doi: 10.11720/wtyht.2022.1196

杨波,孙栋华.东天山某环状熔融岩体航空电磁场特征及深部找矿研究[J].物探与化探,2022,46(4):816-823.http://doi.org/10.11720/wtyht. 2022.1196

Yang B, Sun D H. Airborne electromagnetic characteristics and deep prospecting of a ringed molten rock mass in eastern Tianshan [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(4): 816-823. http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1196

东天山某环状熔融岩体航空电磁场特征 及深部找矿研究

杨波^{1,2,3}.孙栋华^{1,2,3}

(1.核工业航测遥感中心,河北石家庄 050002;2.河北省航空探测与遥感技术重点实验室,河北石家庄 050002;3.中核集团铀资源地球物理勘查技术中心(重点实验室),河北石家庄 050002)

摘要:新疆东天山某环状熔融岩体与金铅锌矿成矿关系密切,已知矿化产于岩体与地层外接触带附近的断裂破碎带中,需要查明岩体空间展布特征以及断裂构造发育情况。通过对实测的1:2.5 万高精度航空瞬变电磁和航磁数据的处理和分析,可知环状熔融岩体在航磁上表现为正、负相间排列的环状磁场面貌;沿环状熔融岩体出现了4片NWW向展布的条带状电磁响应强烈区,时间常数一般为0.07~0.18 ms。以dB/dt X 分量第23 道的电磁响应高值带和5~10 nT 航磁磁异常带为标志,推断解释了NWW向断裂7条。综合航空电、磁特征及磁矢量三维反演结果,对研究区岩性、构造重新进行了推断解释,大致查明闪长岩体的三维空间展布特征。结合已知矿成矿地质条件和航空电、磁特征,在环状熔融岩体的西部和西南部的电磁响应强烈区圈定了2 片找矿有利地区。本次研究为该岩体的深部找矿提供了重要资料。

0 前言

新疆东天山地区是我国重要的金铅锌铜镍铁等 矿产资源的产地^[1-3]。前人研究认为该地区的金及 铁铜多金属矿主要形成于石炭纪—二叠纪^[4],其中 已发现的多数矿产与同时期侵入的环状熔融岩体有 关^[5]。环状熔融岩体,又称环状岩体或环状杂岩 体,其形态近似环状,由内向外岩性分带明显,一般 位于区域性深大断裂边缘,是特定地质事件的产 物^[4-7]。研究环状熔融岩体分布的特征,对于揭示 区域地质背景和成矿地质条件具有重要意义。

本文研究的环状熔融岩体位于新疆东天山卡瓦 布拉克深大断裂南缘。前人已经在岩体北缘与地层 的外接触带中发现了金铅锌矿体,认为该岩体不仅 是重要的矿源层,也是含矿热液的主要来源,岩体的 形成发展过程即是矿液运移、沉淀、富集的过程,岩体与矿化关系十分密切^[8]。因此,查明岩体的空间 展布特征以及断裂构造发育情况,是围绕该岩体下 一步找矿的关键。

大部分学者使用地面磁法和重力来探测岩体, 通过对磁法或重力数据单独反演或是磁、重联合反 演,得到深部磁性、密度结构来查明岩体的空间展布 特征^[9-12];也有学者在此基础上增加了可控源音频 大地电磁测深方法,从电性角度更加精细刻画了岩 体的深部结构^[13-14]。另外,也有学者使用地面磁法 +地震勘探+大地电磁测深综合方法^[15],或者使用重 力+地震勘探+大地电磁测深综合方法^[16]来探测岩 体的深部延伸情况。航空瞬变电磁法作为近年来取 得突破发展的一种新技术、新方法,具有测量效率 高、精度高、速度快、成本低、绿色环保等优势^[17],其 与常规的航空磁法一起已经在隐伏岩体的识别、构

收稿日期: 2021-04-08; 修回日期: 2021-11-01

第一作者:杨波(1984-),男,硕士,高级工程师,主要从事航空地球物理勘探及研究工作。Email: yangbo4100064@163.com

基金项目:新疆维吾尔自治区国土资源厅项目"新疆托克逊县铜花山-彩华沟一带1:2.5万航空 TEM 测量"(新国土资函[2015]623号)

