

陈伟, 王志宏, 祁平, 孙栋华, 张伟盟, 程莎莎, 彭莉红, 骆燕. 2025. 基于导纳张量的航空大地电磁测量技术及应用[J]. 地球与行星物理论评 (中英文), 56(6): 682-688. doi: 10.19975/j.dqyxx.2024-043.

Chen W, Wang Z H, Qi P, Sun D H, Zhang W M, Cheng S S, Peng L H, Luo Y. 2025. Airborne magnetotelluric measurement technology and application based on admittance tensor[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 56(6): 682-688 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyxx.2024-043.

基于导纳张量的航空大地电磁测量技术及应用

陈伟^{1,2,3}, 王志宏^{1,2,3*}, 祁平^{1,2,3}, 孙栋华^{1,2,3}, 张伟盟^{1,2,3},
程莎莎^{1,2,3}, 彭莉红^{1,2,3}, 骆燕^{1,2,3}

1 核工业航测遥感中心, 石家庄 050002

2 河北省航空探测与遥感技术重点实验室, 石家庄 050002

3 中核集团铀资源地球物理勘查技术中心重点实验室, 石家庄 050002

摘要: 航空大地电磁法是一种测量天然电磁场的机载频率域电磁法, 它具有探测深度大、测量效率高、受地形影响小、绿色环保等优点. 本文简要介绍了航空大地电磁法的发展历史及其测量原理, 在此基础上介绍了导纳张量的基本概念以及利用导纳张量进行航空大地电磁测量的工作方法, 最后将其应用于复杂地形条件下的工程勘察中, 结合反演电阻率和磁化率特征, 实现了对岩体、断裂构造的有效探测. 应用实例表明基于导纳张量的航空大地电磁法对地电边界敏感, 可用于复杂环境区近地表和深层结构的探测.

关键词: 航空大地电磁法; 导纳张量; 电阻率反演

doi: 10.19975/j.dqyxx.2024-043

中图分类号: P318

文献标识码: A

Airborne magnetotelluric measurement technology and application based on admittance tensor

Chen Wei^{1,2,3}, Wang Zhihong^{1,2,3*}, Qi Ping^{1,2,3}, Sun Donghua^{1,2,3}, Zhang Weimeng^{1,2,3},
Cheng Shasha^{1,2,3}, Peng Lihong^{1,2,3}, Luo Yan^{1,2,3}

1 Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002, China

2 Key Laboratory of Airborne Survey and Remote Sensing, Hebei Province, Shijiazhuang 050002, China

3 Key Laboratory of Uranium Resources Geophysical Exploration Technology, Shijiazhuang 050002, China

Abstract: Airborne magnetotelluric method is an airborne frequency-domain electromagnetic method that measures the natural electromagnetic fields. It has the advantages of great detection depth, high measurement efficiency, minimal terrain influence, and being environmentally friendly. This paper briefly introduced the development history and measurement principles of airborne magnetotelluric method. Then introduced the basic concept of admittance tensor and the working methods of airborne magnetotelluric measurement using admittance tensor. Finally, this method was applied to engineering surveys under complex terrain conditions. By analyzing the characteristics of inversion resistivity and magnetic susceptibility, effective detection of rock masses and fracture structures was achieved. Application example showed that the airborne magnetotelluric method based on the admittance tensor is sensitive to geoelectric boundary and can be used for detecting near-surface and deep structures in complex environmental areas.

Keywords: airborne magnetotelluric method; admittance tensor; resistivity inversion

收稿日期: 2024-09-30; 录用日期: 2025-01-07

基金项目: 河北省航空探测与遥感重点实验室科研资助项目 (246790127H)

Supported by the Research Project of Key Laboratory of Airborne Survey and Remote Sensing (Grant No. 246790127H)

第一作者: 陈伟 (1990-), 男, 工程师, 主要从事航空及地面电磁法的生产研究工作. E-mail: 18631107945@briug.com

*通信作者: 王志宏 (1973-), 男, 正高级工程师, 主要从事航空物探的生产研究工作. E-mail: wzhsjz@163.com



0 引言

航空大地电磁法是以全球范围内雷电活动引起的天然电磁场信号作为场源, 通过观测天然电磁场的强度变化, 来研究地下构造和解决地质环境问题的一种航空物探测量方法. 作为一种被动源的频率域电磁勘探方法, 航空大地电磁法具有探测深度大、工作效率高、数据采集受地形影响小等优点, 近年来得到了快速的发展, 在矿产勘查、工程勘察以及深部地质构造探测等方面成果显著 (Alexander et al., 2024a; 贾世豪等, 2025; Juliane et al., 2015; 李坚, 2020; Lo and Zang, 2008; Sattel et al., 2019; 王志宏等, 2020; 赵从等, 2016).

