

doi: 10.11720/wtyht.2016.2.16

赵丛,朱琳,李怀渊,等.航空和地面天然场电磁法联合开展深部矿产资源勘探[J].物探与化探,2016,40(2):333-341.http://doi.org/10.11720/wtyht.2016.2.16

Zhao C, Zhu L, Li H Y, et al. Deep mineral exploration by airborne and ground natural field electromagnetic methods[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(2): 333-341. http://doi.org/10.11720/wtyht.2016.2.16

航空和地面天然场电磁法联合开展深部 矿产资源勘探

赵丛^{1,2,3}, 朱琳^{1,2}, 李怀渊^{1,2}, 江民忠^{1,2}, 骆燕^{1,2}, 张伟^{1,2,3}, 何昕欣^{1,2}

(1.核工业航测遥感中心,河北石家庄 050002; 2.中核集团 铀资源地球物理勘查技术中心重点实验室,河北石家庄 050002; 3.东华理工大学 核工程与地球物理学院,江西抚州 344000)

摘要: 较为全面地介绍了航空天然场电磁观测系统(ZTEM)的方法原理、装置及应用实例,从测量参数、探测成果和工作效率等方面对比总结了航空天然场电磁法与地面 MT 法。在此基础上,提出了航空天然场电磁法和地面 MT 联合的点面结合勘探方案,即 ZTEM 航空电磁法进行大面积快速测量,地面天然场电磁法针对重点和可到达的区域进行辅助性质的完善测量和查证,并为 ZTEM 数据反演提供参考,最终获得全区的电性特征,从而为地质体推断提供可靠参考,可为我国高山峻岭区、森林覆盖区、水体覆盖区、环境保护区矿产资源的快速有效勘查提供技术支撑。

关键词: ZTEM; MT; 天然场电磁法; 倾子矢量; 电阻率; 深部矿产; 快速勘探; 偏远和艰难工作区; 环境保护

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2016)02-0333-09

ZTEM(即 Z-axis tipper electromagnetics, Z-轴倾子电磁测量系统)是基于音频磁场法(Audio-frequency magnetic method, 简称 AFMAG 法)原理并进行改进创新的航空天然场电磁观测系统。该系统通过测量天然场垂直磁场和水平磁场的强度,计算倾子响应即垂直分量与水平分量的比值参数,研究地下构造和地质特征。与地面的大地电磁法(MT)、音频大地电磁法(AMT)类似,都是以全球范围内雷电活动造成的天然场为场源,但 MT 及 AMT 法除了采集磁场信号外,还采集电场信号,并计算阻抗和相位。

音频磁场法(AFMAG)在 1959 年由 S·H·Ward 提出,但是天然场源的微弱性、随机性、极化不确定性以及当时的技术水平制约了其推广应用。直至 20 世纪 80 年代,计算机和电子技术的飞速发展, V·F·Labson 等研发了测量设备并经过大量野外工作认为天然源的 AFMAG 可以探测地下几千米的介质电性结构,随后 AFMAG 被应用于矿产资源勘查工作。GEOTECH 公司于 2000 年开始重新研发 AFMAG 技术,2007 年全球首家商用 AFMAG 航空电

磁测量系统问世,并在多个已知矿床进行了试验,验证了其有效性。2008 年又对航空 AFMAG 进行了数值模拟,来指导该方法野外勘查时测线布置、飞行高度、特定矿产的预期信号等,辅助数据的处理解释,并正式定名为 ZTEM。20 世纪 90 年代末至 2010 年的十几年间,胡文宝、陈小斌、王绪本等学者对 MT 法中的倾子矢量资料进行了研究;2010 年,中南大学席振铎等针对倾子矢量进行了正演模拟,提出了人工源频率倾子测深法(ASFTSM)并进行了试验工作^[1-8];截止目前,加拿大 GEOTECH 公司的 ZTEM 航空天然场电磁观测系统在世界电磁法勘探领域仍独树一帜,并被誉为了最具创新的航空电磁技术。

1 ZTEM 方法原理及观测系统

1.1 方法原理

ZTEM 电磁测量系统场源为全球范围的电磁暴及雷电产生的自然电磁场,根据传播方式,可以认为该场是垂直向下的平面电磁波。任何垂直磁场均是由地下介质侧向电导率差异所造成的,并可以被

ZTEM 系统测量到,位于测区范围内的基站线圈测量水平磁场。磁场垂直分量与水平分量保持复线性关系,倾子矢量则是这种复线性关系的系数,即:

$$H_z = T_{zx} H_x + T_{zy} H_y = [T_{zx} \quad T_{zy}] \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, T_{zx} 、 T_{zy} 表示倾子矢量在 x 和 y 方向的分量^[2]。倾子矢量是复数,振幅值大小表明了介质横向的不均匀性程度,倾向角则指向低阻体。倾子矢量参数的振幅反映了电阻率在观测剖面上横向变化的强度,倾向角表明了局部构造的走向,利用倾子矢量的这些特点可以对多个异常体的边界进行区分^[2-3]。

通过各种模型的正演拟合计算,得出高阻或低阻异常体的倾子响应都能很好地分辨出异常体,倾子响应对低阻异常体边界的识别能力要强于高阻体。异常体的埋深影响倾子值的大小,埋深越深,倾子的幅值越小,倾子曲线变化越平缓,与围岩的边界越模糊。在多个异常体边界的识别中,得出倾子的识别能力不随异常体之间距离的减小而明显下降,因此倾子响应可以较好地克服视电阻率对于多个异常体相距较近时对异常体边界识别能力弱的问题^[2-3]。

