

# 新疆塔什库尔干铁矿带 1:1 万直升机航磁调查 及找矿线索\*

张永军<sup>1</sup>, 李皎皎<sup>1</sup>, 何怡原<sup>1</sup>, 单希鹏<sup>1</sup>, 余学中<sup>1</sup>, 张磊<sup>2</sup>, 陈懋弘<sup>2</sup>

(1 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

**摘要** 新疆塔什库尔干沉积变质型铁矿带位于高海拔、深切割的喀喇昆仑山, 铁矿成矿潜力大, 但由于该区处于无人区, 交通十分困难, 找矿难度也很大。工作区虽已完成 1:5 万航磁覆盖, 但由于使用固定翼飞机测量, 平均飞行高度达到 794 m, 获得的航磁异常较圆滑, 难以精确识别铁矿引起的磁异常。直升机航空物探调查在地形复杂区大比例尺调查中已基本取代固定翼飞机航空物探调查, 其优势是成本低、机动灵活、稳定性好、可超低空飞行获取更丰富的航空物探信息等。文章通过对处于无人区的 1:5 万航磁异常新 C-1999-13、新 C-2008-1324 和新 C-2008-1285 开展 1:1 万直升机航磁调查, 获取了高精度、高分辨率航磁数据, 进一步精细刻画了航磁异常形态; 采用多种异常分离技术对航磁异常进行分解, 圈定了多处具有找矿意义的磁异常。随后采用直升机投送人员开展航磁异常踏勘, 在新 C-1999-13 异常区发现了磁铁矿转石, 证实直升机航磁测量和随后的直升机异常检查快速高效, 对新一轮找矿突破战略行动中在高海拔深切割的无人区开展磁性矿勘查具有较好的参考价值。

**关键词** 直升机; 航空磁法测量; 磁铁矿; 塔什库尔干铁矿带

中图分类号: P618.31; P631.2

文献标志码: A

## 1:10 000 helicopter aeromagnetic survey and prospecting clues in Taxkorgan iron metallogenic belt, Xinjiang

ZHANG YongJun<sup>1</sup>, LI JiaoJiao<sup>1</sup>, HE YiYuan<sup>1</sup>, SHAN XiPeng<sup>1</sup>, YU XueZhong<sup>1</sup>,  
ZHANG Lei<sup>2</sup> and CHEN MaoHong<sup>2</sup>

(1 China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resource, Beijing 100083, China; 2 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

### Abstract

The Taxkorgan metamorphosed sedimentary iron metallogenic belt in Xinjiang is located in the high altitude and sharp topographic Karakoram Mountains. Ore prospecting in this area is a tough challenge in spite of its superior metallogenic geologic conditions due to locating in no-human-zone and poor transportation. 1:50 000 aeromagnetic survey in study area was finished by using fixed-wing plane. But the average flight altitude is too high (794 m). It's difficult to discriminate aeromagnetic anomalies caused by magnetite because they are relatively smooth. Helicopter-borne geophysical survey has more advantages in the complicated terrains than fixed-wing plane aero-geophysical survey, for example lower cost, better flexibility, better stability, lower flying altitude to acquire more aero-geophysical information etc. In this paper, we present the results of a 1:10 000 helicopter-borne aeromagnetic survey over aeromagnetic anomaly Xin-C-1999-13, Xin-C-2008-1324 and Xin-C-2008-1285

\* 本文得到地质调查项目“大宗紧缺战略性矿产重点远景区矿产地质调查(编号:DD20221684)”资助

第一作者简介 张永军, 男, 1972年生, 教授级高级工程师, 主要从事航空物探调查研究。Email: 573651654@qq.com

收稿日期 2023-12-01; 改回日期 2024-08-20。张绮玲编辑。

in no-human-zone of Taxkorgan, which were discovered by 1:50 000 fixed-wing aeromagnetic survey. Compared with the past data, the newly collected high-precision and high-resolution aeromagnetic data can depict the aeromagnetic anomalies more meticulously. Various anomaly separation techniques were used to decompose aeromagnetic anomalies and some aeromagnetic anomalies maybe caused by magnetite were discriminated. We attempted to use a helicopter to transport personnel to the centre of magnetic anomalies for field geologic reconnaissance immediately after finishing aeromagnetic survey, and discovered floats/boulders of magnetite in the area of aeromagnetic anomaly Xin-C-1999-13. This attempt proves that the helicopter aeromagnetic survey and field magnetic anomaly verification by helicopter transportation are fast and effective in high altitude and deep cutting mountainous areas. This might offer the valuable reference for the new round of prospecting breakthrough strategy in mineral exploration covering the high altitude, deep cutting and uninhabited mountainous areas.

**Keywords:** helicopter, aeromagnetic survey, magnetite, Taxkorgan iron metallogenic belt

在上一轮找矿突破战略行动(2011~2020年)中及前期,中国自然资源航空物探遥感中心联合新疆维吾尔自治区地质矿产勘探开发局在新疆中高山地区开展了1:5万高精度航磁调查,开创了“当年飞行、当年查证、当年见矿”的“三当年”找矿工作新模式(郑广如等,2011;乔春贵等,2009;2012;周道卿等,2009;2013),取得了丰硕的找矿成果,发现了莫喀尔、叶里克、塔辖尔等大中型铁矿床(年武强等,2014),形成了塔什库尔干和阿吾拉勒铁矿大型资源基地。新一轮找矿突破战略行动重点向高海拔、深切割、深覆盖地区拓展,难度明显增大,急需构建快速、高效的现代化找矿勘查技术体系。新疆塔什库尔干铁矿带位于高海拔、深切割区,平均海拔高于4000 m。区内铁多金属矿找矿潜力大,已发现多处沉积变质型铁矿(胡建卫等,2010;年武强等,2014;李智泉等,2018)。但由于海拔高,地形起伏大,交通条件极差,仅在规模最大的新C-1999-13航磁异常边缘发现小型铁矿,一直未能找到主矿体。2023年中国地质科学院矿产资源研究所联合中国自然资源航空物探遥感中心开展了空地协同调查,通过大比例尺直升机测量获取了高精度、高分辨率航磁数据,进一步精细刻画了航磁异常形态,并使用直升机投送地质人员至地面,开展了航磁异常踏勘,短时间、低成本揭开了新C-1999-13异常的神秘面纱,在靠近主异常区新发现了磁铁矿化,为快速实现找矿突破奠定了基础,对新一轮找矿突破战略行动具有较好的参考价值。

## 1 地质概况

新疆赞坎铁矿东工作区位于青藏高原西北缘和塔里木盆地西南缘。在大地构造位置上,工作区处

于喀喇昆仑—羌塘构造带的塔什库尔干-甜水海地块中(图1)。西昆仑塔什库尔干铁矿带长约200 km,宽约20 km,面积约4000 km<sup>2</sup>。矿床赋存于古元古界布伦阔勒群变质岩中(黑云母石英片岩、斜长角闪片岩),典型矿床如赞坎、莫喀尔、老并、叶里克和喀来子等大中型铁矿(陈曹军,2012;冯昌荣等,2012;张连昌等,2016)。截至2019年,塔什库尔干成矿带累计查明铁矿石资源储量11.9亿t(杨在峰等,2019),预测远景资源量可达20~30亿t。

