,易于探测到覆盖层下的良导体。但是当存在上覆低阻层时会产生地质噪声,导致数据信噪比下降而直接影响探测效果(薛国强和邓湘, 2007)。CSAMT因其具备分辨率更高、探测深度更大的优势(Strangway et al., 1973),在深部和隐伏(岩)矿体探测中受到了广泛的应用。CSAMT能够有效确定地下断层、矿体分布、岩性接触带等与成矿有关的地下构造(程长根等, 2011),对矿区的勘查和成矿机制具有重要作用。杨乃峰等(2014)、李冰等(2014)将CSAMT分别应用于翠宏山、河南舞阳地区铁多金属矿床深部找矿中;Lv et al.(2022)将CSAMT应用于深部矿脉的探测中,圈定出碱性岩浆岩体和断裂带的位置,从而成功预测并圈定出有利成矿区;He et al.(2024)在CSAMT电阻率剖面中圈定地下断层带和成矿带,并通过钻孔信息验证推断的准确性。从国内外众多研究现状及成果来看,CSAMT在深部隐伏找矿中发挥了显著作用。

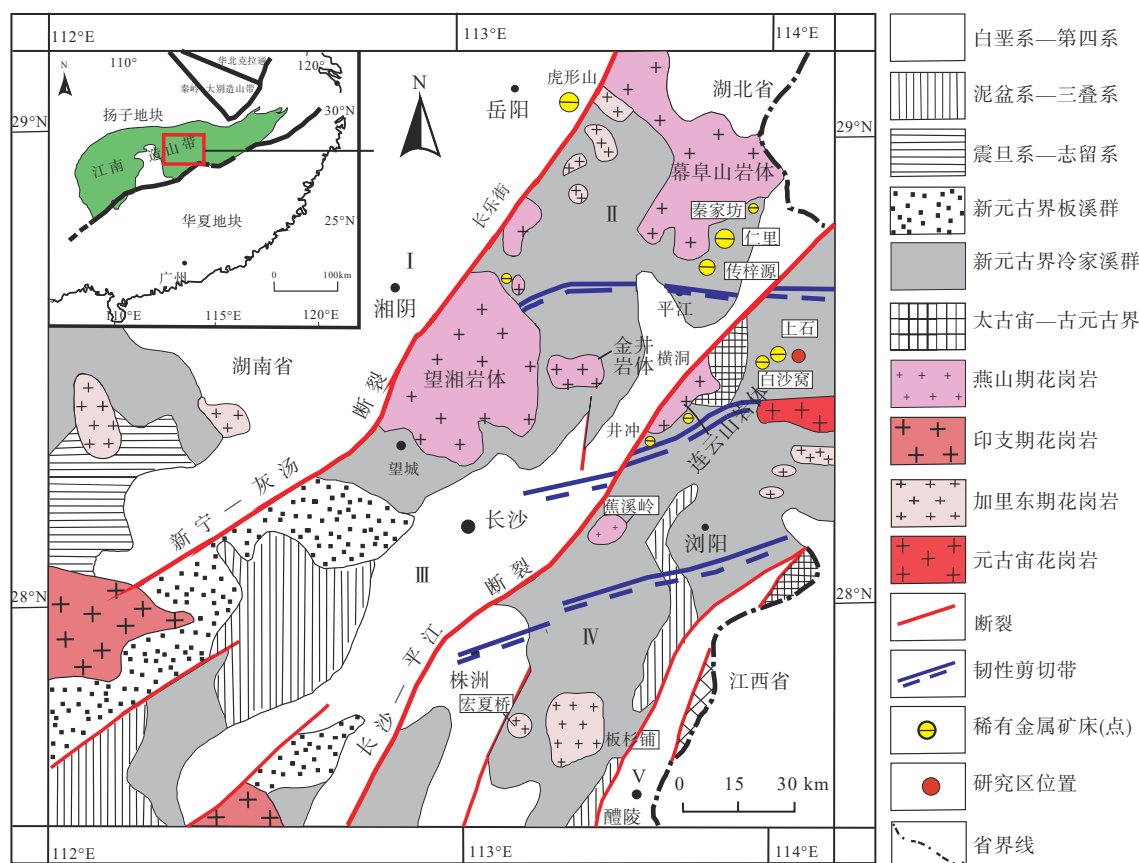
在数据反演方面,学者们研究出很多反演算法,De Groot-Hedlin and Constable(1990)开展了CSAMT方法的二维OCCAM反演;Rodi and Mackie(2001)提出非线性共轭梯度法(NLGG);底青云等(2006)研究了快速松弛二维可控源算法;王若和王妙月(2007)采用网格参数法和剥层法实现了一维全资料可控源音频大地电磁反演;何梅兴等(2008)实现了CSAMT一维OCCAM反演;雷达(2010)将OCCAM算法应用到二维可控源反演中,并且考虑了地形的影响;周俊杰等(2010)开展了具有干预机

制的CSAMT数据一维最优化反演;柳建新等(2012)详细阐述了二维OCCAM反演方法;林昌洪等(2012)试验了CSAMT的三维共轭梯度反演。OCCAM反演方法同时考虑横向和纵向的光滑函数,可以得到光滑的横向、纵向变化电性结果,但是也有可能把小构造光滑掉,不利于后期地质解释工作的开展。快速松弛算法和共轭梯度算法的优势在于计算速度快、占用内存少,从而在实测数据反演中得到广泛应用。

前期工作显示,白沙窝地区地表出露的花岗伟晶岩的地质特征已基本明晰(文春华等, 2020),但含矿伟晶岩脉的深部定位及空间展布特征尚不明确,缺少深部成矿模型建立依据。为此在白沙窝矿床采用CSAMT进行深部隐伏岩(矿)体的探测工作,基于实测数据完成二维反演工作,查明隐伏伟晶岩脉的分布和埋深情况。

1 区域地质背景

湘东北地区位于江南造山带中段,区内基底由古元古代连云山岩群、中元古代冷家溪群和新元古代板溪群组成。区内冷家溪群出露最广,为一套灰色—灰绿色绢云母泥板岩、条带状板岩、粉砂质板岩、岩屑杂砂岩、凝灰质细碎屑岩,局部夹火山岩,与上覆板溪群呈角度不整合接触(图1)。湘东北区内曾发生的弧—陆碰撞活动(王孝磊等, 2017)使得地层发生北东向的挤压,形成出露广泛的褶皱基底。湘东北地区发育有晋宁期、加里东期、印支期和燕山期岩浆岩,其中燕山期岩浆岩分布最为广泛,主要代表性岩体有连云山岩体、金井岩体、幕阜山岩体、望湘岩体、焦溪岭岩体和七宝山岩体等。燕山运动以来,受太平洋板块俯冲和陆块间相互作用的远程效应影响,湘东北地区形成了北北东向的走滑深大断裂,如长沙—平江断裂、新宁—灰汤断裂和浏阳—醴陵断裂等;次级断裂带主要为东西向的久岭—清水、连云山—长沙和青草—株洲等韧性剪切带。冷家溪群板岩地层破碎,层间裂隙发育。多期次的构造运动形成了区内的汨罗断陷盆地、幕阜山—望湘断隆、长沙—平江断陷盆地、浏阳—衡东断隆和醴陵—攸县断陷盆地,这些独特的构造断陷(隆)盆地共同构成了湘东北区域的盆岭相间构造格局(图1)。燕山运动晚期,由于处于由挤压向伸



I—汨罗断陷盆地; II—幕阜山—望湘断隆; III—长沙—平江断陷盆地; IV—浏阳—衡东断隆; V—醴陵—攸县断陷盆地

a—华南构造划分图 (Chen and Jahn, 1998); b—湘东北地区大地构造图 (许德如等, 2009)

