



湘东北幕阜山-梅仙深部电性结构及其 对稀有金属成矿的控制作用

曹创华^{1,2,3,4}, 程云涛⁵, 邹光均⁴, 黄建中⁴, 刘俊峰⁵, 文春华⁴, 孟德保⁴,
柳建新³, 楼法生¹, 邓居智²

(1. 江西省地质调查研究院, 南昌 330030;

2. 东华理工大学 地球物理与测控技术学院, 南昌 330013;

3. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;

4. 湖南省地质调查院, 长沙 410116;

5. 湖南省核工业地质调查院, 长沙 410011)

摘要: 为揭示湘东北幕阜山-梅仙两大岩体之间的深部地质结构, 深化岩浆构造的控矿作用认识, 实现地球物理深地探测技术在伟晶岩型稀有金属矿床找矿中的应用, 对经过湘东北幕阜山-梅仙矿集区的电磁测深剖面进行了处理和解释, 结合地质信息推演了深部地质构造格局。频率域大地电磁探测数据阻抗张量和相位张量分解分析表明湘东北仁里矿集区在高频区(大于1 Hz)主要呈现二维构造特征; 利用Swift分解和相位张量分解结果对剖面所有测点数据进行电性主轴分析, 判断出剖面主要构造走向总体上呈北偏西48°~50°; 针对TE、TM两个模式利用Occam反演方法分别进行了单独和联合反演, 并对幕阜山-梅仙地区深部电性分布进行了地质解释。本文综合研究结果表明, 幕阜山-梅仙两大岩体深部存在走向北西-南东、倾向东北的岩浆构造, 此构造控制的岩脉穿插到冷家溪群中, 形成一系列走向北西向、倾向南西的含稀有金属伟晶岩群。

关键词: 湘东北; 幕阜山地区; 电性结构; 伟晶岩脉; 电磁测深; 岩浆构造; 稀有金属

文章编号: 1004-0609(2022)-04-1175-12

中图分类号: P631

文献标志码: A

引文格式: 曹创华, 程云涛, 邹光均, 等. 湘东北幕阜山-梅仙深部电性结构及其对稀有金属成矿的控制作用[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(4): 1175-1186. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42298

CAO Chuang-hua, CHENG Yun-tao, ZOU Guang-jun, et al. Deep electrical structure and its control on rare metal mineralization of Mufu Mountain-Meixian in northeastern of Hunan Province, China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(4): 1175-1186. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42298

湘东北幕阜山-梅仙稀有金属富集区是我国华南大规模成矿典型区, 中心位置为28°48'N、113°39'E, 大地构造上位于扬子陆块东南缘江南新元古代造山带中段北缘之湘东北断隆带^[1], 处于扬子陆

块与华夏陆块的过渡部位^[2]。研究区内经历多期次、多类型造山作用, 形成了北北东向和北东向大型走滑断裂系统控制的雁列盆岭山链构造格局^[3], 成矿潜力巨大。区内的仁里矿田于2017年被选为中国

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42130810); 湖南省重点领域研发计划资助项目(2019SK2261); 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0602402); 湖南省创新型省份建设专项科普专题项目(2020ZK408)

收稿日期: 2021-09-08; **修订日期:** 2021-10-21

通信作者: 柳建新, 教授, 博士; 电话: 13807486248; E-mail: ljx6666@126.com

地质学会十大找矿进展^[4],引起了国内外广泛关注,使得湘东北幕阜山-梅仙矿集区成为我国华南地区战略性稀有金属矿产资源研究的热点地区之一^[5]。

近年来,地质科技工作者在湘东北幕阜山仁里矿田及外围开展了大量基础地质、矿床地质和同位素年代学研究,取得了丰富的研究资料和成果,主要包括:1)提出了幕阜山矿集区定位于构造岩浆隆起带,仁里矿床受大型层状构造与燕山期岩浆岩联合控矿,含铌钽伟晶岩脉形成于区域后造山构造环境的伸展构造体制中^[2]。2)矿集区南部的新元古代三墩花岗岩体为I型花岗岩,形成于大陆火山弧构造背景,推测为江南造山带形成过程中格林威尔造山运动板块碰撞形成,为聚合板块边缘俯冲带岩浆作用的产物^[6]。3)幕阜山花岗岩主岩体形成后,富稀有金属元素的花岗质岩浆沿裂隙充填结晶;伟晶岩中稀有金属元素通过岩浆结晶分异作用逐渐富集,岩浆侵位上升过程中,挥发分与稀有金属元素络合物快速迁移至岩体顶部富集;随着温度下降,岩浆不混溶作用导致Na、Li与K分离^[7-8],最终铌钽和锂得到富集;仁里和传梓源矿床伟晶岩脉总体走向为北西向,伟晶岩脉沿层理张裂隙产出,接触面平整,表明伟晶岩形成于伸展构造环境^[9]。基于伟晶岩的下盘均见片麻状似斑状黑云母二长花岗岩,其与矿区北部的燕山早期片麻状似斑状黑云母二长花岗岩锆石U-Pb定年测试结果接近^[10],结合幕阜山复式岩体各期次侵入岩各种岩性Rb、Nb、Ta、W、F等元素的丰度大大低于湖南其他地区的同种岩性且与含矿伟晶岩脉呈明显的跳跃式变化关系^[2],推测目前钻孔揭露到的位于矿脉底层的花岗岩并不是成矿母岩,成矿母岩体应该为深部的隐伏岩体^[11]。但以上众多认识主要依据地表地质调查、地球化学测试及钻探等手段,研究深度局限于近地表几百米以内,深部成矿模型建立依据不充分,矿集区内各大岩体的深部展布特征以及相互间的接触关系尚不清晰。为此,本文选择幕阜山-梅仙两大岩体及其间的伟晶岩脉群、冷家溪群板岩作为探测要素,探索其深部状态,有助于加深区内地质成矿模型的认识、推动此区内的深部找矿。

地球物理探测方法门类众多,针对不同探测深度和探测目标选择方法有所侧重。大量案例证实,频率域电磁测深方法具有探测深度大、深部地质体(矿化体)响应信息丰富等优点^[12-17],在探索造山带及盆地地层结构等方面有着天然的优势^[18-19],特别

是大地电磁测深法在探索深部岩体空间展布、隐伏构造及成矿有利部位等工作中取得了良好的应用效果^[20]。因此,布设完成了两条音频大地电磁测线剖面,采用TE和TM两种模式的联合反演结果作为地质解释依据,得到了区内幕阜山和梅仙两大不同时代的岩体之间的分布关系;结合目前本区内的研究现状,分析了本区内成矿构造属性及其分布,为阐明地质构造运动历史、建立区内地球物理和地质成矿模型以及探讨成矿物质运移途径提供了依据,为本矿集区的深部找矿提供了方向。

