

熊盛青, 徐学义. 航空地球物理在战略性矿产勘查中的应用前景[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(2): 143-156.

XIONG Sheng-qing, XU Xue-yi. Application Prospect of Aerogeophysics in Strategic Mineral Exploration[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(2): 143-156.

DOI: 10.19814/j.jese.2022.11055

•《地球科学与环境学报》更名二十周年纪念专辑•

# 航空地球物理在战略性矿产勘查中的应用前景

熊盛青<sup>1,2</sup>, 徐学义<sup>1,3</sup>

(1. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 自然资源部航空地球物理与遥感地质重点实验室, 北京 100083; 3. 中国地质调查局, 北京 100037)

**摘要:**实施新一轮找矿突破战略行动急需高效的勘查技术支撑。航空地球物理是重要的高效找矿勘查方法, 在世界矿产勘查史上一直发挥着重要作用。21 世纪以来, 我国航空地球物理技术取得了长足的发展: 自主研发的高灵敏度仪器、更高分辨率和更多种类型数据的无缝采集、更精细的数据处理和更精准的解释方法、更大的探测深度、更广的应用领域, 尤其是多参量航磁、时间域航空电磁、航空重力等新勘查技术得到快速发展。国内外找矿勘查实践表明, 航空地球物理可在矿产勘查的不同阶段中发挥重要的直接或间接找矿作用, 尤其是对铁、铜、镍、铀、钾盐等紧缺矿产勘查成效显著。但是, 针对战略性矿产勘查以难进入地区和以深部间接找矿为主的新需求, 航空地球物理找矿勘查面临信息微弱、浅部干扰大、探测(解释)结果的不确定性和地质-地球物理找矿模型难以构建等难题; 存在自主研发的新航空地球物理装备使用不够充分、实用化程度不够高, 基于较低成本的无人机平台勘查技术发展较慢, 具有更高分辨率的航磁张量梯度、航空重力梯度和航空电磁等新技术发展滞后, 先进实用的高精度航空地球物理数据采集与数据处理技术不完善, 航空地球物理与地质和其他方法融合不深入等问题。基于此, 初步总结了航空地球物理找矿勘查中不同方法在不同找矿阶段的作用, 以及探测不同矿种、不同矿产类型的有效性, 提出了航空地球物理支撑战略性矿产勘查的思路: 以先进的成矿系统理论为指导, 研究有效的技术方法或方法组合, 以解决找矿勘查部署和隐伏矿体(或成矿地质体)精准定位问题为主要目标, 重点实现国产化仪器和软件平台的实用化, 研制更高灵敏度的仪器和高效的低飞行高度-高分辨率综合探测方法、有效的信息增强和弱信息提取技术、智能化的多源信息联合反演与地质-地球物理建模方法, 发展空-地-井地球物理协同勘查技术。最后, 展望了航空地球物理战略性矿产勘查的应用前景, 讨论了航空地球物理勘查技术的发展趋势和今后需重点发展的技术方法。

**关键词:**航空地球物理; 矿产勘查; 探测仪器; 软件平台; 地质-地球物理建模; 空-地-井协同勘查技术; 战略性矿产; 应用前景

中图分类号: P631.2<sup>+</sup>22

文献标志码: A

文章编号: 1672-6561(2023)02-0143-14

## Application Prospect of Aerogeophysics in Strategic Mineral Exploration

XIONG Sheng-qing<sup>1,2</sup>, XU Xue-yi<sup>1,3</sup>

(1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Airborne Geophysics and Remote Sensing Geology, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China; 3. China Geological Survey, Beijing 100037, China)

收稿日期: 2022-11-17; 修回日期: 2023-01-11

投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U2244220); 国家重点研发计划项目(2017YFC0602200)

作者简介: 熊盛青(1963-), 男, 湖南桃江人, 中国自然资源航空物探遥感中心教授级高级工程师, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: xsqagr@126.com.

**Abstract:** Effective exploration technology is urgently needed to carry out the strategic action of mineral exploration breakthrough in China. Aerogeophysics is an important and efficient mineral exploration method, which has played an important role in the world mineral exploration history. Since the 21st century, aero geophysical technology has made great progress in China, such as self-developed high-sensitivity instruments, higher resolution and more types of seamless data collection methods, finer data processing and more accurate interpretation methods, greater detection depth, and wider application fields. In particular, new exploration technologies such as multi-parameter aeromagnetic, airborne time-domain electromagnetic, and airborne gravity, have developed rapidly. Examples of mineral exploration show that aerogeophysics can play an important direct or indirect role in different stages of strategic mineral exploration, especially in the exploration of iron, copper, nickel, uranium, sylvite and other scarce minerals. However, for the new requirements of difficult access and deep earth prospecting, aero geophysical mineral exploration faces some difficulties, such as weak useful geophysical signals, large interference from shallow parts, uncertainty of detection results and difficult construction of geological and geophysical prospecting models. Moreover, the self-developed aeronautical geophysical instruments are not sufficiently practical and used enough. In addition, the development of UAV survey technology is slow, and higher resolution technologies such as aeromagnetic gradient tensor, aero gravity gradient tensor and airborne electromagnetic technology are developing slowly. Advanced and practical high-precision airborne geophysical data acquisition and data processing technologies need to be improved, and the integration of aero geophysical and other methods is not deep enough. The functions of different methods and stages of aero geophysical prospecting were preliminarily summarized, as well as the effectiveness of detecting different mineral species and types, and the idea of aero geophysical technology supporting strategic mineral exploration was proposed. Guided by advanced metallogenic system theory, the effective technologies or technology combinations were studied to solve the problems of mineral exploration deployment and accurate positioning of concealed mineral bodies or geological bodies. Making breakthroughs were focused on in the practicability of domestic instruments and software platforms, developing instruments with higher sensitivity, developing efficient low-altitude high-resolution aero geophysical integration exploration methods, effective information enhancement and weak signal extraction technologies, and intelligent multi-source joint inversion and geophysical geological modeling methods. At the same time, the air-ground-borehole geophysical exploration technology was looked forward to the application prospect of aviation geophysical strategic minerals exploration, and the development trend of aero geophysical exploration technology and the technical methods that need to be developed in the future were discussed.

**Key words:** aerogeophysics; mineral exploration; exploration instrument; software platform; geophysical geological modeling method; air-ground-borehole exploration technology; strategic mineral; application prospect

0 引 言

能源资源安全保障已上升为国家战略,国家“十四五”规划和 2035 年远景目标对战略性矿产找矿勘查提出了新要求,明确要“实施新一轮找矿突破战略行动”,旨在通过加大国内矿产勘查力度,推动矿业

高质量发展,增强战略性矿产资源安全保障能力。战略性矿产(亦称为关键矿产)是对国家的科技、经济、军事乃至国防都有着重大意义的矿产<sup>[1]</sup>。在国家确定重点发展的 9 个战略性新兴产业中,有新一代信息技术、高端装备制造、新材料、生物、新能源汽车、新能源、节能环保等七大产业均需要重要矿产资

源及原材料支撑<sup>[2]</sup>。开展新一轮找矿突破战略行动意义重大,但急需高效的勘查技术支撑。

航空地球物理勘查(亦称航空物探)是现代化的地质矿产探测技术、军民两用高新技术、地球系统科学观测的重要组成部分,也是国家优先支持的高科技领域之一。它具有全地域、快速、综合、经济、环保和较大探测深度等特点,探测效率是地面方法的10~100倍甚至更高,成本仅为地面方法的1/10左右,可以大大减少地面物探和钻探工作。

航空地球物理主要包括航空重力(简称航重)、航空磁力(简称航磁)、航空电磁(简称航电)和航空放射性(亦称航空伽马能谱)4类勘查技术,是在能源资源安全保障、深地探测、深海探测等领域战略高技术部署中具有突破性和先导性的关键技术之一。航空地球物理通过快速获取并研究高精度重力场、地磁场、电磁场、辐射场信息,广泛应用于基础地质调查、能源和矿产资源勘查,在水文地质、工程地质、测绘、军事、环境评价等领域也发挥着重要作用。

