

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2022.01.015

音频大地电磁测深在甲基卡深部 找矿预测中的应用研究

范俊波^{1,2}, 杨荣¹, 郝雪峰¹, 付小芳¹, 潘蒙¹, 唐屹¹, 彭宇¹

(1. 四川省地质调查院, 稀有稀土战略资源评价与利用四川省重点实验室, 成都 610081;

2. 四川省智慧地质大数据有限公司, 成都 610081)

摘要: 近年随着找矿难度的不断加大, 找矿重心已由早期的地表浅覆盖转向地下深部隐伏矿脉。川西甲基卡地区目前是我国乃至世界上规模最大的硬岩型稀有金属富集区之一, 其深部找矿潜力巨大。基于多年野外实践工作成果笔者认为, 音频大地电磁测深是解决当前甲基卡地区深部找矿预测的一种有效技术手段; 通过与区域内的重磁资料综合对比解析, 立足于地质基础, 从面—线—点逐步深入分析研究; 现基本查明, 区内中深部地质构造格架, 圈定出马颈子花岗岩等酸性岩体空间分布范围, 推断勾绘出稀有金属伟晶岩脉体发育通道, 为甲基卡矿区深部找矿工作指明了方向。

关键词: 音频大地电磁测深; 稀有金属; 深部找矿预测; 甲基卡地区; 四川省

中图分类号: P631 **文献标识码:** A

0 引言

川西甲基卡地区已成为当下地质学家们的瞩目之地, 前人在该地区开展了大量的基础研究工作, 从不同的角度(成矿背景、矿床成因、物质来源、成矿机制等)进行了探讨, 形成了丰富的基础地质资料。许志琴、侯立玮、付小芳等对松潘—甘孜造山运动带的深入研究, 为进一步探讨造山热穹隆构造运动拓宽了思路^[1-3]。付小芳等通过调查发现了甲基卡稀有金属矿田的含矿伟晶岩主要分带集中分布于马颈子花岗岩穹隆体顶部及其边缘区域, 建立并揭示了甲基卡地区花岗岩浆底辟穹隆变形变质特征与成矿控矿作用特点^[4-5]。王登红等提出的“甲基卡式稀有金属矿床‘五层楼+地下室’模型”对于指导热穹隆构造区伟晶岩型稀有金属矿床的勘查工作, 具有重要

的指导意义^[6]。

稀有金属作为当前战略关键性矿产资源, 对解决我国的能源危机问题、环境保护问题等将会发挥至关重要的作用^[7-9]。当前加快川西大型战略性新兴产业矿产资源基地的勘查与开发已迫在眉睫, 但要在勘查开发历史较长、工作程度较高且第四系覆盖严重的甲基卡地区及外围继续取得新的地质找矿突破, 难度日益增大^[10]。在当前找矿形势背景下, 不能只考虑传统地质勘查方法, 要结合实际地质情况建立适当的多方法综合勘查模式。

音频大地电磁法是以地下岩矿体电性差异为基础的快速有效解决深部找矿预测的间接物探方法, 是解决深部找矿预测的一种有效技术手段。通过物探异常与其它地质信息综合分析, 可以较准确地确定矿体空间赋存位置, 是当前寻找隐伏和深部固体矿产的重要间接找矿手段。目标是为了建立一批深部找矿的技术方法组合, 建立成矿模式与勘查模型,

收稿日期: 2021-04-29; **责任编辑:** 沈名星

基金项目: 国家深地资源勘查开采专项——中国地质调查局地质调查项目“战略性新兴产业矿产调查工程”之“松潘—甘孜成锂带锂铍多金属大型资源基地综合调查评价”(编号:DD20190173)、“稀有稀土战略资源评价与利用四川省重点实验室”基金联合资助。

作者简介: 范俊波(1991—), 男, 助理工程师, 硕士, 2019年毕业于成都理工大学, 主要从事地球物理应用研究。通信地址:四川省成都市金牛区人民北路一段25号, 四川省地质调查院; 邮政编码:610081; E-mail:836575673@qq.com