1 矿集区地质概况及岩石物性特征

1.1 地质概况

湘东北地区整体构造格局为“两隆三盆(自北西向东南分布有汨罗断陷盆地、幕阜山-望湘断隆、长沙-平江断陷盆地、浏阳-衡东断隆、醴陵-攸县断陷盆地)”雁列式分布(见图1)^[21],呈现出山盆耦合、中生代成矿事件爆发的特点。区内出露地层有第四系、白垩系、寒武系、震旦系和青白口系;其中分布较广泛的青白口系冷家溪群位于幕阜山西南缘,呈现出北西-近东西向分布,第四系仅分布在瑚珮一带^[22]。研究区构造以北北东、北东向构造活动最为主,目前地表发现的伟晶岩脉群主要分布在F12断裂以西,F75断裂在冷家溪群地层中尖灭。区内岩体有北部的幕阜山岩体、西南部的梅仙岩体和东南部的传梓源岩体,其中幕阜山岩体西南部的粗中粒片麻状黑云母闪长花岗岩锆石U-Pb法年龄为151.4 Ma,梅仙岩体的U-Pb法年龄为816 Ma,而传梓源岩体的U-Pb法年龄为838.6 Ma^[22]。2019年李鹏等^[23]以仁里-传梓源矿床5号伟晶岩脉为研究对象,测定的伟晶岩中锂云母Ar-Ar年龄为(125.0±1.4) Ma,代表了岩浆分异演化晚阶段,近热液体系中稀有金属聚集成矿的时代。两条物探剖面经过的地质体有梅仙岩体、幕阜山岩体、冷家溪群板岩及赋存其中的含矿伟晶岩脉。其中产于冷家溪群片岩中伟晶岩脉为矿区主要铌钽化聚集区,伟晶岩脉规模大,走向延伸数百米至数公里。脉体密集,呈平行状排列,层状产出,北西走向,倾向南西,倾角25°~56°,受后期构造(F75)影响地段的倾角可达68°。矿体严格受伟晶岩脉控制,产状与岩脉产状相似;由于该区伟晶岩脉产状较稳定,规模大,相应的铌钽矿体也较简单,呈层状产出,规模大。

磁力异常,冷家溪群为弱磁性异常,伟晶岩脉位于两者之间呈过渡相特征。上述差异,特别是电阻率差异特征为本次研究工作提供了依据。

2 数据采集与处理

2.1 数据采集

本次共布设两条野外数据采集物探测线剖面(见图1),分别为L1线和L2线。其中,L1线长度为4520 m,西南部为小号点(覆盖了梅仙岩体东北部出露区域)、东北部为大号点(覆盖了幕阜山岩体西南部出露区域);L2线长度为4760 m,西南部为

小号点(在老地层冷家溪群出露区),东北部为大号点(覆盖了幕阜山岩体西南部出露区域);采集物理点点距均为40 m。音频大地电磁测深法采用加拿大凤凰公司生产的V8多功能电法测量系统,工作中采用双方向矢量观测模式,野外观测时间30 min到45 min不等;具体野外数据由湖南省核工业地质调查院刘俊峰等人于2019年采集,经过预处理得到了卡尼亚视电阻率和相位;采集数据的频率区间为0.35~10400 Hz,其中超过90%的数据在大于1 Hz时都表现出较好的质量,对部分测点、部分频点的“飞点”等畸变数据进行了剔除,畸变数据不参与后续反演解释。

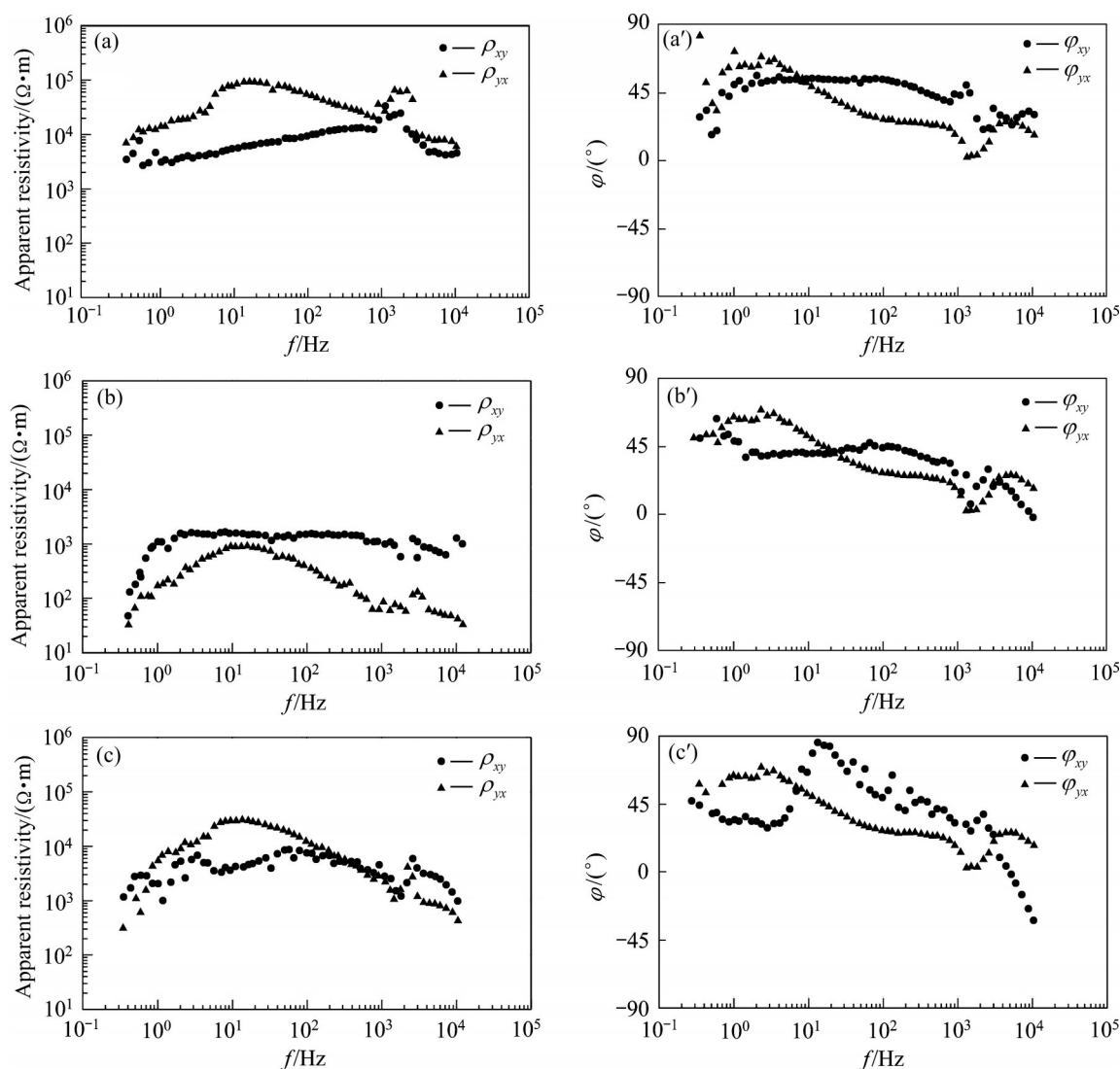


图2 音频大地电磁测深典型区段视电阻率相位实测曲线:(a) L1线4520点幕阜山岩体实测探测点数据;(b) L2线200点无伟晶岩脉冷家溪群实测探测点数据;(c) L1线1960点有伟晶岩脉冷家溪群实测探测点数据