我国航空地球物理勘查技术,通过几代人的艰苦努力,已基本实现了与国际的同步发展,并在地质找矿和国民经济建设中发挥了巨大作用。21世纪以来,我国在航空物探仪器设备、数据采集、数据处理与反演、方法应用等方面取得了长足的发展;更高灵敏度仪器、更高分辨率和更多种类型数据的无缝采集、更加精细的数据处理和更精准的解释方法、更大的探测深度以及更广的应用领域。尤其是多参量航磁、时间域航电、航重和航空重力梯度等新勘查技术得到快速发展。与此同时,航空地球物理方法与地质和其他勘查方法不断渗透与融合,初步形成了具有中国特色的高分辨率综合航空地球物理勘查技术体系和空中-地面-井中地球物理协同勘查技术,不断增强了矿产勘查能力与成效<sup>[3-4]</sup>。

航空地球物理是重要的高效找矿勘查方法,在世界矿产勘查史上一直发挥着重要作用,为许多大型金属矿床和油气田的发现作出了重要的先导性贡献。澳大利亚著名矿业咨询公司 MinEx Consulting 的统计数据表明,世界上每年平均取得60~70个找矿重大发现,物探方法(航空、地面)发挥了关键作用<sup>[5-8]</sup>。在我国,根据《中国矿床发现史:物探化探卷》对20世纪勘查技术找矿效果的统计分析,物探方法(航空、地面、井中)可有效探测的矿种有48种,矿产勘查中物探已有大的作为<sup>[9]</sup>。截至2011年的不完全统计,依据航空物探异常发现或扩大规模的矿床有1 200多处,矿种包括铁、铜、铅、锌、金、(铁)

锰、铬、锡、镍、钴、(铜)钼、铀、铍、钨、钼、钒钛磁铁矿等金属矿产,以及钾盐、石棉、金刚石、蛇纹石等非金属矿产<sup>[10-11]</sup>,其中全国80%以上的磁铁矿是根据航磁异常发现的<sup>[12-13]</sup>。

航空地球物理在矿产资源勘查中的主要作用是:通过对获取的高精度航空地球物理场数据的研究,开展岩性-构造填图,分析成矿地质背景与提取成矿地质要素,识别矿致异常,预测找矿远景区和找矿靶区,在特殊条件下直接找矿(如航磁找铁矿等,航空伽马能谱找铀矿和钾盐等)。随着科学技术的发展,它可在找矿勘查的各个阶段发挥不同的重要作用。充分发挥航空地球物理在矿产勘查中的作用,可以缩短勘探周期,提高总勘查质量,减少投资。

新一轮找矿突破战略行动中找矿勘查的基本特点是:调查区分为基础调查区、重点调查区、重点勘查区和重要矿山深部等四大区,大多分布在西部中高山、深切割等难进入地区和覆盖区;确定的战略性矿产资源矿种有36种,按矿产类型可分为能源矿产、金属矿产和非金属矿产3类,按供需紧缺程度分为紧缺矿产和优势矿产两类;勘查目标是提交可出让的矿业权区块,拟提交的区块按地质工作程度可分为远景区块、验证区块、勘查区块以及其他区块4类<sup>[1,14]</sup>。

勘查实践表明,航空地球物理可以在新一轮找矿突破战略行动中发挥重要作用。上述矿产中大多数是地球物理(航空、地面、井中)方法可发挥直接或间接找矿作用的,尤其是对富铁、铜、镍、铀、钾盐等紧缺矿产勘查成效显著。但是,在新一轮找矿突破战略行动的实施中,航空地球物理勘查技术的应用也面临着重大挑战:①战略性矿产勘查区主要分布在覆盖区、边远地区和勘查条件恶劣地区,现有航空物探方法的适应性还不强;②战略性矿产勘查的目标是提供可出让的矿业权区块<sup>[14]</sup>,矿产勘查程度要求高,对航空物探的精细探测能力也提出了更高的要求;③航空地球物理对大部分战略性矿产的找矿勘查属于间接找矿,尤其是稀有金属矿产因矿体(或成矿地质体、或含矿地层)与围岩的物性差异小,地球物理信息微弱,且航空物探对这类矿产的勘查经验少,其方法的有效性尚不清晰。因此,要充分发挥航空物探的作用还有许多找矿勘查理论和关键技术问题亟待突破。

本文简要介绍我国航空地球物理勘查技术发展历程、主要科技进展,总结航空地球物理在矿产勘查中的应用成效,探讨航空地球物理找矿勘查中不同

方法、不同找矿阶段的作用,以及探测不同矿种、不同矿产类型的有效技术方法组合,阐述战略性矿产资源(以金属矿产为主)勘查对航空地球物理勘查技术的需求、存在的主要问题与难点,展望应用前景和发展趋势,并提出发展航空地球物理勘查技术的思路、攻关重点与相关建议。

## 1 航空地球物理勘查技术发展历程和主要科技进展

### 1.1 发展历程

我国航空地球物理勘查始于 1953 年。按仪器灵敏度、测量参数、导航定位、记录方式、测量精度与应用领域等要素的阶段划分,大致经历了 3 个发展阶段。①中低精度测量阶段,亦称第一代航空物探。时间为 20 世纪 50 年代至 70 年代末期,其特点是以引进技术为主,主要方法是航磁总场和放射性总量测量,应用领域是以找铁矿和铀矿、圈定油气盆地为主。②高精度测量阶段,亦称第二代航空物探。时间为 20 世纪 80 年代初期至 90 年代中期,其特点是引进技术与自主技术并重,主要方法为航磁总场、航空伽马能谱和频率域航电测量,应用领域以找铁矿、多金属矿、铀矿、钾盐,以及油气局部构造、地质(岩性-构造)填图等为主。③高分辨率综合测量阶段,亦称第三代航空物探。时间是 20 世纪 90 年代末期至现今,其特点是以自主技术为主,主要方法为航磁多参量、航空伽马能谱、频率域和时间域航电、航重及其综合测量,应用领域为铁、多金属、贵金属、铀、稀有稀土、钾盐等矿产勘查,油气局部构造评价,岩性-构造填图,以及军事、测绘、环境、工程勘察等。高分辨率综合测量具有更高的仪器灵敏度、导航定位精度、测量精度,更多的参数(量),更大的测量比例尺等特点,勘查能力和解决地质问题能力较第二代航空物探有大幅度提高。

### 1.2 主要科技进展

我国航空地球物理仪器装备和软件长期受制于国外,是制约我国该领域技术发展与应用的“卡脖子”问题。通过“十一五”以来国家高技术研究发展计划、国家重点研发计划等重大科技计划的持续支持,航空地球物理勘查技术已取得了突破性进展,形成了具有中国特色的高分辨率综合航空地球物理勘查技术体系<sup>[3-4,15-16]</sup>。与第二代航空物探相比,主要技术进步体现在仪器装备基本实现国产化、飞行平台和勘查系统多样化、测量参数(参量)大幅度增加、数据采集技术显著提高、数据处理方法和软件实现

自主可控、找矿勘查理论方法不断完善等方面。

(1)仪器装备基本实现国产化。航空地球物理勘查仪器,包括航空重力仪、磁力仪、磁补偿仪、电磁仪、伽马能谱仪等核心仪器,以及专用导航定位和数据收录等配套仪器与装置,已实现自主创新与初步国产化,技术指标总体达到国际同类仪器先进水平,显著地缩小了与发达国家的差距,实现重大跨越。

(2)飞行平台和勘查系统多样化。飞机改装与勘查系统集成技术持续提高,基于固定翼飞机、直升机、无人机、滑翔机、飞艇等多种类型平台,集成了多种单一方法的高精度航空地球物理勘查系统,以及航空磁/重、航空磁/电/放、航空磁/重/遥等综合勘查系统。

(3)测量参数(参量)大幅度增加。航重测量填补国内空白,航磁由总场测量发展到总场、梯度和矢量测量,航电由频率域发展到频率域与时间域测量,实现了航磁、航重、航电、航空伽马能谱 4 类方法,以及航空重磁与遥感综合方法的勘查应用,测量参数(参量)较第二代航空物探增加了 29 个。

(4)数据采集技术显著提高。我国发展了适合高原、中高山区和海域等多种复杂条件下的低高度-高信噪比-高精度-快速获取勘查数据的飞行测量技术,初步形成了全地域、多尺度、高精度的航空综合探测能力。