图1 湘东北地区地质简图

Fig. 1 Generalized geological map of northeast Hunan Province in the Jiangnan Orogen Belt

(a) Tectonic division map of South China (Chen and Jahn, 1998); (b) Geotectonic map of northeast Hunan (Xu et al., 2009)

展转变的构造环境中,岩石圈发生了玄武质岩浆底侵作用,下地壳发生熔融,岩浆活动导致湘东北地区发生了强烈的稀有金属成矿活动,形成了广泛分布的稀有金属矿床(点)。

白沙窝矿床位于连云山岩体背斜南翼地段,长平断陷盆地(长沙—平江断陷盆地)东南缘。矿床主要出露地层为新元古界冷家溪群,区内分布的岩浆岩为北北西向展布的白沙窝岩体及伟晶岩脉。矿床东部发育南北走向深大断裂及大量北东东向次级断裂。通过搜集物性资料和部分补测,获得了区内地层和代表性岩石样品的电阻率数据(表1),这将为下一步的地球物理成果解释提供物性数据的参考。花岗伟晶岩与围岩(地层)相比,具有密度低、电阻高的典型物性特征,电阻率值差异是开展CSAMT工作的物质基础。通过研究花岗伟晶岩和围岩之间的电性特征变化和异常分布规律,进而确定伟晶岩的深部空间分布信息。

2 数据采集与处理

2.1 数据采集与处理

此次野外工作部署3条北西向的CSAMT测线(L1—L3),站距20 m,间距500 m,布线方位呈北西向54°(图2),每条测线剖面长度为1000 m,测线总长达3 km,西北向为小号点,测线布置可见图2。野外工作使用美国Zonge工程公司的GDP-32型多功能电法探测系统,利用高频发射机发射0.125~8192 Hz的正弦交变信号,采取多次迭代、多次采集以获得稳定数据。

数据处理工作主要包括数据预处理和静态位移动校正。数据预处理工作包括检查原始数据存在的误差和噪声,并对其进行编辑和处理;再将数据文件进行静态位移动校正,然后对单个测点的视电阻率和相位曲线进行评定,剔除畸变频点,合理删除脱离平滑曲线的频点,编辑整条剖面中明显受到近场源

表 1 白沙窝矿床主要地层与岩浆岩物性参数

Table 1 Physical parameters of main strata and magmatic rocks in the Baishawo mining area

地质体类型		样品数量	电阻率/(Ω·m)		
			最小值	最大值	平均值
地层	第四系	532	1.21	211.12	112.22
	冷家溪群	388	118.66	1988.31	886.53
花岗岩	白沙窝岩体	331	5633.23	33552.83	24388.22
含矿体	伟晶岩	111	4568.66	26953.77	17683.41

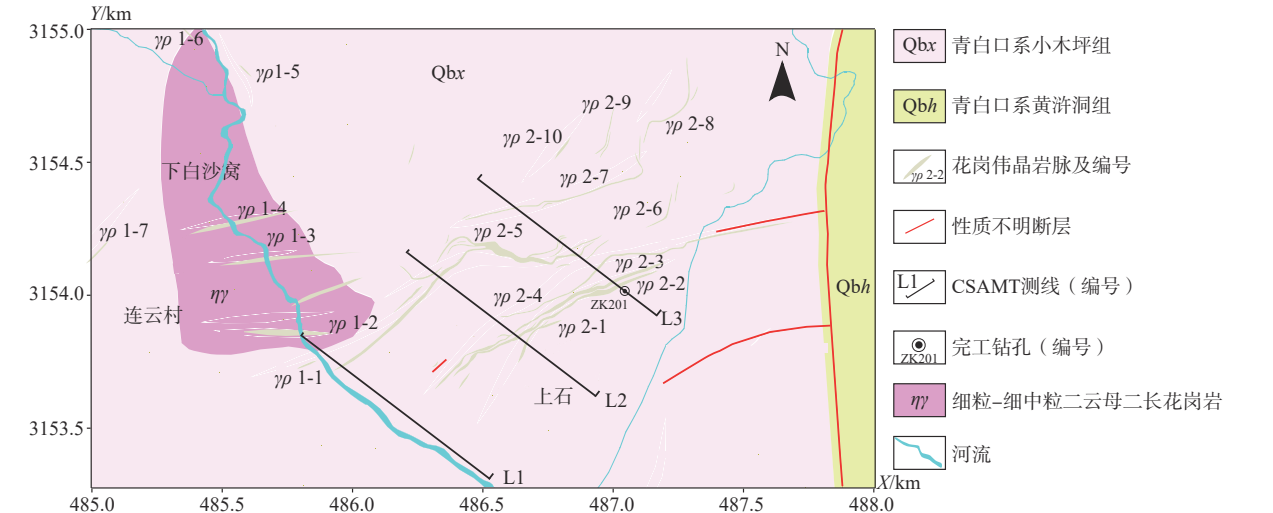


图 2 白沙窝矿床测线布置图 (据曹创华等, 2020 修改)

Fig. 2 Map of CSAMT survey line layout in the research area (modified after Cao et al., 2020)

干扰的测点数据,剔除飞点,保证数据反演的质量。

文中采用非线性共轭梯度算法(NLCG; Rodi and Mackie, 2001),优势在于通过“拟正演”手段避免了雅可比矩阵的求取和存储,只需要计算雅可比矩阵及其转置与某一向量的乘积,每次迭代通过确定搜索方向和最优步长,得到能够使目标函数达到最小值时的最优解。横磁(Transverse Magnetic, TM)模式进行二维反演可以有效地重建三维模型信息(董浩等, 2012),故文中采用TM模式对采用的3条相互平行的CSAMT测线数据分别进行反演。剖面实测数据和二维反演拟合数据对比结果如图3所示,发现原始数据和反演模型数据在3条测线中的反演拟合程度尚可,可以基于此反演结果进行分析和地质解释。