一般认为,塔什库尔干铁矿成因类型为古元古代沉积变质型(BIF)铁矿(董连慧等,2011),但燕长海等(2012)把以老并为代表的矿床命名为“帕米尔式”铁矿,其主要特征是具有一种特殊的膏铁建造(含石膏、重晶石),成矿时代为寒武纪,认为矿床成因类型为海相火山沉积型磁铁矿矿床。陈曹军(2012)、郑梦天等(2016)、张连昌等(2016)研究认为,塔什库尔干地块原“布伦阔勒群”实际上发育古元古代(2500~2100 Ma)、寒武纪早期(540~510 Ma)二个含矿层位。不同层位的含铁建造有明显的区别:古元古代含铁岩系以黑云石英片岩、斜长角闪片岩为主,夹石英岩(硅质岩)和条带状铁矿,推测原岩为基性火山岩-细碎屑岩-硅质岩-条带状硅铁建造;寒武纪早期以变砂岩、黑云(二云)石英片岩夹大理岩、石膏及重晶石岩为主,原岩是火山沉积-碳酸盐岩-石膏层-重晶石-铁建造。相应的铁矿划分为2种类型:①条带状铁建造受后期热液叠加改造的沉积变质型磁铁矿矿床(BIF型),以赞坎、莫喀尔和吉尔铁克沟为例,其成矿主期的形成条件为古元古代岛弧背景的海相弱氧化-还原的海水沉积环境,成矿物质来源于海底热液对基性火山岩的淋滤及少量陆源物质。经历了沉积成岩、变质、热液改造和变质变

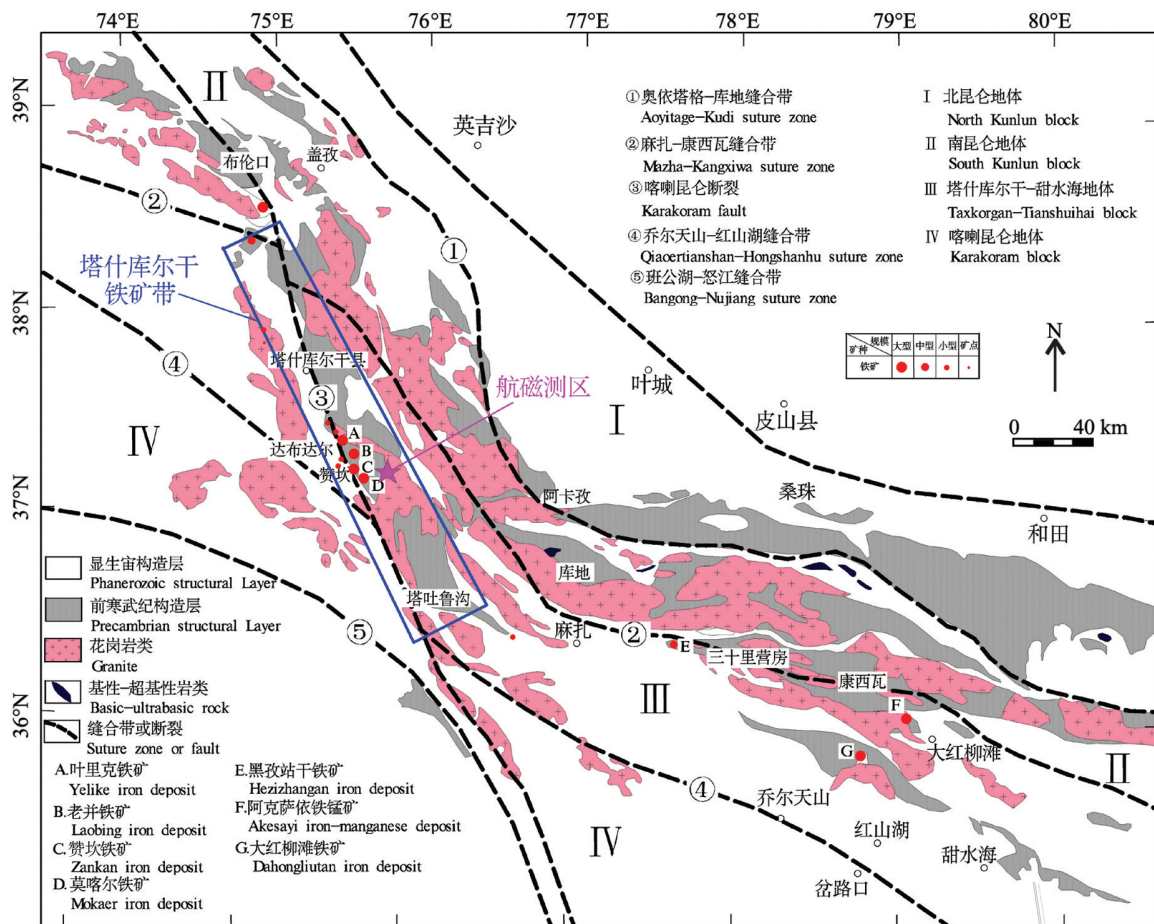


图1 塔什库尔干铁矿带构造位置简图(据胡军,2015修改)

Fig. 1 Sketch tectonic location map of the Taxkorgan iron ore belt (modified after Hu, 2015)

形4期成矿-热事件;②早寒武世海相火山沉积和海底喷流沉积形成的沉积变质型磁铁矿矿床,以喀来子、老并和叶里克为例,其形成环境为弱氧化-半氧化环境,成矿成岩物质主要来源于海底热水沉积及陆源碎屑,主要经历了沉积成岩、热液改造和变质变形3期成矿-热事件。

本次工作区内主要出露震旦系—寒武系马尔洋组,局部可见古元古界布伦阔勒岩群,总体呈北北西向展布(图2)。区内岩浆侵入活动非常强烈,侵入岩分布范围较广,总体呈北北西向,占工作区近三分之一的面积,包括中寒武世和渐新世2个大的侵入期,其中中寒武世岩浆侵入活动更强。区内中酸性侵入

岩占绝对优势,多呈岩基、岩脉、岩株的形式侵入,主要岩性有英云闪长岩、二长花岗岩。

工作区内研究程度较低,目前尚未发现具有经济价值的矿床。从邻近地区勘查结果来看,主要产出沉积变质型磁铁矿矿床,例如赞坎、莫喀尔、老并等铁矿床。

## 2 航磁勘查及效果

### 2.1 以往航磁勘查程度及效果

工作区共开展过2次航磁调查工作(表1),都用固定翼飞机测量,比例尺分别为1:100万和1:5万,

表1 工作区前人航磁测量工作一览表

Table 1 Aeromagnetic survey of study area before 2023

序号	测区名称	测量年份	比例尺	使用机型	平均飞行高度/m	测量精度/nT
1	青藏高原中西部航磁概查	1998~2000	1:100万	固定翼	833	±2.92
2	新疆塔什库尔干县赞坎—苏巴什1:5万航磁勘查	2008~2009	1:5万	固定翼	794	±2.2