(5)数据处理方法和软件实现自主可控。我国自主研发出了航空地球物理数据处理、解释与成图技术方法以及基于自主底层平台的大型软件平台——地学探针(GeoProbe Mager),其中无人机航磁数据处理解释软件(GeoProbe UAV)已经产品化。这些软件平台实现了航空地球物理数据全流程、多参数、多维度、同平台快速处理解释,显著地提高了航空地球物理勘查数据的处理解释能力与地质应用效果,初步解决了制约我国航空地球物理高效勘查应用的“软装备”问题。

(6)找矿勘查理论方法不断完善。我国建立和完善了高分辨率综合航空地球物理-地质解释模式。它涵盖了航空地球物理资料地质解释的全过程,包括数据处理与信息提取、综合地球物理场特征分析、地质要素解译与编图、矿致异常识别与定量解释、地质-地球物理建模、综合地质信息矿产预测等 6 个方面。其核心是定性解释与定量解释结合,重点解决探测的多解性问题;综合解释和联合反演,重点解决快速、精准探测问题。此外,我国还研发了空中-地面-井中地球物理协同勘查技术并应用示范,建立了

系列勘查技术标准和地球物理校准场等。

总体来讲,目前我国航空地球物理勘查技术已实现了与国际先进的航空地球物理勘查技术同步发展。其中,航磁和航空伽马能谱勘查技术由“并跑”到部分“领跑”;航重勘查技术由“无”到“有”,再到目前的“并跑”;航电勘查技术由“跟跑”到基本“并跑”;航空地球物理软件平台已工程化应用,功能与国外相关平台相当。

## 2 航空地球物理矿产勘查应用成效

### 2.1 应用概述

#### 2.1.1 国外找矿勘查

通过对国际资深勘探地球物理学家 Paterson 总结的 20 世纪物探技术发展及矿产发现史<sup>[5]</sup>、Witherly 总结的过去 60 多年来矿产勘探演变趋势<sup>[6-7]</sup>以及加拿大金属经济小组发布的《公司勘查战略报告》历年调查结果等资料<sup>[17-18]</sup>的综合分析,吴其斌等将国外物探方法找矿大致分为 3 个发展阶段<sup>[8]</sup>,每一个发展阶段在矿产勘查中都发挥着重要作用,而且技术方法的进步加速了矿产勘查的前进步伐,提高了找矿成功率。

第一阶段是直接找矿时代。这一阶段大致发生在 20 世纪五六十年代,典型的案例是采用航磁测量和航空电磁法(AEM)发现的一系列多金属硫化物矿床。第二次世界大战之后,在北美洲、澳大利亚、南非和苏联掀起的航磁测量热潮,导致了铁、镍、石棉、稀土金属等矿产的发现。20 世纪 60 年代航空电磁法快速发展,已成为寻找硫化物金属矿床极为有效的手段,找矿效果非常突出,堪称 20 世纪矿产勘查中最成功的里程碑事件之一。

第二阶段为地表填图时代,即利用物探方法进行地表填图并发现浅部矿床。其主要方法包括磁测、激发极化测量、电磁测量和放射性测量等。20 世纪 80 年代之后,随着时间域电磁测量方法(航空、地面和井中)的发展成熟,其具有分辨率较高、探测深度大的特征,使之在金属矿产勘查(尤其是块状硫化物金属矿床勘查)中发挥了主导作用,并取得了一系列找矿新突破。20 世纪 90 年代以来,高分辨率航空物探方法得到快速发展,并应用于澳大利亚一些州政府推出的矿产勘查计划,采集了一大批高质量数据,编制和更新了一批新的图件,据此直接或间接地发现了一批金属矿床。

第三阶段为智慧地下深部填图时代。通过采用高灵敏度、大探测深度、分布式数据采集系统和高效

数据处理,密切结合地质与成矿背景,进行地下深部填图,进而取得找矿新发现。进入 21 世纪后,矿产勘查难度显著增大,矿床发现成本不断攀升,但新矿床发现成功率未显著提高。为此,加拿大、澳大利亚等一些传统的矿产资源大国,为保持其在全球矿产勘查开发领域的领先地位,分别制定了新的矿产资源勘查战略。一是持续地加大勘查投入,给矿产勘查活动注入新的动力;二是矿产勘查投资的重点集中在铜、铅、锌、镍等有色金属矿和金矿等,并以巨型或大型矿床的发现为目标;三是通过科技创新,将信息技术渗透并融合到传统勘查技术方法之中,运用成矿系统等地质找矿新理念、新思维,逐步形成新一代勘查技术方法,并在仪器设备、数据解释与反演、方法应用等方面取得了长足的发展,尤其是高分辨率、大探测深度航电系统和航空重力梯度技术发展迅速,探测深度提升到数百米,甚至上千米。这些战略的实施开创了地质找矿的新局面,取得了一系列重大发现。澳大利亚著名矿业咨询公司 MinEx Consulting 的数据表明,世界上每年平均取得 60~70 个找矿重大发现<sup>[8]</sup>。

#### 2.1.2 国内找矿勘查

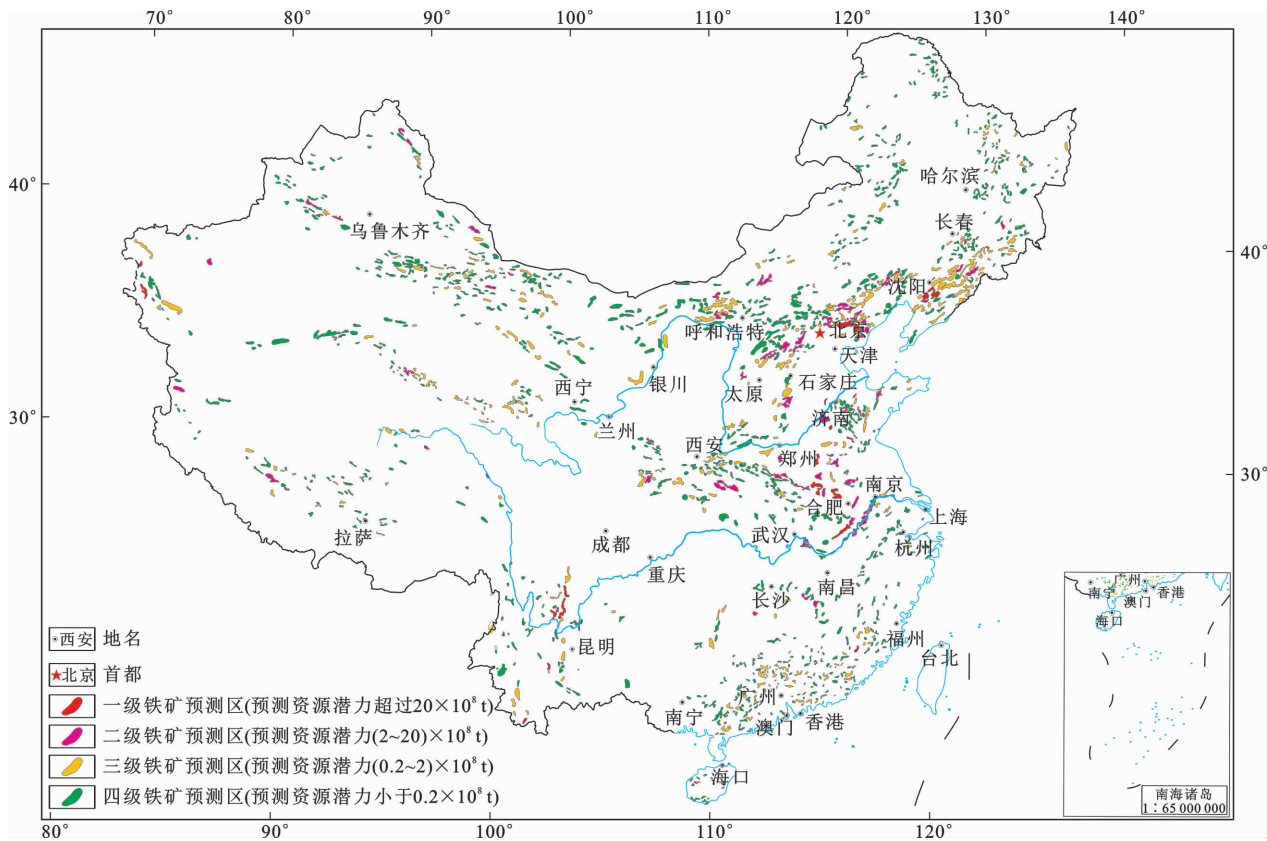
据《中国矿床发现史:物探化探卷》<sup>[9]</sup>对 20 世纪勘查技术找矿效果的不完全统计,依据物探方法(航空、地面、井中)在矿床发现和扩大规模中起到重要作用的矿床有 661 个,排在各类勘查技术的前两位,尤其是在寻找块状硫化物矿床方面物探优于化探。物探方法可有效探测的矿种有 48 种,包括新一轮找矿突破战略行动确定的矿种有 22 种,其中能源矿产 4 种、金属矿产 14 种、非金属矿产 4 种。