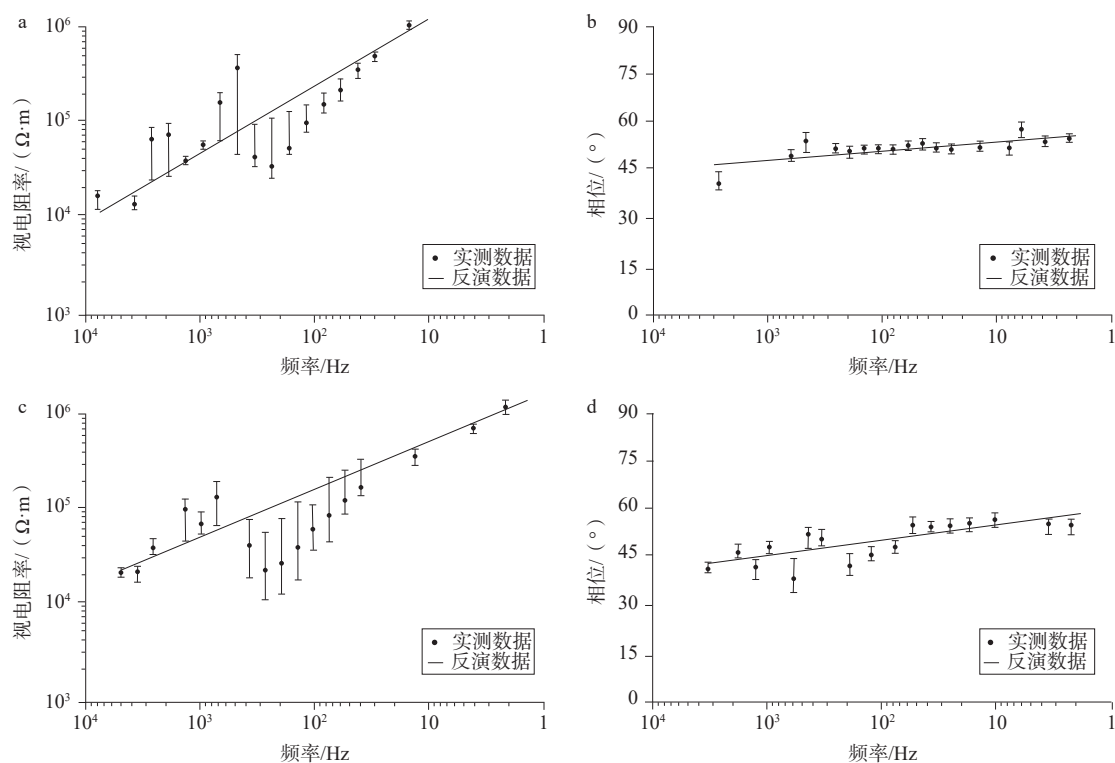
2.2 数据二维反演

为适应实际地形起伏的地质条件,开展带地形的CSAMT数据二维反演。二维反演结果如图4所示,反演结果的拟合情况较好,测线L1初始均方根(Root Mean Square, RMS)为50.12,迭代40次收敛,取第37次反演的迭代结果, RMS为4.8;测线L2初始RMS为55,迭代40次收敛,取第35次反演的迭

代结果, RMS为5.17;测线L3初始RMS为59.2,迭代40次收敛,取第37次反演的迭代结果, RMS为5.2。

2.3 反演模型分析和验证

3条测线剖面均表现为“深部中高阻、浅部低阻”。低阻体的数值在0~5000 Ω·m之间,中阻体的数值在5000~10000 Ω·m之间,高阻体的数值在15000~55000 Ω·m之间。测线L1的反演结果如图4a所示,高程在300 m至0 m的范围内,呈现“高阻—中高阻—低阻”相间分布特征,在测点350~750 m、高程100~300 m之间存在大范围低阻地质体,并且一部分高阻地质体侵入顶部的低阻体中;高程0~-600 m范围内,呈现“高阻—中阻—高阻”分布特征,位于测点250~450 m之间的垂向分布中阻带分割两侧的高阻体,该中阻带推测为电阻率梯度带或其他构造裂隙引起的电阻差异带。测线L2的反演结果如图4b所示,具有与测线L1类似的分布特征,表现为2条剖面连续变化的电阻率特征,高程200~500 m范围内,呈现类似测线L1中的高阻—低阻相间分布特征,但高阻地质体电导率值比测线L1中高阻地质体小,小范围内分布低阻地质体;高程在200 m至-55 m,表现为“高阻—低阻”分布特征,位于测点700~900 m之间的垂向分布中

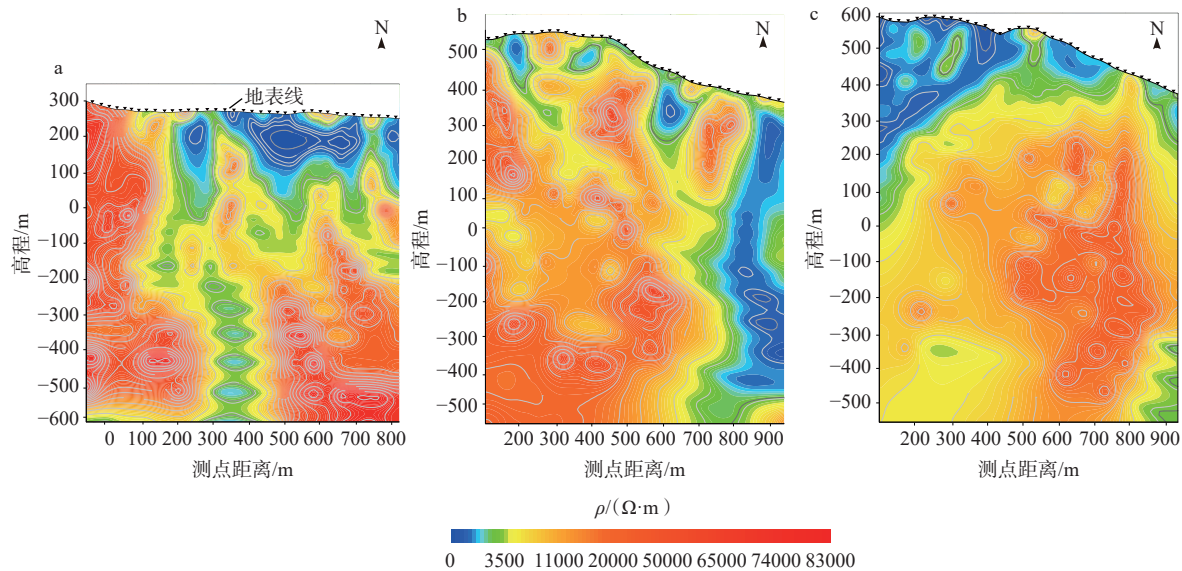


a—测线 L1 中 170 号点的视电阻率曲线; b—测线 L1 中 170 号点的相位曲线; c—测线 L2 中 870 号点的视电阻率曲线; d—测线 L2 中 870 号点的相位曲线

图 3 测线实测数据和二维反演模型数据

Fig. 3 Data of line measurement and two-dimensional inversion model

(a) Apparent resistivity curve at point 170 in Line 1; (b) Phase curve at point 170 in Line 1; (c) Apparent resistivity curve at point 870 in Line 2; (d) Phase curve at point 870 in Line 2



a—测线 L1 的二维反演结果图; b—测线 L2 的二维反演结果图; c—测线 L3 的二维反演结果图

图 4 二维反演电阻率断面图

Fig. 4 Two-dimensional inverse resistivity profile

(a) Two-dimensional inversion result map of Line 1; (b) Two-dimensional inversion result map of Line 2; (c) Two-dimensional inversion result map of Line 3

低阻带异常醒目,从深部贯穿到浅部,直至部分出露地表,推测为类似测线 L1 中的地质结构。测线 L3 的反演结果如图 4c 所示,高程 600~350 m 之间的范围内,呈现大范围的低阻体;高程在 350 m 至 -550 m,几乎被中高阻体覆盖。3 条测线的反演电阻率断面图均具有“浅层低阻、深部高阻、垂向分层”的特征。

3 条测线可以分别独立进行反演成图,所以三

者的反演结果能够互相验证。在垂向切片图(图 5)中可以明显观察到测线 L1—L3 剖面电阻率呈现连续变化,沿着测线方向上的电阻率异常表现出连续性,总体呈浅部呈层、高一低阻相间分布、深部整体中高阻、存在垂向的电阻率断陷通道的特征。3 个反演模型具有相同或相似的电性结构特征,从而可以验证反演结果的可靠性和准确性,也为下一步进行地质解释奠定了良好的反演基础。