在测深方面,其原理与 MT 方法原理一致,测量深度遵循趋肤深度公式:

$$\delta_s = 356 \times \sqrt{\frac{\rho_A}{f}},$$

即如果电阻率为 $\rho_A = 1000 \Omega \cdot m$ 时,频率 f 为 360~30 Hz,那么测深深度 δ_s 为 600~2000 m^[9]。

1.2 观测系统

该系统分为地面基站接收机和机载接收机两部分(图 1),其中地面接收机主要由两个相互垂直的直径为 3.5 m 的接收线圈组成,采集水平磁场分量

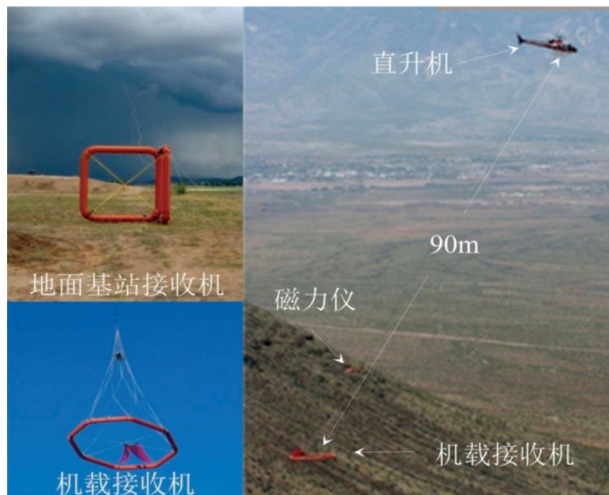


图 1 ZTEM 系统装置^[9]

H_x 、 H_y 。机载接收机接收线圈直径 7.4 m,采集垂直磁场分量 H_z ,在测量时采用 90 m 长电缆悬挂在直升机下方,并采用专利的悬挂系统避免或减小振动,同时该电缆还可以将采集的数据实时传输到数据采集系统中。表 1 为 ZTEM 测量系统的主要技术参数。

表 1 ZTEM 主要技术参数^[9]

ZTEM 系统	参数
发射机	无(天然场)
采样频率	A/D=2000 Hz A/D (0.0005 s) Output=2.5 Hz(10 m/sample)
接收机	机载接收机= H_z (垂直磁场分量) 地面基站接收机= H_x 、 H_y (水平磁场分量)
接收频率	22~2800 Hz,实际中通常采用 30~720 Hz 或 25~600 Hz
接收线圈直径	机载接收线圈=7.4 m 地面基站接收线圈=3.5 m
测量速度	80 km/h
接收机导出参数	H_z/H_x 和 H_y/H_x 倾子(Tensor FFT)
接收机转换参数	同相分量,异相分量
标称噪声	<1% IP&QD

为了消除水平和垂直电磁场交叉耦合的效应,对机载线圈的飞行姿态进行实时监控。在 ZTEM 机载线圈上的不同位置分别布设了 3 个 GPS 接收机。采用其中一个 GPS 数据作为移动的基站来计算其他两个接收机的相对位置,以此来进行非常精确的飞行姿态测量。

得益于测量方法的技术革新,ZTEM 能够获得噪声水平极低的观测数据。ZTEM 对微弱电阻率异常体具有优秀的识别和分辨能力,并且低频 25/30 Hz 能够穿透导电覆盖层。在高阻结晶岩石中探测深度很容易达到 2000 m;在导电性沉积岩和地热建造可达 500~1000 m。因此 ZTEM 已成为一种有效的大深度电阻率探测方法,在航空电磁领域独树一帜,已被成功地应用于探测斑岩型、喷流—沉积型、大型火山岩型块状硫化物,不整合铀与受构造控制的金、银、铂族金属矿床和地质填图,并在智利北部 Copaque 铜—钼矿、美国阿拉斯加金—铜矿、加拿大 Milligan 山铜—金矿等多个世界级著名矿床的测量及研究工作取得了较好的效果^[9-11]。

2015 年 4 月,核工业航测遥感中心受青海省地质调查局的委托,在 4000 m 以上高海拔地区成功完成世界上首例具有标志性意义的航空天然场源电磁法 ZTEM 试验飞行,取得了高信噪比的可靠的原始资料。

2 ZTEM 的应用实例

迄今为止,国内还没有大面积应用 ZTEM 的实

例,仅在青海进行了小范围的试验工作,以下主要介绍 ZTEM 在加拿大 Milligan 山铜—金矿的测量工作,对青海的试验工作成果仅作简要介绍。Milligan 山测量共完成东西向测线 25 条,测线长 8 km,线距 250 m,共计总测线长度 200 km,控制面积 48 km²,项目测量时间自 2008 年 10 月 15 日起至 10 月 22 日止,仅历时 8 天。

2.1 Milligan 山矿床地质概况

Milligan 山矿床位于上三叠—下侏罗统 Takla 群的火山核内,包括碱性辉石安山岩、玄武岩和火山碎屑岩。侵入在火山岩中的岩石为碱性正长岩和二长—闪长岩同岩浆岩套。矿化主要产在安山质和安粗质岩流、火山碎屑岩、粗面凝灰岩和斑状二长岩中^[12]。

Milligan 山近地表的斑岩型铜—金矿区南北约 2.5 km,东西约 1.5 km,厚度约 400 m。主要为 2 个矿带——主矿床带和 Southern Star 区(简称 SS 区)。主矿床带又包含 4 个子区:MBX 区、WBX 区、DWBX 区和 66 区(图 2)。