近 70 年来,我国航空物探在铁、铜多金属、铀等矿产勘查中发挥了重要作用,取得了突出找矿效果。据不完全统计,截至 2012 年我国航空物探发现了超过 60 000 处航磁局部异常和 4 400 余处航空放射性异常,以航空物探异常为线索,经地面查证发现或扩大规模的矿床 1 214 处(图 1),其中大型矿床 114 处,中型矿床 153 处,矿种主要包括铁、铬、铜、镍、铅、锌、铝、锡、钼、钨、金、钴、铂、钽、锂、钾盐、金刚石、硫、石棉、蛇纹石等矿产<sup>[10]</sup>。全国 80% 以上的磁铁矿是根据航磁异常发现的<sup>[11-12]</sup>,已勘查的铀矿中 94.4% 是由航空伽马能谱测量和地面放射性方法首先发现的,其中依据航空放射性异常发现的铀矿床有 45 个,占全国铀矿床总数的 22.5%<sup>[12-13]</sup>。

近 20 年来,高分辨率综合航空地球物理勘查技术的研发和推广应用取得了显著的找矿效果,有力







图件引自文献[24],有所修改

图 2 中国陆域磁性铁矿资源潜力预测图

Fig. 2 Potential Prediction Map of Terrestrial Magnetic Iron Ore Resource in China

极大地缩小了找矿范围;在部分重要成矿带优选出具有找铁矿前景的靶区 162 片;预测全国铁矿资源量为  $1\,935 \times 10^8$  t,其中 2 000 m 以浅资源潜力为  $1\,334 \times 10^8$  t,预测四川攀枝花地区富铁矿资源量  $44.28 \times 10^8$  t,尤其是预测了 702 个矽卡岩型铁矿预测区的铁矿资源潜力达  $223 \times 10^8$  t,寻找富铁矿的潜力很大。该项成果对于指导全国磁性矿产(尤其是铁矿)勘查选区发挥了重要作用,根据矿产预测成果,经后续勘查发现了一批铁、铜多金属矿床,并将继续在指导新一轮找矿突破勘查选区中发挥重要作用。

## 2.2 各种航空地球物理方法的作用

不同的航空物探方法在找矿勘查中的作用不同(表 1)。航空磁测是国内外找矿勘查最常用和有效的地球物理方法,可直接找磁铁矿,并在寻找与磁铁矿共生或伴生的铜、镍多金属矿方面效果显著。航空重力测量是 21 世纪以来发展的能源和矿产资源勘查新方法,国内外在找铁矿、铜镍等多金属矿方面已有许多成功实例。航空电磁法(尤其是时间域航空电磁法)是隐伏金属矿产资源找矿勘查最有效的地球物理方法,在国外得到了广泛应用,发现了大量

多金属矿床,在国内发现了新的镍矿和金矿<sup>[22]</sup>,其应用潜力巨大。航空放射性方法是找铀矿的主要方法,并在稀土稀有金属矿、钾盐矿找矿勘查中发挥重要作用,在寻找伟晶岩型锂矿等矿产方面具有较好的应用前景。

综合分析可知,航空物探在找矿勘查中发挥作用大、效果好的矿产有 12 种,包括石油、天然气、铀 3 种能源矿产,铁、铜、镍、铬、金、钾盐等紧缺矿产和钼、钒、钛等优势矿产;有一定作用和效果的矿产有 12 种,包括铝、锰、钴、锂、铍、萤石、硼等紧缺矿产,钨、锡、锑、稀土、磷等优势矿产;应用较少的矿产有 12 种,包括页岩气、煤层气、锆、钨、铋、铌、铍、铯等紧缺矿产,煤炭、铟、锗、镓、品质石墨等优势矿产<sup>[9-10]</sup>。

## 2.3 在找矿勘查各阶段中的作用

众多学者基于勘查实践结果认为,航空地球物理在找矿勘查的各个阶段均能发挥重要作用,但不同比例尺、不同精度的航空地球物理资料解决找矿勘查问题的能力是有差异的<sup>[9-10,22-26]</sup>。通常,中小比例尺资料主要用于成矿地质背景研究,分析成矿控矿要素,达到成矿预测与勘查选区的目的;大比例尺

表 1 不同航空物探方法在找矿勘查中的作用

Table 1 Functions of Different Airborne Geophysical Exploration Methods for Mineral Prospecting

方法	主要用途	局限性	测量比例尺	备注
航空磁测	油气勘查;铁、铜、镍、铬、金、钼、钒、钛、铝、锰、钴、钨、锡、锑、锂、铍、稀土、萤石、磷、硼及滨海砂矿(钛、锆、钨、锡、稀土)等矿产勘查,成矿地质背景研究等	垂向分辨率较低;部分矿产的成矿地质体与围岩磁性差异小,弱异常信息难以识别	1:200 000~1:2 000	有多种不同组合,如重/磁、磁/伽马能谱、磁/电磁、磁/电磁/伽马能谱等
航空重力/重力梯度测量	油气勘查;铁、铜、镍等部分固体矿产勘查,区域地质调查,成矿地质背景研究等	目前空间分辨率难于满足固体矿产精细勘查;航空重力梯度技术尚未实用化	1:200 000~1:50 000	
航空电磁测量	铜、镍等多金属矿产勘查,地下水资源调查,地下电性结构探测等	易受电性干扰,探测深度受环境电阻率影响	1:50 000~1:2 000	
航空伽马能谱测量	铀、稀土稀有金属、钾盐、多金属、贵金属和非金属矿产勘查,区域地质调查,成矿地质背景研究等	探测深度有限,矿产勘查局限于浅地表	1:50 000~1:10 000	

高精度资料可用于隐伏矿体或成矿地质体预测,建立深部矿体或成矿地质体二维或三维模型,快速缩小靶区,指导勘探工作;而高分辨率航空地球物理勘查技术可用于成矿地质体和成矿结构面的定位探测,指导钻探工程的部署。

2.3.1 区调、矿调阶段(快速找矿勘查选区)

航空地球物理是区域地质矿产调查的重要组成部分,其目的是辅助地质矿产填图,测量比例尺 1:200 000~1:50 000,通过查清区域地球物理场(重、磁、电、放)及其属性特征,快速提取各类成矿地质要素,如隐伏侵入岩、火山岩、断裂、构造、蚀变岩、蚀变带等,分析成矿地质背景,深化对区域成矿规律的认识,发现有找矿意义的异常,圈定找矿预测区。鉴于我国主要成矿带大部分已为航磁和航空放射性资料所覆盖,此阶段的工作可以开发利用已有资料为主,对空白区和低精度资料覆盖区适当补充测量即可,可为新一轮找矿突破战略行动快速提供能够进一步勘查的远景区块。

2.3.2 预查、普查阶段(快速缩小靶区)

预查、普查阶段的作用主要是,通过 1:50 000~1:25 000 比例尺的航空物探测量(最好是综合测量),提供从地表到地下深处的有关待寻找目标物的信息,开展岩性-构造填图,分析成矿地质背景,发现矿致异常,确定异常源的性质、分布范围、埋深、延深、找矿意义等。在此基础上,识别、剔除无目标物存在的地段,缩小勘查靶区,并且在可探测深度和网度下,其预测结果非常可靠,可为新一轮找矿突破战略行动提供能够进一步勘查的验证区块。