造的推断解释以及低阻多金属矿产的勘查等方面取 得了较好的效果^[18-23]。

航空瞬变电磁测量原理是,由飞行器搭载航空 瞬变电磁系统的发射线圈产生的一次磁场,地下介 质由一次磁场激发下产生感应电流,感应电流在一 次场中断后不会马上消失,而是在介质周围空间产 生二次磁场。通过航空瞬变电磁系统的接收线圈采 集二次磁场,对其进行处理和分析即可了解异常体 的导电性、埋深和规模。

本文通过对1:2.5 万高精度航空瞬变电磁和航 磁数据的处理和分析,大致查明了环状熔融岩体的 航空电、磁特征,推断解释了断裂构造平面延伸情 况,圈定了熔融岩体的三维空间展布范围,初步探讨 了环状熔融岩体的形成机制;根据已知矿床的控矿 地质条件,预测了2片供下一步找矿的有利地区。 本次研究为该地区的深部找矿提供了重要资料。

1 研究区地质概况及成矿地质特征

1.1 地质概况

研究区内地层以中泥盆统阿拉塔格组(D₂a)为 主,局部为下泥盆统阿尔彼什麦布拉克组(D₁a)(图 1)。D₂a为一套浅海相碳酸盐岩夹碎屑岩建造,岩 性主要为灰白色、白色中厚层状或块状中粗粒大理 岩、大理岩化灰岩;D₁a岩性主要为变质钙质片岩、 黑云母石英片岩、绿泥石英片岩、大理岩。

环状熔融岩体岩性主要为形成于华力西期的闪 长岩,围岩主要为大理岩。岩体整体呈椭圆形,长轴 近 EW 向,侵入于 D₁a 和 D₂a 中。



1.2 成矿地质特征

在岩体与地层的外接触带——断裂蚀变破碎带 中,已发现4条金铅锌矿体,矿体厚度变化不大,沿 接触带下延伸。矿体主要赋存于 EW 向断裂破碎带 中,主要矿体位于 EW 向断裂弯曲膨大部位,特别是 在断裂面产状由陡变缓的位置,矿体与断裂关系较 为密切,矿体呈脉状分布于岩体的接触带中。闪长 岩体中 Au 平均含量为 12.7×10⁻⁹,高于中国闪长岩 中 Au 平均值(1.0×10⁻¹²)达 12 000 倍以上^[8]。此 外,主要矿化蚀变带均分布于岩体接触带,其枝脉与 大理岩接触部位均有不同程度的蚀变,硅化、褐铁矿 化、酸盐化、绿泥石化等发育普遍。说明闪长岩体不 仅是重要的矿源层,也是含矿热液的主要来源,岩体 的形成发展过程即是环状断裂形成、矿液运移沉淀 富集的过程。由此可见,岩体与矿化关系十分密切。

2 航空瞬变电磁探测技术

2.1 数据来源

选用 VTEM^{plus}系统开展 1:2.5 万时间域电磁测 量,该系统同时搭载高精度铯光泵 822A 磁探头采 集航磁数据^[17,24]。本次使用时间域电磁数据和航 磁数据对环状熔融岩体进行分析。

2.2 数据处理

数据处理包括航电数据处理和航磁数据处理。 航电数据处理主要包括基本处理、B场计算、视电阻 率计算、时间常数计算等,航磁数据处理包括修正处 理、数据调平、总场及水平梯度计算、位场转换处理 和磁性体反演等。

2.2.1 航电时间常数计算

航空瞬变电磁曲线变化速率的大小取决于异常体的电性好坏和几何形态,其电性和几何形态反映在它的时间常数上,因此,异常体的时间常数决定瞬变场衰减速率的大小,是确定异常体电性好坏的重要参数。几何形态相同的矿体,导电性越好,其时间常数越大。