通信作者: 杨荣(1975—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事地球物理、地球化学勘查及研究, GIS信息系统开发建设。通信地址:四川省成都市金牛区人民北路一段25号, 四川省地质调查院; 邮政编码:610081; E-mail:30376331@qq.com

综合评价深部资源潜力,最终钻探验证,实现找矿突破,为引领新兴产业的发展提供技术示范和资源保障^[11]。因此,本文将阐述音频大地电磁测深在甲基卡深部找矿预测中的应用,以期对甲基卡矿区深部找矿工作提供参考。

1 矿区地质特征

川西甲基卡稀有金属矿区位于甘孜州康定、雅江、道孚三县交界地带,海拔 4200~4600 m。地质背景处于青藏高原东部与扬子陆块西部的松潘—甘孜造山带,其为特提斯—喜马拉雅造山运动的产物^[12-14]。在雅江—道孚—康定推覆带中段,以甲基

卡马颈子花岗岩穹窿体最具有代表性。

甲基卡花岗岩体侵入于上三叠统侏倭组和新都桥组,在南部马颈子和中北部的甲基甲米(308)呈岩株、岩枝状出露。区内动热变质带以花岗岩为中心,向外依次发育十字石带、红柱石十字石带、红柱石带以及黑云母带,大致呈南北向展布。在花岗岩(枝)和伟晶岩(矿)脉外接触带发育电气石、堇青石热接触蚀变带(图 1)。甲基卡岩底辟穹隆构造花岗岩岩基与伟晶岩具有时空和成因上的联系,岩浆—变形—变质—成矿是控矿的基本要素^[1-2,4]。岩浆侵位所形成的底辟穹隆构造对于矿床的形成具有关键性的控制作用,不仅控制花岗岩岩浆分异形成含矿熔体—流体,而且在岩浆底辟侵位伸展过程中,发育一系列张性和剪张性裂隙,给含矿熔体—流体上升提供

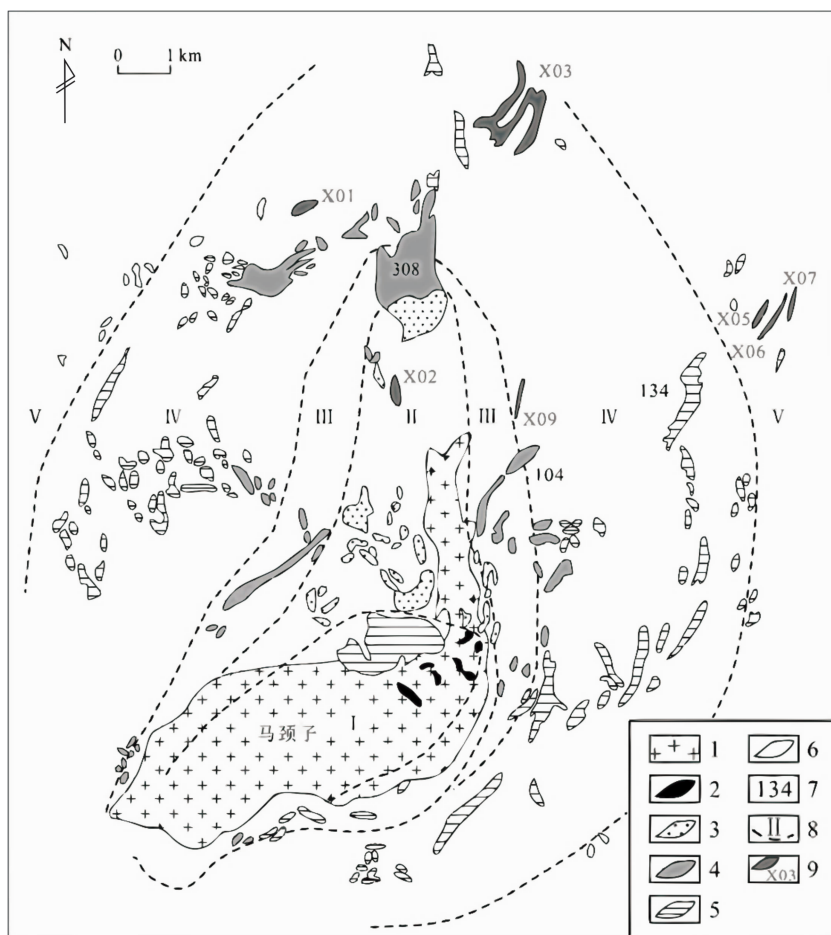


图 1 甲基卡矿田主要伟晶岩脉分布图(据文献[13])