2.3.3 详查、勘探阶段(提高钻孔见矿率)

详查、勘探阶段的主要作用是,通过在矿集区或地质上选出的远景区块开展 1:10 000~1:5 000,甚至 1:2 000 高分辨率综合测量,经过精细的数据

处理与定量解释,开展成矿地质体定位预测,探明隐伏成矿地质体的地质属性和三维结构,包括位置、埋深、空间分布以及与围岩的接触关系等。近年来发展的空-地-井地球物理协同勘查技术,充分发挥各种地球物理勘查的技术优势,可大大提高预测结果的准确性,提高钻探的见矿率,在老矿山边部和深部找矿中也可发挥重要的定靶作用。例如,在大冶铁矿采用 1:10 000 高分辨率航磁指导钻探工作,在 720 m 深处发现了新的富铁钴矿体<sup>[27-29]</sup>。刘士毅等认为航空磁测是有效的矿区抗干扰方法,高分辨率航磁定位精度可达到 1:10 000~1:5 000 比例尺的定位要求;该技术已经成熟,应大力推广,可以替代不小于 1:2 000 比例尺地面较大工作量的面积性磁测<sup>[30]</sup>。对于磁铁矿等还可以估算资源量<sup>[23-24,31]</sup>,吴晓峰等总结了矿山深部、边部磁法找矿工作方法和步骤<sup>[32]</sup>。该阶段航空物探应作为新一轮战略性矿产工作部署的重点,为提供勘查区块做好数据和技术支撑。

2.3.4 小 结

需要说明的是,随着找矿勘查理念和勘查技术的进步,上述勘查阶段的划分界线越来越模糊,“从飞行到钻孔”的新勘查模式已成为国内外找矿勘查的发展趋势。

3 航空地球物理在战略性矿产勘查中的应用前景

3.1 需 求

新一轮战略性矿产勘查的目的之一是通过进一步勘查提交可出让的矿业权区块,引导商业性矿产勘查,实现找矿突破,优化国内供应格局。根据《固体矿产区块优选调查评价技术要求(征求意见稿)》规定,拟出让的矿业权区块按地质工作程度可分为



远景区块、验证区块、勘查区块以及其他区块4类<sup>[14]</sup>。其中,远景区块要求成矿地质条件有利、有物化探异常,与已知矿床可类比,经勘探检查发现矿(化)点;验证区块要求找矿预测圈定了可供普查工作的范围或位于已知矿床外围;勘查区块要求开展了普查及以上阶段勘查工作;其他区块是以往有采矿活动,主要是重要矿山的深部与边部。

综合分析认为,上述4类区块的找矿勘查,需要航空地球物理勘查解决的主要地质找矿问题如下(各阶段的重点和精细程度等要求有所区别):①快速识别与提取各类成矿地质要素。通过创新多尺度、定性与定量结合的地球物理-地质解释模式,快速圈定隐伏侵入岩、火山岩、断裂、构造、蚀变岩、蚀变带等成矿地质要素,分析成矿地质背景,圈定找矿预测区,为研究解决成矿规律、矿产预测(即有没有矿)等重大地质找矿问题提供科学依据。②快速发现和圈定矿致局部异常。通过查明不同类型矿产的地球物理异常响应特征,建立典型矿床地质-地球物理模型,确定异常源的性质、分布范围、埋深、延深、找矿意义等。③成矿地质体定位预测。完善定性与定量、二维与三维结合的地球物理异常解释技术方法,其目的是探明隐伏成矿地质体的地质属性和三维结构,包括位置、埋深、长度、宽度、延深、与围岩的接触关系等。④快速优选找矿靶区。完善基于航空地球物理资料解释的矿产资源快速评价与定量预测技术,提供可进一步勘查的远景区块、验证区块和勘查区块,支撑解决“哪里找矿”问题。

### 3.2 主要问题与差距

从技术角度讲,我国航空地球物理勘查技术存在的主要问题与差距有:①在前沿技术方面,具有更高分辨率的航磁张量梯度、航空重力梯度和大深度航空电磁等技术与国际一流水平还有较大差距。②面对以间接找矿为主的需求,现有仪器的灵敏度、探测分辨率、精度有待提高,需突破新型高灵敏传感器、高性能电子学模块、高稳定性仪器装备制造等关键核心技术,有待研制更高精度的新型探测仪器装备,以提高对弱信息的探测能力。③先进实用的高精度航空地球物理数据采集与数据处理技术不完善,数据处理软件系统的性能与国外还有一定差距。针对中高山区、覆盖区矿产资源快速勘查评价的多飞行平台、有效降低飞行高度的飞行方法等有待完善,亟待开发数据精细处理、强动态干扰下微弱信息智能提取等技术。④空-地-井地球物理协同勘查技术应用刚刚起步,如何充分发挥航空地球物理勘查

的快速、高效、绿色、覆盖面大,地面地球物理勘查精度高,以及井中地球物理垂向分辨率和定位精度高的综合优势,建立和完善空-地-井地球物理协同勘查技术体系。由此可见,提高战略性矿产的找矿勘查效果,还有许多理论、技术和方法问题有待攻克。

从应用角度讲,制约航空地球物理探测技术的推广因素主要有:①国内研发的航空物探装备虽然技术指标达到或接近国际先进水平,但因飞行实验面积过少,使用不够充分,勘查系统的稳定性、可靠性与国外有较大差距,实用化程度不够高,导致系统更新迭代速度较慢;仪器的小型化不够,难以满足中高山等地区“轻便化”需求。②针对矿田或矿床尺度的小范围勘查,基于直升机、固定翼飞机等飞行平台的航空物探新技术应用成本较高,而基于较低成本的无人机平台勘查技术发展和推广较慢。③航空地球物理数据地质解释与找矿需求结合不深入,数据处理解释方法、软件推广应用不够。有待深化针对战略性矿产资源勘查的航空地球物理-地质解释理论方法研究,进一步提高航空地球物理资料应用的“大众化”程度。

### 3.3 难点

新一轮战略性矿产勘查将围绕基础调查区、重点调查区、重点勘查区和重要矿山深部等四大区开展重点突破。这些地区大多分布在西部中高山和深切割等难进入地区和覆盖区,且除铁矿、铀矿等少部分矿产可用地球物理方法直接找矿外,大部分矿产都是间接找矿,难度极大。例如,航磁除直接找铁矿外,对其他矿产的勘查主要是通过揭示航磁异常特征与磁铁矿共生/伴生的铜、镍等有色金属矿种的控矿构造、赋矿地层和成矿岩体等控/示矿要素的空间形态及耦合关系,达到间接找矿的目的。

综合分析可以发现,航空地球物理应用于战略性找矿勘查的难点主要表现在:①信息微弱。深部成矿地质体产生的地球物理场信息弱,且随着探测距离和深度的增加迅速衰减,通常只能形成难以识别的宽缓弱异常;目标物太小而使异常遗漏;弱异常往往叠加在较复杂的背景之上。②浅部干扰。覆盖层往往具有遮挡和屏蔽物探异常信号的作用,常规地质找矿方法难有效果,存在深部地质信息探测技术难题;在中东部地区人为干扰严重。③多解性和不确定性。场源定性(地质属性)存在不可靠性或多解性,而且深度越大,定性越困难;随着深度的加大,对成矿地质体空间分布(深度、边界等)探测的准确性降低、难度加大。④找矿模型建立难。不同矿产

与地球物理场之间的耦合关系复杂,在不同矿产的地质-地球物理场模型建立和探测理论方面存在许多难点,如矿山的非线性复杂几何模型、复杂的重磁电震异常表征模型、非线性探测理论等。

3.4 支撑找矿勘查的思路

针对战略性矿产找矿勘查的新需求和难点,以成矿系统等先进的成矿地质理论为指导,研究有效的技术方法或组合,以解决找矿勘查部署和隐伏矿体(或成矿地质体)精准定位问题为主要目标,以航空地球物理方法具有优势的大宗紧缺战略性矿产勘查为重点,同时探索战略性稀有金属矿产的地质-地球物理找矿模式和有效技术方法组合,突破如下找矿理论与关键技术:①开展战略性矿产找矿勘查示范区的飞行试验,解决国产化仪器和软件平台的实用化难题,尽快实现工程化应用;②研制更高灵敏度的仪器,研发高效的低飞行高度-高分辨率航空地球物理综合探测方法,尽可能获取高精度的综合地球物理数据;③研究有效的信息增强和弱信息提取方法,尤其是抗浅部屏蔽和干扰的信息增强技术,尽可能地提取与成矿有关的深部弱信息;④研究有效的多源信息联合反演与地质-地球物理建模方法,揭示不同矿产与地球物理场之间的耦合关系,建立具有普适性的找矿模型,减少解释结果的多解性,提高可