时间常数 τ 的计算方法有很多种,对于 VTEM^{plus}系统观测的数据,通常采用"移动窗口"技 术来计算时间常数 τ(图 2)。计算原理是沿电磁响 应的衰减曲线滑动时间窗口,根据噪声水平和预设 的信号阈值水平,确定最晚期的4个时间道。然后 对最晚的4个时间道进行最小二乘拟合获得时间常 数^[25]。

2.2.2 航电 *X* 分量 Fraser 滤波

在测量过程中若无干扰,实测 X 分量 dB/dt 曲

• 818 •





线的真零交点出现在低阻地质体或含水断裂带上 方,以此来识别和圈定低阻异常体的空间位置。实 际应用中,由于存在地质噪声、相邻地质体及其他 (如输电线路等)干扰因素,以及地形起伏等影响, 往往导致剖面上的过零交点与地下隐伏低阻体实际 位置发生偏移(图 3a),甚至不显示零交点或出现假 零交点。因此,对实测资料尚须进行真、假零交点的 判识及区域背景干扰因素的消除等^[26]。

Fraser 滤波法于 1969 年由 D.C. Fraser 首先提 出,用于处理甚低频(VLF)电磁法数据,其应用的最 基本条件是场源固定,探测目标体位于均匀场中,感 应的二次电流可视为线电流。该方法利用一个差分 算子将投点或"交点"变成峰值,并用一个低通滤波 器来消除噪声,滤波后测量剖面上的拐点或过零交 点异常变成极大值,其峰值即对应地下低阻异常 体^[27](图 3b)。Crone 等人应用 Fraser 滤波处理大 定源外的 TEM 观测数据,取得了令人满意的结果。 2.2.3 航电电阻率深度成像(RDI)

电阻率深度成像(resistivity depth imaging, RDI) 是通过对测量的数据进行反褶积,从而将电磁响应 衰减数据快速转化为相同意义上电阻率深度断面的 一种方法,所采用的电阻率—深度转换的 RDI 算法 是基于 Maxwell A.Meju 的视电阻率转换和导电半空 间的 TEM 响应原理。

RDI 能够提供具有参考价值的导体深度、垂向延伸等信息,并能准确提供每条测线上的一维介质 视电阻率断面。根据 RDI 能够获得 VTEM 系统的 探测深度、电阻率、初始导电体的位置等资料。

2.2.4 航磁三维反演

航磁三维反演时通常假设地球磁场方向与磁异 常磁场方向相同,只考虑感磁影响。但是近年来的 研究发现,剩磁及其他因素的影响是普遍存在的,此



图 5 薄极状体在 X 分量反经 FF 滤波的 X 分量响应示意 Fig.3 X and Fraser filtered X (FFx) components for thin target

时磁异常的磁场方向与地球磁场方向并不相同,使 得在磁三维反演计算时会出现较大偏差,进而影响 对资料的认知程度,导致资料解释不准确。Robert G. Ellis于 2012 年提出了磁化强度矢量反演(magnetization vector inversion, MVI),该技术在无需事先 了解剩磁方向或强度的前提下,加入了剩磁和感磁。 在 MVI 处理过程中,ΔT 总场数据被转化为磁三分 量矢量数据,其反演结果不仅有 3D 矢量信息,还包 括一个标量的 MVI 视磁化率信息。

3 岩体电、磁场特征及解释

3.1 电场特征

研究区实测大理岩、花岗岩和闪长岩的电阻率 均大于1000Ω·m,呈高阻特征,而实测褐铁矿化、 黄铁矿化绢云母化、碎裂岩化的岩石电阻率一般小 于200Ω·m,呈低阻特征。

研究区范围内主要有4片NWW向展布的电磁 响应强烈区(图4)。第一片位于环状熔融岩体北 部,时间常数为0.07~0.12 ms,目前已发现一个金铅 锌矿床;第二片位于中部,整体呈条带状横穿环状熔 融岩体,时间常数一般为0.08~0.16 ms;第三片位于 环状岩体西南部,时间常数一般为0.10~0.18 ms;第 四片位于环状熔融岩体南部,时间常数在0.12~0.33 ms。这4片电磁响应强烈区表明了深部有低阻体存 在,其中与负磁异常相对应的第二片区推测与环状 熔融岩体中不同岩性界面或构造破碎带有关,而第 四片区的时间常数值最高,可能与地层中顺层发育