该地区断裂构造较为发育,在 Milligan 山东部为该地区的区域性 Great Eastern 断裂带,以该断裂为界,西部出露含矿化的 Takla 群火山岩,东部为古近系—新近系地层。在矿化区主要为三组断裂:①早期的北东向 Rainbow 断裂;②北东东向断裂,如 MBX、WBX 及 DWBX 区北部的 Oliver 断裂及 SS 区南部 Cross 断裂;③北西向断裂,如南北贯穿矿床中部的 Harris 断裂及 SS 区中部的断裂。

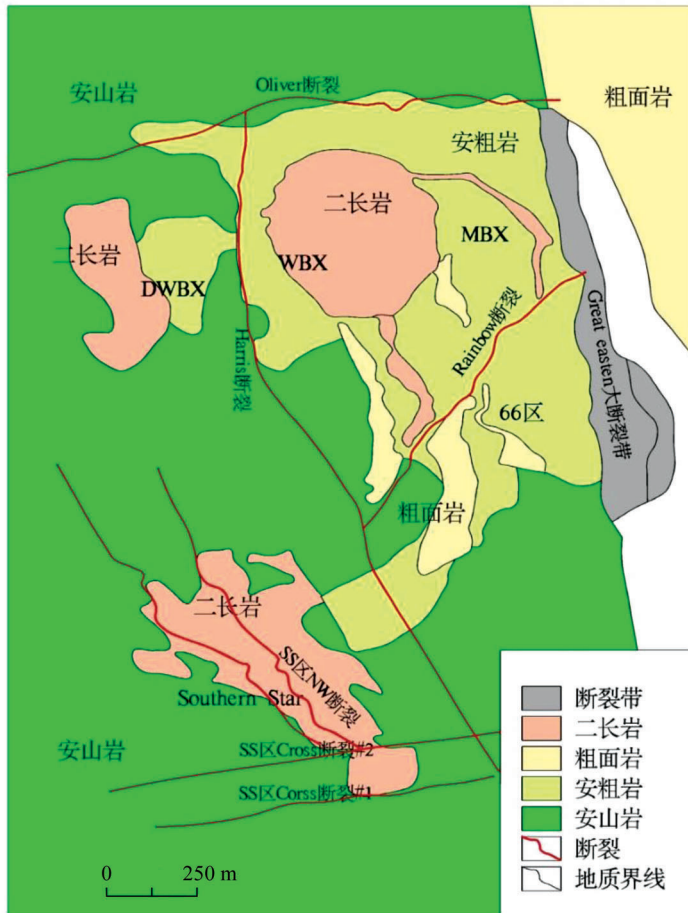


图 2 Milligan 山地区地质及主要矿化区示意^[9]

2.2 Milligan 山矿床 ZTEM 测量结果分析

根据倾子矢量的原理,可以得出沿测线方向 x 的倾子响应(T_{xx})和垂直测线方向 y 的倾子响应(T_{yy}),并根据该方向的倾子响应识别与此方向呈大角度交角的断裂构造或地质体的边界等。将 x 、 y 两个方向的倾子响应结合起来,即可在一张图上将该

地区的断裂格架表现出来(图 3)。

由于倾子矢量在不同频率上响应不同,较为直接地反映了断裂构造随深度的变化。由图 3 的 In-Phase 总散度(由倾子矢量实部响应经导数计算得出)等值图可知,Milligan 山东部的主要构造 Great Eastern 断裂带由浅至深其倾子响应逐渐增强,说明

了断裂构造在深部可能规模更大、更加破碎。与该大断裂带形成对比的是, Milligan 山 MBX 矿区北部的断裂, 其响应情况随着频率的变小, 即随着深度由浅至深逐渐变弱, 反映出该断裂由浅到深规模逐渐

变小, 属于近地表的断裂。

ZTEM 系统除了可以宏观地将整个测区的构造格架(图 4)较好地反映出来外, 还可以对其倾子响应资料进行 2D 和 3D 的反演(图 5, 图 6)。

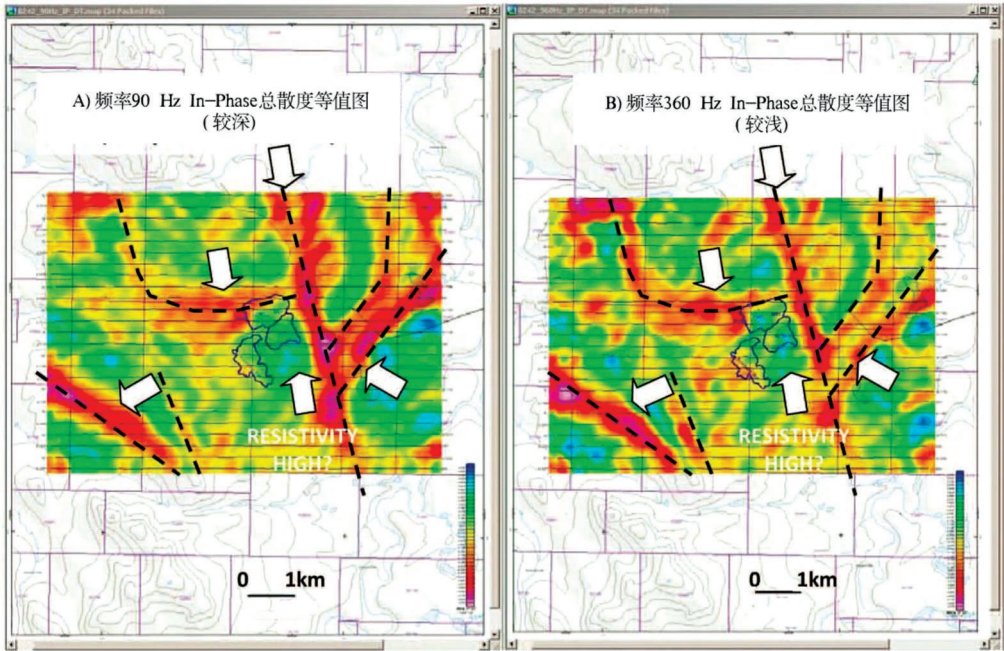


图 3 Milligan 山地区 ZTEM 测量成果示意^[9]