Fig. 2 Measured curves of apparent resistivity phase in typical section of audio magnetotelluric sounding: (a) Observation point data of Mufushan rock mass at point 4520 on line L1; (b) Observation point data of Lengjiaxi Group without pegmatite vein at point 200 on line L2; (c) Observation point data of Lengjiaxi Group with pegmatite dikes at point 1960 on line L1

2.2 数据分析

结合研究区的地层结构及表1中的物性参数,选择经过岩体、冷家溪群和穿插有伟晶岩脉的冷家溪群三类响应曲线进行精细分析,其中经过岩体(以幕阜山为例)的探测点典型曲线如图2(a)所示,经过无伟晶岩脉的冷家溪群如图2(b)所示,穿插有伟晶岩脉的冷家溪群如图2(c)所示。

图2中所有测点在最低频率和2000 Hz附近的数据相对有所漂移外,整体数据质量较好。图2(a)中指示两个方向的视电阻率较为连续,且响应视电阻率与表1中的岩体参数范围一致,证实其为岩体;大于1000 Hz的数据在 ρ_{xy} 方向几乎没有跳变点,而在 ρ_{yx} 方向呈现出局部“K”型近地表高阻特征;依据李金铭观点^[24],证实在垂直测线方位上可能存在岩体内的伟晶岩脉。图2(b)中视电阻率较低,曲线整体形态较为平缓,在小于1 Hz范围内出现了随着频率变小而陡降的趋势,推断为在采集此点时“死频带”影响较为明显;视电阻率在2000 Hz附近 ρ_{xy} 方向出现相对局部变小、而在 ρ_{yx} 方向出现相对局部变大的现象,但范围有限,加之与表1中的冷家溪群地层电阻率参数范围一致,表明了此测点是岩性较为均一的冷家溪群地层,且L2线200点深部随着探测频率的减小电阻率没有增

大,证实其在探测深度内存在岩体可能性较小;图2(c)中整体电阻率介于前两个剖面图中的整体电阻率之间,且整体的视电阻率形态与图2(a)中的视电阻率类似,最高频率对应的视电阻率在1000 $\Omega \cdot m$ 左右(与图2(b)中的视电阻率接近),但在3000 Hz左右时 ρ_{xy} 方向存在一个峰值大8000 $\Omega \cdot m$ 的“K”型响应特征曲线,证实在冷家溪群中后期侵入了高阻脉体。

2.3 维性分析

矢量采集的音频大地电磁数据需要进行维性分析,其目的是确立采集的数据是以一维、二维,还是以三维方式进行反演。对于实测的天然源频率域电磁数据维性分析方法众多,其中较为常用的为基于阻抗张量分解的方法,如Swift分解、Groom-Bailey(简称GB)分解和BAHR分解等^[25-27]。本次深部探测选择的是音频大地电磁测深法,数据段频率相对较高,利用Swift分解和GB分解对研究区的响应进行了分析,图3所示为L1和L2剖面按上述两种方法处理后的二维偏离度沿剖面方向分布的伪彩图,L1线的Swift分解如图3(a)所示,L2线的Swift分解如图3(b)所示,L1线的GB分解如图3(c)所示,L2线的GB分解如图3(d)所示,图中纵坐标轴 f 均

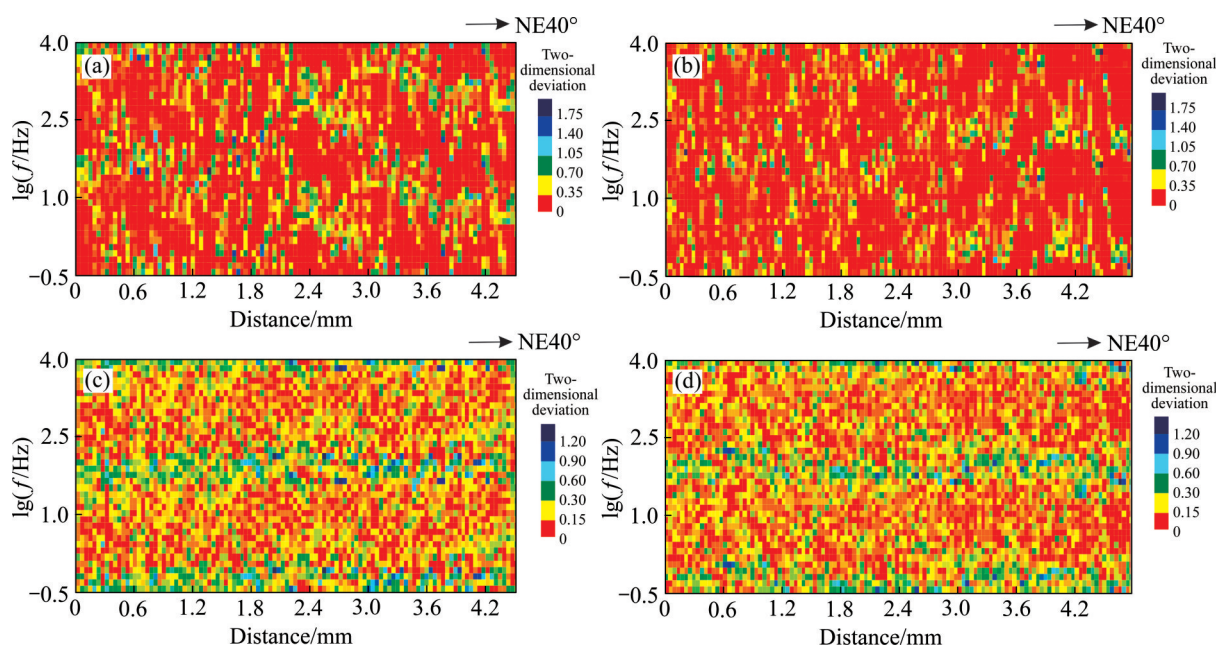


图3 L1和L2线二维偏离度伪彩图:(a) L1线Swift张量分解;(b) L2线Swift张量分解;(c) L1线Groom-Bailey张量分解;(d) L2线Groom-Bailey张量分解