的构造破碎带有关,构造破碎带可能为后期成矿提供良好条件。

在 dB/dt 早期道(10 道)电磁响应影像图(图 5)中,可见早期道的电磁响应以单峰异常为主,这 可能是构造、含矿构造或矿化带在浅地表形成的一 层近水平的低阻风化壳或矿化层的反映。

对 dB/dt 的 X 分量进行 Fraser 滤波处理,其第 23 道的电磁响应见图 6。可看出研究区内出现数个 近 EW 向展布的条带状异常,推断为岩体与地层的 接触带及隐伏断裂的反映。

利用 Geosoft Oasis Montaj 的 voxel 模块制作研 究区电阻率三维分布图(图7)。研究区范围内主要



图 5 航电 dB/dt 早期道(10 道)电磁响应影像 Fig.5 VTEM dB/dt z component channel 10 image



图 6 航电 dB/dt X 分量经 Fraser 滤波后第 23 道 电磁响应影像

Fig.6 VTEM dB/dt X component fraser filtered channel 23 image



图 7 研究区低阻体三维分布及部分测线电阻率断面叠合 Fig.7 3D low resistivity voxels with survey line resistivity-depth sections

有 4 片 NWW 向展布的低阻区, 与 4 片时间常数响 应强烈区对应, 其中研究区中部的低阻区与航磁负 异常对应。

3.2 磁场特征

实测闪长岩磁化率 6 000×10⁻⁵ SI 以上,属强磁体;大理岩、花岗岩磁化率不超过 400×10⁻⁵ SI,为弱

磁性体。

航磁总场化极影像图(图8)出现总体排列成环 状的众多不规则的强磁异常,磁场值一般为30~80 nT,最高可达250 nT,推测为闪长岩体的反映。在其 内部可见近椭圆形、环形的负磁异常,磁场值一般为 -40~-10 nT,最低为-140 nT,推测为变质岩地层或 花岗岩体的反映。这种正、负环形相间排列的环形 磁场面貌特征,正是岩体内部环状熔融特征在航磁 上的反映。

由航磁垂向一阶导数影像图(图 9)可知,研究 区范围内具有 NW-NWW、近 EW 和 NE 向 3 组构



图 8 航磁总场化极影像 Fig.8 Reduced to pole total magnetici intensity (TMI) image

造,其中,NW—NWW、近 EW 向这二组构造明显 切割岩体或沿岩体与地层的接触带展布,为岩浆 热液和矿源的沉淀和富集提供了通道,是岩体周 围成矿的关键因素之一。

对航磁数据进行了磁矢量三维反演,反演结 果如图 10 所示。根据实测结果,将反演磁化率 大于0.06 SI 的强磁体推断为闪长岩。图中可清 晰看到岩体在整个研究区的空间展布情况。推 测的闪长岩体东、西两侧外倾,延伸深度大于 3 500 m,中部向下延伸约 2 000 m,整体呈"拱门" 状。



图 9 航磁垂向一阶导数影像 Fig.9 Magnetic first vertical derivative image



图 10 研究区推断岩体空间分布及部分测线反演磁化率

Fig.10 Inferred spatial distribution of rock mass with survey line magnetic susceptibility-depth sections

3.3 电、磁资料推断解释

根据上述分析,对研究区岩性、构造重新进行 了推断解释,结果见图 11。与已知地质图相比,本 次推断的岩体范围扩大,由3片不规则岩体组成。

根据航磁三维反演资料推断了岩体空间三维

展布形态。已知断裂以 NE、NW 向为主,本次推断 以 NW 向为主,尤其是编号 F_3 、 F_5 、 F_6 、 F_7 为本次新 推断断裂,这几条断裂穿过岩体或位于岩体边缘, 所具备的电磁特征与已知矿的控矿构造基本一 致。