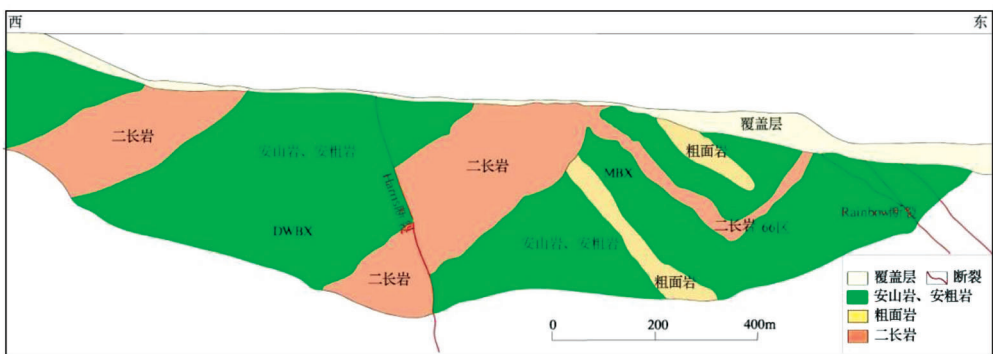


图 4 Milligan 山地区 MBX 矿区地质剖面^[9]

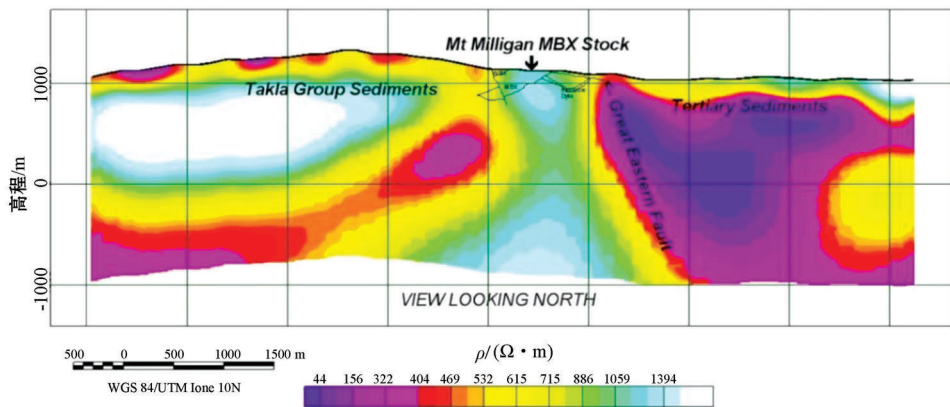


图 5 Milligan 山地区 L1100 线 2D 反演电阻率等值线剖面^[9]

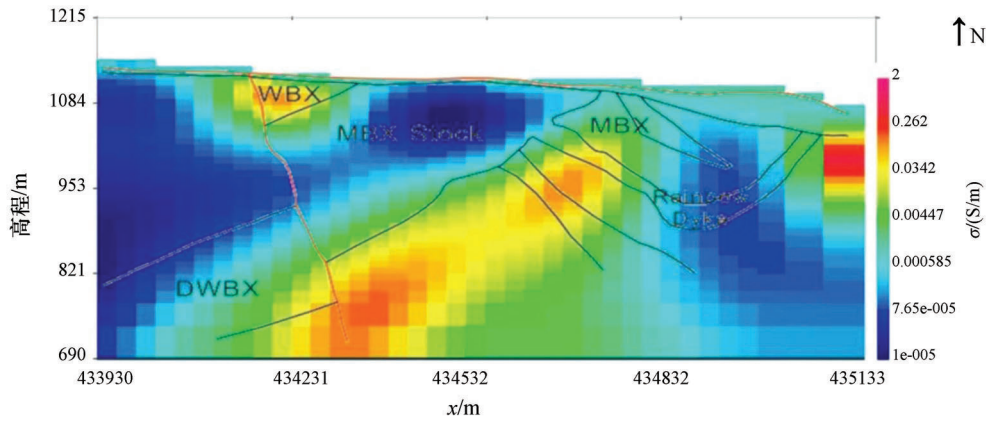


图 6 Milligan 山地区 MBX 矿区 3D 反演电导率等值切片 (截取自 L1100 线对应位置)^[9]

由图 5 可知,该反演剖面清晰地将区域性断裂构造 Great Eastern 断裂带、Takla 群及古近系—新近系地层的接触形态及空间展布特征反映出来。图 6 为经过 3D 反演的电导率等值切片图,其对应位置为图 5 中标出的 MBX 矿区位置,经过与图 4 已知地质剖面对比,其反演结果与剖面吻合度较高。