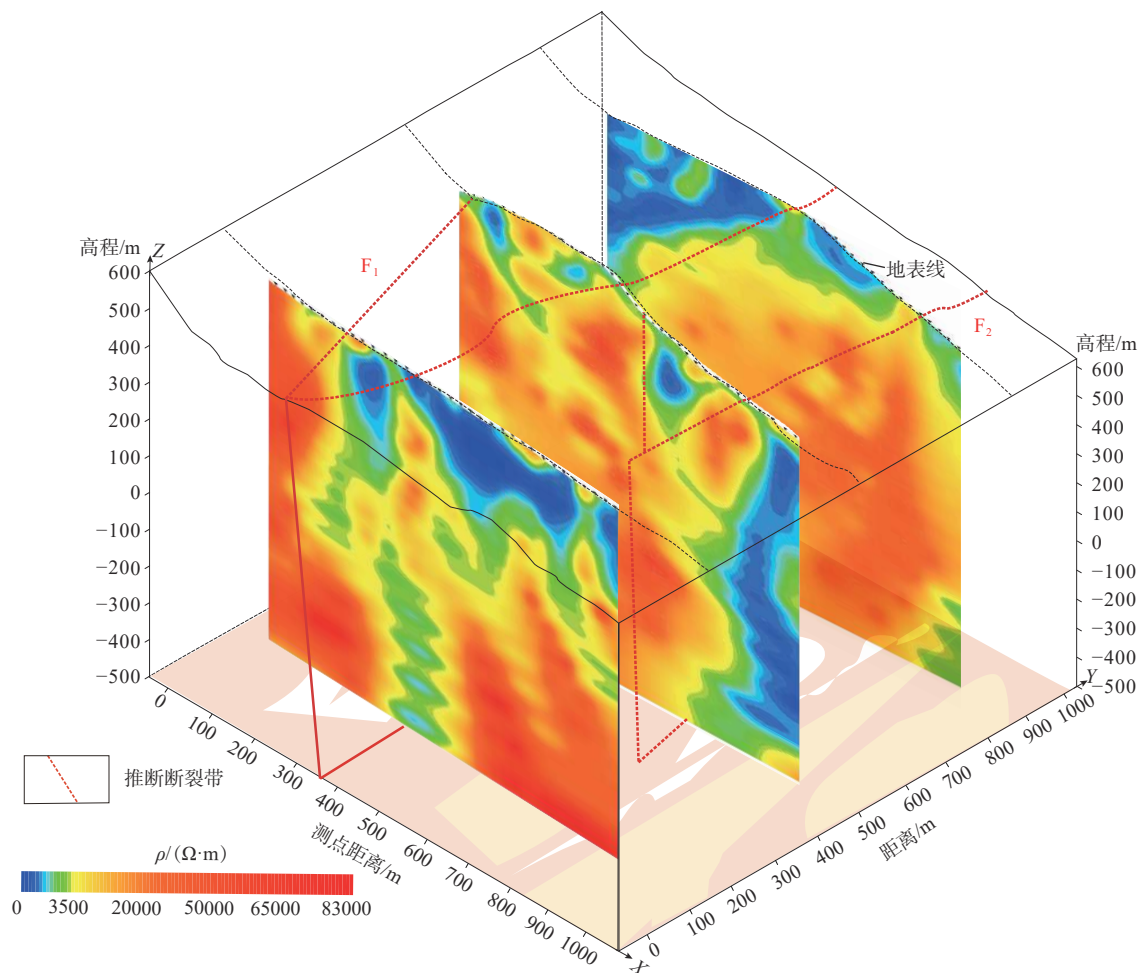


图 5 反演模型三维垂向切片视图

Fig. 5 Inversion model three-dimensional vertical slice view

3 地质解释

3.1 地球物理找矿标志

白沙窝地区主要出露地层为冷家溪群组,其岩性主要表现为浅变质的片岩、板岩、粉砂质板岩及砂岩。由岩石物性参数特征可知(表 1),第四系和冷家溪群为区内高电导率地质体,白沙窝岩体为区内最低电导率地质体,含矿伟晶岩的电阻率值范围介于两者之间,伟晶岩脉与周围岩体或地层之间的

电导率存在明显差异,电阻率差异在电性结构中会出现电性梯度(异常畸变),因此中阻异常体推测为伟晶岩脉。查明伟晶岩脉的埋深和位置是文中研究的重点,以下将分别分析 3 条测线剖面的伟晶岩脉的产出状况。

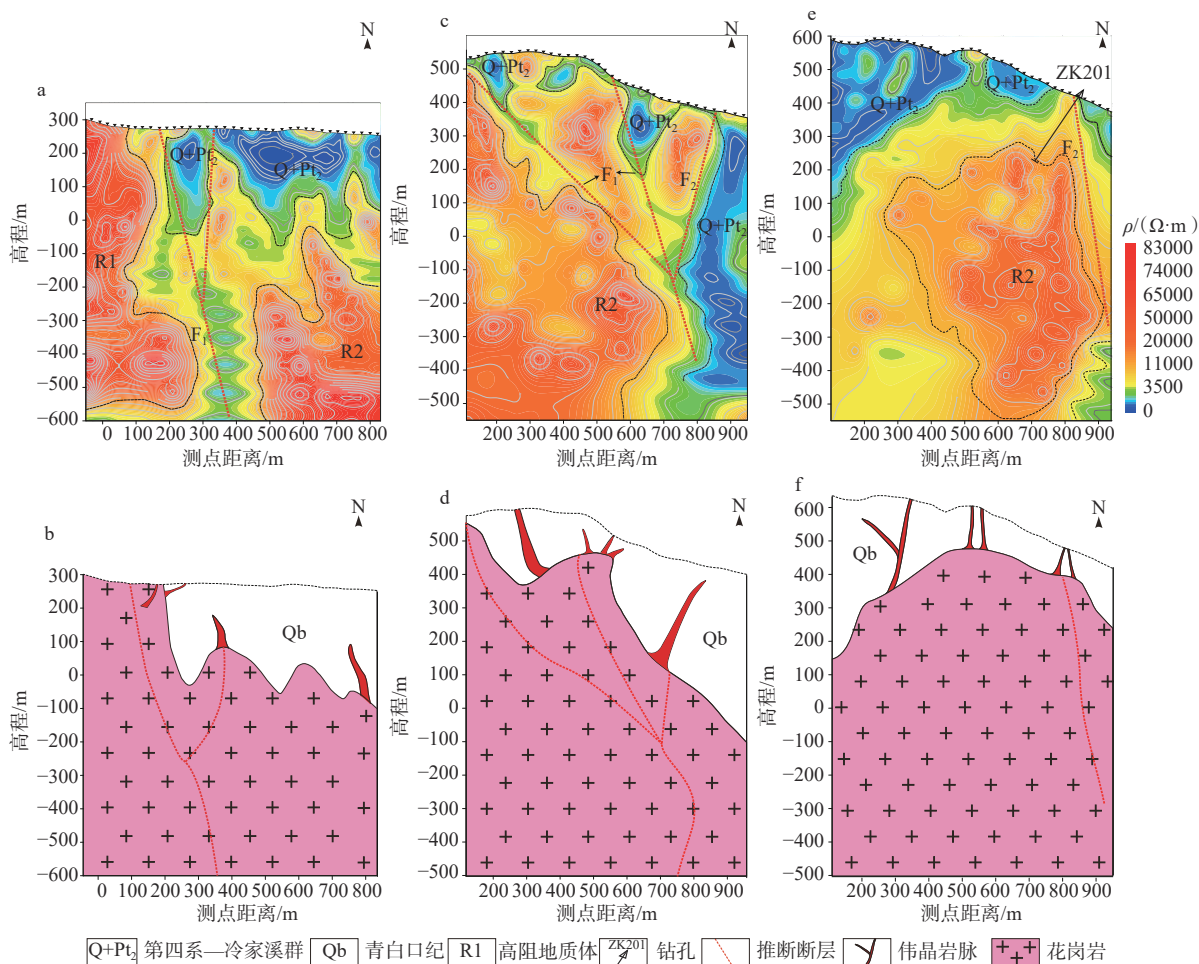
测线 L1 中浅部分布的低阻地质体为区内第四系和冷家溪群(图 6a),高阻异常地质体 R1 和 R2 为地层中隐伏的花岗岩岩体,明显侵入浅部冷家溪群中。在 R1 和 R2 之间存在 1 条分割高阻异常体的中阻带,可能为岩体在强烈构造环境下形成的张裂