图 11 推断解释岩性构造 Fig.11 Inferred and interpreted lithological structure

3.4 已知矿电、磁特征

已知金铅锌矿位于航磁异常边缘的梯度带上, 在航磁垂向一阶导数图中可见弱磁异常,其值为 $0.5 \sim 0.005 \text{ nT/km}$ 。从磁三维反演结果可知,金铅锌 矿位于闪长岩体与围岩的接触带上,受断裂构造 F₇ 控制。已知金铅锌矿航电特征较为明显,异常呈 NW 向展布,其早期道(10 道)值普遍为 $1.36 \sim 2.89$ $pV/(A \cdot m^4)$,最大值可达 $4.08 \text{ pV/(A \cdot m^4)}$,比背 景值高 $1 \sim 2$ 倍;航电X分量经 Faser 滤波一般为 $0.000 86 \sim 0.0021 \text{ pV/(A \cdot m^4)}$,最大值可达0.0041 $pV/(A \cdot m^4)$,比背景值升高 $1 \sim 3$ 倍。

4 成矿远景区预测

综合以上物探及地质资料,进行成矿有利区预 测,圈定成矿有利区2片。这2片地段位于闪长岩 体外围或内部与地层的接触带上,且有断裂构造通 过,与研究区内已发现的矿床具有类似的成矿地质 条件,推测是下一步深部找矿的有利区段。

I 区位于研究区西部,闪长岩体西缘与地层的 接触带上,断裂构造发育;航电呈双峰特征,电磁特 征为在时间常数值为 0.02~0.06 ms 的低值区叠加 的 NWW 向的中间低两侧高的中、高值带;航磁表现 为负磁场背景,局部可见有升高 5~10 nT 的磁异常。 该区的地质—地球物理特征与已知金铅锌矿的特征 相符,因此推断其为多金属成矿有利区。

Ⅱ 区位于研究区西南部,出露地层为下泥盆统, 位于闪长岩体与地层的接触带上。电磁特征为时间 常数值为 0.02~0.06 ms 的低值区叠加的 NWW 向的 中间低两侧高的中、高值带;航磁特征为正负相间排 列的环形磁异常西缘及其外围。根据航磁三维反演 推测,该闪长岩体为半隐伏岩体,在南部仍然有大面 积的岩体隐伏于地层之下。II 区东部位于环形磁异 常西缘,磁场变化快、梯度陡、幅值高,场值一般为 -140~80 nT,推测可能由环形的闪长岩和花岗岩质 岩类引起。II 区中西部位于-50~-30 nT 的负磁场 中,推测由隐伏的花岗岩引起,在花岗岩与地层接触 带位置是研究区内成矿较为有利的地段。

5 结论

1)环状熔融岩体内可以划分为3个环形的闪 长岩体。结合 MVI 结果,推测岩浆可能从研究区西 部和东部两个方向先后侵入地层形成闪长岩体。在 闪长岩体形成过程中,岩体与地层发生熔融形成环 状熔融岩体,同时在闪长岩体与地层的接触带附近 的断裂构造中形成了金铅锌矿化。

2)利用航空电磁及航磁数据结合地质信息,大 致查明了环状熔融岩体的空间分布特征,推断出7 条断裂,其中6条为新断裂,提出了一种利用航电、 航磁数据解决地质问题的新思路。

3)通过提取航电、航磁特征信息,圈定找矿有 利区2片。它们位于环状熔融岩体的西部和西南 部,这些地段具有与已知矿床类似的地质条件,是下 一步深部找矿的有利区段。

参考文献(References):

[1] 王亚磊,张照伟,陈寿波,等.新疆东天山红石岗北铜镍矿化镁
 铁质岩体岩石成因及成矿潜力分析[J].地质学报,2017,91
 (4):776-791.

Wang Y L, Zhang Z W, Chen S B, el al. Petrogenesis and Metal-

logenic Potential Analysis of Mafic Intrusion in the Hongshigangbei Ni-Cu-Sulfide Mineralization in East Tianshan, Xinjiang [J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(4):776-791.