Fig. 1 Map showing distribution of pegmatite dykes in Jiajika orefield

1. 二云母花岗岩; 2. 微斜长石型伟晶岩; 3. 微斜长石钠长石型伟晶岩;
4. 钠长石型伟晶岩; 5. 钠长石锂辉石型伟晶岩; 6. 钠长石锂云母型伟晶岩;
7. 伟晶岩脉体编号; 8. 类型分带线及编号; 9. 新发现伟晶岩脉体及编号;
- I. 微斜长石伟晶岩带; II. 微斜长石—钠长石伟晶岩带; III. 钠长石伟晶岩带;
- IV. 锂辉石伟晶岩带; V. 锂(白)云母伟晶岩带

了良好的通道和聚集场所。目前区内已发现的花岗伟晶岩(矿)脉,成群产布于这些穹窿体周缘的构造裂隙中,围绕花岗岩内、外接触带派生出一系列含锂、铍、铌、钽的稀有金属伟晶岩矿脉。

甲基卡矿田受构造岩浆穹窿控制,穹窿体由花岗岩体、伟晶岩脉和晚三叠世西康群侏倭组、新都桥组泥质粉砂岩以及构造片岩组成,在矿田南部出露有印支期二云母花岗岩,出露面积达 5.3 km²,呈马颈子状。根据产出特点确定为岩浆构造变质穹窿,控制着甲基卡地区构造形成和侵入岩活动规律^[15]。

2 地球物理特征及探测方法

2.1 地球物理特征

2.1.1 区域地球物理特征

据四川省矿产资源潜力评价成果,区域剩余重力异常(1:50 万)与区域航磁化极异常(1:20 万)成果资料显示:甲基卡、容须卡、长征、瓦多、木绒等已知花岗岩穹窿体大致分布于重磁异常过渡带或低重低磁异常区(图 2)^[16]。该区域花岗伟晶岩(矿)脉成群成带产出于这些穹窿体周缘的构造裂隙中,其中以甲基卡地区最具代表性。鉴于一定规模的低密度弱磁性的花岗岩体会引起较大范围的低重低磁异

常,根据低重低磁异常圈闭来推断花岗岩(隐伏)穹窿体的延伸范围,为伟晶岩型稀有金属成矿远景区的圈定提供依据之一。

2.1.2 矿区岩(矿)石物性特征

甲基卡矿区主要岩石为伟晶岩、花岗岩、片岩及变质砂岩,其中主要以伟晶岩和花岗岩为目标探测岩体。片岩为主要的围岩,变质砂岩也是围岩之一,但分布规模较小,角岩更为零星。已知资料显示:重力高异常主要由片岩、变质砂岩、砂岩等引起,重力低异常则由花岗岩、伟晶岩等酸性岩体引起;甲基卡矿区虽为弱磁性区域,各类岩石主要呈低磁化率、低剩余磁化强度特征,但岩石类型及地层间仍存在磁性差异。区内高磁异常主要由角岩、片岩、变质砂岩等岩体引起,低磁异常由花岗岩、伟晶岩等岩体引起^[17]。

电性特征数据来源于野外标本实测结果与资料归纳总结(表 1),采取泥团法进行标本物性测量,统计时对极大和极小值进行了剔除。因片岩电阻率具有各向异性特征,而研究区片岩产状主要为水平产状,因此,对片岩主要采用平行片理面的物性数据。根据区内电性特征可知,片岩等围岩主要呈相对低阻特征;花岗岩、变质砂岩、伟晶岩等为相对高阻特征。变质砂岩与伟晶岩(花岗岩)较为接近^[18],为后期的地电结构定性带来一定影响,需要结合地质成果进行分析研究。