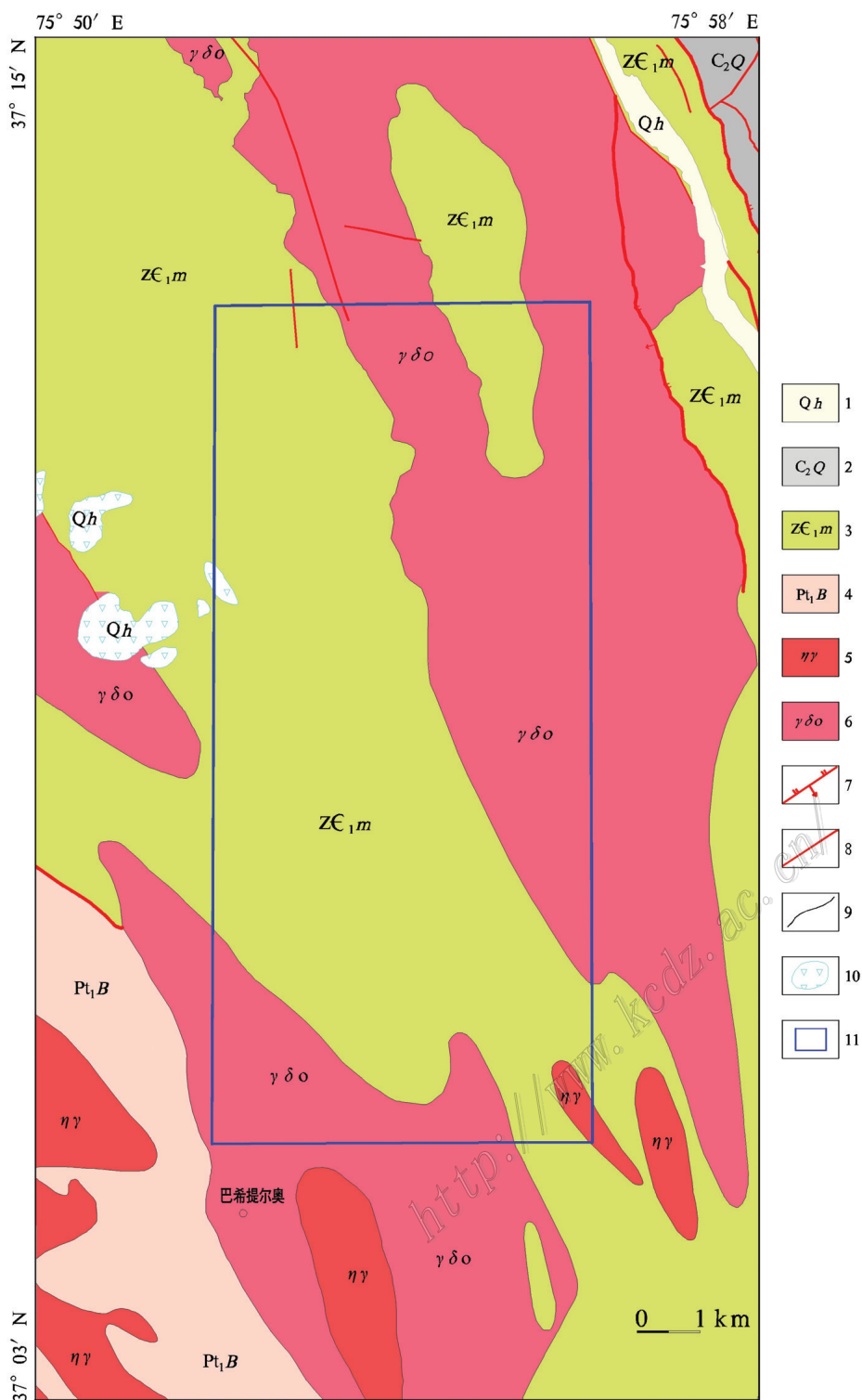


图 2 赞坎铁矿东侧地质简图(据陕西省地质调查院修改,2008)

1—第四系;2—石炭系恰提尔群;3—震旦系—寒武系马尔洋岩组;4—古元古界布伦阔勒岩群;5—二长花岗岩;6—英云闪长岩;7—逆断层;  
8—性质不明断层;9—岩性界线;10—冰雪;11—工作区范围

Fig. 2 Sketch geological map of the east side of the Zankan iron deposit (modified from Shaanxi Institute of Geological Survey, 2008)

1—Quaternary; 2—Carboniferous Qiatier Group ; 3—Cambrian Maeryang rock group; 4—Paleoproterozoic Bulunkuole rock group; 5—Monzogranite; 6—Tonalite; 7—Reverse fault; 8—Unknown nature fault; 9—Lithologic boundary; 10—Ice and snow; 11—Study area



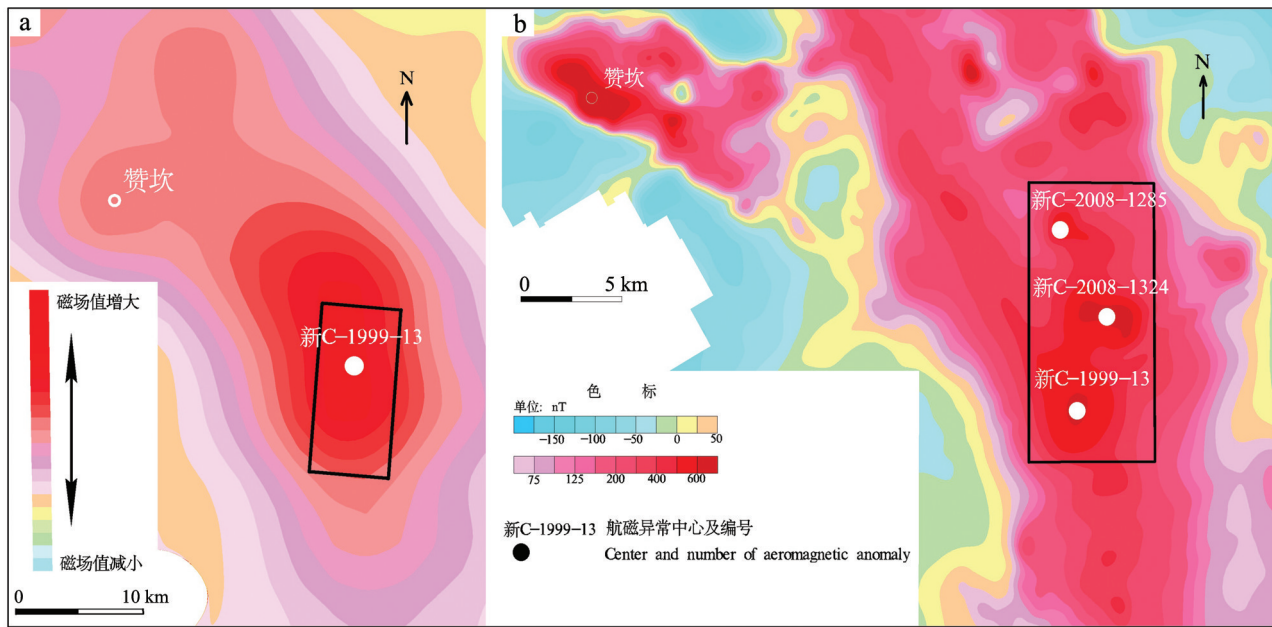


图3 赞坎东工作区(黑框)不同比例尺航磁对比图

a. 1:100万航磁 $\Delta T$ 化极图(据熊盛青等,2001修改);b. 1:5万航磁 $\Delta T$ 化极图(据乔春贵等,2009修改)