[2] 冯延清,钱壮志,徐刚,等.东天山二叠纪镁铁-超镁铁质成矿岩体造岩矿物特征及其成因意义[J].岩石矿物学杂志,2017,36
 (4):519-534.

Feng Y Q, Qian Z Z, Xu G, el al. Rock-forming mineral features of Permian mineralized mafic-ultramafic intrusions in East Tianshan Mountains and their implications for intrusion generation [J]. Acta Petrologica Et Mineralogica, 2017, 36(4): 519–534.

[3] 丁建华,邢树文,肖克炎,等.东天山—北山 Cu-Ni-Au-Pb-Zn 成 矿带主要成矿地质特征及潜力分析[J].地质学报,2016,90 (7):1392-1412.

Ding J H, Xing S W, Xiao K Y, el al. Geological Characteristics and Resource Potential Analysis of the Dongtianshan-Beishan Cu-Ni-Au-Pb-Zn Metallogenic Belts [J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(7):1392-1412.

 [4] 王伟,孟勇,王凯,等.新疆东天山旱草湖环状岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及成因[J].地质通报,2019,38(5):777-789.

Wang W, Meng Y, Wang K, el al. Zircon U-Pb ages, geochemical characteristics and petrogenesis of ringed pluton in the Hancaohu area, eastern Tianshan Mountains of Xinjiang [J]. Geological Bulletin of China, 2019, 38(5):777-789.

[5] 吴玉门,马玉周,郭广飞.东天山卡瓦布拉克北缘环状熔融岩系研究[J].新疆地质,2010,28(3):250-253.
 Wu Y M, Ma Y Z, Guo G F. Ring melting rock series of north

fringe of kawabulake of ease-tian shan region in xin jiang[J]. Xinjiang Geology, 2010, 28(3);250-253.

[6] 余吉远, 计波, 王国强. 中天山阿拉塔格环状杂岩体中闪长质包体地球化学与岩浆混合作用[J]. 中国地质, 2018, 45(4): 767 - 782.

Yu J Y, Ji B, Wang G Q. Geochemistry of dioritic enclaves related to magmatic mixing in the concentrically zoned Alatage igneous complex, central Tianshan Mountains [J]. Geology in China, 2018, 45(4): 767-782.

[7] 付海涛.辽宁瓦房店地区环状构造与金伯利岩关系的几点认识 [J].西部资源,2019(3):14-16.

Fu H T. Some Understandings on the Relationship between Ring Structure and Kimberlite in Wafangdian Area, Liaoning Province [J]. Western Resources, 2019 (3):14–16.

- [8] 邓金火,徐国志,魏奎,等,新疆东天山地区伊山金矿成矿条件 及找矿标志[J].内蒙古科技与经济,2013(4):47-48,50.
 Deng J H, Xu G Z, Wei K, el al. Metallogenic conditions and prospecting indicators of Yishan gold deposit in east Tianshan area, Xinjiang[J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2013(4):47-48,50.
- [9] 陈树民,秦曦,赵晓晓,等.豫西寨凹隐伏岩体地球物理场特征 与深部找矿预测[J].地质与勘探,2019,55(5):1117-1131. Chen S M, Qin X, Zhao X X, el al. Geophysical field characteristics and deep ore prospecting prediction of the Zhaiwa concealed rock mass in Western Henan[J]. Geology and Exploration,2019, 55(5):1117-1131.

- [10] 陈安国,周涛发,刘东甲,等.长江中下游成矿带宣城矿集区重磁场特征与找矿启示[J].矿床地质,2020,39(5):879-892.
 Chen A G, Zhou T F, Liu J D, el al. Gravity and magnetic characteristics of Xuancheng ore concentration area along middle-lower Yangtze river valley metallogenic belt:Implications to ore prospecting[J]. Mineral Deposits, 2020, 39(5):879-892.
- [11] 马一行,吕志成,颜廷杰,等.内蒙古昌图锡力地区重磁场特征 与深部找矿指示[J].地质通报,2020,39(8):1258-1266.
 Ma Y H, Lyu Z C, Yan T J, el al. Characteristics of gravity and magnetic fields and deep prospecting implications in Changtuxili area, Inner Mongolia[J].Geological Bulletin, 2020, 39(8):1258-1266.
- [12] 张建太,于磊,刘传朋,等.鲁西金刚石原生矿床区域重磁异常 特征及深部地质构造背景[J].地质学报,2020,94(9):2783-2795.