Fig. 3 Two-dimensional deviation degree pseudo color maps of line L1 and line L2 : (a) Line L1, Swift skewness; (b) Line L2, Swift skewness; (c) Line L1, GB skewness; (d) Line L2, GB skewness

表示为频率, 单位为 Hz, $\lg(f)$ 为频率取 10 为底的对数。从图 3(a)和(b)可见, Swift 分解在所测频段数据 80% 以上均小于 0.3、剩余部分除个别点均小于 0.7; 从图 3(c)和(d)可见, GB 分解在 0.6 Hz 以下和 50 Hz 左右工频范围内数值大于 0.3, 其余 70% 的数据二维偏离度均小于 0.3。按照当大部分测点的主要频段的二维偏离度小于 0.3 时可以将地电模型近似为二维进行二维反演的原则^[25-27], 本次在后续数据反演时选取二维方式即可。

2.4 构造走向分析

野外实测频率域电磁数据时, 因研究区的成矿地质体经过了多期次、多方向的构造旋回运动, 导致每个测点所测频率响应数据不能完全反映深部地质构造的延伸方向。为兼顾电磁信号阻抗张量处理信息最大有效化, 本次研究参考湘西北民乐周缘大地电磁数据处理的方式^[27], 把探测的两组四个参数进行阻抗张量分解; 利用玫瑰图法选择概率最大的方向为电性主轴方向, 然后经过主轴变换把实测的 ρ_{xy} 、 ρ_{yx} 、 φ_{xy} 和 φ_{yx} 分别变换为 ρ_{TE} 、 ρ_{TM} 、 φ_{TE} 和 φ_{TM} , 即最优地表现出实际地层结构响应信息, 减少后期反演解释的误差。

由于本次探测的两条剖面数据当频率小于 1 Hz 时存在跳点, 所以在构造分析绘制玫瑰图时频率范围选择 1~10400 Hz; 两条剖面所有测点的阻抗张量信息利用 Swift 分解进行了统计(见图 4), 可以看

出: L1 线各个方向都有所分布, 但主轴方向主要累积方位为北偏西 48°; L2 线相比 L1 线主轴方向在延伸方向上变化程度变小, 方位在北偏西 50°; 结合区内地质构造已有认识(见图 1), 从侧面证实了 L1 剖面(研究区西北部)的冷家溪群板岩地层受后期构造运动的影响, 其阻抗张量信息相比 L2 剖面(研究区东南部)复杂一些。

2.5 数据反演

以野外实测的原始数据为时间域, 经过快速傅里叶变换将其转化到频率域, 基于较为成熟的 Robust 估计方法、阻抗张量分解等技术进行处理^[28], 利用前文中维性分析和玫瑰图法确定地下电性构造主轴方向。反演前基于地层结构大致信息和物性数据对明显跳变的响应数据进行了删除, 最后利用 OCCAM 正则化反演方法对研究区 L1 线和 L2 线进行处理, 利用两种模式的数据进行联合反演^[27]。根据图 2 中实测典型曲线可知, 小于 1 Hz 的实测数据部分频点较散不参与后续处理, 本研究仅采用卡尼亚视电阻率进行反演, 结合表 1 所示物性参数统计表结果, 考虑到本地区地层综合电阻率参数相对较高, 基于趋肤探测深度经验公式^[26], 利用 1 Hz 以上数据足以揭示区内深度在 4 km 以内的地层结构(见表 2), 本文中以 L2 线为例进行 TE 模式、TM 模式和两种模式联合反演进行说明(L1 线数据处理结果见文献[29]), 结果如图 5 所示。

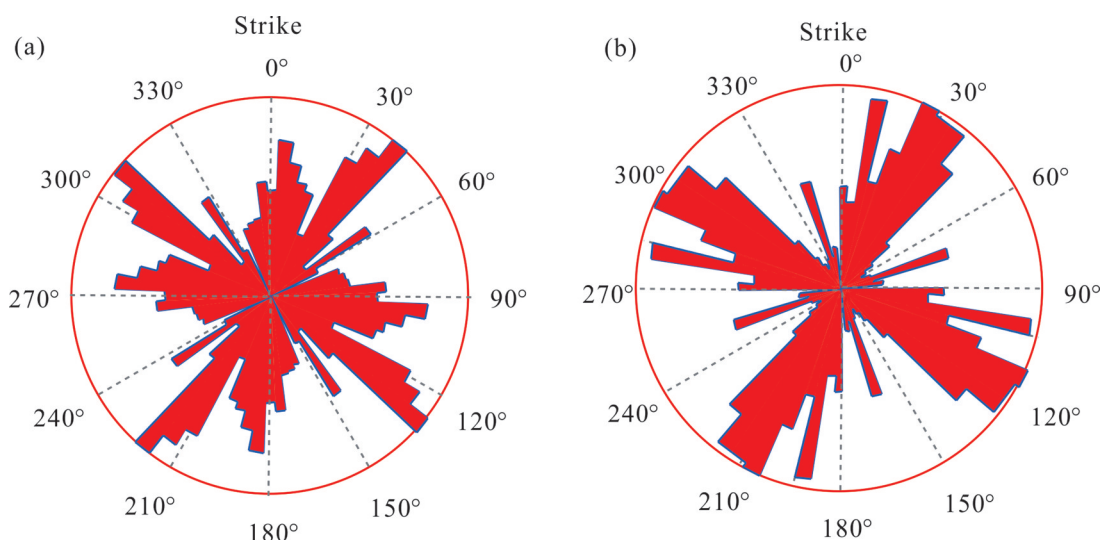


图 4 1~10400 Hz 电性主轴分析玫瑰图:(a) L1 线的 Swift 法玫瑰图;(b) L2 线的相位阻抗法玫瑰图

Fig. 4 Electric spindle analysis rose diagrams during 0.35 Hz to 10400 Hz: (a) Rose diagram of Swift method of line L1; (b) Rose diagram of Swift method of line L2

表2 趋肤深度计算

Table 2 Calculation of skin depth

Strata/rock mass	Background resistivity/($\Omega\cdot\text{m}$)	Frequency/Hz	Detection depth/m
Quaternary	112.22	10400	1.92
		5200	3.84
		1100	18.16
		115	173.69
		10	1997.52
		1	19975.16
Lengjiaxi group	886.53	10400	15.17
		5200	30.35
		1100	143.46
		115	1372.19
		10	15780.23
		1	157802.34
Granite rock	24000	10400	410.77
		5200	821.54
		1100	3883.64
		115	37147.83
		10	427200
		1	4272000