隙。测线方向 100~250 m、高程 200~300 m, 在 R1 顶部呈现北东走向的高阻异常囊状体; 测线方向 300~450 m、高程从 -200 m 沿南北向至 200 m, 出露在张断裂顶部并侵入冷家溪群地层中的高阻异常脉状体; 测线方向 720~850 m、高程从 -100 m 沿北西向至 100 m, 出露在 R2 顶部侵入浅部冷家溪群地层中的高阻体; 这 3 个高阻异常体的位置和电阻率值介于高阻岩体和低阻体地层之间, 呈现侵入浅部低阻体的囊状和脉状结构, 推测为测线 L1 剖面中揭露的伟晶岩脉(图 6b)。

测线 L2 的电性结构分布特征与测线 L1 类似(图 6c), 近地表的低阻体为第四系和冷家溪群, 深部 R2 为花岗岩岩体。从深部贯穿至浅部的长条中

阻带为贯穿冷家溪群的构造张裂隙。测线方向 300~450 m、从高程 400 m 沿着北西向直至出露地表的高阻脉状体; 测线方向 400~500 m、高程 400~500 m 分布的高阻异常带; 测线方向 650~700 m、从高程 100 m 沿北东方向至 400 m 的高阻脉状体; 这些均为测线 L2 剖面电性结构中揭露的伟晶岩脉(图 6d)。测线 L2 比测线 L1 揭露的伟晶岩脉规模更大、形态更复杂、分布更紧凑。

测线 L3 的电性结构特征与 L1、L2 有所差异(图 6e), 主要表现为深部基本分布为高阻体 R2, 使得 L3 的深部物理圈闭性良好。近地表的低阻地质体为冷家溪群地层, 深部 R2 为花岗岩岩体, R2 右侧的北西向低阻带为深部的构造裂隙。测线方向



a—测线 L1 电性结构图; b—测线 L1 地质解释图; c—测线 L2 电性结构图; d—测线 L2 地质解释图; e—测线 L3 电性结构图; f—测线 L3 地质解释图

图 6 白沙窝矿床测线 L1—L3 的电性结构和地质解释图

Fig. 6 L1-L3 electrical structure and geological interpretation map of the Baishawo mining area

(a) Electrical structure diagram of measuring Line 1; (b) Geological interpretation map of survey Line 1; (c) Electrical structure diagram of measuring Line 2; (d) Geological interpretation map of survey Line 2; (e) Electrical structure diagram of measuring Line 3; (f) Geological interpretation map of survey Line 3

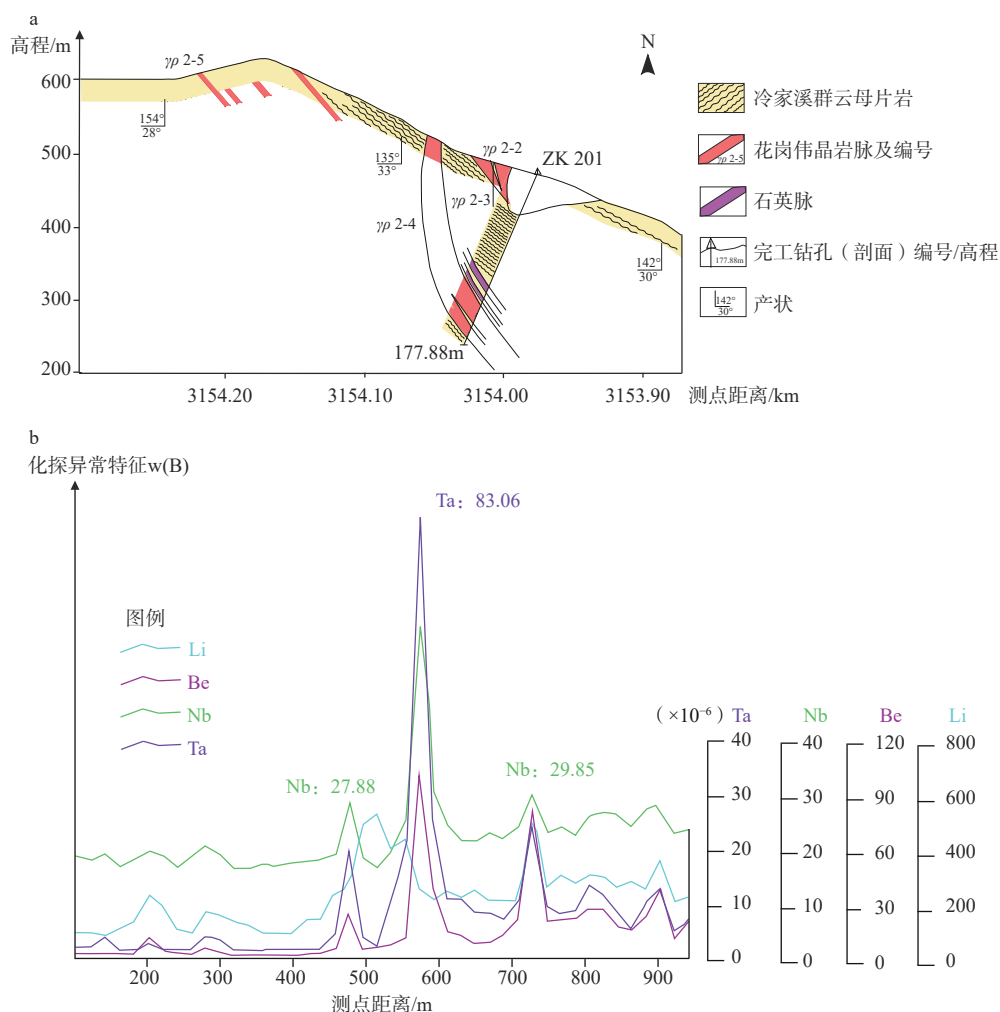
200~360 m、沿着北东向至出露地表的高阻脉体;测线方向 510~560 m、从高程 400 m 沿南北向至地表的高阻异常体;在测线方向 780~860 m、高程 330~400 m 处的高阻异常体;这些均推测为花岗岩体侵入冷家溪群中形成的伟晶岩脉(图 6f)。在测线 L3 中相对完整的花岗岩体周围产出的伟晶岩脉一般产出距离较远,推测可能是因为完整的花岗岩基形成的成矿环境物理圈闭性良好,更有利于大型的伟晶岩脉的产出。

由 3 条测线的电性结构和地质解释可以分析得出白沙窝地区的地球物理找矿标志:深部高阻体(花岗岩体)侵入浅部低阻地层中(冷家溪群)的高阻脉状体(伟晶岩脉)。各剖面揭露的伟晶岩脉主要呈囊状和脉状产出于浅部地层中,大部分产出于岩体顶部和构造裂隙周围,小部分伟晶岩脉产出

于花岗岩体内部。构造裂隙更为发育的地方产出伟晶岩脉形态更为复杂,在完整的花岗岩基周围产出的伟晶岩脉规模更大,分布更为集中。伟晶岩脉的产出和分布与花岗岩体和构造裂隙密切相关。