靠性;⑤发展空-地-井地球物理协同勘查技术,研究成矿地质体深度(纵向)和边界(横向)的有效识别与定位探测技术,提高对探测目标的分辨能力,实现深部成矿地质体的精细探测与矿产资源的精确定位预测,有力支撑新一轮找矿突破。

3.5 应用前景

通过对全国 1 991 个典型矿床地质-地球物理特征的研究<sup>[10]</sup>,以及国内外找矿勘查成功案例的分析<sup>[8-9,19-23,25-37]</sup>,航空地球物理可有效探测岩浆型铜矿、铜镍矿、铜钼矿、钒钛磁铁矿、铁稀土矿、铬(铁)矿、铀矿等;热液交代型-热液型(矽卡岩型)铁矿、铜矿、铜钼矿、锡铅锌多金属矿、钼矿、钨矿、银、硼矿等;斑岩型铜矿、钼矿、铅锌矿等;火山岩型铁矿、铁多金属矿、铅锌矿、金矿、银矿、钨矿、锰矿、硫矿等;沉积-变质型铁矿、硼(铁)矿、稀土矿、硫矿、萤石矿、重晶石矿等;砂岩型铀矿;沉积型铝土矿、钾矿、磷矿、稀土矿、锰矿、钼矿、铅锌矿、萤石矿等。航空地球物理在上述矿产勘查中可发挥重要的直接找矿或间接找矿作用(表 2)。可以预见的是,通过攻克上述勘查理论与技术难题,针对不同的矿种和矿产成矿类型,在先进的成矿系统理论指导下,研究不同矿产与地球物理信息的耦合关系,采用不同的有效方法组合,加强综合找矿,航空地球物理将在战略性矿

表 2 航空地球物理有效探测的主要矿产类型及方法组合

Table 2 Main Mineral Types and Combinations of Effective Airborne Geophysical Methods				
序号	矿床类型	主要矿种	典型矿床	有效方法组合
1	岩浆型	铜矿、铜镍矿、铜钼矿; 铁矿、钒钛磁铁矿; 铬(铁)矿等	金川铜镍矿、黄山东铜镍矿、喀拉通克铜镍矿、坡十铜镍矿; 潭村铁矿、大庙铁矿、攀枝花钒钛磁铁矿、瓦吉里塔格钒钛磁铁矿、 罗布莎铬铁矿等	磁+重力; 磁+电磁
2	热液交代型 (矽卡岩型)、 热液型	铁矿;铜矿;锡铅锌多金属 矿;铜钼矿、钼矿;钽铌锂矿; 铀矿;钨矿;银矿;硼矿等	大冶铁矿、马坑广义铁矿、莱芜张家洼铁矿、莱芜顾家台铁矿、 邢邯式铁矿;寿王坟铜钼矿;南丹大厂锡铅锌多金属矿、核桃坪 铅锌矿;卡拉达坂铅锌矿;相山钼矿(花岗岩型)、宜春钽铌锂矿 (碱性蚀变花岗岩型)等	磁+重力; 磁+电磁+能谱
3	斑岩型	铜矿;钼矿;铅锌矿;银矿等	多宝山铜矿;玉龙铜钼矿;栾川南泥湖钼矿(斑岩型-矽卡岩型)等	磁+电磁; 磁+电磁+能谱; 磁+重+成像光谱
4	海相火山岩 型和陆相 火山岩型	铁矿;铁多金属矿;铅锌矿; 铀矿;金矿;银矿;钨矿; 锰矿等	磁海铁矿、查岗若尔铁矿、智博冰川铁矿、泥河铁矿、罗河铁矿(玢岩型)、 雅满苏铁矿;墩德铁锌矿等	磁+重; 磁+能谱
5	沉积-变质型	铁矿、硼(铁)矿;稀土矿; 硫矿;萤石矿;重晶石矿等	西鞍山铁矿、大台沟铁矿、司马营铁矿;石碌铁(钴铜)矿、 赞坎-乔普卡铁矿、穆卡尔铁矿、叶里克铁矿、迪木那里克铁矿; 白云鄂博铁稀土矿;凤城翁泉沟硼铁矿等	磁+重力; 磁+电磁
6	沉积型	钾矿;铀矿;铝土矿;磷矿; 稀土;锰矿;铜矿; 铅锌矿;萤石矿等	宣化庞家堡铁矿;白彦花铀矿(砂岩型);务川大竹园铝土矿; 宜昌樟村坪磷矿;东平锰矿(沉积锰帽型);四子王旗苏莫查干敖包 萤石矿(沉积改造型)等	磁+能谱; 磁+电磁+能谱; 磁+重

产勘查中发挥重要作用。

## 4 讨论

### 4.1 发展方向

航空地球物理勘查技术的总体发展趋势是:进一步提高探测分辨率、精度、深度、维度,发展以无人机集群和智能化为特色的新一代航空物探技术(第四代),以满足新一轮战略性矿产资源勘查为主要目标。

从应用角度讲,将向“一深”和“一浅”及两者结合的方向发展。“一深”是以满足深部找矿和地球深部探测等需求为主要目标,不断地提高探测深度(金属矿产 3 000 m,油气资源 100 000 m)是其攻关重点,力争探得更深。“一浅”是以服务于中高山-深切割-浅覆盖区地质与矿产勘查、地下水资源勘查、生态地质、环境地质、地下空间探测等领域为主要目标,探测地表以下一定深度(如 300 m 以浅)目标物,攻关重点是不断提高对探测目标的空间分辨率与属性分辨力,力争探得更精细。

从技术角度讲,将以瞄准国际前沿和国际一流为目标,通过解决“一硬”和“一软”的关键核心技术,实现高分辨率、高精度、大深度、多维度的立体探测。“一硬”是通过研制抗强干扰的精密仪器与装备,解决高精度数据获取的瓶颈问题。“一软”是通过研发高分辨率的综合勘查技术,重点发展基于无人机集群、智能化的超高分辨率综合勘查技术,更精确地获取地球物理场数据;通过攻克微弱信息提取、智能化数据精细处理解释等关键核心技术,研发新一代航空地球物理软件系统,实现数据处理与解释的智能化、精细化和精准化,更精细地提取和研究地球物理场(异常)信息,更精准地解决地质矿产勘查等地球科学问题。

### 4.2 重点发展的航空地球物理勘查技术

为满足战略性矿产资源快速勘查评价等需求,需突破“卡脖子”关键核心技术,大力推进航空地球物理新技术研发和实用化研究,完善升级航磁梯度、航空三分量磁测、时间域航空电磁、航空重力/重力梯度、航空伽马能谱、长航时自主避障无人机航磁等装备,提高仪器精度和可靠性。推进技术装备工程化应用,构建航空地球物理高效精细探测和成矿地质体精准定位技术装备体系,具备区域尺度快速准确圈定 500 m 以浅矿致异常信息的能力。推动传统地球物理探矿范式变革,实现航空磁测大幅度取代地面磁测,航空重力测量和时间域航空电磁成为区

域尺度找矿预测的普遍手段。实现先进航空地球物理技术装备国产化,使我国航空地球物理勘查技术与装备总体达到国际一流水平。

#### 4.2.1 航磁全参量勘查技术与装备

航磁全参量勘查技术与装备的发展目标是实现地磁场全要素、全参量测量,进一步提高对深部探测目标的分辨能力。近期重点发展方向是研制产品化的小型无人机航磁勘查系统,实用型直升机航磁梯度测量系统、三分量航磁系统、全张量航磁梯度勘查系统,研发先进实用的航磁多参量数据精细处理与解释技术;中长期重点发展方向是研制航磁全要素、全参量一体化勘查系统,实现地磁场全要素、全参量的航空测量。