Fig. 3 Aeromagnetic comparison map with different scales of study area on the east side of Zankan

a. 1:1 000 000 aeromagnetic map of reduction to the pole (modified after Xiong et al., 2001); b. 1:50 000 map of reduction to the pole (modified after Qiao et al., 2009)

测线间距为10 km和0.5 km,平均飞行高度800 m左右,测量精度分别为 $\pm 2.92$  nT、 $\pm 2.2$  nT,定位精度10 m左右。

从测量结果看(图3a、b),1:5万航磁测量将1:100万航磁测量发现的新C-1999-13异常解体为新C-1999-13异常、新C-2008-1324异常、新C-2008-1285异常等,异常的轴向从北北西向变为北北西向、北西向。2次航磁测量找矿效果显著,通过1:100万航磁异常查证,发现了赞坎、老并、走克本等大中型铁矿;通过1:5万航磁异常查证,发现了莫喀尔、叶里克铁矿、希尔波力等铁矿,并且证实布伦阔勒群地层中的磁异常基本与铁矿有关。

## 2.2 1:1万航磁调查及效果

### (1) 测量方法技术

工作区属高山深切割地形,相对高差最大达1900 m。磁测系统使用具有国际先进水平的Cs-3高精度铯光泵磁力仪(灵敏度0.001 nT)、DSC-1航磁数字补偿系统(精度0.035~0.080 nT),导航定位使用差分GPS系统(平面定位精度 $< 1$  m)。为了降低离地飞行高度,本次测量采用了适宜于高海拔飞行的小松鼠AS350型直升机。在测量飞行前根

据测区地形和作业飞机性能,做好每条测线的飞行高度设计,标注不同高程点飞机能够达到的最低安全高度值,指导机组野外飞行作业;实际测量中采用沿地形缓起伏飞行,对于部分深切割区采用降速飞行,充分发挥直升机的低速爬升性能降低离地飞行高度;在工作区附近建设临时起降点,实际测量飞机半油起飞,增强飞机的高空机动性能和爬升能力。通过这些措施,有效地降低了测线飞行高度,本次测量将平均飞行高度从794 m(1:5万航磁测量)降低至234 m,也优于设计指标(280 m)。与以往测量相比(熊盛青等,2001;乔春贵等,2009),无论是采集的磁信息量,还是定位精度等都有了全面提高。

### (2) 航磁特征

据1:1万航磁图(图4a、b),大致以北纬 $37^{\circ}09'$ 为界,将测区分为北部正负变化磁场区和南部正磁场区。北部正负变化磁场区以负磁场为背景,叠加轴向北西向、北北西向磁异常,强度变化大,幅值一般在300~1000 nT之间,最高超过1400 nT。南部正磁场区以正磁场为背景,局部异常特别发育,轴向以北西向为主,少部为北东向,强度变化不大,幅值一

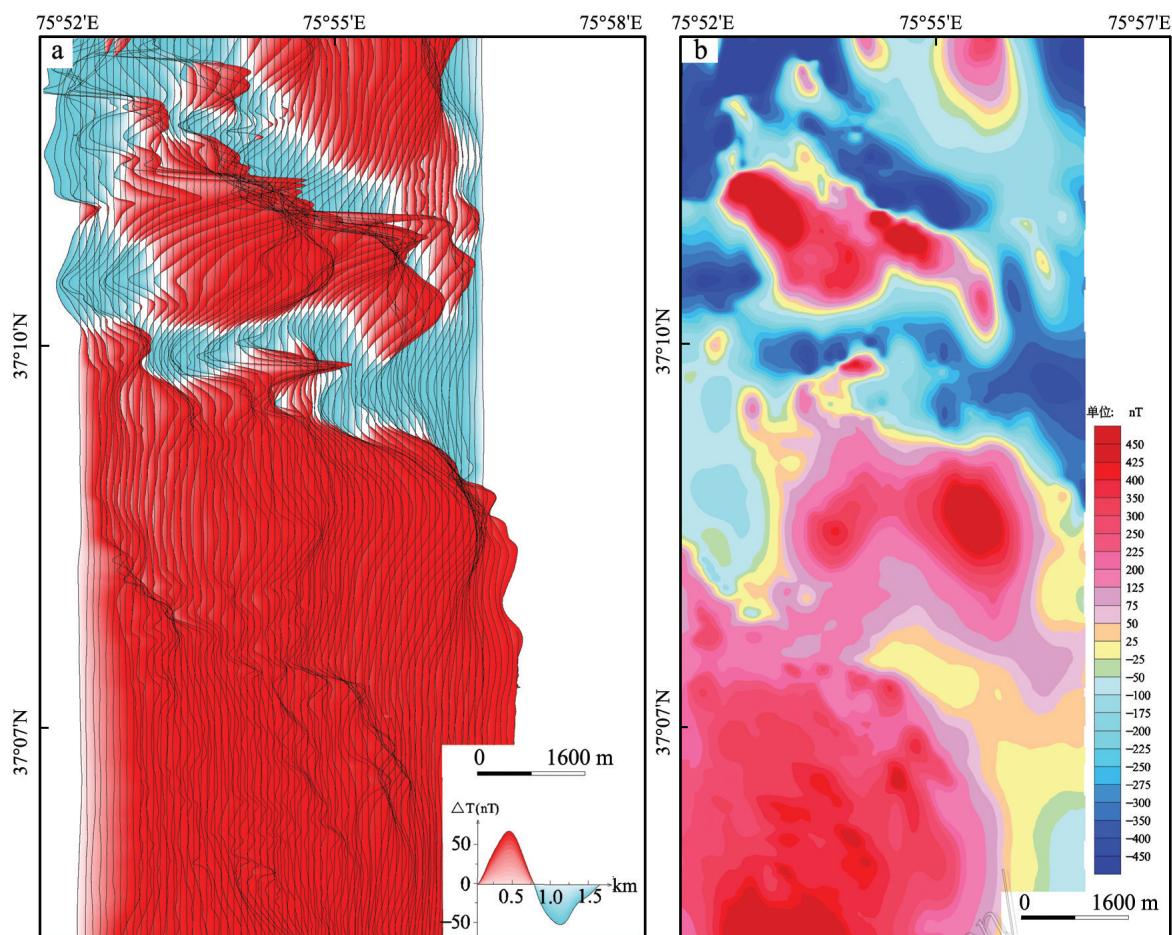


图 4 赞坎东工作区 1:1 万航磁  $\Delta T$  剖面平面图(a)和航磁  $\Delta T$  图(b)