与传统地面大地电磁测量方法不同, 航空大地电磁法采用机载平台搭载电磁测量设备来进行探测, 适宜在人员难以到达的复杂地形地貌区 (高山、荒漠、沼泽等) 进行面积性勘探. 由于在空中探测无法接地, 因此空中只采集感应磁场分量. 第一个航空音频磁场测量系统 (AFMAG) 由 Ward 开发, 其通过飞机拖曳两个正交线圈测量两个频率下垂直磁场和水平磁场的比值, 来推断地下电性介质的构造情况 (Ward, 1959). 由于仅测磁场, 因此避免了由于电场畸变引起的静态效应问题. 但由于天然场源的微弱性、随机性、极化不确定性, 导致测量结果的误差与试验区域、工作时间存在很大的关系, 这限制该方法的推广与应用. 2006 年, 加拿大 Geotech 公司在音频磁场法的基础上开发了 Z 轴倾子电磁法 (ZTEM). 考虑到地下介质的感应信号主要由横向电阻率变化引起, 该方法通过空中接收线圈测量垂直磁场分量, 在地面基站测量两相互垂直的水平磁场分量 (天然场源可以看成是垂直入射的平面波, 磁场的水平分量在一定范围内可以近似为均匀, 故整个工作区可使用某一点的水平磁场来表征), 最后求取倾子矢量, 获得地下介质的电性结构信息 (Lo and Zang, 2008). 由于感应信号主要由地下介质的横向电阻率变化引起, 因此该方法对水平层状地质构造反映不明显. 2018 年, 加拿大 EGL 公司研发了 Mobile MT 系统, 并在加拿大、美国等国家成功开展了地质矿产勘查工作, 取得了较好的成果 (Alexander et al., 2022). 其采用地面基站测量两电场水平分量, 空中接收线圈测量三个正交的磁场分量, 最后通过电磁场的线性关系求取导纳张量, 获得地下地质体的电阻率分布情况.

国外对航空大地电磁法的研究比较成熟, 国内

由于缺乏成熟的测量系统, 研究多集中在理论、数值模拟阶段. 李志强 (2016) 采用数据空间 OCCAM 反演算法实现了 ZTEM 倾子响应的三维反演; 张铭等 (2018) 通过有限元法实现了倾子响应的正演模拟, 分析了倾子响应的影响因素, 并提出了一种利用倾子及其梯度对地下异常体进行快速、定量识别解释的方法; 许智博和谭捍东 (2019) 实现了起伏地形下 ZTEM 倾子响应的二维正反演; 刘彦涛等 (2021) 通过三维有限元算法实现了倾子响应的正演模拟, 并分析了典型地电模型的航空大地电磁倾子响应特征; Cao 等 (2022) 使用非结构化四面体网格的有限元和 L-BFGS 法实现了 ZTEM 倾子数据的三维正反演, 并通过模型试验和西藏某隧道的实测数据验证了算法的正确性. 目前, 国内对航空大地电磁的研究主要是基于 Z 轴倾子电磁法. 受限于测量飞行速度、系统采样率、天然场信号的强度以及噪声, 该方法可用的频带宽在 25~720 Hz 之间. 由于测量飞行过程中空中接收线圈姿态的不稳定性, 导致需要对测量数据进行姿态校正.

本文介绍了一种新的航空大地电磁测量方法, 其结合了地面大地电磁法和 Z 轴倾子电磁法的观测方式, 使用地面基站采集电场水平分量, 在空中测量三个正交的垂直磁场分量. 与 Z 轴倾子电磁法相比, 在地面基站观测电场代替磁场, 观测数据的信噪比更高, 而且可以通过改变电极距来控制天然场信号的强度. 本文首先介绍了导纳张量的基本概念, 在此基础上介绍了基于导纳张量进行航空大地电磁测量的工作方法, 最后将其应用于复杂地形条件下的工程勘察中, 实现了对断裂构造、岩体的有效探测.