3.2 电性结构验证分析

基于反演结果,从电性结构中推断出伟晶岩脉的埋深和空间分布特征(图 6),为了进一步验证 CSAMT 的反演结果,研究将结合测线 L3 上的 ZK201 钻孔地质剖面图和地球化学元素异常特征图进行详细分析(图 7)。在 ZK201 钻孔剖面图中,可以直接确认伟晶岩脉的出露位置,这与图 6f 中揭露的北东走向伟晶岩脉位置产状一致,侧面验证了其地质解释结果的可靠性。在测线 L3 的地球化学元素异常特征图中,钽(Ta)和铌(Nb)元素异常高点分别位于测线方向上的 550~600 m 和 700~750 m 处,对应



a—ZK201 钻孔地质剖面图; b—测线 L3 元素地球化学异常特征图(Wen et al., 2021)

图 7 钻孔地质剖面与地球化学元素解译图

Fig. 7 Comprehensive geological and geochemical results interpretation map

(a) Geological profile of drill hole ZK201; (b) Characterization of L3 elemental geochemical anomalies in the survey line (Wen et al., 2021)

图 6f 中的 2 处伟晶岩脉位置, 从而推测 550~600 m 处、700~750 m 处为富铌-钽伟晶岩脉。结合钻孔及元素异常特征信息分析反演结果, 不仅验证了反演结果和地质解释结果的可靠性, 也为下一步的探测工作提供了重要的科学依据。

基于 3 条测线剖面的深部电性结构及其地质解释结果(图 6), 并结合地表地质调查研究结果可

知, 湘东北白沙窝地区深部花岗岩基底为白沙窝岩体, 浅部地层为第四系和冷家溪群, 伟晶岩脉主要集中在花岗岩体的北东方向, 岩脉沿走向出现膨大和收缩状, 呈雁行排列和脉状分叉产出(图 8)。伟晶岩脉出露的位置一般为花岗岩体顶部, 产状和分布方向会受到构造裂隙和周围地层的约束, 呈不规则的脉状或囊状产出。

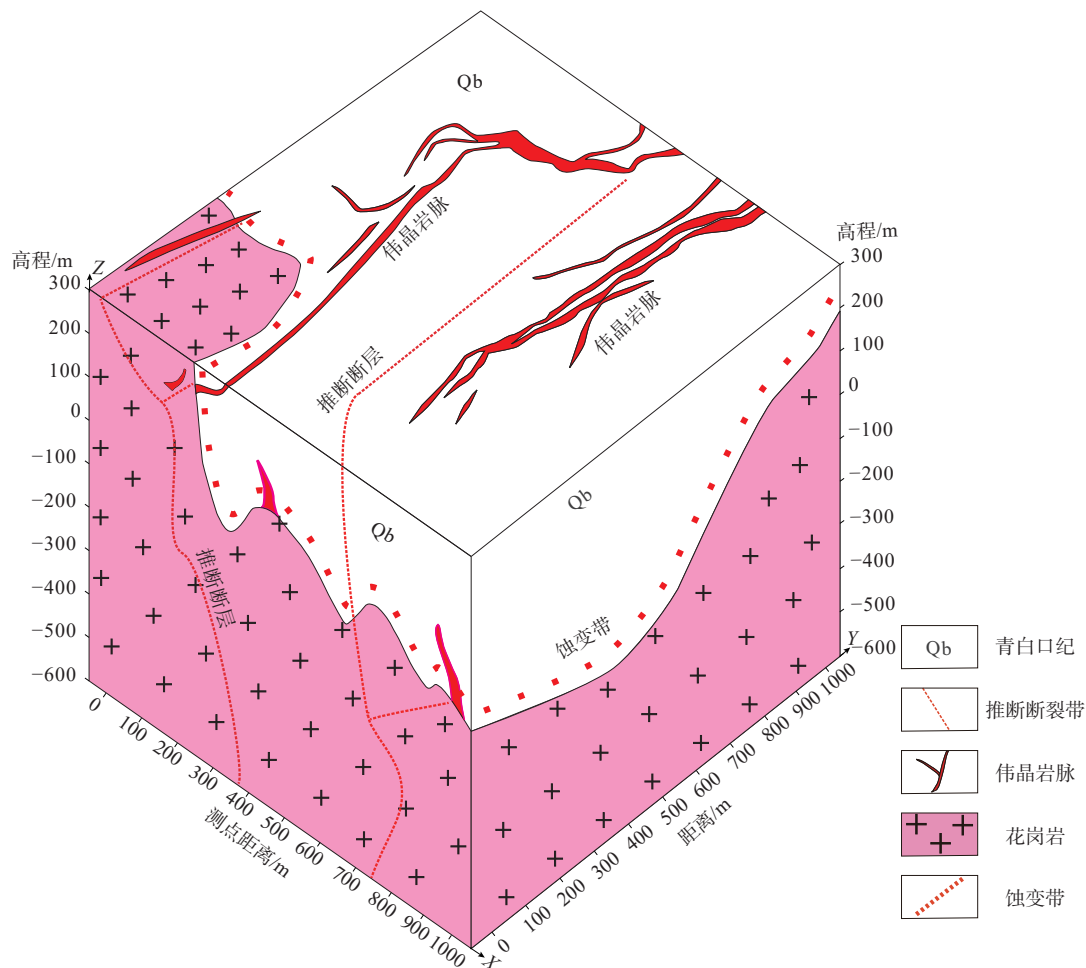


图 8 湘东北白沙窝矿床深部地层结构图

Fig. 8 Structure map of deep strata in the Baishawo mining area, northeast Hunan Province

4 结论

采用可控源音频大地电磁法(CSAMT)对湘东北白沙窝矿床深部隐伏岩(矿)体开展探测工作, 圈定出区内的含矿靶区, 并基本查明了隐伏伟晶岩脉的分布和埋深情况。研究成果从地球物理学的角度为白沙窝矿床后续勘查工作提供了科学依据, 同时为湘东北乃至华南地区的稀有金属勘查提供可靠的物探预测技术和经验, 得到的主要结论如下。

(1) 白沙窝矿床的地球物理找矿标志为深部高阻体(花岗岩)侵入浅部低阻体(冷家溪群)中的高阻脉状地质体(伟晶岩脉); 并结合钻孔地质信息和地球化学元素异常信息验证了反演和地质解释结果的可靠性, 证明 CSAMT 能够有效地圈定矿体靶区。

(2) 白沙窝地区伟晶岩脉主要出露在岩体顶部和裂隙带周围, 呈大小不一、不规则的脉状产出; 伟晶岩脉的形成与断裂带息息相关, 大部分伟晶岩脉受断裂带控制, 还有部分伟晶岩脉由岩体内部破碎