Fig. 4 1:10 000 aeromagnetic  $\Delta T$  plan-profile map (a) and contour map (b) of study area on the east side of Zankan

一般在 400~600 nT 之间。

### (3) 岩(矿)石磁性特征

岩(矿)石的磁性是航磁资料推断解释的依据,根据中国自然资源航空物探遥感中心实测资料统计(乔春贵等,2009),工作区及外围岩矿石磁性具有如下特征:

正常沉积的砂岩、粉砂岩、砾岩、泥岩、灰岩等岩石磁性较弱或者基本无磁性,磁化率平均值一般小于  $30 \times 10^{-5} \text{SI}$ 。下古生界和元古宇变质岩一般磁性较弱,大理岩、千枚岩、石英岩、片岩、片麻岩的磁化率平均值均小于  $30 \times 10^{-5} \text{SI}$ 。古元古界布伦阔勒岩群( $\text{Pt}_1\text{B}$ )与已知铁矿密切相关,该套地层的磁性一般较弱,但当靠近磁铁矿时,岩石中的磁铁矿含量明显增加,地层磁性明显增强,如赞坎铁矿附近的二云母石英片岩磁铁矿含量达到 5% 以上,其磁化率平均值达  $2922 \times 10^{-5} \text{SI}$ ,剩余磁化强度为  $176 \times$

$10^{-3} \text{A/m}$ 。中酸性岩侵入岩磁性变化较大,但靠近工作区的中酸性侵入岩磁性不强,均值一般不超过  $600 \times 10^{-5} \text{SI}$ 。磁铁矿磁性强,与一般岩石之间差异显著,赞坎磁铁矿的磁化率极大值超过  $150\,000 \times 10^{-5} \text{SI}$ ,磁化率平均值达  $75\,799 \times 10^{-5} \text{SI}$ ,铁矿石标本测得的剩磁达  $425\,000 \times 10^{-3} \text{A/m}$ 。工作区手捡铁矿石标本的磁性也较强,最高达  $17\,164 \times 10^{-5} \text{SI}$ 。因此,区内具备通过磁法来圈定铁矿体的地球物理基础。

## 3 成果解释与找矿

### 3.1 数据处理效果

航磁  $\Delta T$  测量数据是不同深度、不同规模和形态以及不同磁性特征的地质体磁场信息在观测面上综合反映的结果。由于场的叠加,使得某些具有一

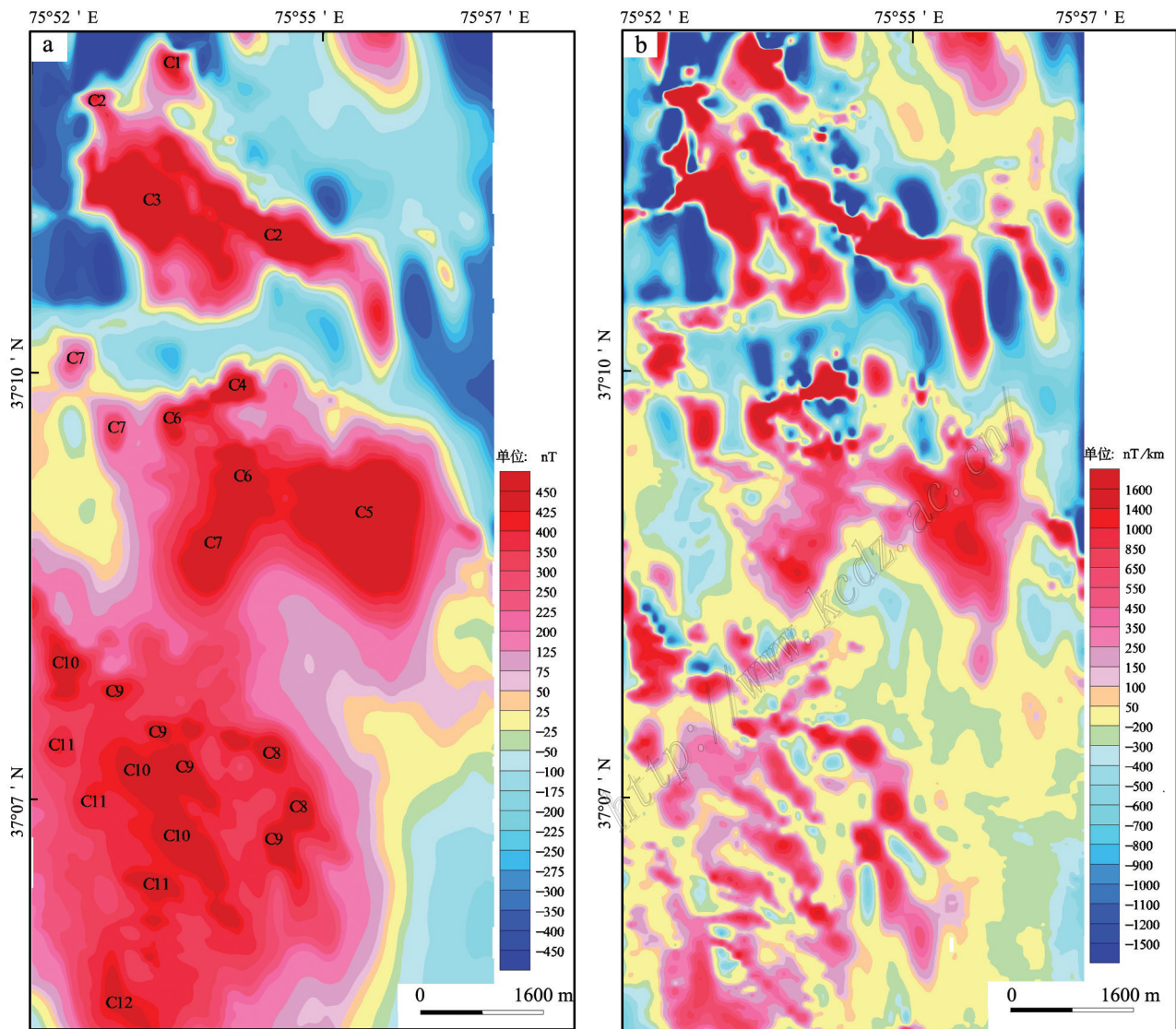


定地质意义的异常变得复杂,在原始图件上很难识别出来,给地质解释带来了困难。为了提高对航磁异常的分辨能力,突出更多有用信息,需要对航磁原始测量数据进行位场转换处理。