1 导纳张量概念

在一般情况下, 电场水平分量与磁场的水平和垂直分量之间存在线性关系, 它们之间通过阻抗张量和倾子矢量联系起来 (陈乐寿和王光镔, 1990; Vozoff, 1972):

$$E_x = Z_{xx}H_x + Z_{xy}H_y \quad (1)$$

$$E_y = Z_{yx}H_x + Z_{yy}H_y \quad (2)$$

$$H_z = T_{zx}H_x + T_{zy}H_y \quad (3)$$

式中, E_x 、 E_y 为 x 、 y 方向上的电场分量, H_x 、 H_y 、 H_z 为 x 、 y 、 z 方向上的磁场分量, Z_{xx} 、 Z_{xy} 、 Z_{yx} 、

Z_{yy} 和 T_{zx} 、 T_{zy} 分别为阻抗张量分量和倾子矢量分量.

在上述表达式中, 假设垂直电场分量为零, 并且磁场垂直分量对电场的影响可以忽略不计. 然而当地下介质为良导体时, 在良导体附近会产生强的二次垂直磁场, 该垂直磁场分量也会对电场起作用 (Shireesha and Harinarayana, 2011). 此时, 电场和磁场的矢量关系可以表示为 (胡祥云和金钢变, 2018):

$$E_x = T_{xx}H_x + T_{xy}H_y + T_{xz}H_z \quad (4)$$

$$E_y = T_{yx}H_x + T_{yy}H_y + T_{yz}H_z \quad (5)$$

可以看出, 电场两水平分量与三个正交磁场分量线性相关, 用电场水平分量来表述磁场分量, 并写成矩阵形式, 有:

$$\begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{xx} & Y_{xy} \\ Y_{yx} & Y_{yy} \\ Y_{zx} & Y_{zy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, H_x 、 H_y 、 H_z 为磁场水平和垂直分量, E_x 和 E_y 为电场水平分量, Y 为导纳张量, 其物理意义为

电场水平分量在磁场三个分量空间中的投影.

2 基于导纳张量的航空大地电磁测量工作方法

基于导纳张量的航空大地电磁测量系统由空中机载测量设备、地面基站、航磁测量设备、GPS 定位设备以及雷达高度计等组成. 其中空中机载测量设备由三个直径 1.4 m 的正交感应线圈组成, 用于测量感应磁场的三分量, 测量过程中空中机载测量设备吊挂在直升机下方约 97 m 处. 地面基站由电极距为 100 m 的四对独立正交接地电极组成, 测量两个相互垂直方向上的电场和参考电场信号, 参考电场信号用来消除电场信号中的噪声影响 (Labson et al., 1985). 航磁测量设备安装在直升机下方约 77 m 处, 在航空电磁数据采集的同时进行航磁综合测量. 数据采集时直升机沿地形起伏飞行, 飞行速度控制在 80~100 km/h, 系统的采样率为 73 728 Hz. 航空大地电磁测量的工作方式见图 1.