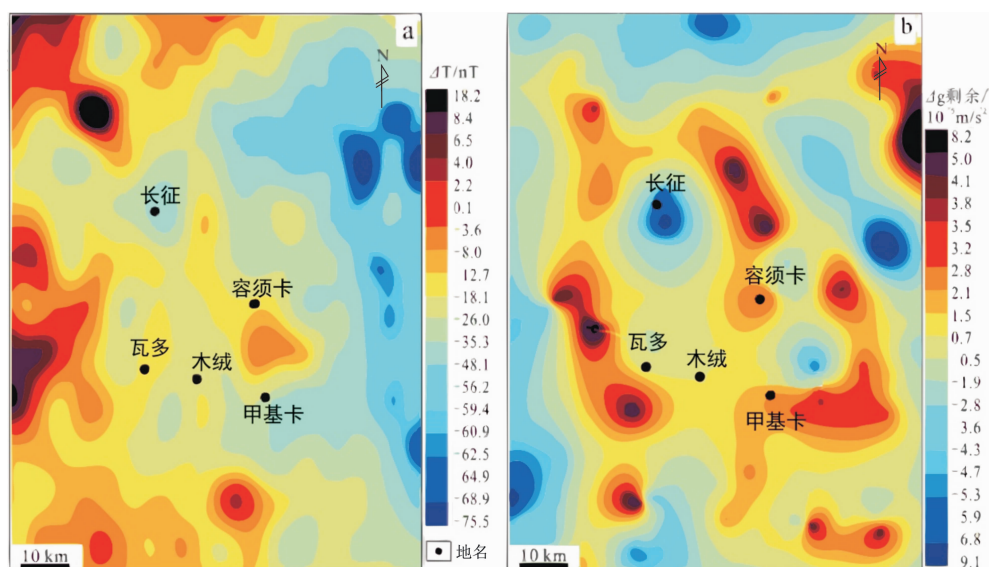


图 2 区域航磁 ΔT 化极异常(a)及剩余重力异常(b)(据文献[16])

Fig. 2 Regional aeromagnetic ΔT polarization anomaly (a) and residual gravity anomaly (b)

表 1 甲基卡矿区岩(矿)石电阻率特征统计

Table 1 Statistics of resistivity characteristics of rocks and ores in Jiajika area

岩性	样品数量/个	电阻率/ $\Omega \cdot m$			备注
		最小值	最大值	平均值	
伟晶岩	128	537	32343	7588	主要分布于矿区外围
花岗岩	32	529	63072	11970	
石英岩	85	1787	91403	26715	
角岩	31	686	89893	16705	
变质砂岩	86	1233	36272	10784	
片岩	60	278	9897	3070	

2.2 音频大地电磁测深基本原理

2.2.1 基本原理

音频大地电磁法(AMT)是以电磁波传播理论为基础的一种以天然交变电磁场为场源的地球物理测深法,工作频率范围为 1~10000 Hz,探测深度在 2000 m 以内。它以地下介质体不同的地球物理特征差异为基础,通过对电磁场正交水平分量的观测,可计算出地下介质视电阻率:

$$\rho = \frac{1}{5f} \left| \frac{E}{H} \right|^2 \quad (1)$$

式(1)为音频大地电磁法最基本的公式,式中, ρ 为视电阻率, E 为电场强度, H 为磁场强度, f 为电磁波频率。实际工作中,探测深度较好的经验公式是:

$$D \approx 356 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (2)$$

式(2)表明,在 AMT 不同勘探系统的工作频率都已确定的条件下,各频点的探测深度只与地下介质的平均电阻率有关,最大探测深度一般对应最低频点所反映的深度。很显然,在高阻地区,探测深度大,而在低阻地区,探测深度小。

2.2.2 数据处理

音频大地电磁测深资料处理流程大致如下:首先利用预处理软件进行傅里叶变换,将时间域电磁数据转换成频率域数据,剔除明显的坏点,然后进行静态校正及空间滤波等基本处理,通过不同反演方法结合已有的地质资料,分析成果图件,划分出异常范围,做出初步地质推断,通过地质与物探成果的相互印证,最终给出物探成果。其主要处理流程见图 3。