化极转换处理结果相当于将观测面设在磁北极所测的磁异常,也就是将斜磁化异常转换为垂直磁化异常,化极后的异常通常与地质体对应较好,更便于推断解释。本次进行了原平面化极处理(图5a)。工作区位于北纬37°05′18″~37°12′24″之间,范围较小,本次采用了中心点化极方法。中心点磁倾角

57.16°,磁偏角3.57°。与原始磁场图相比(图4b),经化极处理后斜磁化影响减弱,正异常明显增多。同时,大部分磁异常经化极处理后异常范围缩小,形态简化,正异常极值增加且向北偏移,一些叠加在主异常上的微弱局部异常更加明显。

为了更好地研究局部磁异常,较准确地圈定磁性地质体,在化极的基础上对航磁 $\Delta T$ 数据进行了垂向一阶导数处理。垂向一阶导数处理有突出和放大作用,侧重于突出浅层近地表地质的磁效应而压制深层区域背景场的影响,从而突出浅部地质体引



C1~C12:推测与沉积变质型铁矿有关的磁异常

图5 赞坎东工作区1:1万航磁 $\Delta T$ 化极图(a)和航磁 $\Delta T$ 化极垂向一阶导图(b)

Fig. 5 1:10 000 aeromagnetic  $\Delta T$  map reduction to the pole (a) and vertical first derivative map (b) of study area on the east side of Zankan

起的局部异常。另外,垂向一阶导数对消除和减弱异常之间的叠加和干扰作用显著,对浅部磁性体和浅层构造的边界范围以及断裂均具有较高的分辨率。与航磁化极图相比,航磁 $\Delta T$ 化极垂向一阶导数图上的局部异常较化极图上明显增多(图5b),异常等值线更加密集,规模较小的异常显示更加突出。尤其在化极磁场图上反映不明显的局部叠加异常、磁场梯度带上表现为局部扭曲、鼻状突出和疏密变化的磁异常在导数图中均表现为明显的圈闭磁异常。

### 3.2 重点异常解释

基于航磁等值线图、化极图和化极垂向一阶导数图,结合地质、矿产、化探等资料,初步筛选出12处具有寻找沉积变质型铁矿意义的局部异常(图5a)。

C1、C2、C3异常位于工作区北部,由新C-2008-1285异常解体而来,呈平行条带状,轴向北西,异常曲线呈尖峰状(图4a),最大幅值超过1100 nT,其中C1相对较短,已延出工作区。C1、C2、C3轴向与地层走向一致,推测为沉积变质型铁矿引起。C4、C5、C6、C7异常位于工作区中部,由新C-2008-1324异常解体而来,整体呈平行条带状,轴向多呈北西,曲线较平缓;C4曲线呈尖峰状,与C1、C2、C3相似,幅值超过1000 nT,但轴向呈北东状;C5呈椭圆状,曲线较宽缓,但幅值较高,超过800 nT。除C4外,这些异常较平缓,但幅值一般都超过500 nT,与地层走向一

致,推测也由沉积变质型铁矿引起。异常C8、C9、C10、C11、C12位于工作区南部,也位于1:100万航磁调查发现的新C-1999-13异常的南部(图3a),由1:5万航磁调查确定的新C-1999-13异常分化而来(图3b),呈平行条带状,轴向整体呈北西,曲线较平缓,局部呈尖锐状。本次测量未完全覆盖1:5万航磁调查确定的新C-1999-13异常,因此异常南部不完整,C8、C9、C10、C11、C12位于高背景场,幅值难以界定,但总体较强,轴向与地层走向一致,推测为沉积变质型铁矿的反映。由于本次航磁测量飞行高度低,获得了更多的磁性体信息,也表明尚未发现的铁矿体形态复杂(郝延海等,2013)。

### 3.3 航磁异常踏勘与发现

区内找矿前景好,但自然条件恶劣,无人居住。为了实现找矿工作的快速突破,中国自然资源航空物探遥感中心和中国地质科学院矿产资源研究所摸索建立“空地一体化”找矿工作新机制,共同组织地面踏勘队伍。根据航磁异常初步解释结果,在飞行工作完成后利用直升机迅速对区内重点找矿异常新C-1999-13进行了踏勘检查。由于经费不足,本次仅开展了1个架次载人踏勘试验。

异常区地势崎岖,可用工作时间短,工作人员仅在临时停机点附近开展了磁异常追索,在新C-1999-13边部分支异常C8发现了磁铁矿化(图6a、b),证实新C-1999-13异常具有寻找沉积变质型铁矿的重要

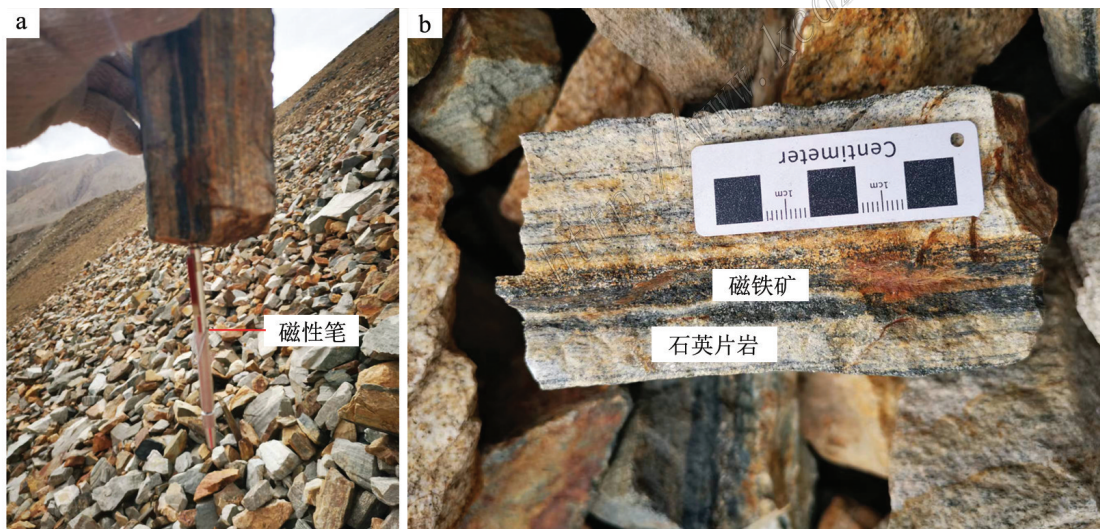


图6 新C-1999-13异常区发现的磁铁矿转石

a. 能吸住磁性笔的铁矿石;b. 具条带状构造的铁矿石

Fig. 6 Magnetite boulder discovered in the area of Xin C-1999-13 aeromagnetic anomaly

a. Iron ore which can hold a magnetic pen; b. Iron ore with banded structure



价值,将原“三当年”找矿模式进一步优化,利用直升机搭载人员大幅提高了工作效率。本次仅踏勘了新C-1999-13异常的边缘,建议继续追加经费,利用直升机运送人员和设备,对航磁异常开展钻探验证,获得新的铁矿资源量。