2.6 电性结构分析

从L2线反演结果来看, 两种模式有一定的差异(见图 5), 证实了此研究区域地下的地层结构不是一维结构, 具有“垂向分层、深部高阻分块”的特征。两个模式反演结果反映的是互相垂直的电磁信号响应, 联合反演后的电阻率模型更能较好地反映实际的深部地层结构(见图 5(c))。L1线的反演结果如图 6(a)所示, 浅部电阻率相对较低, 数值在 0~5000 $\Omega\cdot\text{m}$ 之间, 大部分分布在地表下 600 m 以内; 其深部可分为三个电阻率区块: 第一区块在测点 0~700 m 之间, 呈现出高阻特征, 数值峰值可达 20000 $\Omega\cdot\text{m}$ 以上; 第二块在测点 700~4520 m 之间, 表现出相对低阻, 大部分区域数值在 5000 $\Omega\cdot\text{m}$ 以下且具有向 2000 m 测点深部低阻中心梯级变化的特征; 第三个数据块在测点 1500~4520 m 之间第二个数据块以上, 呈高阻特征, 电阻率在 8000 $\Omega\cdot\text{m}$ 以上, 且在其内表现出具有一定产状的电阻率断陷通道, 且一部分高电阻率地质体侵入到了顶部的低电阻率地层中。L2线的反演结果(见图 6(b))与 L1线较为类似, 两者电阻率范围也较为一致, 表现出两条剖面连续变化的特征, 垂向上大致分为两层,

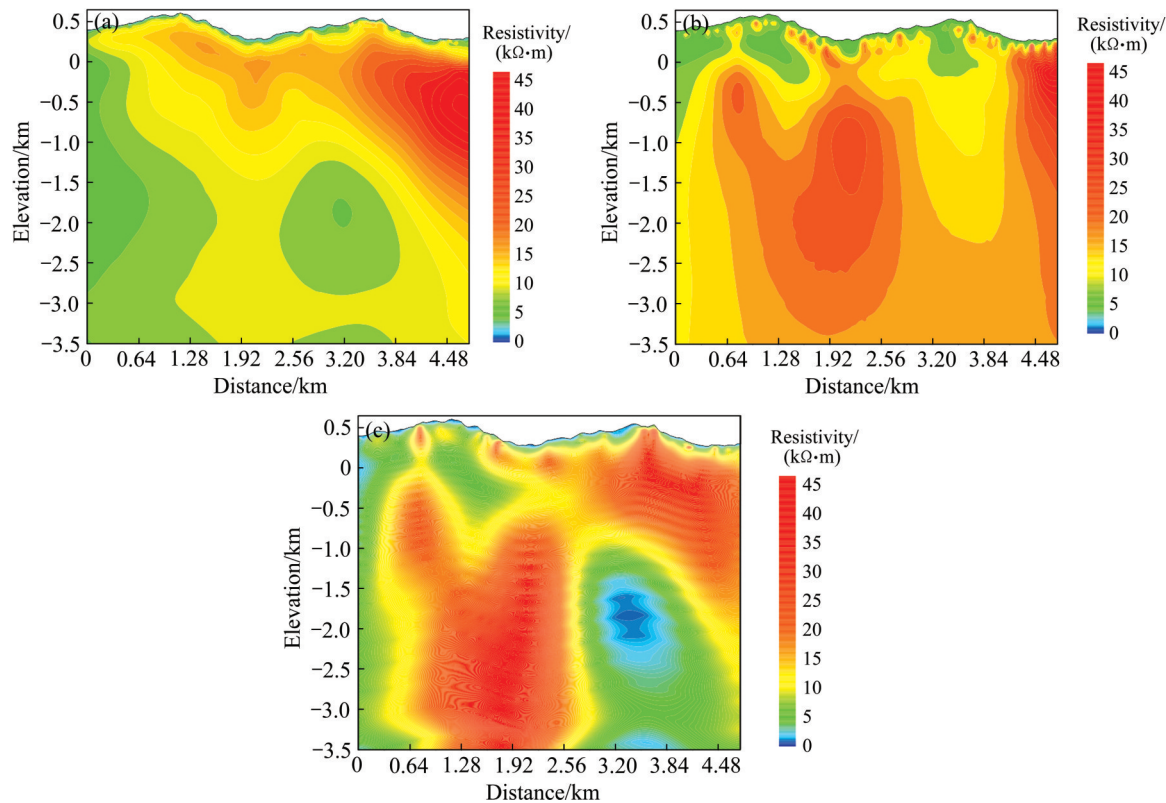


图5 L2线不同模式条件下的反演结果

Fig. 5 Inversion results under different mode conditions of line L2: (a) TE mode inversion result; (b) TM mode inversion result; (c) TE and TM mode joint inversion result

一是地表下深度 500 m 以内的相对低阻带普遍小于 $5000 \Omega \cdot \text{m}$, 二是深部相对高电阻率带。深部高电阻率带从小号测点到大号测点可以分为四块: 第一块为 0~500 m 测点之间的相对低阻块; 第二块为 500~3000 m 测点之间的高阻块; 第三块为 3000~4760 m 测点之间深部的低阻块(电阻率数值不均且存在等值线呈梯级带缩小特点); 第四块为第三块低阻块上部的高阻块。其中第一块、第二块和第四块电阻率数值较为均一, 经证实都是比较单一的地质体响应所致, 而第三块应为第二块和第四块之间的后期构造活动中心。

3 深部电性结构的地质解译及其成矿意义

3.1 地质解释

研究区内找矿标识为深部高阻体(即花岗岩体)

顶部穿插在低阻带(即冷家溪群板岩)中的高阻脉体(即伟晶岩脉), 依据表 1 中各类岩石物性参数特征和 L1 线反演结果(见图 6(a)), 地表以下深度在 1 km 以内为一个低阻横向地块, 推断为冷家溪群; 深部横向上呈左右两端高阻且两者中间夹一相对低阻的特征, 推断为左部小号点的高阻为梅仙岩体, 右部高阻为幕阜山岩体(且明显呈“舌型侵入”冷家溪群特点); 两种岩体之间具有一个走向北西-东南、倾向东北的构造带, 特别是在近地表低阻带中存在一系列穿插在其中的高阻伟晶岩脉带(见图 6(c))。

L2 线反演结果(见图 6(b))具有与 L1 线类似的特征, 近地表呈现出低阻特征, 推断为冷家溪群地层; 深部也存在左右两大高阻体, 左部的高阻体推断为梅仙岩体、右部高阻体推断为幕阜山岩体。但 L2 线反演结果也有新的特点, 两大岩体之间的空间有所压缩、断裂带呈现出浅部变缓而深部变陡的特点, 且浅部的高阻伟晶岩脉规模变小、数量变少。