2.3 AMT 正演模型设计与分析

AMT 正演模拟是假设已知地下岩(矿)体的视电阻率、地质构造及相应的围岩参数的情况下,对电磁场分布规律和衰减快慢特点进行数值模拟。查清花岗岩或者花岗岩型伟晶岩所表现出的高阻异常在音频大地电磁测深曲线上的响应特征。采用大地电

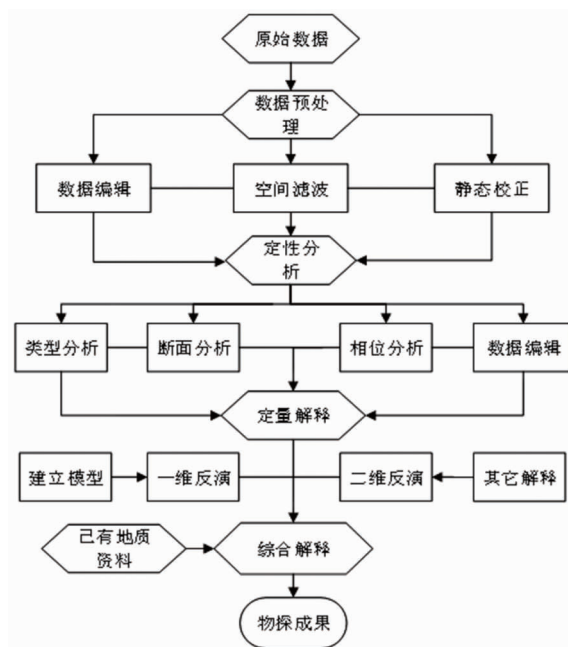


图 3 AMT 处理流程图

Fig. 3 Flow chart of AMT procession

磁处理软件(MtSoft2D),通过有限元二维正演数值模拟方法,以基础地质背景与初步成矿模式为基础,建立穹隆构造模型—花岗岩侵入围岩出露浅地表。这与甲基卡地区情况类似,对于研究区隐伏岩(矿)体勘查具有重要指导意义。

通过正演模拟分析可知,在甲基卡区域 AMT 找矿预测中,TE 模式对浅部高阻异常构造分辨率要优于 TM 模式^[19]。

3 甲基卡地区深部找矿预测

3.1 重磁异常解析

通过地面高精度重磁实测数据处理绘制得到研究区布格重力异常图(图 4a)与磁源重力异常(图 4b)。

布格重力异常整体表现为四周高值环绕,中部、南部呈极低值和低值。中南部布格重力低异常呈面型分布,推测隐伏有大规模的低密度酸性岩,这与南部出露的马颈子花岗岩岩株相对应,且主体总体呈近南北向展布,往西延伸较小,向东部延伸较大,在花岗岩露头附近,布格重力异常极低值,显示其底部厚度最大。通过上延处理或将磁异常变换得到磁源重力异常(等同于低通滤波,抑制地表高频信号,突出低频的背景信号),与研究区布格重力异常吻合。从异常分布来看,北部异常幅值较高,对应于三叠系围岩,中部过度带,弱异常或相对低异常,中南部为低异常,异常规模较大,与地表花岗岩体出露对应,推测深部为花岗岩穹隆体^[20]。

从重磁异常大致可推断深部花岗岩穹隆体的大体形态,可指示有多个隐伏岩体的隆起,为伟晶岩发育占位空间提供线索,在花岗岩顶部和边缘,应为有利于稀有金属伟晶岩脉产出部位。

3.2 音频大地电磁测深异常解析

通过对研究区 4 条 AMT 测深剖面(PM01、

PM02、PM03、PM04)进行综合反演,得出了该区域三维构架图(图 5)。

图 5 反映出该地区的基本地质构架,马颈子花岗岩为花岗岩浆的主要通道,花岗岩主体岩体有较大延深(延伸 2000 m 以下),花岗岩岩体向北和向东也延伸较长,可能存在有多个隐伏岩体的隆起,为伟晶岩发育占位空间提供线索。