#### 4 大比例尺航空物探调查前景展望

工作区3次航磁测量工作历时20多年,比例尺从1:100万到1:1万,测线间距从10 km到0.1 km,平均飞行高度从833 m到234 m,测量精度从 $\pm 2.92$ 到 $\pm 0.64$  nT,定位精度从10 m左右到优于1 m,反映了中国航空物探的发展历程。从测量结果看,1:5万航磁测量将1:100万航磁测量发现的新C-1999-13异常解体为3个主要异常,异常的轴向也多样化;1:1万航磁测量将新C-2008-1285异常解体为3个主要磁异常,将新C-2008-1324异常解体为4个主要异常,而新C-1999-13异常变化较大,在高背景场上出现多个异常高点,为地表或近地表磁性体的反映,为地面异常查证提供了清楚的指示,提高了航磁异常查证效果。

直升机航空物探调查在我国起步虽然较晚(于长春等,2007;熊盛青等,2008;崔志强等,2015),但发展速度很快,目前技术较成熟,在地形复杂区大比例尺调查中已基本取代固定翼航空物探调查,其优势是成本低、机动灵活、稳定性好、可超低空飞行获取更丰富的航空物探信息等。近年来,小型无人机航空物探测量系统发展较快(李军峰等,2014;张文杰等,2021),但无人机飞行平台气候适应能力和稳定性较差,难以应用于地形条件复杂的无人居住地区,同时续航时间有限,不适合承担大规模的航空物探勘查任务,离地飞行高度控制能力也较直升机差。建议在新一轮找矿突破战略行动中大力推广直升机航空物探,提高找矿效率。

#### 5 结论

(1) 通过大比例尺高精度航磁测量和直升机投送开展航磁异常踏勘,在新C-1999-13异常发现了磁铁矿化,证实新C-1999-13异常区具有寻找沉积变质型铁矿的潜力,值得进一步开展工作。

(2) 塔什库尔干铁矿带布伦阔勒群和马尔洋岩组地层中航磁异常与含铁建造关系极为密切,

利用直升机开展大比例尺高精度航磁勘查效果明显。

(3) 直升机投送人员极大提高了高寒、深切割山区航磁异常踏勘、查证的效率,为快速实现找矿突破奠定了基础。中国地表矿已寻找殆尽,找矿难度已较大,航空物探作为快速、高效、低成本的地球物理探测手段先行非常必要,可以为地面找矿提供线索,降低成本,提高效率。

**致谢** 新疆地质局庄道泽老师给予了很好的建议,在此表示衷心的感谢!

#### References

- Chen C J. 2012. Study of metallogenic regularity and prospecting direction of iron deposits in Taxkorgan area, Xinjiang Province[D]. Wuhan: China University of Geosciences. 1-76(in Chinese with English abstract).
- Cui Z Q, Xu Z L, Meng Q M and Gao W D. 2015. Review on exploration effect and characteristics of aeromagnetic survey system based on current three types flying-platform[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 37(4): 437-443(in Chinese with English abstract).
- Dong L H, Feng J, Zhuang D Z, Li F M, Ou X, Liu D Q and Tang Y L. 2011. Discussion of metallogenic models, mineralization characteristic and main type of rich iron ore of Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 29(4): 416-422(in Chinese with English abstract).
- Feng C R, He L D, Hao Y H and Huang C Y. 2012. Features and potential analysis of the iron polymetallic deposits in the Taxkorgan area, Xinjiang[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 36(1): 102-110(in Chinese with English abstract).
- Hao Y H, Wang H J, Yang P Y and Ying X Q. 2013. Aeromagnetic characteristics of the III ore belt in the Zankan iron deposit, Taxkorgan County[J]. *Non-ferrous Geology in Xinjiang*, (9): 48-52(in Chinese).
- Hu J, Wang H, Han H W, Wei Y and Mu S L. 2016. Genesis of the Dahongliutan iron deposit in the Tianshuihai terrane, West Kunlun and its prospecting significance[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(5): 949-959(in Chinese with English abstract).
- Hu J W, Zhuang D Z and Yang W Z. 2010. The integrated information predicting model of the Zankan iron deposit, Tashikuergan area, southwestern Xinjiang, China and its application in regional metallogenic prognosis[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(10): 1495-1503(in Chinese with English abstract).
- Li J F, Li W J, Qin X W, Xu Z L, Liu J J, Meng Q M, Li F and Liu Y Y. 2014. Trial survey of a novel UAV-borne magnetic system in the Duobaoshan ore district[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 38(4): 846-850(in Chinese with English abstract).

- Li Z Q, Zhang L C, Xue C J, Zheng M T, Zhu M T, Dong L H and Feng J. 2018. Geological characteristics, formation age and high-grade ore genesis of Zankan banded iron deposit in the West Kunlun Mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(2): 427-446(in Chinese with English abstract).
- Nian W Q, Xie Y Q and Feng C R. 2014. 1:50 000 aeromagnetic characteristics and prospecting potential in Taxkorgan area of West Kunlun[J]. *West-China Exploration Engineering*, (9): 125-133(in Chinese with English abstract).
- Qiao C G, Song Y B, Liu W, Liang X J, Qiao G Z, Wu C P and Wang Y. 2009. Aeromagnetic survey in the area of Zankan-Subashi, Taxkorgan County, Xinjiang[R]. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for land and Resources. 1-126(in Chinese).
- Qiao C G, Zhou J X, Liu W, Song Y B and Wang Y. 2012. Aeromagnetic characteristics of iron ore deposits and ore-prospecting potential in Taxkorgan area of Xinjiang[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*: 36(3): 350-355(in Chinese with English abstract).
- Shanxi Institute of Geological Survey. 2008. 1:50 000 regional geological survey reports of Malate area and Kutazi area[R]. (in Chinese).
- Xiong S Q, Zhou F H, Yao Z X, Xue D J, Duan S L, Liu Z J, Zhang Y J and Liang X J. 2001. Aero magnetic survey in central and western Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-214(in Chinese with English abstract).
- Xiong S Q, Yu C C, Fang Z G, Wang N D, Wan J H and Zhang H R. 2008. Large scale aero geophysical survey with helicopter and its application to deep ore prospecting[J]. *Advances in Earth Science*, 23(3): 270-275(in Chinese with English abstract).
- Yan C H, Chen C J, Cao X Z, Zhang W S, Chen J K, Li S P and Liu P D. 2012. The discovery of the "Pamir-type" iron deposits in Taxkorgan area of Xinjiang and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(4): 549-557(in Chinese with English abstract).
- Yu C C, Fang Z G, Wang N D, Xiong S Q, Wan J H and Zhang H R. 2007. High-resolution aeromagnetic exploration methods and their application Daye iron mines[J]. *Progress in Geophysics*, 22(3): 979-983(in Chinese with English abstract).
- Zhang L C, Feng J, Dong L H, Zhu M T, Zheng M T, Li Z Q, Hao Y H and Shi Y J. 2016. Deposit types, origin and metallogenetic regularity of Taxkorgan iron ore belt in West Kunlun[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 38(4): 427-443(in Chinese with English abstract).
- Zhang W J, Yang S, Guo G Y, Xin C and Yang S Y. 2021. The application prospect of light UAV aeromagnetic survey in mineral exploration[J]. *Mineral Exploration*, 12(4): 989-999(in Chinese with English abstract).
- Zheng G R, Zhang X J, Fan Z L, Zhou J X, Song Y B and Wen S X. 2011. The application of high-precision aeromagnetic survey in West Tianshan area of Xinjiang[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*: 35(2): 188-191(in Chinese with English abstract).
- Zheng M T, Zhang L C, Zhu M T, Li Z Q, He L D, Shi Y J, Dong L H and Feng J Y. 2016. Geological characteristics, formation age and genesis of the Kalaizi Ba-Fe deposit in West Kunlun[J]. *Earth Science Frontiers*: 23(3): 252-265(in Chinese with English abstract).
- Zhou D Q, Zhang H R, Song Y B, Tan L, Yang X, Wang Y, Zhang T G and Huang X Z. 2009. 1:50 000 aeromagnetic survey in the area of Dimunalike-Bashibulake, Xinjiang[R]. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for land and Resources. 1-124(in Chinese).
- Zhou D Q, Zhou J X, Fan Z G, Tan L, Zhang H R, Huang X Z, Hu Y and Cao B B. 2013. The application of the aeromagnetic method to the rapid prospecting breakthrough in middle and high mountain areas[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 37(3): 443-448(in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