#### 4.2.2 航空重力/重力梯度勘查技术与装备

航空重力/重力梯度勘查技术与装备的发展目标是突破其应用于金属矿产勘查分辨率低的“瓶颈”。近期目标是攻克航空重力灵敏度和空间分辨能力提升技术与重力数据精细处理解释技术,实现航空重力仪系列化、实用化、产品化;中长期目标是研制实用化的航空重力梯度勘查系统和全波段航空重力勘查系统。航空重力梯度技术具有抗动态干扰强、空间分辨率高、探测效率高等特色,在国外已成为油气和金属矿产勘查的新一代技术。

#### 4.2.3 多深度航空电磁勘查技术与装备

多深度航空电磁勘查技术与装备的发展目标是实现 0~3 000 m 全深度探测。近期研究重点是研制轻型化的时间域航空电磁系统和半航空电磁系统(探测深度 300 m 左右)、航空电磁数据处理解释技术与软件,以满足中高山、深切割等难进入地区快速找矿勘查的急需;研制实用化的较大探测深度的时间域航空电磁系统(探测深度 500~800 m)和航空大地电磁系统(探测深度 1 500 m 左右),以满足覆盖区深部找矿的需求。中长期研究重点是突破空中电场、磁场探测技术和多维度电磁正反演解释方法,实现多参数、0~3 000 m 全深度的精细探测。

#### 4.2.4 航空放射性勘查技术

航空放射性勘查技术要求进一步提高探测分辨率,实现资源与环境的综合探测与精细评价。研制航空放射性新型探测器和勘查系统,分辨率提高 1 倍(从 4% 到 1%),实现精细探测;提升航空放射性的多参量测量、放射性核素定量解析和空间分辨能力。

#### 4.2.5 综合地球物理勘查技术

综合地球物理勘查技术的发展目标是实现勘查

方法的优化组合,建立和完善空-地-井地球物理协同勘查技术体系。研发多飞行平台航空地球物理综合勘查系统集成与勘查方法,实现多参数、多尺度和多维度综合立体探测;大力发展基于无人机集群、智能化的超高分辨率航空综合探测技术,实现从无人值守到无人探测;完善空-地-井地球物理协同勘查技术,研究以航空地球物理为主,面向矿产勘查应用目标的多方法、多参量、多尺度空-地-井地球物理数据融合、联合反演与成像方法技术,实现 500 m 以浅矿致异常信息的快速圈定和定位能力。

#### 4.2.6 地球物理数据处理方法与软件平台技术

地球物理数据处理方法与软件平台技术的发展目标是产品化,实现数据和模型双驱动的智能化地质解释。开发高效的航空地球物理软件平台和功能强大的地球物理数据处理解释系统;研发多源数据精细处理、弱信号增强处理和目标智能识别、航空地球物理智能反演与解释、三维地质-地球物理建模与可视化技术,以及基于大数据和人工智能的多源地学信息智能化调查评价等技术。

## 5 结 语

(1)我国已形成自主创新的高分辨综合航空地球物理科学技术体系,基本实现了技术与装备的自主可控,以及与国际先进技术的同步发展,为新一轮找矿突破战略行动的实施奠定了良好的理论与技术基础。

(2)高分辨率综合航空地球物理作为重要的快速找矿勘查方法,可以在新一轮找矿突破战略行动中,为提交远景区块、验证区块、勘查区块以及老矿山深边部增储发挥重要作用,但应根据不同矿产类型、不同成矿地质条件选择有效的方法或方法组合,采用综合方法找矿。

(3)在找矿勘查部署时,应注意:①以航空地球物理具有优势的大宗紧缺矿产勘查为主,对战略性稀有金属矿产勘查先开展应用示范研究探索其有效性,然后再推广应用;②加强找矿勘查示范区的飞行试验,加快国产化仪器和软件平台的推广应用;③优先和超前部署高分辨率综合航空地球物理勘查工作,大力发展和推广空-地-井地球物理协同勘查技术;④以成矿系统理论为指导,开展多种矿产的综合找矿勘查。

(4)为了更有效地支撑新一轮找矿突破战略行动实施和技术持续发展,建议加强技术攻关,加快研制新一代的技术与装备。

真诚感谢主编彭建兵院士的约稿!《地球科学与环境学报》编辑部在主编彭建兵院士的领导下,瞄准国内外地学前沿和进展,及时报道地学领域的创新性成果,为促进地球科学与环境领域科技进步与推广做出了重要贡献,在学术界产生了重要影响。尤其是聚焦具体科研问题策划出版的问题导向型专刊,如“电磁法勘探专辑”(2020 年第 6 期)等,对特定的读者群及时获取信息带来了极大的方便,增强了期刊的实用性和凝聚力。谨以此文祝贺《地球科学与环境学报》更名二十周年,期待编辑部通过紧密跟踪服务国家重大科技项目,提升期刊学术影响力!

## 参考文献:

### References:

- [1] 毛景文,杨宗喜,谢桂青,等.关键矿产:国际动向与思考[J].矿床地质,2019,38(4):689-698.  
MAO Jing-wen, YANG Zong-xi, XIE Gui-qing, et al. Critical Minerals: International Trends and Thinking [J]. Mineral Deposits, 2019, 38(4): 689-698.
- [2] 鞠建华,张照志,潘昭帅,等.我国战略性新兴产业矿产厘定与“十四五”需求分析[J].中国矿业,2022,31(9):1-11.  
JU Jian-hua, ZHANG Zhao-zhi, PAN Zhao-shuai, et al. Determination of Mineral Resources in China's Strategic Emerging Industries and Analysis of the Demand of the "14th Five Year Plan"[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(9): 1-11.
- [3] 熊盛青,周锡华,薛典军,等.航空地球物理综合探测理论技术方法装备应用[M].北京:地质出版社,2018.  
XIONG Sheng-qing, ZHOU Xi-hua, XUE Dian-jun, et al. Aero-geophysical Integrated Exploration Theory, Technology, Method, Equipment and Application [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018.
- [4] 熊盛青.航空地球物理科技创新与应用[J].地质力学学报,2020,26(5):791-818.  
XIONG Sheng-qing. Innovation and Application of Airborne Geophysical Exploration Technology[J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(5): 791-818.
- [5] PATERSON N R. Geophysical Developments and Mine Discoveries in the 20th Century[J]. The Leading Edge, 2003, 22(6): 558-561.
- [6] WITHERLY K. The Evolution of Minerals Exploration over 60 Years and the Imperative to Explore Undercover[J]. The Leading Edge, 2012, 31(3): 292-295.
- [7] WITHERLY K. Building Effective Mineral System