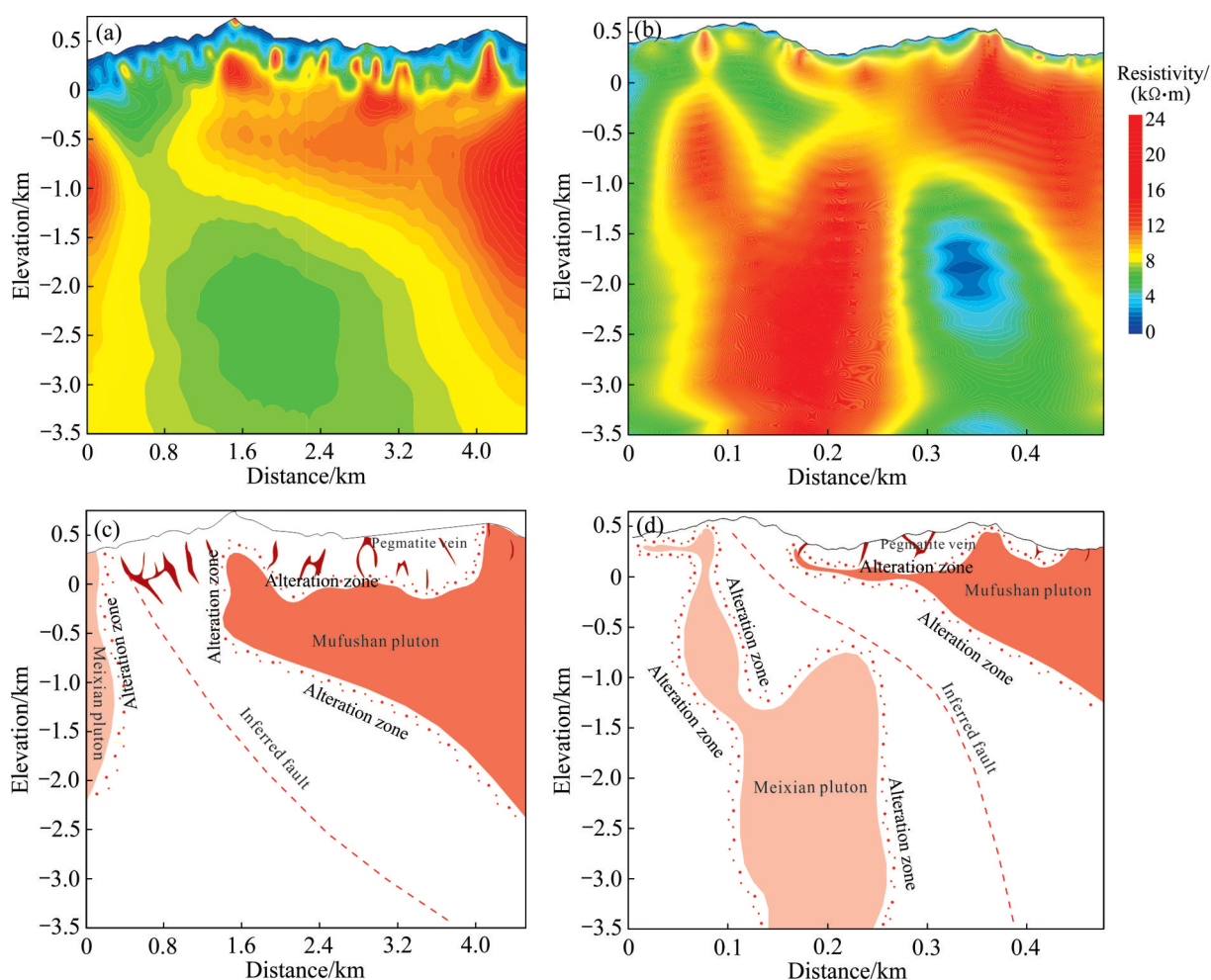


图6 L1线和L2线反演结果及地质解释图

Fig. 6 Inversion results and geological interpretation maps of lines L1 and L2: (a) Inversion result of line L1; (b) Inversion result of line L2; (c) Geological interpretation map of line L1; (d) Geological interpretation map of line L2

3.2 讨论

依据前文关于两条剖面的深部电性结构及其地质解释结果(见图6),结合地表地质调查研究结果,湘东北幕阜山-梅仙深部三维地质结构如图7所示。红色的成矿伟晶岩脉(见图7)大部分集中于北西向断裂的上盘,结合成矿母岩体应该为深部的隐伏岩体的认识^[1],推断含矿伟晶岩脉群赋存并穿插在冷家溪群“舌型侵入”的上部地表以下深度在1 km以内;根据图1中F12断裂分布特征和图7推断的深部地质结构综合推断,断裂汇聚部位应为本区含稀有金属伟晶岩脉的东南部边界,其西北部成矿潜力较好,伟晶岩脉的延伸更深。综合认为,在已发现的仁里超大型钽铌矿床的西北部黄柏山地区成矿潜力较大。

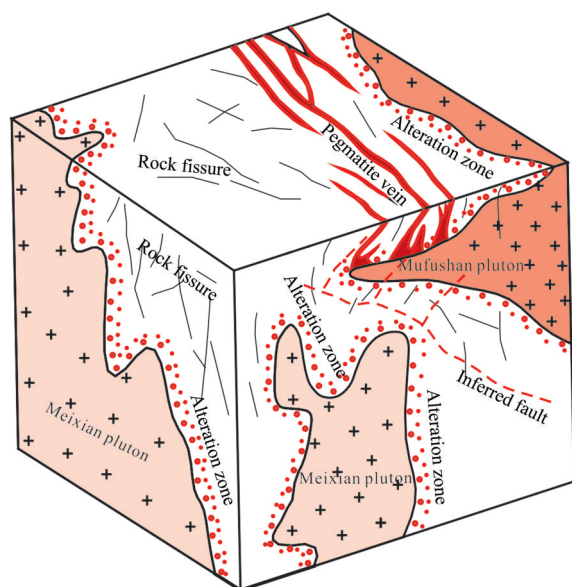


图7 湘东北幕阜山-梅仙地区深部地层结构及成矿模式推断图

Fig. 7 Inferred map of deep stratigraphic structure and metallogenic model in Mufushan-Meixian area, northeastern Hunan

梅仙岩体的片麻状花岗闪长岩 U-Pb 法年龄为 816 Ma^[22],幕阜山岩体的黑云母闪长花岗岩锆石 U-Pb 法年龄为 151.4 Ma^[10]。2019 年李鹏等^[23]测定的伟晶岩中锂云母 Ar-Ar 年龄为(125.0±1.4) Ma,具有从深部到浅部年龄逐渐变新的特点。综上所述,大量伟晶岩脉的成矿母岩来源于深部的二云母花岗岩,大部分伟晶岩脉是在幕阜山岩基上就地重溶分异,古生代岩浆岩隔离带(梅仙岩体-传梓源岩体形成的岩浆岩带)为稀有金属提供了封闭的成矿空间。

图1中的F12、F75等北东向构造为成矿前构造,本文探测的北西向断裂为导矿构造,出露地面冷家溪群地层的构造为容矿构造;区内经过了多期次、多方向地质运动历史,为含稀有金属的伟晶岩脉富集提供了必要条件。