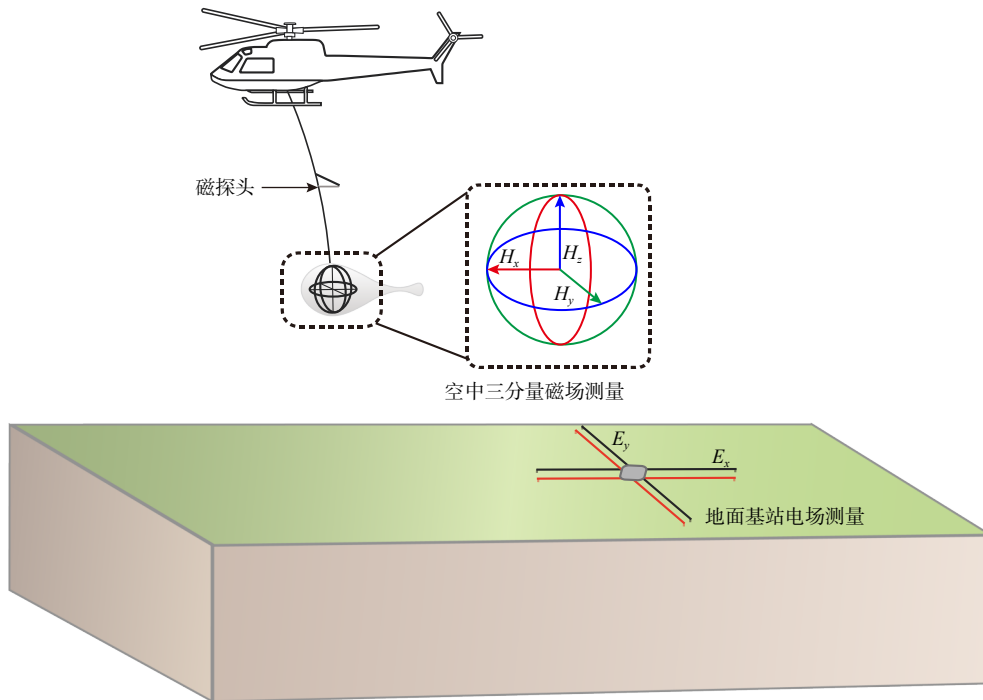


图 1 基于导纳张量的航空大地电磁测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of airborne magnetotelluric electromagnetic measurement based on admittance tensor

对采集的电磁场数据, 基于电场分量与磁场分量的线性关系, 对观测的两个水平电场分量和三个磁场分量数据进行处理, 求取导纳张量响应, 以此来求得不同频率的视电阻率值, 最后进行反演计算得到地下介质的电性结构信息. 数据处理流程见图 2.

首先通过 GPS 时间同步将空中接收线圈采集的三个正交的磁场分量数据和地面基站测量的两个电场分量数据进行合并, 然后对合并后的数据进行去噪及快速傅里叶变换, 将其转换到频率域. 之后通过电场和磁场分量之间的线性关系, 采用 MT 响

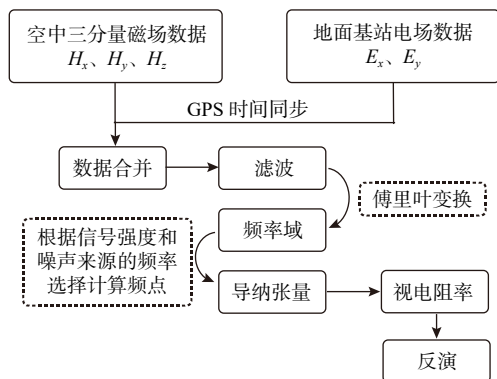


图 2 数据处理流程

Fig. 2 Data processing workflow

应函数的处理方式, 计算得到一系列连续频率窗口中的导纳张量, 频率窗口及其中心根据天然场信号强度及噪声水平来确定 (Alexander et al., 2024b)。

不同频率视电阻率值的计算表达式为 (Alexander et al., 2022, 2024b):

$$\rho_a = \frac{1}{\omega \mu |Y^2|} \quad (7)$$

式中, $Y^2 = \text{im}(Y^2)/\text{re}(Y^2)$, μ 为自由空气磁导率, $\omega = 2\pi f$ 为角频率。对获取的不同频率的视电阻率, 采用 MARE2DEM 反演算法进行二维反演获得反演结果, 进而获得地下介质的电性结构信息 (Key, 2016)。

3 应用实例

3.1 试验区概况

试验区位于新疆天山以北, 属高海拔复杂地形区, 区内高差起伏大且人迹罕至, 常规的地面物探工作难以开展。试验区西侧主要出露安山质凝灰岩、火山角砾岩以及古元古界深变质岩系等, 东侧岩浆岩分布广泛, 主要出露花岗岩、花岗斑岩以及二长花岗岩等, 多呈似圆状的岩基产出。区内总体构造方向为北东向, 断裂规模较大, 控制着地层发育、地貌格局展布特征。试验区地质图见图 3。

3.2 岩矿石物性特征

试验区及周边主要地层对应的岩石物性参数统计见表 1 (余学中, 2016)。由表 1 可知: 第四系残坡积物主要表现为低阻弱磁特征, 凝灰岩整体表现为中阻弱磁特征, 花岗岩表现为中高阻弱磁特征, 二长花岗岩表现为高阻中强磁特征, 闪长玢岩表现为中高阻强磁特征。试验区不同岩石之间存在一定的物性差异, 为区内开展航空大地电磁法工作提供了物性前提。