2.3 青海 ZTEM 试验工作简介

青海试验区位于我国青海省格尔木市西南部,区内海拔最低约 3 800 m,最高约 4 350 m,平均海拔近 4 000 m,山势陡峻,切割剧烈,人畜难以通行。本次试验工作共布置测线 13 条,测线方向 132°,线距

200 m,共完成测线 152 km,控制面积 29 km²,测量时间为 2015 年 4 月 8 日至 13 日,共 6 天,除去设备组装、准备和测试时间,实际测量时间仅为 1 天。

通过对 ZTEM 资料的处理分析,选择了合适的初始模型进行反演计算,并形成各个频率的 In-Phase 总散度切片图(图 7),展示了本次测量的效果。根据趋肤深度公式,可得到本次试验测量深度达到 2 000 m。根据倾子响应的特性并凸显异常,暖色调表示低阻区,冷色调表示高阻区,各频率的 In-Phase 总散度图将各个深度的倾子矢量响应表现得十分直观。试验区中部的低阻区规模逐渐变大,推

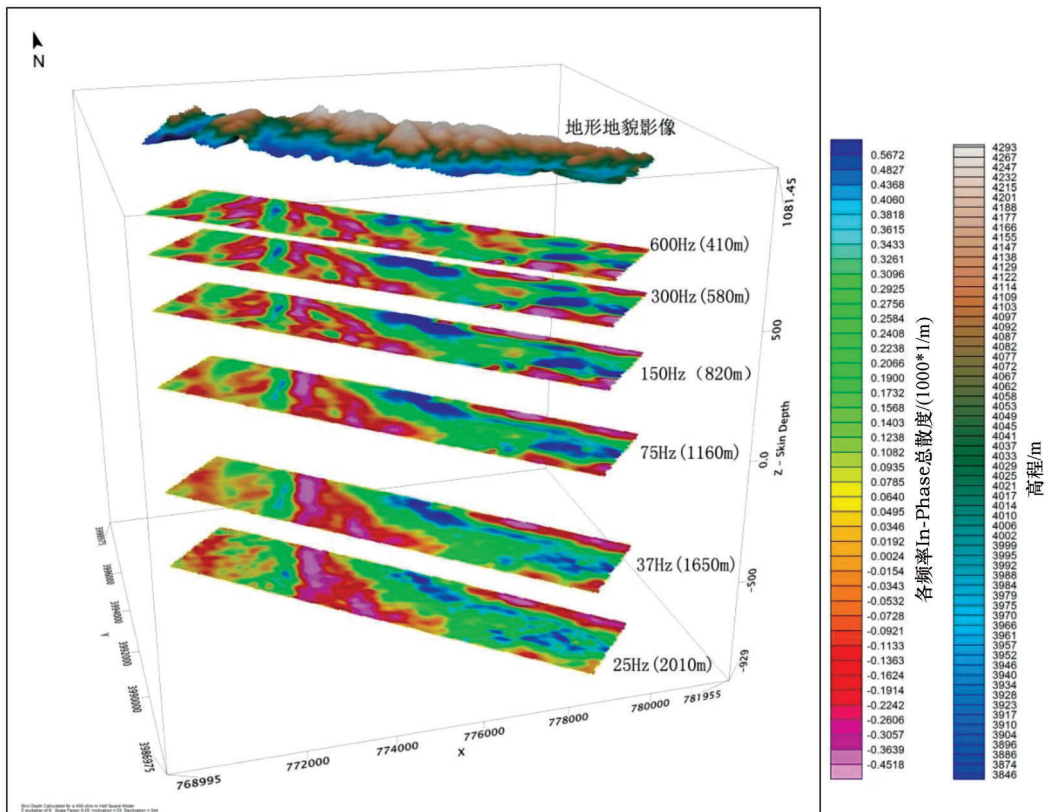


图 7 试验区各频率对应趋肤深度 In-Phase DT 等值线切片及地形地貌影像综合示意^[13]

断可能为一个规模较大较深的断裂,随着深度逐渐变化其破碎程度逐渐增加;试验区南部则由浅至深变化不大,且电阻率值整体较高,仅在较浅部位有少许的低阻区,且厚度较小。综上可知,ZTEM 测量为认识该地段深部地质环境提供了较多的资料。

通过对两个地区 ZTEM 资料的分析,充分证明了 z 轴倾子对横向地质体边界的识别分辨能力较强,尤其是针对低阻体响应较强,同时可以对探测区域进行 x 、 y 、 z 三维的综合分析。利用 x 与 y 方向的倾子响应数据,来分析该方向的横向地质构造的边界;利用频率由高到低的变化进行自浅到深的观察,来分析地质体由浅至深的形态变化,从而使资料的解释更加直观、可靠、准确。

3 ZTEM 与地面 MT 等天然场方法对比

3.1 主要测量参数对比

ZTEM 系统与地面大地电磁系统原理类似,都是采集天然电磁场信号,只是采集的物理量有所差别。

ZTEM 主要对磁场的水平分量 H_x 、 H_y 及垂直分量 H_z 进行观测,并计算 Tipper 即倾子矢量进行主要的数据分析工作。MT 或 AMT 系统则广为人知,采集电场的水平分量 E_x 、 E_y 及磁场的水平分量 H_x 、 H_y 及垂直分量 H_z ,并计算其各方向的阻抗。

两种采集系统的采集频率也有差别。ZTEM 系统的主要采集频率为 720~30 Hz,基本能够保证测量深度达到 2 km 以上。MT 系统(以加拿大凤凰公司的 V8 多功能电法采集系统为例)的采集频率为 1 000~0.000 1 Hz,其测量深度甚至能够达到上地幔。