4 结论

1) 本研究区地处大陆火山弧构造发育的湘东北地区,年代晚于幕阜山岩体的中生代岩浆构造活动为区内稀有金属伟晶岩脉群提供了能量及物质来源,根据本文探测的深部电性结构研究结果,认为在隐伏高阻体顶部、穿插在地表浅部低阻体内的高阻脉状体即为本次探测的目标地质体—伟晶岩脉,其特有的穿插模式为我国华南花岗伟晶岩型钽铌矿床的探寻提供了典型的地球物理标志。

2) 提出了“中生代幕阜山舌型侵入+垂直双方向构造交汇+古生代岩浆岩隔离带”是区内战略性稀有金属矿种成矿的典型立体空间找矿模式,且探测结果与近年来岩体及成矿地质体测定年龄具有对应性,从地球物理角度为本区成矿地质模型的建立提供了有力支撑。

3) 依据区内岩体、冷家溪群及伟晶岩地球物理物性参数,联合本文研究得到的深部地质-地球物理成矿模式,综合认为,区内伟晶岩脉体在已发现的超大型稀有金属仁里矿床的西北部(特别是黄柏山地区)分布更为广泛,成矿潜力较好。

REFERENCES

- [1] 湖南省地质调查院. 中国区域地质志: 湖南志[M]. 北京: 地质出版社, 2017: 579-622, 913-1037.
Geology Survey Institute of Hunan Province. China Regional Geological Records : Hunan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017: 579-622, 913-1037.
- [2] 刘翔,周芳春,黄志飏,等. 湖南平江县仁里超大型伟晶岩型钽铌多金属矿床的发现及其意义[J]. 大地构造与成矿学, 2018, 42(2): 235-243.
LIU Xiang, ZHOU Fang-chun, HUANG Zhi-biao, et al. Discovery of Renli superlarge pegmatite-type Nb-Ta polymetallic deposit in Pingjiang, Hunan Province and its significances[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2018, 42(2): 235-243.

- [3] 陕亮. 湘东北地区铜-铅-锌-钴多金属成矿系统[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019: 1-11.
SHAN Liang. Copper-lead-zinc-cobalt polymetallic mineralization system in northeastern Hunan[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019: 1-11.
- [4] 中国自然资源报. 中国地质学会2017年度十大地质科技进步十大地质找矿成果简介[EB/OL]. [2018-02-10]. https://www.cgs.gov.cn/xwl/ddyw/201802/t20180226_451616.html.
China Natural Resources News. Brief introduction of the ten major geological scientific and technological progress of the Chinese Geological Society in 2017 and ten major geological prospecting results[EB/OL]. [2018-02-10]. https://www.cgs.gov.cn/xwl/ddyw/201802/t20180226_451616.html.
- [5] 李鹏, 李建康, 张立平, 等. 幕阜山西南缘黄柏山稀有金属伟晶岩密集区的发现及意义[J]. 矿床地质, 2019, 38(5): 1069-1076.
LI Peng, LI Jian-kang, ZHANG Li-ping, et al. Discovery and significance of Huangbaishan rare metal pegmatite concentration area on southern margin of Mufushan[J]. Mineral Deposits, 2019, 38(5): 1069-1076.
- [6] 黄志彪, 李鹏, 周芳春, 等. 幕阜山地区新元古代花岗岩地球化学特征及成因探讨[J]. 桂林理工大学学报, 2018, 38(4): 614-624.
HUANG Zhi-biao, LI Peng, ZHOU Fang-chun, et al. Geochemical characteristics and genesis of the Neoproterozoic granite in Mufu Mountain area[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2018, 38(4): 614-624.
- [7] ZHU J C, LI R K, LI F C, et al. Topaz-albite granites and rare-metal mineralization in the Limu District, Guangxi Province, southeast China[J]. Mineralium Deposita, 2001, 36: 393-405.
- [8] EVENSEN J M, LONDON D. Experimental silicate mineral/melt partition coefficients for beryllium and the crustal Be cycle from migmatite to pegmatite[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2002, 66(12): 2239-2265.
- [9] 文春华, 罗小亚, 陈剑锋, 等. 湘东北幕阜山地区燕山期岩浆演化与稀有金属成矿的关系[J]. 中国地质调查, 2019, 6(6): 19-28.
WEN Chun-hua, LUO Xiao-ya, CHEN Jian-feng, et al. Relationship between Yanshanian magmatic activity and rare metal mineralization in Mufushan area of Northeast Hunan[J]. Geological Survey of China, 2019, 6(6): 19-28.
- [10] 李鹏, 周芳春, 李建康, 等. 湘东北仁里-传梓源钨钽矿床隐伏花岗岩锆石U-Pb年龄、Hf同位素特征及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2020, 44(3): 486-500.
LI Peng, ZHOU Fang-chun, LI Jian-kang, et al. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic compositions of the concealed granite of renli-chuanziyuan deposit, NE Hunan and geological significance[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2020, 44(3): 486-500.
- [11] 周芳春, 李建康, 刘翔, 等. 湖南仁里钨钽矿床矿体地球化学特征及其成因意义[J]. 地质学报, 2019, 93(6): 1392-1404.
ZHOU Fang-chun, LI Jian-kang, LIU Xiang, et al. Geochemical characteristics and genetic significance of ore bodies in Renli Nb-Ta deposit, Hunan Province[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(6): 1392-1404.
- [12] GARCIA X, BOERNER D, PEDERSEN L B. Electric and magnetic galvanic distortion decomposition of tensor CSAMT data. Application to data from the Buchans Mine (Newfoundland, Canada) [J]. Geophysical Journal International, 2003, 154(3): 957-969.
- [13] MA Yi-xing, HU Jun-hua, CHANG Yan-jun, et al. Study on the coincident-loop transient electromagnetic method in seafloor exploration—Taking Jiaodong polymetallic mine as a model[J]. Journal of Earth Science, 2021, 32(1): 25-41.
- [14] 席振铎, 朱伟国, 张道军, 等. 采用音频大地电磁法间接探测深埋富集铁矿床[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(3): 928-933.
XI Zhen-zhu, ZHU Wei-guo, ZHANG Dao-jun, et al. Indirectly exploit buried deposits of rich iron by audio-frequency magnetotelluric method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(3): 928-933.
- [15] 曹创华, 邓专, 柳建新. 长株潭地区CSAMT法收发距探讨及实例分析[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(2): 345-355.
CAO Chuang-hua, DENG Zhuan, LIU Jian-xin. Case study and analysis on distance between transmitter and receiver of CSAMT method in Chang-Zhu-Tan area, China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(2): 345-355.
- [16] 何继善. 大深度高精度广域电磁勘探理论与技术[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 1809-1816.
HE Ji-shan. Theory and technology of wide field electromagnetic method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1809-1816.
- [17] HU Yan-fang, LI Di-quan, YUAN Bo, et al. Application of pseudo-random frequency domain electromagnetic method in mining areas with strong interferences[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(3): 774-788.
- [18] 肖骑彬, 赵国泽, 王继军, 等. 苏鲁造山带及邻区深部电性结构研究[J]. 中国科学(D辑), 2008, 38(10): 1258-1267.
XIAO Qi-bin, ZHAO Guo-ze, WANG Ji-jun, et al. Research on the deep electrical structure of the Sulu orogenic belt and