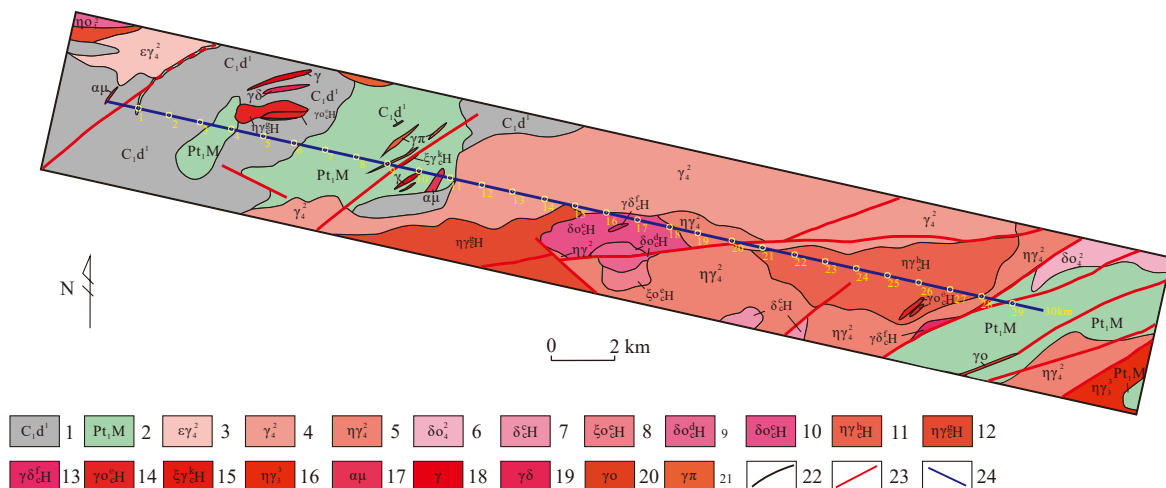


图 3 试验区地质图。1-下石炭统大哈拉军山组; 2-木扎尔特岩群; 3-华力西中期正长花岗岩; 4-华力西中期中细粒花岗岩; 5-华力西中期中细粒二长花岗岩; 6-石英闪长岩; 7-闪长岩; 8-石英正长岩; 9-中细粒石英闪长岩; 10-中细粒石英闪长岩; 11-似斑状中细粒二长花岗岩; 12-中细粒二长花岗岩; 13-中细粒花岗闪长岩; 14-中细粒斜长花岗岩; 15-中细粒钾长花岗斑岩; 16-加里东晚期中细粒二长花岗岩; 17-安山玢岩脉; 18-花岗岩脉; 19-花岗闪长岩脉; 20-斜长花岗岩脉; 21-花岗斑岩脉; 22-地质界线; 23-断裂; 24-测线

Fig. 3 Geological map of the test area. 1-Lower Carboniferous Dahalajunshan Formation; 2-Muzart Rock Group; 3-Hercynian Syenogranite; 4-Hercynian Medium-fine-grained Granite; 5-Hercynian Medium-fine-grained Monzonite Granite; 6-Quartz Diorite; 7-Diorite; 8-Quartz Syenite; 9-Medium-fine-grained Quartz Diorite; 10-Fine-grained Quartz Diorite; 11-Porphyritic Medium-fine-grained Monzonite Granite; 12-Medium-fine-grained Monzonite Granite; 13-Medium-fine-grained Granodiorite; 14-Medium-fine-grained Plagiogranite; 15-Medium-fine-grained Potassium Feldspar Granite Porphyry; 16-Caledonian Late Medium-fine-grained Monzonite Granite; 17-Andesite Porphyrite Vein; 18-Granite Vein; 19-Granodiorite Vein; 20-Plagiogranite Vein; 21-Granite Porphyry Vein; 22-Geological Boundary; 23-Fault; 24-Survey Line

表 1 试验区岩石物性参数统计表

Table 1 Statistical table of rock physical parameters in test area

岩性	电阻率/($\Omega \cdot m$)	磁化率/(10^{-5} SI)
第四系坡残积物	10~200	13~297, 平均值35
凝灰岩	500~4000	21~400, 平均值43
花岗岩	1000~15000	10~334, 平均值33
二长花岗岩	6500~16000	41~4273, 平均值579
闪长玢岩	2500~7800	19~5432, 平均值1056

3.3 资料解释

对采集的航空大地电磁和航磁数据分别进行反演得到试验区的反演电阻率和磁化率特征。图 4 为试验区反演结果的三维显示图，三维体 A 为电阻率反演结果，三维体 B 为磁化率反演结果，从图中可以看出，试验段北西段整体表现为低阻、中等磁化率特征；中段电阻率相对较高，同时伴随着强