3.2 ZTEM 与地面 MT 探测成果及工作效率

倾子响应在 ZTEM 资料解释中地位十分重要。根据倾子矢量的特性可以对探测区域进行 x 、 y 、 z 三维的综合分析,并且可以进行 2D 和 3D 的电阻率反演。同时其测量效率较高,可以用较短的时间进行大面积的电磁法测量。

地面 MT 测量在资料解释中,分析的基础主要以电阻率为主,由于其观测频带较宽,因此其测量数据量大,探测深度较大,并可以提供更多的细节。但是其主要以二维剖面的形式对大致垂直测线方向上的断裂构造进行分析推断,不能完全做到对 x 、 y 、 z 三个方向进行三维的综合分析,而且电阻率在分辨多个地质体之间的边界方面能力相对较弱,同时其采集效率较低。

4 ZTEM 联合地面 MT 技术的可行性

ZTEM 与地面 MT 法具备较多的相似性,在数据处理分析时可以将两种方法的资料结合,进行联合反演处理及综合解释。

4.1 联合反演

ZTEM 测量数据与 MT 数据最终都可以进行各自方法的反演,得到电阻率等值图,因此,理论上可以将同一区域内的 ZTEM 数据和 MT 数据共同观测的部分进行对比分析,优势互补,在反演中提供更加丰富的约束条件。

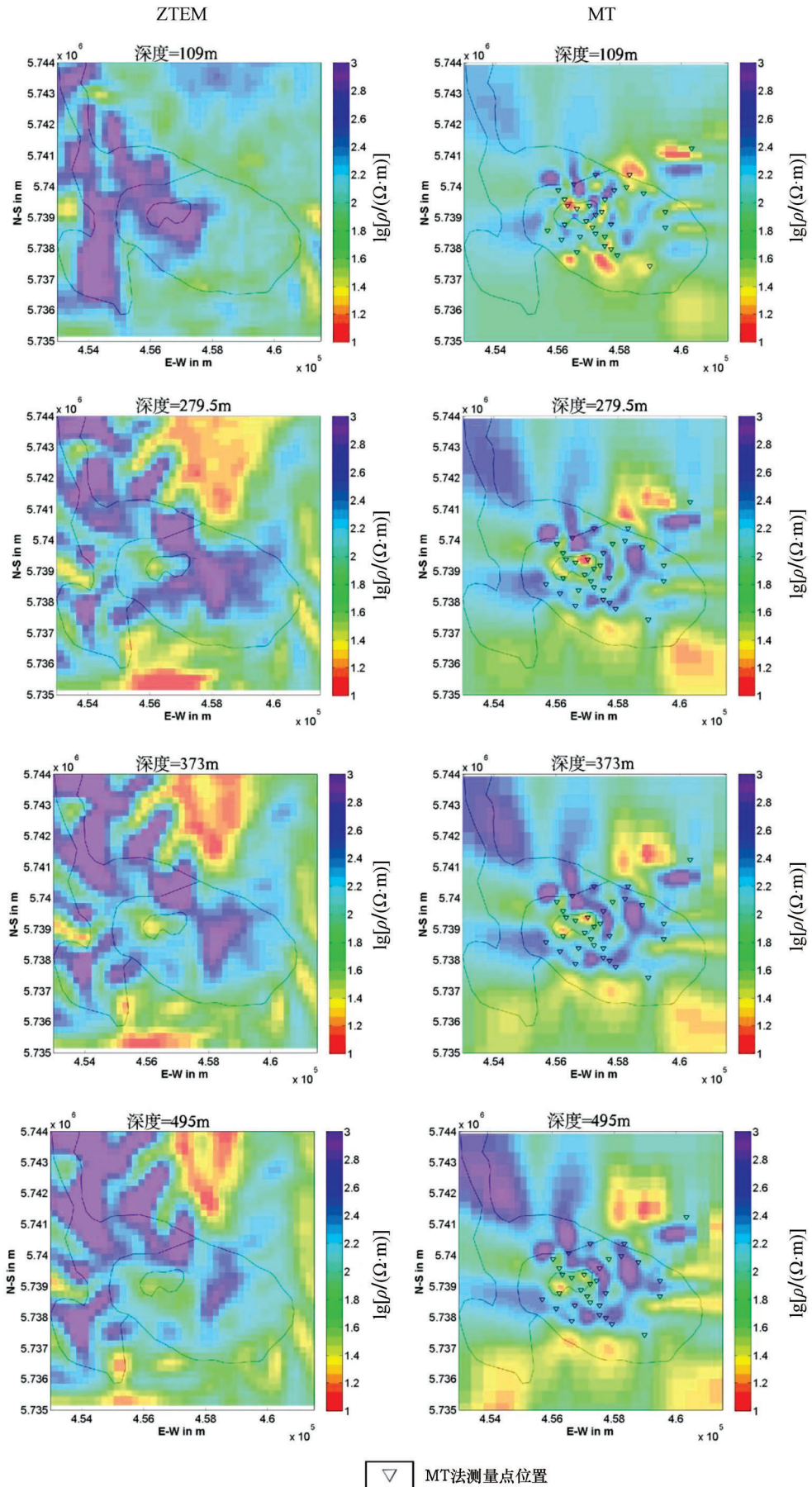
以下是对美国 Newton 地区金—铜矿共同进行的 ZTEM 与 MT 测量实例,ZTEM 在此次试验中进行了大面积的测量,同时在某些地点进行了少量的地面 MT 测量。图 8 展示的是 ZTEM 与 MT 法在相同的初始模型下,各自反演结果的等深度切片,从图中可以看出,在 MT 测点与 ZTEM 数据共同控制的区段内,反演结果整体面貌有一定的相似性,并且随着深度的变化,两种方法的反演结果变化趋势相同,在对应位置其结果较为吻合。在图上 MT 数据比 ZTEM 数据反映的信息更加丰富,表现出了更多的深部细节,而 ZTEM 在对整个测量区域宏观的表现上较为出色。