已知含矿伟晶岩脉体位于马颈子花岗岩北部的 308 号脉、X03 号脉与位于马颈子花岗岩北东部的 134 号脉在浅地表均表现为高电阻率、次电阻率分布与深部高阻紧密相连。结合地质钻探等资料综合分析,伟晶岩(矿)脉的产布、规模与花岗岩岩体是有密切联系的,花岗岩岩浆为伟晶岩(矿)脉提供物质来源。这一点与甲基卡地区成矿认识基本一致,即含矿脉体为大型花岗岩岩体分异出来的轻物质经长时间、多期次逐步形成的支脉。根据从已知到未知的推断思想,区域内还有类似的次级高阻异常体(与深部高阻体有联系),推测可能存在伟晶岩脉体,也预示着甲基卡区域深部找矿潜力很大。

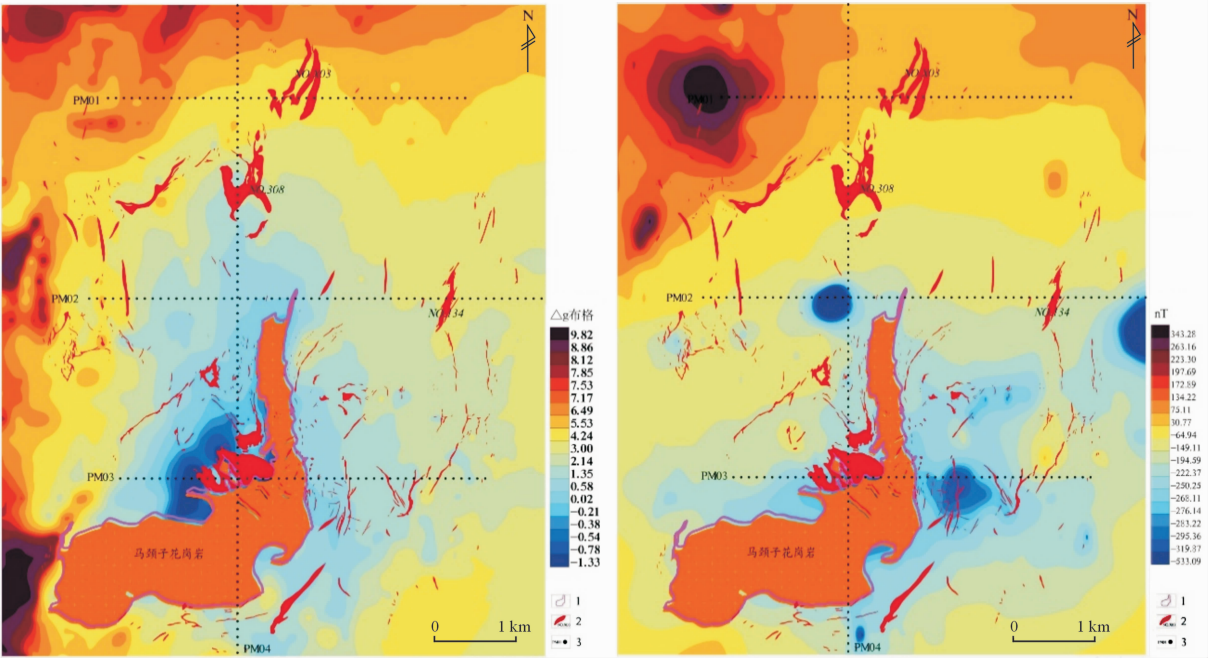


图 4 甲基卡地区布格重力异常(a)及磁源重力异常(b)

Fig. 4 Diagrams of Bougguar gravity anomaly (a) and magnetic source gravity anomaly (b) of Jiajika area