磁化率特征；南东段整体表现为中低电阻率、弱磁化率特征。

图 5 为试验区中部某剖面的反演电阻率和反演磁化率断面图，剖面位置与对应的飞行轨迹如图 4A 所示。从图 5 中可以看出：在 541 100~548 000 m 段，反演电阻率值一般小于 $3000 \Omega \cdot m$ 、反演磁化率一般小于 300×10^{-5} SI，整体表现为低阻、低磁化率特征，推测该段主要为下石炭统大哈拉军山组角砾凝灰岩、凝灰岩等的反映；在 548 000~551 500 m 段，整体表现为中阻、中等磁化率特征，反演电阻率值在 $2000 \sim 4000 \Omega \cdot m$ 、反演磁化率在 $(400 \sim 600) \times 10^{-5}$ SI，推断该段主要为斜长片麻岩、花岗片麻岩的反映；在 551 500~556 000 m 段，主要表现为中阻、强磁化率特征，反演电阻率值在 $3000 \sim 6000 \Omega \cdot m$ 、反演磁化率一般大于 600×10^{-5} SI，局部可达 1600×10^{-5} SI，推断该段主要为花岗斑岩及

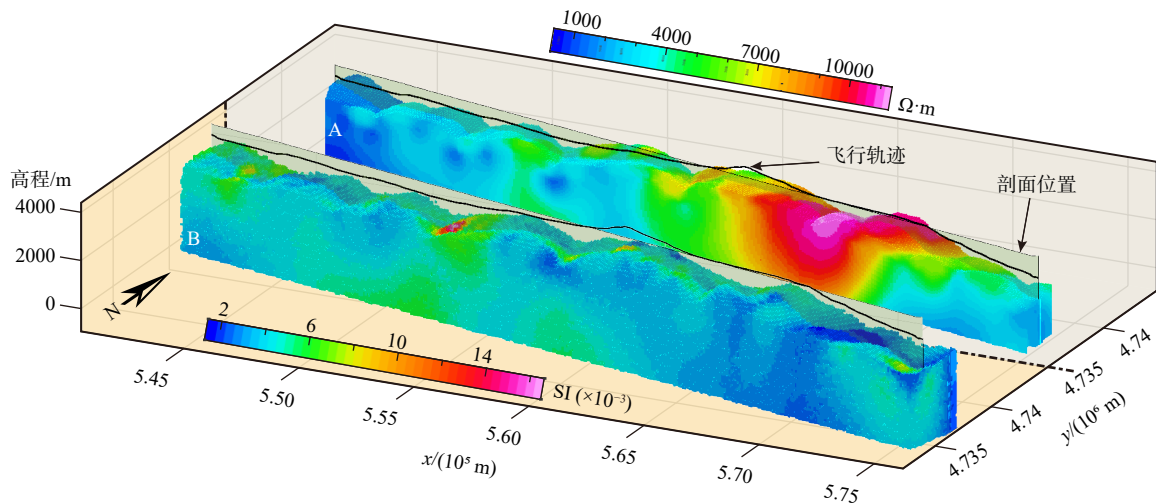


图 4 试验区反演电阻率和磁化率 3D 显示图

Fig. 4 3D map of inversion resistivity and magnetic susceptibility in the test area

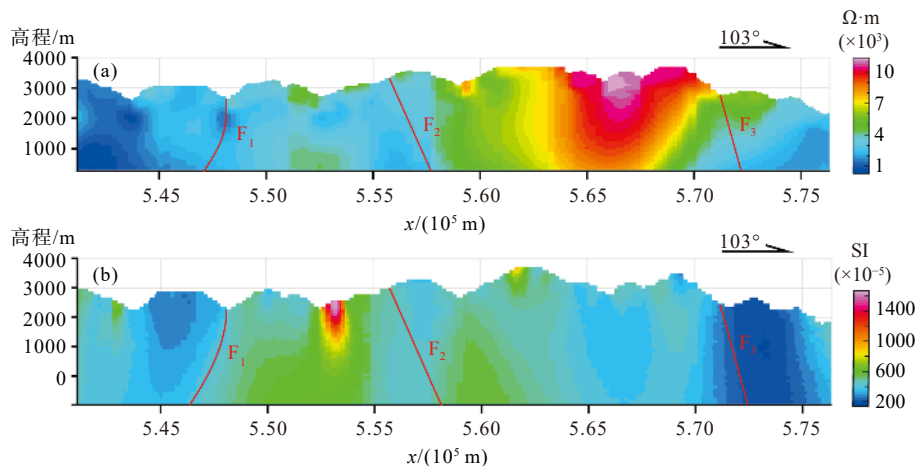


图 5 反演电阻率 (a) 与磁化率 (b) 剖面图

Fig. 5 Cross-section of inversion resistivity (a) and inversion magnetic susceptibility (b)