由于 ZTEM 方法的特点,在初始模型中给出的电阻率值对反演结果影响也较大。图 9 为不同初始电阻率值反演结果的对比,可以看出,不同的初始电阻率值,其最终反演结果差异很大,因此一个真实准确的电阻率约束是反演结果好坏的关键。由于 MT 法可以根据电场信号得出定量、准确的电阻率值,对 ZTEM 数据反演将是非常好的约束,从而可以得到较好的反演结果。

最终在选择综合 3D 反演时,将 MT 测量的电阻率值为初始模型的电阻率值加入反演,取得了较好的反演效果,为地质解释提供了丰富的参考资料(图 10)。

4.2 ZTEM 与地面 MT 优势互补

由于 ZTEM 采用航空测量的方式,复杂地形、植被覆盖或水系等对其影响较小,可以在上述地区进行快速的大面积的测量,从而获得该区域宏观的电磁场信息;MT 法则因为其测量频带较宽,数据量较大,可以直接测量电场而得到定量的准确的电阻率值等特点,可以在重点区域进行少量的验证及辅助工作,最后将两种方法的数据有机地结合,进行综合分析反演,得出一个更加接近真实的三维反演结果,为地质解释提供可靠的参考。



▽ MT法测量点位置

图 8 ZTEM 与 MT 法不同深度反演电阻率等值线切片对比^[14]

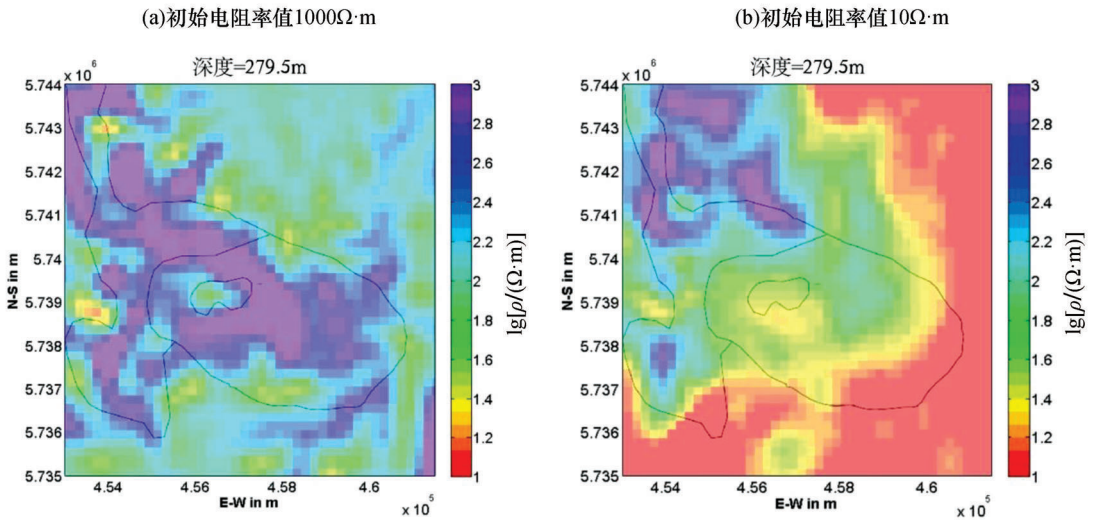


图 9 ZTEM 不同初始电阻值反演电阻率等值线切片对比^[14]

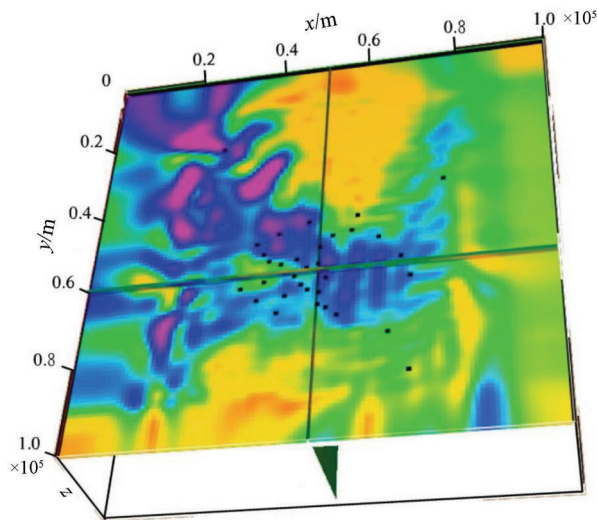


图 10 最终 3D 反演模型^[14]

5 结论

通过以上对 ZTEM 与地面 MT 方法的讨论,总结得出以下几点结论:

1) 实例验证了 ZTEM 方法对横向不均匀体边界反映的有效性和准确性,并且可以对地下构造进行 x, y, z 三个方向的三维推断和解释,对以往的资料分析解释是个新的拓展。同时航空电磁法改变了传统的人海战术找矿模式,在面积复杂地形条件下开展快速、高效的找矿工作,这一优势是地面方法无法比拟的。

