

# 航空地球物理勘查技术发展策略研究

熊盛青<sup>1\*</sup>, 毛景文<sup>2</sup>, 刘敏<sup>3</sup>, 周锡华<sup>1</sup>, 徐学义<sup>4</sup>, 秦绪文<sup>1</sup>, 葛良全<sup>5</sup>, 王林飞<sup>1</sup>,  
陈斌<sup>1</sup>, 李桐林<sup>6</sup>, 骆遥<sup>1</sup>

(1. 中国自然资源航空物探遥感中心 自然资源部航空地球物理与遥感地质重点实验室, 北京 100083; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 3. 中国地质大学(北京)自然资源战略发展研究院, 北京 100083; 4. 中国地质调查局, 北京 100037; 5. 成都理工大学核技术与自动化工程学院, 成都 610059; 6. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130061)

**摘要:** 航空地球物理勘探是重要的快速找矿勘查方法, 21世纪以来我国航空地球物理勘查技术已取得长足进步, 但现有技术与装备仍难以满足国家“新一轮找矿突破战略行动”和深地、深海探测等对重大关键核心技术与装备的新需求。本文聚焦我国航空地球物理勘查技术高质量发展布局, 梳理和总结了国内外航空地球物理勘查技术发展现状, 评估了当前国内外技术竞争和发展态势, 分析研判了我国在该领域面临的主要挑战。结合科技发展新变化、新特征和新趋势, 瞄准超导传感器、航空重力全张量梯度、航磁全张量梯度、多场源全深度航空电磁、航空地震等前沿关键技术, 以及新一轮找矿突破战略行动等急需的实用化技术, 制定了我国航空地球物理勘查技术发展路线图。针对前沿技术攻关能力不够强、技术适应性较差和创新基础较薄弱等问题, 提出了组建国家级航空地球物理技术创新中心、开展第四代航空地球物理勘查技术研发和构建一体化的航空地球物理技术装备发展体系建议。

**关键词:** 航空地球物理; 资源勘查; 航空重力全张量梯度勘查; 航磁全张量梯度勘查; 多场源全深度航空电磁勘查; 航空地震勘查

中图分类号: P631 文献标识码: A

## Development Strategy of Airborne Geophysical Exploration Technology

Xiong Shengqing<sup>1\*</sup>, Mao Jingwen<sup>2</sup>, Liu Min<sup>3</sup>, Zhou Xihua<sup>1</sup>, Xu Xueyi<sup>4</sup>, Qin Xuwen<sup>1</sup>,  
Ge Liangquan<sup>5</sup>, Wang Linfei<sup>1</sup>, Chen Bin<sup>1</sup>, Li Tonglin<sup>6</sup>, Luo Yao<sup>1</sup>

(1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Key Laboratory of Airborne Geophysics and Remote Sensing Geology, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China; 2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Institute of Natural Resources Strategic Development, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 4. China Geological Survey, Beijing 100037; 5. College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 6. College of Geoprospection Science and Technology, Jilin University, Changchun 130061, China)

**Abstract:** Airborne geophysical exploration is an important and rapid method for mineral prospecting. China's airborne geophysical

收稿日期: 2024-07-01; 修回日期: 2024-07-23

通讯作者: \*熊盛青, 中国自然资源航空物探遥感中心教授级高级工程师, 研究方向为航空地球物理勘查理论、技术与应用;

E-mail: xshengqing@mail.cgs.gov.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“中国工程科技未来20年发展战略研究”(2021-XBZD-13); 国家自然科学基金地质联合基金重点项目(U224420)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

exploration technology has made great progress in the 21st century. However, existing technologies and equipment can hardly satisfy the new demand for key prospecting technologies and equipment for deep-Earth and deep-sea exploration in the new round of mineral prospecting breakthroughs in China. Focusing on the high-quality development of airborne geophysical exploration technologies in China, this study summarizes the development status of these technologies in China and abroad, evaluates the technological competition and development trends, and analyzes the major challenges faced by China in this field. Considering the new changes, characteristics, and trends of scientific and technological development, this study proposes a development roadmap of China's airborne geophysics exploration technologies, aiming at frontier technologies, such as superconducting sensors, full-tensor airborne-gravity gradient, full-tensor aeromagnetic gradient, multi-field-source full-depth airborne electromagnetism, and airborne seismic survey, as well as practical technologies urgently needed for the new round of mineral prospecting breakthroughs. Given the weaknesses in frontier research capability, technical adaptability, and innovation foundation, it is proposed to establish a national innovation center for airborne geophysical technologies, conduct the research and development of the fourth-generation airborne geophysical exploration technology, and build an integrated development system for airborne geophysical technical equipment.