1. 马颈子花岗岩;2. 伟晶岩脉;3. AMT 测点

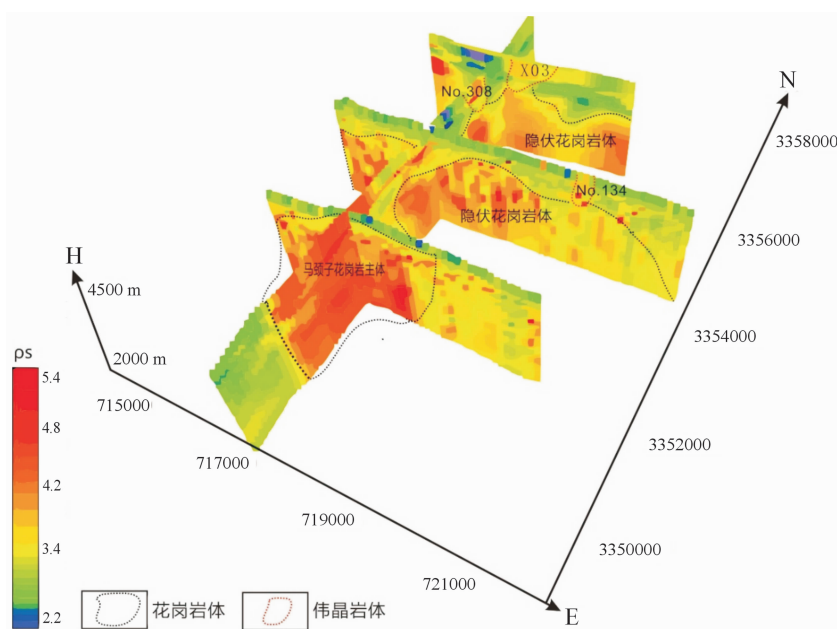


图5 AMT测深剖面综合成果图

Fig. 5 Map showing results of integrated AMT sounding profile

4 结语

采用综合地球物理方法测量和多参数评估体系总结物性规律,可为地球物理勘探提供依据。以基本查明控矿构造和圈定找矿靶区为目标,通过与地质、化探、钻探等多元信息综合对比分析,基于伟晶岩脉体隐伏或深埋的地质特征,优化地球物理方法组合,可以获得区域和剖面不同维度的地球物理信息,建立地质-地球物理勘查模型。

在方法选择上,针对稀有金属成矿背景的复杂多样性,应采用多方法、多尺度的勘探模式。小尺度区域重磁异常可以反映有利的大地构造-岩浆岩部位,圈定隐伏花岗岩基或热液流体;大比例重磁资料反映了隐伏花岗岩体和伟晶岩的就位空间,间接了解矿区深部的穹窿构造、岩体分布等特征(花岗岩通常为低磁低重异常、三叠系地层为高磁高重异常),对矿区的成矿潜力评估提供依据。通过音频大地电磁剖面测深以及地表地质调查验证,初步了解该区内深部地质构造特征,圈定花岗岩空间分布范围,勾绘出研究区内的主要地质构造格架。

在条件允许的情况下,开展综合地球物理勘探,可以有效利用多参数多尺度减小物探解释的多解性,为准确预测提供更充分的物探依据。通过多元找矿信息综合分析,从已知推测未知,优选地质-地

球物理方法组合应用,是稀有金属深部找矿突破或直接影响找矿周期的重要因素。

致谢:感谢在研究工作中给予帮助的领导和同事们。

参考文献:

- [1] 侯立伟,付小方. 松潘—甘孜造山带东缘穹隆状变质地质体[M]. 成都:四川大学出版社,2003.
- [2] 付小芳,侯立伟,梁斌,等. 甲基卡式花岗伟晶岩型锂矿床成矿模式与三维勘查找矿模型[M]. 北京:科学出版社,2017.
- [3] 许志琴,王汝成,赵中宝,等. 试论中国大陆“硬岩型”大型锂矿带的构造背景[J]. 地质学报,2018,92(6):1091-1106.
- [4] 付小方,黄韬,邹付戈,等. 甲基卡式锂矿田控矿作用与深部找矿方向[J]. 地质学报,2021,95(3):791-808.
- [5] 秦宇龙,郝雪峰,徐云峰,等. 四川甲基卡地区花岗岩型稀有金属找矿规律及标志[J]. 中国地质调查,2015,2(7):35-39.
- [6] 王登红,刘丽君,侯江龙,等. 初论甲基卡式稀有金属矿床“五层楼+地下室”勘查模型[J]. 地学前缘,2017,24(5):1-7.
- [7] 王登红,王瑞江,付小方,等. 对能源金属矿产资源基地调查评价基本问题的探讨:以四川甲基卡大型锂矿基地为例[J]. 地球学报,2016,37(4):471-480.
- [8] 王登红,王成辉,孙艳,等. 我国锂铍钽矿床调查研究进展及相关问题简述[J]. 中国地质调查,2017,4(5):1-8.
- [9] 刘丽君,王登红,刘喜方,等. 国内外锂矿主要类型、分布特点及勘查开发现状[J]. 中国地质,2017,44(2):263-278.
- [10] 刘善宝,王成辉,王登红,等. 四川甲基卡锂矿伟晶岩转石分布区“3定2参”大比例尺填图法及其在青藏高原应用的意义[J]. 地质学报,2020,94(1):326-332.