带和层间裂隙共同约束。

References

- CAO C H, WEN C H, LOU F S, et al., 2020. Geophysical responses of typical rare metal deposits and implications on geophysical prospecting in Hunan province, China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(6): 1096-1112. (in Chinese with English abstract)
- CAO X Z, ZHANG W S, SUN H S, 2009. Progress in the study of deep exploration in China[J]. *Geological Science and Technology Information*, 28(2): 104-109. (in Chinese with English abstract)
- CERNÝ P, ERCIT T S, 2005. The classification of granitic pegmatites revisited[J]. *The Canadian Mineralogist*, 43(6): 2005-2026.
- CHEN J F, JAHN B M, 1998. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence[J]. *Tectonophysics*, 284(1-2): 101-133.
- CHENG C G, LI Y, ZHANG K, et al., 2011. A preliminary study on prospecting deep-seated hidden ore body in the Yueshan intrusion using CSAMT[J]. *Geology of Anhui*, 21(1): 52-59. (in Chinese with English abstract)
- DE GROOT-HEDLIN C D, CONSTABLE S C, 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data[J]. *Geophysics*, 55(12): 1613-1624.
- DI Q Y, MARTYN UNSWORTH, WANG M Y, 2006.2. 5-Dimensional Finite Element Method CSAMT Numerical Inversion[J]. *Petroleum Geophysical Exploration*, (01): 100-106+122+129. (in Chinese with English abstract)
- DONG H, WEI W B, YE G F, et al., 2012. Study of two dimensional magnetotelluric inversions of complex three dimensional structures[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(12): 4003-4014.
- FAN J B, YANG R, HAO X F, et al., 2022. Application of audio-frequency magnetotelluric sounding to deep prospecting and prediction of rare metal deposit in Jiajika area[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 37(1): 111-117. (in Chinese with English abstract)
- GUO Z W, XUE G Q, LIU J X, et al., 2020. Electromagnetic methods for mineral exploration in China: A review[J]. *Ore Geology Reviews*, 118: 103357.
- HE H Y, WANG J R, WEN W, et al., 2024. Deep structure of epithermal deposits in Youxi area: insights from CSAMT and dual-frequency IP data[J]. *Minerals*, 14(1): 27.
- HE M X, HU X Y, CHEN Y P, et al. 2008. Application of one-dimensional inversion of CSAMT Occam[J]. *Journal of Engineering Geophysics*, (04): 439-443. (in Chinese with English abstract)
- HOU Z Q, CHEN J, ZHAI M G, 2020. Current status and frontiers of research on critical mineral resources[J]. *Chinese Science Bulletin*, 65(33): 3651-3652. (in Chinese with English abstract)
- HUANG N, SHAO K, ZHANG B S, et al., 2014. The application of CSAMT and induced electric medium gradient method to one lead—zinc polymetallic ore in one district of Guangdong[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 11(6): 797-801. (in Chinese with English abstract)
- JIAO Y J, HUANG X R, LIANG S X, et al., 2021. Deep structure and prospecting significance of the Cuonadong dome, Tethys Himalaya, China: geophysical constraints[J]. *Geological Journal*, 56(1): 253-264.
- LEI D, 2010. Studies and applications of 2-D CSAMT modeling and inversion with a dipole source and topography[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(4): 982-993. (in Chinese with English abstract)
- LI B, DING Y H, ZHANG Z H, et al., 2014. Application of CSAMT to deep iron ore exploration in Wuyang area, Henan province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 29(1): 108-113. (in Chinese with English abstract)
- LI T D, 2022. Development history of geological and mineral survey in China[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(5): 653-682. (in Chinese with English abstract)
- LIU C H, TAN H D, SHU Q, et al., 2012. Three-dimensional conjugate gradient inversion of CSAMT data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(11): 3829-3838. (in Chinese with English abstract)
- LIU G D, 1992. Comprehensive study of geophysics for shallow layer[J]. *Progress in Geophysics*, 7(4): 1-3. (in Chinese with English abstract)
- LIU J X, LIU R, GUO R W, et al., 2023. Research progress of electromagnetic method in nonferrous metal mineral exploration[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 33(1): 261-284. (in Chinese with English abstract)
- LIU J X, ZHOU K K, LIU H D, et al., 2023. Metallogenic prediction of magnetite in the Pandian area at the northwest margin of Luxi uplift, China: constraints of wide-field electromagnetic data[J]. *Remote Sensing*, 15(5): 1217.
- LU H F, WANG Z F, WANG H, et al., 2013. The application of CSAMT and GS on prospecting and evaluation in Baishan molybdenum deposit, Hami, Xinjiang[J]. *Progress in Geophysics*, 28(3): 1547-1556. (in Chinese with English abstract)
- LV H Q, XU L Y, YANG B, et al., 2022. Mineralization based on CSAMT and SIP sounding data: a case study on the Hadamengou gold deposit in Inner Mongolia[J]. *Minerals*, 12(11): 1404.
- MAO J W, YUAN S D, XIE G Q, et al., 2019. New advances on metallogenic studies and exploration on critical minerals of China in 21st century[J]. *Mineral Deposits*, 38(5): 935-969. (in Chinese with English abstract)
- RODI W, MACKIE R L, 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion[J]. *Geophysics*, 66(1): 174-187.
- SHEN P, PAN H D, LI C H, et al., 2023. Lithium deposits in the Central Asian Metallogenic Domain: Metallogenic regularity and model[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(11): 3185-3209. (in Chinese with English abstract)
- STRANGWAY D W, SWIFT JR C M, HOLMER R C, 1973. The application of audio-frequency magnetotellurics (AMT) to mineral exploration[J]. *Geophysics*, 38(6): 1159-1175.
- WANG D H, 2016. A discussion on some problems concerning deep exploration of mineral resources in South China[J]. *Geology in China*, 43(5): 1585-1598. (in Chinese with English abstract)
- WANG D H, WANG R J, SUN Y, et al., 2016. A review of achievements in the three-type rare mineral resources (rare resources, rare earth and rarely scattered resources) survey in China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 37(5): 569-580. (in Chinese with English abstract)
- WANG D H, DAI H Z, LIU S B, et al., 2022. New progress and trend in ten