- 陈曹军. 2012. 西昆仑塔什库尔干地区铁矿地质特征、成矿模式及找矿预测[D]. 武汉:中国地质大学(武汉). 1-76.
- 崔志强, 胥值礼, 孟庆敏, 高卫东. 2015. 现行三类平台航磁勘察系统特点及勘察效果评述[J]. *物探化探计算技术*, 37(4): 437-443.
- 董连慧, 冯京, 庄道泽, 李凤鸣, 区迅, 刘德权, 唐延龄. 2011. 新疆富铁矿成矿特征及主攻类型成矿模式探讨[J]. *新疆地质*, 29(4): 416-422.
- 冯昌荣, 何立东, 郝延海, 黄朝阳. 2012. 新疆塔什库尔干县一带铁多金属矿床成矿地质特征及找矿潜力分析[J]. *大地构造与成矿学*, 36(1): 102-110.
- 郝延海, 王海军, 杨平友, 应学谦. 2013. 塔什库尔干县赞坎铁矿III号矿带磁异常特征[J]. *新疆有色金属*, (4): 48-52.
- 胡军, 王核, 韩红为, 魏勇, 蔡生禄. 2016. 西昆仑甜水海地块大红柳滩铁矿床成因浅析及找矿意义[J]. *大地构造与成矿学*, 40(5): 949-959.
- 胡建卫, 庄道泽, 杨万志. 2010. 新疆西南部塔什库尔干地区赞坎铁矿综合信息预测模型及其在区域预测中的初步应用[J]. *地质通报*, 29(10): 1495-1503.
- 李军峰, 李文杰, 秦绪文, 胥值礼, 刘俊杰, 孟庆敏, 李飞, 刘莹莹. 2014. 新型无人机航磁系统在多宝山矿区的应用试验[J]. *物探与化探*, 38(4): 846-850.
- 李智泉, 张连昌, 薛春纪, 郑梦天, 朱明田, 董连慧, 冯京. 2018. 西昆仑赞坎铁矿床地质特征、形成时代及高品位矿石的成因[J]. *岩石学报*, 34(2): 427-446.
- 年武强, 谢月桥, 冯昌荣. 2014. 西昆仑塔什库尔干地区1:5万航磁异常特征及找矿前景[J]. *西部探矿工程*, (9): 125-133.
- 乔春贵, 宋燕兵, 刘伟, 梁秀娟, 乔广志, 吴承平, 王艳. 2009. 新疆塔什库尔干赞坎-苏巴什一带航磁勘查成果报告[R]. 中国国土资源航空物探遥感中心. 1-126.
- 乔春贵, 周坚鑫, 刘伟, 宋燕兵, 王艳. 2012. 新疆塔什库尔干地区铁矿航磁异常特征及找矿潜力[J]. *物探与化探*, 36(3): 350-355.
- 陕西省地质调查院. 2008. 马拉特幅(J43E017016)和库塔孜幅(J43E018016)1/5万区域地质调查报告[R].
- 熊盛青, 周伏洪, 姚正煦, 薛殿军, 段树岭, 刘振军, 张永军, 梁秀娟.

2001. 青藏高原中西部航磁调查[M]. 北京:地质出版社. 1-214.
- 熊盛青,于长春,王卫平,范正国,王乃东,万建华,张洪瑞. 2008. 直升机大比例尺航空物探在深部找矿中的应用前景[J]. 地质科学进展,23(3): 270-275.
- 燕长海,陈曹军,曹新志,张旺生,陈俊魁,李山坡,刘品德. 2012. 新疆塔什库尔干地区“帕米尔式”铁矿床的发现及其地质意义[J]. 地质通报,31(4): 549-557.
- 于长春,范正国,王乃东,熊盛青,万建华,张洪瑞. 2007. 高分辨率航磁方法及其在大冶铁矿区的应用[J]. 地球物理学进展,22(3): 979-983.
- 张连昌,冯京,董连慧,朱明田,郑梦天,李智泉,郝延海,石玉君. 2016. 西昆仑塔什库尔干铁矿带矿床类型、成因及成矿规律[J]. 地球科学与环境学报,38(4): 427-443.
- 张文杰,杨生,郭刚冀,新臣,杨申勇. 2021. 轻型无人机航磁系统及其在矿区勘查应用[J]. 矿产勘查,12(4): 989-999.
- 郑广如,张玄杰,范子良,周坚鑫,宋燕兵,温世新. 2011. 高精度航磁调查在新疆西天山地区的应用[J]. 物探与化探,35(2): 188-191.
- 郑梦天,张连昌,朱明田,李智泉,何立东,石玉君,董连慧,冯京. 2016. 西昆仑喀来子钽-铁矿床地质特征、时代及成因探讨[J]. 地学前缘,23(3): 252-265.
- 周道卿,张洪瑞,宋燕兵,谭林,杨雪,王艳,张天阁,黄旭钊. 2009. 新疆且末县迪木那里克—若羌县巴什布拉克一带 1:5 万航磁勘查成果报告[R]. 中国国土资源航空物探遥感中心. 1-124.
- 周道卿,周坚鑫,范正国,谭林,张洪瑞,黄旭钊,胡悦,曹宝宝. 2013. 航磁调查在中高山地区找矿快速突破中的应用[J]. 物探与化探,37(3): 443-448.