- [11] 王登红,孙艳,刘喜方,等. 锂能源金属矿产深部探测技术与找矿方向[J]. 中国地质调查,2018,5(1):1-9.
- [12] 许志琴,王汝成,朱文斌,等. 川西花岗-伟晶岩型锂矿科学钻探:科学问题和科学意义[J]. 地质学报,2020,94(8):2177-2189.
- [13] 付小方,袁茜平,王登红,等. 四川甲基卡矿田新三号稀有金属矿脉的成矿特征与勘查模型[J]. 矿床地质,2015,34(6):1172-1186.
- [14] 郝雪峰,付小方,梁斌,等. 川西甲基卡花岗岩和新三号矿脉的形成时代及意义[J]. 矿床地质,2015,34(6):1199-1208.
- [15] 黄韬,付小方,杨荣,等. 探地雷达在甲基卡稀有金属矿田找矿的应用[J]. 物探与化探,2018,42(2):316-324.
- [16] 杨荣,范俊波,黄韬,等. 磁法测量在甲基卡地区找矿中的应用[J]. 四川地质学报,2017,37(4):692-695+699.
- [17] 杨荣,郝雪峰,王登红,等. 四川甲基卡锂矿田伟晶岩脉的地球物理探测效果:以新三号脉(X03)为例[J]. 矿床地质,2020,39(1):111-125.
- [18] 杨荣,付小方,郝雪峰,等. 甲基卡及扎乌龙大型锂矿基地 1:5 万综合调查 2016—2018 综合物探成果报告[R],2018. 成都:四川省地质调查院.
- [19] 范俊波. 物探方法在甲基卡稀有金属矿田勘查中的综合应用研究[D]. 成都:成都理工大学,2019:20-35.
- [20] Huang T, Fu X F, Ge L Q, et al. The genesis of giant lithium pegmatite veins in Jiajika, Sichuan, China: Insights from geo-physical, geochemical as well as structural geology approach [J]. Ore Geology Reviews, 2020 April, 124: 103557. (DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103557)

Application of audio-frequency magnetotelluric sounding to deep prospecting and prediction of rare metal deposit in Jiajika area

FAN Junbo^{1,2}, YANG Rong¹, HAO Xuefeng¹, FU Xiaofang¹,
PAN Meng¹, TANG Yi¹, PENG Yu¹

(1. Sichuan Geological Survey, Evaluation and Utilization of Strategic Rare Metals and
Rare Earth Resource Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610081, China;
2. Sichuan Province Wisdom Geology Big Data Co., Ltd, Chengdu 610081, China)

Abstract: In the West Sichuan province is located Jiajika area where is one of the largest enrichment district of hard rock type rare metals in China, even in the world. It is still potential for prospecting to depth. Facing difficult situation of prospecting at surface the prospecting at present begins to focus on blind ore to depth. It is considered on basis of summary of field practice and results available in recent years that audio-frequency magnetotelluric is an effective technical means to prospect and predict blind ore to depth in the area. Based on basic geological data and analysis and comparison of magnetic and gravity survey data of Jiajika area with the regional ones and plane-line-point search are made clear the geological structural frame at medium-deep depth thus distribution of acidic intrusive bodies, such as Majingzi granitic body, are outlined, then the possible intruding conduits of pegmatite dykes. The future prospecting direction of the Jiajika area and surrounding areas is pointed out according the outline.

Key Words: audio-frequency magnetotelluric sounding; rare metal; prospecting direction; Jiajika area; Sichuan province