- Models; The Importance of Merging Geophysical Observation with Geological Inference[J]. ASEG Extended Abstracts, 2015, 2015(1): ab117.
- [8] 吴其斌, 马冰, 张桂平. 近年来国外勘查地球物理的若干进展与趋势[J]. 物探与化探, 2015, 39(6): 1261-1266.
- WU Qi-bin, MA Bing, ZHANG Gui-ping. The Trends and Developments of Mining Geophysics in Recent Years Abroad[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(6): 1261-1266.
- [9] 孙文珂, 孙焕振, 刘士毅, 等. 中国矿床发现史: 物探化探卷[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- SUN Wen-ke, SUN Huan-zhen, LIU Shi-yi, et al. The Discovery History of Mineral Deposits of China: Geophysical and Geochemical Exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.
- [10] 熊盛青, 范正国, 黄旭钊, 等. 全国矿产资源潜力评价中磁测资料应用研究[M]. 北京: 地质出版社, 2021.
- XIONG Sheng-qing, FAN Zheng-guo, HUANG Xu-zhao, et al. Application of Magnetic Data in the Evaluation of Mineral Resources Potential in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2021.
- [11] 刘士毅, 孙文珂, 孙焕振, 等. 我国物探化探找矿思路与经验初析[J]. 物探与化探, 2004, 28(1): 1-9.
- LIU Shi-yi, SUN Wen-ke, SUN Huan-zhen, et al. A Preliminary Analysis of the Train of Thought for Geophysical and Geochemical Exploration in China[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2004, 28(1): 1-9.
- [12] 姚培慧. 中国铁矿志[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- YAO Pei-hui. Records of China's Iron Ore Deposits[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993.
- [13] 李怀渊, 江民忠, 陈国胜, 等. 我国航空放射性测量进展及发展方向[J]. 物探与化探, 2018, 42(4): 645-652.
- LI Huai-yuan, JIANG Min-zhong, CHEN Guo-sheng, et al. The Brilliant Achievements and Technological Innovation of Airborne Radioactivity Survey in China[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(4): 645-652.
- [14] 庞振山. 固体矿产区块优选调查评价技术要求[R]. 北京: 中国地质调查局发展研究中心, 2022.
- PANG Zhen-shan. Technical Requirements for Optimal Investigation and Evaluation of Solid Mineral Blocks[R]. Beijing: Development and Research Center, China Geological Survey, 2022.
- [15] 林君, 刁庶, 张洋, 等. 地球物理矢量场磁测技术的研究进展[J]. 科学通报, 2017, 62(23): 2606-2618.
- LIN Jun, DIAO Shu, ZHANG Yang, et al. Research Progress of Geophysical Vector Magnetic Field Survey Technology[J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(23): 2606-2618.
- [16] 林君, 嵇艳鞠, 赵静, 等. 量子地球物理深部探测技术及装备发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(4): 156-166.
- LIN Jun, JI Yan-ju, ZHAO Jing, et al. Development Strategy of Quantum-based Deep Geophysical Exploration Technology and Equipment[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(4): 156-166.
- [17] KILLEEN P G. Mineral Exploration Trend and Developments in 2014[R]. Toronto: The Northern Miner, 2015.
- [18] SNL Metals Economics Group. Worldwide Exploration Trends[R]. Charlottesville: SNL Metals and Mining, 2015.
- [19] 董连慧, 冯京, 庄道泽, 等. 2007年新疆地质矿产勘查进展及2008年工作重点[J]. 新疆地质, 2008, 26(1): 1-3.
- DONG Lian-hui, FENG Jing, ZHUANG Dao-ze, et al. The Made Headways of Exploration on Geology and Mineral Resources of Xinjiang in 2007 and the Work Points on It in 2008[J]. Xinjiang Geology, 2008, 26(1): 1-3.
- [20] 兰险, 庄道泽, 段新力. 进入21世纪新疆非油气矿产资源物探勘查技术的应用[J]. 西北地质, 2010, 43(2): 107-119.
- LAN Xian, ZHUANG Dao-ze, DUAN Xin-li. Application of Geophysical Prospecting Technique in Non-oil Gas Mineral Resources in the 21st Century[J]. Northwestern Geology, 2010, 43(2): 107-119.
- [21] 王怀洪, 周明磊, 朱裕振, 等. 黄河北煤田煤层下富铁矿深部找矿成果及重要意义[J]. 中国煤炭地质, 2020, 32(12): 8-12, 32.
- WANG Huai-hong, ZHOU Ming-lei, ZHU Yu-zhen, et al. Coal Underlying High-grade Iron Ore Deep Part Prospecting Results and Significance in Huanghebei Coalfield[J]. Coal Geology of China, 2020, 32(12): 8-12, 32.
- [22] 熊盛青, 范正国, 于长春, 等. 典型覆盖区航空地球物理技术示范与处理解释软件平台开发[R]. 北京: 中国自然资源航空物探遥感中心, 2021.
- XIONG Sheng-qing, FAN Zheng-guo, YU Chang-chun, et al. Demonstration of Aero-geophysical Technology and Development of Software Platform for Processing

- and Interpretation in Typical Overburden Areas[R]. Beijing:China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources,2021.
- [23] 范正国,黄旭钊,熊盛青,等.磁测资料应用技术要求[M].北京:地质出版社,2010.
- FAN Zheng-guo, HUANG Xu-zhao, XIONG Sheng-qing, et al. Technical Requirements for Application of Magnetic Survey Data[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010.
- [24] 熊盛青,范正国,黄旭钊,等.中国陆域磁性铁矿资源潜力预测图及说明书[M].北京:地质出版社,2015.
- XIONG Sheng-qing, FAN Zheng-guo, HUANG Xu-zhao, et al. Potential Prediction Map of Magnetic Iron Ore Resources in China and Its Specification[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2015.
- [25] 刘士毅.物探技术的第三根支柱[M].北京:中国地质出版社,2016.
- LIU Shi-yi. The Third Pillar of Geophysical Exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016.
- [26] 杨海,熊盛青,杨雪,等.中国航磁异常特征与铁矿床空间分布的关系[J].矿床地质,2022,41(5):893-916.
- YANG Hai, XIONG Sheng-qing, YANG Xue, et al. Relationship Between Aeromagnetic Anomaly Feature and Spatial Distribution of Iron Ore Deposits in China[J]. Mineral Deposits, 2022, 41(5): 893-916.
- [27] 于长春,范正国,王乃东,等.高分辨率航磁方法及在大冶铁矿区的应用[J].地球物理学进展,2007,22(3):979-983.
- YU Chang-chun, FAN Zheng-guo, WANG Nai-dong, et al. High-resolution Aeromagnetic Exploration Methods and Their Application in Daye Iron Mines[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(3): 979-983.
- [28] 刘士毅,颜廷杰.在工作程度高的地区如何筛选矿致磁异常[J].物探与化探,2008,32(1):1-7.
- LIU Shi-yi, YAN Ting-jie. The Sieving of Ore-induced Magnetic Anomalies in Areas of Detailed Work[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2008, 32(1): 1-7.
- [29] 高宝龙,陶德益,詹应林,等.大冶铁矿接替资源勘查项目中“空、地、井”磁法测量的应用[J].地质与勘探,2010,46(3):483-490.
- GAO Bao-long, TAO De-yi, ZHAN Ying-lin, et al. Application of Aero-surface and Borehole Magnetic Exploration to the Prospecting of Exhausted Mines in the Daye Iron Mine[J]. Geology and Exploration, 2010, 46(3): 483-490.
- [30] 刘士毅,颜廷杰.资源危机矿山接替资源勘查物探找矿百例[M].北京:地质出版社,2013.
- LIU Shi-yi, YAN Ting-jie. One Hundred Cases of Resource Crisis Mines Replaced by Resource Prospecting[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013.
- [31] GAO X H, XIONG S Q, YU C C, et al. The Estimation of Magnetite Prospective Resources Based on Aeromagnetic Data: A Case Study of Qihe Area, Shandong Province, China[J]. Remote Sensing, 2021, 13(6): 1216.
- [32] 吴晓峰,曹彦荣,韩红庆.矿山深部、边部磁法找矿工作方法和步骤[J].物探与化探,2013,37(2):233-236.
- WU Xiao-feng, CAO Yan-rong, HAN Hong-qing. Methods and Steps of Work for Magnetic Geological Exploration in the Depth and on the Edge of the Old Mine[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(2): 233-236.
- [33] 张洪瑞,熊盛青,范正国,等.中高山区高精度航磁调查找矿效果研究[J].地球物理学进展,2013,28(4):2051-2059.
- ZHANG Hong-rui, XIONG Sheng-qing, FAN Zheng-guo, et al. Exploration Effect of High Precision Aeromagnetic Survey in Mid-high Mountains Areas[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(4): 2051-2059.
- [34] ZHOU D Q, FAN Z G, TAN L, et al. Metallogenic Series Classification for the Iron Belt of Northern Hebei and Shanxi to Western Liaoning, China[J]. Advanced Materials Research, 2012, 616/617/618: 185-189.
- [35] FAN Z G, HUANG X Z, TAN L, et al. A Study of Iron Deposits in the Anshan Area, China Based on Interactive Inversion Technique of Gravity and Magnetic Anomalies[J]. Ore Geology Reviews, 2014, 57: 618-627.
- [36] YANG X, FAN Z G, HUANG X Z, et al. Geophysical Characteristics and Prospecting Criteria in Wajiertag Magmatic V-Ti-Fe Deposit[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2014, 88(S2): 1313-1314.
- [37] HE J Z, GE T F, TAN H J, et al. An Efficient and Economical Combination of Exploration Methods for Pb-Zn Polymetallic Skarn Deposits: A Case Study of the Periphery of Hetaoping Deposit, Yunnan Province, China[J]. Minerals, 2022, 12(6): 749.