2) 通过对 ZTEM 与 MT 从方法原理到主要测量参数等几个方面的对比分析,基本了解了两种方法的特点及其解释结果中各自的主要侧重点。两种方法反演结果较为吻合,同时 ZTEM 数据反映较为

宏观,MT 数据则反映了更深的信息。

3) 将 ZTEM 航空测量与地面 MT 测量有机联合起来,点面结合,进行矿产勘查是十分可行的。两种方法各自在矿产勘查工作中的应用效果有目共睹,将两者结合起来,即使是在地形复杂区、植被覆盖区等以往地面方法难以施工的地区,也能利用 ZTEM 进行大面积的快速测量,再在重点地段进行少量的辅助性 MT 测点,获得丰富的深部地质信息,快速地对该区域的地质环境进行准确了解,从而为矿产资源勘查提供重要的信息,加快矿产勘查的步伐,缩短勘查周期,有效地降低勘查成本。

综上所述,随着我国矿产资源勘查手段的改革与发展,更深、更快、更准确是其前进的方向,航空和地面天然场电磁法联合开展深部矿产勘探的思路不但十分可行,而且迫在眉睫,如能在国内大力推广,可为我国找矿突破行动提供必要的技术支撑,将会把我国大深度多金属矿产资源勘查事业推向一个更高、更广阔的平台。

参考文献:

[1] 席振铎.人工源频率倾子测深法[D].长沙:中南大学,2013.
 [2] 甘佳雄. MT 倾子响应的有限元模拟及影响因素分析[D].长沙:中南大学,2012.
 [3] 吴頔,严家斌,贺文根. 倾子对异常体的分辨能力及影响因素研究[J].地球物理学进展,2012,27(6):2656-2663.
 [4] 胡文宝,苏朱刘,陈清礼,等. 倾子资料的特征及应用[J].石油地球物理勘探,1997,32(2):202-212.
 [5] 徐凌华,甘佳雄,柳建新,等. MT 倾子响应的影响因素分析[J].物探化探计算技术,2013,35(4):430-434.
 [6] 陈小斌,赵国泽,詹艳,等.磁倾子矢量的图示分析及其应用研究[J].地学前缘,2004,11(4):626-636.
 [7] 余年,王绪本,阚媛珂,等.倾子和视倾子的研究及在断裂解释

- 中的应用[J].工程地球物理学报,2007,4(4):275-281.
- [8] 陈军营,林长佑,王书明,等.电偶源频率电磁测深视电阻率多参量联合反演效果检验[J].西北地震学报,2001,23(3):279-285.
- [9] Geotech Ltd. ZTEM Tipper AFMAG results over Mt. Milligan Copper-Gold porphyry deposit[R].Canada,2009.
- [10] Pascal P, Jean M L. Ground IP-Resistivity, and airborne Spectrem and helicopter ZTEM survey results over Pebble copper-moly-gold porphyry deposit, Alaska[C]//SEG Denver 2010 Annual Meeting,2010.
- [11] Carlos I, Jean L, Cristiano F. ZTEM airborne Tipper AFMAG results over the Copaqueire Porphyry, northern Chile[C]//SBGf -Sociedade Brasileira de Geofísica.The 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society,2011.
- [12] Brian K Janes. 金属分带在斑岩铜矿体系金勘探中的应用[J].国外火山地质,1993,38(2):67-77.
- [13] Geotech Ltd. Report on a helicopter-borne Z-Axis tipper electromagnetic(ZTEM) and Aeromagnetic geophysical survey [R]. Ontario,Canada, 2015.
- [14] Juliane H, Martyn U. Characterizing porphyry Cu-deposits with airborne ZTEM and ground MT data[R].2014.
- [15] Wannamaker P E, Legault J M. ZTMT2DIV: Two-dimensional joint inversion of ZTEM and MT plane-wave EM data including topography [R].2014.

Deep mineral exploration by airborne and ground natural field electromagnetic methods

ZHAO Cong^{1,2,3}, ZHU Lin^{1,2}, LI Huai-Yuan^{1,2}, JIANG Min-Zhong^{1,2},
LUO Yan^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2,3}, HE Xin-Xin^{1,2}

(1. Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002, China; 2. Key Laboratory of Uranium Resources Geophysical Exploration Technology, China Nuclear Industry Group Company, Shijiazhuang 050002, China; 3. College of Nuclear Engineering and Geophysics, East China Institute of Technology, Fuzhou 344000, China)

Abstract: This paper describes the theory, equipment and applications of airborne natural electromagnetic system (ZTEM) and comparatively summarizes the measuring parameters, exploration results and working efficiency of both airborne natural EM and ground MT methods. The local-regional exploration scheme of combining airborne EM and ground MT method is proposed based on the above discussion. The ZTEM system is used for rapid survey in large area, thus ground MT is used to follow up the interested points in accessible area and provide a reference for data inversion of a ZTEM survey so as to ensure that the final exploration results truly represent the geological bodies in the whole area. It can provide advanced technologies for rapid and effective exploration in high mountainous, forest-cover, water-cover and environmental protection areas in China.

Key words: ZTEM; MT; natural field electromagnetic method; tipper vector; resistivity; deep minerals; rapid exploration; remote and difficult areas; environmental protection

作者简介: 赵丛(1985-),男,汉族,工程师,2008年毕业于成都理工大学勘查技术与工程专业,现于东华理工大学硕士在读,主要从事地面物化探生产与研究。E-mail:348936541@qq.com