闪长玢岩的反映; 556 000~571 300 m 段, 反演电阻率整体以中高阻、中高磁化率为主, 反演电阻率值一般大于 $4\,500\ \Omega\cdot\text{m}$ 、反演磁化率一般大于 $350\times 10^{-5}\ \text{SI}$, 推测该段主要为二长花岗岩、石英闪长岩的反映, 其中在 565 000~568 500 m 段反演电阻率断面表现为中高阻, 反演磁化率表现为低磁化率特征, 推测为花岗岩的反映; 571 300~576 300 m 段, 该段整体以中低阻、低磁化率特征为主, 反演电阻率一般在 $2\,700\sim 3\,500\ \Omega\cdot\text{m}$ 之间、反演磁化率一般小于 $250\times 10^{-5}\ \text{SI}$. 推测该段主要为斜长片麻岩、花岗片麻岩的反映. 在 548 000 m、556 000 m 及 571 300 m 等 3 处反演电阻率和反演磁化率表现为明显的等值线梯度密集带, 推断解释为断裂. 以上推断解释的岩体、断裂与地质资料均有着较好的对应关系.

4 结 论

(1) 基于导纳张量的航空大地电磁测量方法, 相较于传统的地面物探, 在保证较高分辨率和强机动性的前提下, 能够实现更高效的数据采集, 同时还能够保证较大的探测深度, 适用于复杂地形条件区的面积性勘探.

(2) 基于导纳张量的航空大地电磁测量方法, 相较于 Z 轴倾子电磁法, 在地面基站观测电场代替磁场, 观测数据的信噪比更高, 而且可以通过调整电极距来控制天然信号的强度, 观测的频点数更多, 有着较好的纵向分辨率.

(3) 应用实例表明, 基于导纳张量的航空大地电磁测量技术, 在探测岩体和断裂构造上具有较好的效果, 综合航磁信息, 有了更多定性的量化参数, 可以有效地对岩体、断裂构造进行识别, 减小了反演解释中的不确定性. 基于导纳张量的航空大地电磁测量技术不仅在工程勘察领域具有较好的应用效果, 未来也有望在复杂地形条件下的矿产勘查领域发挥重要作用, 同时也可扩展到其他地球物理勘探领域, 如地下水探测、环境监测等.

致谢

感谢审稿专家提出的修改意见及编辑部的大力支持.

References

Alexander P, Andrei B, Petr K, et al. 2022. Natural field airborne electromagnetics-History of development and current exploration cap-

abilities[J]. *Minerals*, 12(5): 583.

Alexander P, Andrei B, Petr K. 2024a. Airborne natural total field broadband electromagnetics—Configurations, capabilities, and advantages[J]. *Minerals*, 14(7): 704.

Alexander P, Andrei B, Robert W, et al. 2024b. Detecting and recovering critical mineral resource systems using broadband total-field airborne natural source audio frequency magnetotellurics measurements[J]. *Geophysics*, 89(1): 13-23.

Cao X Y, Huang X, Yin C C, et al. 2022. 3-D inversion of Z -axis tipper electromagnetic data using finite-element method with unstructured tetrahedral grids[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 1-11.

Chen L S, Wang G E. 1990. Magnetotelluric Sounding Method[M]. Beijing: Geological Press, 110-124 (in Chinese).

Hu X Y, Kim K. 2018. A trial for introducing 6-element tensor impedance in magnetotelluric method and its application[J]. *Earth Science*, 43(10): 3399-3406 (in Chinese).

Jia S H, Li Y, Gong S P, et al. 2025. Application of comprehensive electromagnetic methods in the search for copper-nickel polymetallic ores in shallow-covered areas: A case study of the Jing'erquan Area in the east Tianshan Mountains of Xinjiang[J]. *CT Theory and Applications*, 34(3): 392-400 (in Chinese).

Juliane H, Benjamin M L, Liu L J, et al. 2015. Three-dimensional imaging of a Ag-Au-rich epithermal system in British Columbia, Canada, using airborne z -axis tipper electromagnetic and ground-based magnetotelluric data[J]. *Geophysics*, 81(1): 1-12.