Zhang J T, Yu L, Liu C P, el al. Characteristics of regional gravity, magnetic anomalies and deep structural geological background of primary diamond deposits in the western Shandong Province[J]. Acta Geologica Sinica, 2020,94(9):2783-2795.

- [13] 李海,李永军,徐学义,等.西准噶尔达尔布特蛇绿岩带萨尔托海岩体深部结构、构造特征:地质与地球物理证据[J].大地构造与成矿学,2021,45(4):634-650.
 Li H, Li Y J, Xu X Y, el al. Deep Structure and Texture of the Sartohay Ophiolite in West Junggar, Xinjiang: New Geological and Geophysical Evidence[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2021,45(4):634-650.
- [14] Letelier P, Napier S, Reid J, et al. Combined potential field and airborne electromagnetic interpretation to unravel the geological istory of the Curaca Valley Region, Bahia, Brazil [J]. ASEG Extended Abstracts, 2019 (1): 1-3.
- [15] 姜枚,杨经绥,谭捍东,等.西藏东坡蛇绿岩体深部结构的地球 物理特征及其找矿意义[J].中国地质,2015,42(5):1179-1187.

Jiang M, Yang J S, Tan H D, el al. Geophysical characteristics and prospecting significance of deep structures in Dongpo ophiolite body, Tibet[J]. Geology in China, 2015, 42(5):1179-1187.

[16] 程光锁,刘卫东,褚志远,等.山东蒙阴县西峪金伯利岩带深部综合地球物理特征及其意义[J].地质学报,2020,94(9):2772-2782.

Cheng G S, Liu W D, Chu Z Y, el al. Deep comprehensive geophysical characteristics and significance of the Xiyu kimberlites in the Mengyin County, Shandong Province[J]. Acta Geologica Sinica, 2020,94(9):2772-2782.

- [17] 李怀渊,张景训,江民忠,等.航空瞬变电磁法系统 VTEM^{plus}的应用效果[J].物探与化探,2016,40(2):360-364.
 Li H Y, Zhang J X, Jiang M Z, el al. The application effect analysis of the VTEM^{plus} system[J].Geophysical and Geochemical Exploration, 2016,40(2):360-364.
- [18] 孙栋华,李怀渊,江民忠,等.时间域航空电磁、航磁在五龙沟金
 矿整装勘查区中的应用研究[J].地球物理学进展,2017,32
 (6):2533-2544.

Sun D H, Li H Y, Jiang M Z, el al. Applications of time domain airborne electromagnetic and aeromagnetic in Wulonggou gold de-

posit exploration area[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(6): 2533-2544.

[19] 孙栋华,李怀渊,江民忠,等.华北地台北界划分新证据及其找 矿意义[J].地质科技情报,2019,38(2):25-30.
Sun D H, Li H Y, Jiang M Z, el al. New evidence for the boundary of north China platform' north margin and its prospecting significance[J].Geological Science and Technology Information, 2019,

38(2):25-30. ご城市 国乙町 江戸市 笠 岡太江工順支奥田河上渋知64

[20] 宁媛丽,周子阳,江民忠,等.黑龙江下嘎来奥伊河上游铅锌多 金属矿航空电磁异常特征及找矿意义[J].地球物理学进展, 2019,34(3):1074-1080.

Ning Y L, Zhou Z Y, Jiang M Z, el al. Airborne anomaly characteristics and prospecting intention of the upper reaches of Xiagalai' aoyi river Pb-Zn deposit in Heilongjiang[J].Progress in Geophysics, 2019,34(3):1074-1080.

[21] 彭莉红,江民忠,程莎莎,等.航空瞬变电磁法在新疆阿奇山地 区铅锌多金属找矿中的应用研究[J].地质与勘探,2019,55 (5):1250-1260.