- adjacent areas[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2008, 38(10): 1258–1267.
- [19] 张乐天, 金 胜, 魏文博, 等. 青藏高原东缘及四川盆地的壳幔导电性结构研究[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(12): 4126–4137.
- ZHANG Le-tian, JIN Sheng, WEI Wen-bo, et al. Electrical structure of crust and upper mantle beneath the eastern margin of the Tibetan Plateau and the Sichuan Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(12): 4126–4137.
- [20] 尤 淼. 南陵-宣城矿集区三维大地电磁成像和成矿背景研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021: 1–121.
- YOU Miao. The study of 3D magnetotelluric imaging and metallogenic background in the nanling-Xuancheng ore concentration area[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021: 1–121.
- [21] 许德如, 邓 腾, 董国军, 等. 湘东北连云山二云母二长花岗岩的年代学和地球化学特征: 对岩浆成因和成矿地球动力学背景的启示[J]. *地学前缘*, 2017, 24(2): 104–122.
- XU De-ru, DENG Teng, DONG Guo-jun, et al. Zircon U-Pb geochronological and geochemical characteristics of the Lianyunshan two-mica monzogranites in northeastern Hunan Province: implications for petrogenesis and tectonic setting associated with polymetallic mineralization[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(2): 104–122.
- [22] 湖南省地质调查院. 1:25万地质图-平江幅[R]. 长沙: 湖南省地质局, 1978: 1–87.
- Geology Survey Institute of Hunan Province. Geological Map with 1:250,000 -Pingjiang Sheet [R]. Changsha: Hunan Provincial Bureau of Geology, 1978: 1–87.
- [23] 李 鹏, 刘 翔, 李建康, 等. 湘东北仁里-传梓源矿床5号伟晶岩岩相学、地球化学特征及成矿时代[J]. *地质学报*, 2019, 93(6): 1374–1391.
- LI Peng, LIU Xiang, LI Jian-kang, et al. Petrographic and geochemical characteristics of Renli-Chuanziyuan No. 5 pegmatite, NE Hunan, and its metallogenic age[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(6): 1374–1391.
- [24] 李金铭. 地电场与电法勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 36–59.
- LI Jin-ming. Geoelectric field and electrical exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 36–59.
- [25] SWIFT C M. A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the southwestern United States[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1967: 1–32.
- [26] 柳建新, 童孝忠, 郭荣文, 等. 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, 2012.
- LIU Jian-xin, TONG Xiao-zhong, GUO Rong-wen, et al. Magnetotelluric sounding exploration: Data processing, inversion and interpretation[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [27] 曹创华, 邹光均, 彭 杰, 等. 湘西北民乐毗邻区深部电性结构及其地质意义[J]. *地球学报*, 2020, 41(2): 219–229.
- CAO Chuang-hua, ZOU Guang-jun, PENG Jie, et al. Deep electrical structure in the neighboring areas of Minle in northwestern Hunan Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2020, 41(2): 219–229.
- [28] 陈乐寿, 王光镠. 大地电磁测深法[M]. 北京: 地质出版社, 1990.
- CHEN Le-shou, WANG Guang-e. Magnetotelluric sounding method[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990.
- [29] 刘俊峰, 程云涛, 邓志强, 等. CSAMT与AMT数据“拼接”处理: 以湖南仁里铌钽矿床7号剖面为例[J]. *物探与化探*, 2021, 45(1): 68–75.
- LIU Jun-feng, CHENG Yun-tao, DENG Zhi-qiang, et al. CSAMT and AMT data “splicing” processing: A case study of No. 7 profile of the Renli niobium tantalum deposit in Hunan Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45(1): 68–75.

Deep electrical structure and its control on rare metal mineralization of Mufu Mountain-Meixian in northeastern of Hunan Province, China

CAO Chuang-hua^{1, 2, 3, 4}, CHENG Yun-tao⁵, ZOU Guang-jun⁴, HUANG Jian-zhong⁴, LIU Jun-feng⁵,
WEN Chun-hua⁴, MENG De-bao⁴, LIU Jian-xin³, LOU Fa-sheng¹, DENG Ju-zhi²

(1. Geology Survey Institute of Jiangxi Province, Nanchang 330030, China;

2. School of Geophysics and Measurement-control Technology, East China University Technology, Nanchang 330013, China;

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

4. Geology Survey Institute of Hunan Province, Changsha 410116, China;

5. Nuclear Geology Institute of Hunan Province, Changsha 410011, China)

Abstract: In order to reveal the stratigraphic structure between the Mufushan-Meixian pluton in northeastern Hunan, to deepen the understanding of magmatic structure for ore control, and to realize the guidance of geophysical deep exploration technology for pegmatite rare metal deposits, the electromagnetic sounding profile in the area passing through the Mufushan-Meixian ore concentration area in northeastern Hunan was processed and interpreted, and the stratigraphic structure was deduced based on geological information. First, the impedance tensor and phase tensor decomposition analysis of the frequency domain magnetotelluric detection data reveals that the Renli ore cluster in northeastern Hunan mainly presents two-dimensional structural features in the high-frequency area (greater than 1 Hz). Second, the Swift decomposition and the phase tensor decomposition result carried out the electrical principal axis analysis on the data of all the survey points of the profile, and it was judged that the main structural trend of the profile was $48^{\circ} - 50^{\circ}$ west by north as a whole. Finally, the Occam inversion method was used for the TE and TM modes, respectively. Individual and joint inversions were carried out, and the deep electrical distribution in the Mufushan-Meixian area was obtained and geological interpretation was carried out. The research results show that there is a magmatic structure in the deep part of the Mufushan-Meixian pluton, which strikes the northwest-southeast and tends to the northeast. Under the activity of this structure, the rock veins perpendicular to its azimuth intersect into the Lengjiayi Group and form a series of rare metal-bearing pegmatite groups trending northwest and leaning southwest.

Key words: Mufushan area in northeast of Hunan; electrical structure; pegmatite veins; electromagnetic sounding; magmatic structure; rare metals

Foundation item: Project(42130810) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2019SK2261) supported by the Key Research and Development Program of Hunan Province, China; Project(2017YFC0602402) supported by the Key Research and Development Program of China; Project(2020ZK408) supported by the Special Popular Science Project of Innovative Hunan Province Construction, China

Received date: 2021-09-08; **Accepted date:** 2021-10-21

Corresponding author: LIU Jian-xin; Tel: +86-13807486248; E-mail: ljx6666@126.com

(编辑 何学锋)