Key K. 2016. MARE2DEM: A 2D inversion code for controlled-source electromagnetic and magnetotelluric data[J]. *Geophysical Journal International*, 207(1): 571-588.

Labson V F, Becker A, Morrison H F, et al. 1985. Geophysical exploration with audiofrequency natural magnetic fields[J]. *Geophysics*, 50: 656-666.

Li J. 2020. Application of airborne electromagnetic method in tunnel exploration in Sichuan-Tibet railway[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 259(4): 1-5 (in Chinese).

Li Z Q. 2016. Research on ZTEM three-dimensional forward modeling and inversion[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese).

Liu Y T, Peng L H, Sun D H, et al. 2021. Research on response characteristics of airborne magnetotelluric tipper based on three-dimensional finite element[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 45(5): 1329-1337 (in Chinese).

Lo B, Zang M. 2008. Numerical modeling of Z -TEM (Airborne AFMAG) responses to guide exploration strategies[C]//78th Society of Exploration Geophysicists International Exposition and Annual Meeting, 1098-1102.

Sattel D, Witherly K, Kaminski V. 2019. A brief analysis of MobileMT data[C]// 89th Annual International Meeting, SEG, 2138-2142.

Shireesha M, Harinarayana T. 2011. Processing of magnetotelluric data - a comparative study with 4 and 6 element impedance tensor elements[J]. *Applied Geophysics*, 8(4): 285-292.

Vozoff K. 1972. The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins[J]. *Geophysics*, 37(1): 98-141.

Wang Z H, Jiang M Z, Peng L H, et al. 2020. The application of aeromagnetotelluric survey technology to Dandong area Liaoning Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 44(4): 734-

- 741 (in Chinese).
- Ward S H. 1959. AFMAG—Airborne and ground[J]. *Geophysics*, 24: 761-787.
- Xu Z B, Tan H D. 2019. Two-dimensional nonlinear conjugate gradient inversion of ZTEM[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 43(2): 393-400 (in Chinese).
- Yu X Z. 2016. The characteristics of regional aeromagnetic & satellite gravity data and regional metallogenic environments, western Tianshan, China[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese).
- Zhang M, Liu C S, Kang L L, et al. 2018. Two-dimensional ground structure detection method based on the tipper characteristics of airborne magnetotelluric[J]. *Progress in Geophysics*, 33(3): 1303-1312 (in Chinese).
- Zhao C, Zhu L, Li H Y, et al. 2016. Deep mineral exploration by airborne and ground natural field electromagnetic methods[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 40(2): 333-341 (in Chinese).
- 附中文参考文献
- 陈乐寿, 王光镠. 1990. 大地电磁测深法[M]. 北京: 地质出版社.
- 胡祥云, 金钢燮. 2018. 大地电磁六元素张量阻抗理论及其应用[J]. *地球科学*, 43(10): 3399-3406.
- 贾世豪, 李勇, 龚胜平, 等. 2025. 磁法和电法联合探测在浅覆盖区寻找铜镍多金属矿的应用——以新疆东天山镜儿泉地区为例[J]. *CT 理论与应用研究(中英文)*, 34(3): 392-400.
- 李坚. 2020. 航空电磁法在川藏铁路隧道勘探中的应用[J]. *铁路工程学报*, 259(4): 1-5.
- 李志强. 2016. ZTEM 三维正反演研究[D]. 北京: 中国地质大学.
- 刘彦涛, 彭莉红, 孙栋华, 等. 2021. 基于三维有限元的航空大地电磁倾子响应特征[J]. *物探与化探*, 45(5): 1329-1337.
- 王志宏, 江民忠, 彭莉红, 等. 2020. 航空大地电磁法在辽宁省丹东地区的应用[J]. *物探与化探*, 44(4): 734-741.
- 许智博, 谭捍东. 2019. ZTEM 二维非线性共轭梯度反演研究[J]. *物探与化探*, 43(2): 393-400.
- 余学中. 2016. 新疆西天山区域航磁重力特征与成矿环境[D]. 北京: 中国地质大学.
- 张铭, 刘长胜, 康利利, 等. 2018. 基于航空大地电磁倾子特征的二维大地结构探测方法[J]. *地球物理学进展*, 33(3): 1303-1312.
- 赵从, 朱琳, 李怀渊, 等. 2016. 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*, 40(2): 333-341.