Peng L H, Jiang M Z, Cheng S S, el al. Application of the ATEM method to prospecting lead-zinc polymetallic ores in the Aqishan area, Xinjiang [J].Geology and Exploration, 2019, 55(5):1250–1260.

[22] Marcus H, Yusen L C. Efficient borehole targeting for ground-control of airborne electromagnetic (AEM) survey results [J]. ASEG Extended Abstracts, 2019 (1): 1-5.

- [23] 石连成,骆燕,江民忠,等.辽东半岛五龙金矿床航空电磁场特征及找矿意义[J].地质学报,2020,94(10):3106-3119.
 Shi L C, Luo Y, Jiang M Z, el al. Characteristics of aero-electromagnetic field and its prospecting significance in the Wulong gold deposit, Liaodong Peninsula[J]. Acta Geologica Sinica, 2020,94(10):3106-3119.
- [24] 骆燕,曾阳,石岩,等.航空瞬变电磁法在火山岩型块状硫化物 矿区的试验[J].物探与化探,2014,38(4):840-845.
 Luo Y, Zeng Y, Shi Y, el al. The test of airborne transient electromagnetic technology in the volcanics-associated massive sulfide ore district[J].Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38 (4):840-845.
- [25] Prikhodko A, Geo P. EM time constant (TAU) analysis [M]. Geotech Ltd., 2010.
- [26] 马庚杰,张锐,郑晓礼,等.甚低频电磁法龙头山银铅锌矿床勘查中的应用[J].地球物理学进展,2007,22(5):1627-1636.
 Ma G J, Zhang R, Zheng X L, el al. Application of VLF-EM method in the mineral exploration of Longtoushan Ag-Pb-Zn Deposit, Alukerqinqi, Inner Mongolia [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(5): 1627-1636.
- [27] 蒋邦远.实用近区磁源瞬变电磁法勘探[M].北京:地质出版 社,1998.

Jiang B Y. Applied near zone magnetic source transient electromagnetic exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998.

Airborne electromagnetic characteristics and deep prospecting of a ringed molten rock mass in eastern Tianshan

YANG Bo^{1,2,3}, SUN Dong-Hua^{1,2,3}

(1. Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002, China; 2. Hebei Provincial Key Laboratory of Aerial Detection and Remote Sensing Technology, Shijiazhuang 050002, China; 3. CNNC Uranium Resources Geophysical Exploration Technology Center (Key Laboratory), Shijiazhuang 050002, China)

Abstract: A ringed molten rock mass in eastern Tianshan, Xinjiang is closely related to Au-Pb-Zn mineralization. Since the mineralization occurs in the fault fracture zone near the outer contact zone between the rock mass and strata, it is necessary to find out the spatial distribution of the rock mass and the development of the fault structure. The processing and analysis of the 1:25 000 high-resolution airborne transient electromagnetic and aeromagnetic data yielded the following airborne electromagnetic characteristics of the rock mass. The ringed molten rock mass displayed positive and negative alternating ringed aeromagnetic fields. There were four NWW-trending banded zones with strong electromagnetic responses along the ringed molten rock mass, with a time constant of generally $0.07 \sim 0.18$ ms. Seven NWW-trending faults were inferred and interpreted using the high-value band of the electromagnetic response of the 23rd trace of the dB/dt X component and the aeromagnetic anomaly zone with amplitude of $5 \sim 10$ nT. By combining the airborne electromagnetic characteristics and three-dimensional inversion results of magnetic vectors, the lithology and structures of the study area were inferred and interpreted again, roughly ascertaining the three-dimensional distribution characteristics of the diorites. Based on these results as well as the known metallogenic geological conditions and the airborne electromagnetic characteristics, two prospecting favorable areas were delineated in the areas with strong electromagnetic responses to the west and southwest of the ringed molten rock mass. This study provides important information on the deep prospecting of the rock mass.

Key words: ringed molten rock mass; airborne transient electromagnetic; aeromagnetic; deep prospecting; eastern Tianshan