- aspects of lithium exploration practice and theoretical research in China in the past decade[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(5): 743-764. (in Chinese with English abstract)
- WANG R T, 1999. Characteristics of geophysical and geochemical anomalies in main gold deposits of devonian strata along the Qinling orogenic belt(Shaanxi part)and indicators for prospecting[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 23(1): 14-20. (in Chinese with English abstract)
- WANG R, WANG M Y, 2007. One-dimensional full data CSAMT inversion[J]. *Petroleum Geophysical Exploration*, (01): 107-114+132-133+125. (in Chinese with English abstract)
- WANG X L, ZHOU J C, CHEN X, et al., 2017. Formation and evolution of the Jiangnan orogen[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36(5): 714-735+696. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y F, GUO R W, LIU J X, et al., 2024. A divergence-free vector finite-element method for efficient 3D magnetotelluric forward modeling[J]. *Geophysics*, 89(1): E1-E11.
- WEI W B, 2002. New advance and prospect of magnetotelluric sounding (MT) in China[J]. *Progress in Geophysics*, 17(2): 245-254. (in Chinese with English abstract)
- WEN C H, CHEN J F, LIN B H, LUO X Y. 2018a. 2018 Implementation Program of the Survey and Evaluation of Rare Metals in Key Mining Aggregation Areas of Hunan. Changsha: Hunan Geological Survey Institute: 1-55. (in Chinese with English abstract)
- WEN C H, CHEN J F, LUO X Y. 2018b. Report on the results of the survey and evaluation of rare metals in key mining concentration areas of Hunan. Changsha: Hunan Geological Survey Institute: 1-124. (in Chinese with English abstract)
- WEN C H, CHEN J F, CAO C H, 2020. Study on the mineralization of rare metal pegmatite in Lianyungshan ore district, Hunan Province[J]. *Geological Review*, 66(S1): 135-136. (in Chinese with English abstract)
- WEN C H, SHAO Y J, XIONG Y Q, et al., 2021. Ore genesis of the Baishawo Be-Li-Nb-Ta deposit in the northeast Hunan Province, south China: Evidence from geological, geochemical, and U-Pb and Re-Os geochronologic data[J]. *Ore Geology Reviews*, 129: 103895.
- WEN Z L, HUANG M, XU G F, et al., 2024. Discovery and significance of pegmatitic rare metal deposits in Shangshi area, Lianyungshan, Northeast Hunan Province[J]. *Chinese Journal of Geology*, 59(4): 961-970. (in Chinese with English abstract)
- XU D R, WANG L, LI P C, et al., 2009. Petrogenesis of the Lianyungshan granites in northeastern Hunan Province, South China, and its geodynamic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5): 1056-1078. (in Chinese with English abstract)
- XUE G Q, DENG X, 2007. Detectability of thin layers by transient electromagnetic method[J]. *Petroleum Geophysical Exploration*, (06): 709-713+733+609. (in Chinese with English abstract)
- YANG N F, HE Y J, YANG L T, 2014. Application of CSAMT method in deep prospecting of Cuihongshan Fe polymetallic deposit[J]. *Global Geology*, 33(4): 880-888. (in Chinese with English abstract)
- ZHAI M G, WU F Y, HU R Z, et al., 2019. Strategic key metal mineral resources: Current status and problems[J]. *China Science Foundation*, 33(02): 106-111. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU J J, QIANG J K, TANG J T, et al., 2010. 1-D optimization inversion of CSAMT data with intervention mechanism[J]. *Seismology and Geology*, 32(3): 453-464. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 曹创华, 文春华, 楼法生, 等, 2020. 湖南省典型稀有金属矿床地球物理响应特征及物探找矿方法研究[J]. *大地构造与成矿学*, 44(6): 1096-1112.
- 曹新志, 张旺生, 孙华山, 2009. 我国深部找矿研究进展综述[J]. *地质科技情报*, 28(2): 104-109.
- 程长根, 李勇, 张凯, 等, 2011. 在月山岩体利用大地音频电磁测深(CSAMT)法寻找深部隐伏矿体的初步研究[J]. *安徽地质*, 21(1): 52-59.
- 董浩, 魏文博, 叶高峰, 等, 2012. 大地电磁测深二维反演方法求解复杂电性结构问题的适应性研究[J]. *地球物理学报*, 55(12): 4003-4014.
- 底青云, Martyn Unsworth, 王妙月, 2006. 2. 5 维有限元法 CSAMT 数值反演[J]. *石油地球物理勘探*, (01): 100-106+122+129.
- 范俊波, 杨荣, 郝雪峰, 等, 2022. 音频大地电磁测深在甲基卡深部找矿预测中的应用研究[J]. *地质找矿论丛*, 37(1): 111-117.
- 何梅兴, 胡祥云, 陈玉萍, 等, 2008. CSAMT 奥克姆一维反演的应用[J]. *工程地球物理学报*, (04): 439-443.
- 侯增谦, 陈骏, 翟明国, 2020. 战略性关键矿产研究现状与科学前沿[J]. *科学通报*, 65(33): 3651-3652.
- 雷达, 2010. 起伏地形下 CSAMT 二维正反演研究与应用[J]. *地球物理学报*, 53(4): 982-993.
- 李冰, 丁云河, 张智慧, 等, 2014. CSAMT 法在河南舞阳地区寻找深部铁矿中的应用[J]. *地质找矿论丛*, 29(1): 108-113.
- 李廷栋, 2022. 中国地质矿产调查事业发展历程[J]. *地质力学学报*, 28(5): 653-682.
- 林昌洪, 谭捍东, 舒晴, 等, 2012. 可控源音频大地电磁三维共轭梯度反演研究[J]. *地球物理学报*, 55(11): 3829-3838.
- 刘光鼎, 1992. 浅层地球物理综合研究[J]. *地球物理学进展*, 7(4): 1-3.
- 柳建新, 童孝忠, 郭荣文, 等, 2012. 大地电磁测深法勘探: 资料处理、反演与解释[M]. 北京: 科学出版社.
- 柳建新, 刘嵘, 郭荣文, 等, 2023. 电磁法在有色金属矿产勘查中的研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 33(1): 261-284.
- 毛景文, 袁顺达, 谢桂青, 等, 2019. 21 世纪以来中国关键金属矿产找矿勘查与研究新进展[J]. *矿床地质*, 38(5): 935-969.
- 王登红, 2016. 对华南矿产资源深部探测若干问题的探讨: 以若干超大型矿床深部找矿突破为例[J]. *中国地质*, 43(5): 1585-1598.
- 王登红, 王瑞江, 孙艳, 等, 2016. 我国三稀(稀有稀土稀散)矿产资源调查研究成果综述[J]. *地球学报*, 37(5): 569-580.
- 王登红, 代鸿章, 刘善宝, 等, 2022. 中国锂矿十年来勘查实践和理论研究的十个方面新进展新趋势[J]. *地质力学学报*, 28(5): 743-764.
- 王若, 王妙月, 2007. 一维全资料 CSAMT 反演[J]. *石油地球物理勘探*, (1): 107-114+132-133+125

- 王孝磊, 周金城, 陈昕, 等, 2017. 江南造山带的形成与演化[J]. 矿物岩石地球化学通报, 36(5): 714-735.
- 魏文博, 2002. 我国大地电磁测深新进展及展望[J]. 地球物理学进展, 17(2): 245-254.
- 文春华, 陈剑锋, 林碧海, 罗小亚, 2018a. 湖南重点矿集区稀有金属调查评价2018年实施方案. 长沙: 湖南省地质调查院: 1-55.
- 文春华, 陈剑锋, 罗小亚, 2018b. 湖南重点矿集区稀有金属调查评价成果报告. 长沙: 湖南省地质调查院: 1-124.
- 文春华, 陈剑锋, 曹创华, 2020. 湖南连云山矿集区稀有金属伟晶岩成矿作用研究[J]. 地质论评, 66(S1): 135-136.
- 文志林, 黄明, 许国锋, 等, 2024. 湘东北连云山上石地区伟晶岩型稀有金属矿床的发现及意义[J]. 地质科学, 59(4): 961-970.
- 许德如, 王力, 李鹏春, 等, 2009. 湘东北地区连云山花岗岩的成因及地球动力学暗示[J]. 岩石学报, 25(5): 1056-1078.
- 薛国强, 邓湘, 2007. 瞬变电磁法对薄层的探测能力[J]. 石油地球物理勘探, (06): 709-713+733+609.
- 杨乃峰, 何英杰, 杨李汀, 2014. CSAMT法在翠宏山铁多金属矿床深部找矿中的应用[J]. 世界地质, 33(4): 880-888.
- 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 等, 2019. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题[J]. 中国科学基金, 33(02): 106-111.
- 周俊杰, 强建科, 汤井田, 等, 2010. 具有干预机制的CSAMT数据一维最优化反演[J]. 地震地质, 32(3): 453-464.

获奖者简历:

柳建新, 中南大学二级教授、博士生导师。2023年荣获第十八次李四光地质科学奖教师奖。现任中南大学地质调查研究院院长、中南大学地球科学与信息物理学院教授委员会主任、中南大学地质资源与地质工程一级学科带头人, 兼职中国地球物理学会副理事长。坚守在地质地球物理科研教学一线, 针对深部战略性金属资源勘探面临强电磁干扰问题, 创立了“双频激电法+伪随机电磁法+三维可视化”的多尺度深部金属矿定位预测技术体系: 提出了西部特殊地貌景观条件下双频激电法勘探方法技术体系; 研发了“均匀广谱伪随机电磁法”勘探方法; 研发了金属矿山深部隐伏矿定位预测理论与方法体系; 研究成果有效缓解了紧缺矿产资源危机, 为社会稳定和国家战略性金属资源安全做出了重大贡献。荣获国家技术发明二等奖1项(R2)、国家科技进步二等奖1项(R5)、国家科技进步三等奖1项(R8)、省部级一等奖7项及二等奖6项; 出版专著25部, 发表SCI论文115余篇, EI论文79篇; 授权国家发明专利35项。荣获中华人民共和国建国70周年纪念章、湖南省首届优秀研究生导师、湖南省首届优秀科技工作者、中国地球物理学会首届最美科技工作者等多项荣誉。享受国务院政府特殊津贴。