**Keywords:** airborne geophysics; mineral resource exploration; full-tensor airborne-gravity gradient survey; full-tensor aeromagnetic gradient survey; multi-field-source full-depth airborne electromagnetism survey; airborne seismic survey

## 一、前言

我国矿产资源形势十分严峻,严重影响国家能源资源安全。2023年,国家启动了“新一轮找矿突破战略行动”,其主要目标是通过加大国内矿产勘查力度,增强战略性矿产资源的安全保障能力,并提出了攻克一批重大核心找矿关键技术和装备的需求。战略性矿产(亦称关键矿产)是指对国家的科技、经济、军事乃至国防都有着重大意义的矿产<sup>[1]</sup>。在国家9个重点发展的战略性新兴产业中,高端装备制造、新能源、新材料等7大产业均需要战略性矿产资源及原材料支撑<sup>[2,3]</sup>。

随着我国地质矿产勘查工作重点逐步转向复杂条件区、覆盖区,以及深部和海洋区,对勘探技术装备探测效率、深度和精度等方面的要求日益提高。航空地球物理勘查(亦称航空物探)技术是实现找矿快速突破、保障国家能源资源安全等的有效支撑技术,被誉为现代化地质矿产调查的“空军”,发挥“战略侦察”和“精准打击”作用。

航空地球物理勘查是将物理探测仪器装载在飞行器上,在空中获取地球物理场数据,探测地下介质的物理属性及其空间分布,解决地质找矿、环境和地球科学等问题的地球物理方法<sup>[4]</sup>,主要包括航空重力、航空磁测、航空电磁和航空放射性(伽马能谱)4类勘查方法,在区域地质调查、固体矿产勘查、油气资源勘查、环境辐射评价、核应急监测、工程勘察、地下空间与地球深部结构探测、测绘、军事等领域得到广泛应用,发挥着重要作用<sup>[4-7]</sup>。

在基础性地质调查与研究中,通过快速“扫描”探测地球内部磁性、密度、电性和放射性等物

性特征与结构,揭示地质结构-构造特征与演化规律,提高对地球的认知能力,为研究成山、成盆、成岩、成矿(藏)、孕灾和深化认识陆海区本体提供重要的科学依据,促进地球系统科学发展。

在能源和矿产资源勘查中,航空地球物理勘查可快速查明区域成矿成藏地质背景、发现矿致异常、识别示矿信息、圈出找矿预测区和找油气有利构造区,缩短找矿周期,降低勘探成本。研究表明,物探方法(航空、地面、井中)可有效探测的固体矿产矿种有48种<sup>[8]</sup>,我国90%以上的铁矿、16%的铀矿是分别根据航磁异常和航空放射性异常发现的<sup>[9,10]</sup>,世界上每年平均取得60~70个找矿重大发现,航空地球物理勘查和地面物探方法发挥了关键作用<sup>[11-16]</sup>。

我国的航空物探始于20世纪50年代初期,经过70余年的发展,建立了完整的勘查技术体系,取得了重大科技创新与应用成果<sup>[5-7]</sup>。尤其是“十一五”以来,在国家高技术研究发展计划等的持续支持下,突破了仪器装备研制和软件开发等关键核心技术,已基本实现与国际“并跑”<sup>[6,7,17-19]</sup>,但航空重力梯度和航磁矢量(张量)梯度等前沿技术与国际最先进的技术还有较大差距。

为了推进资源勘探前沿技术发展路线研究,支撑资源领域国家科技规划制定和新一轮找矿战略行动等重大决策部署,实现更深、更广、更准、更全、更快地服务国民经济建设,支撑地质科技强国建设,开展了我国航空地球物理勘查技术发展战略研究。本文在总结国内外航空地球物理勘查技术进展、梳理存在问题的基础上,分析研判面临的主要挑战,评估当前国内外技术竞争和发展态势,结合

科技发展新变化、新特征和新趋势，以国家重大需求为导向，瞄准前沿关键技术，提出我国航空地球物理技术发展路线图和强化科技创新与技术装备国产化、产品化的对策建议。

## 二、国际航空地球物理勘查技术的发展现状

全球航空地球物理勘查核心技术持有国主要包括美国、加拿大、澳大利亚、俄罗斯、德国、法国、丹麦和中国等国家。进入21世纪，国际上航空地球物理勘查技术得到了快速发展，特别是航空重力、航空重力梯度、航磁梯度和航磁矢量、时间域航空电磁和航空大地电磁方法等取得了重要进展<sup>[20,21]</sup>，从探索性研究到商业化勘探，极大地提升了航空地球物理勘查应用的广度和深度。

### （一）航空重力勘查技术

航空重力勘查是通过测量地球重力场（异常），研究地质构造及寻找油气和矿产资源的一种地球物理方法，可细分为标量（总场、总场梯度）测量和矢量（三分量、张量梯度）测量。航空重力测量的概念始于20世纪50年代末<sup>[22,23]</sup>，直到20世纪90年代差分全球定位系统技术的逐渐成熟，才使得该技术得到突破性进展并实现了商业化应用<sup>[5,24]</sup>。航空重力测量大致经历了三代技术的发展历程。

第一代技术是双轴惯性稳定平台式航空重力技术。以美国拉科斯特-隆贝格（LaCoste & Romberg）公司、Micro-g公司、Dynamic Gravity System公司等基于零长弹簧技术的航空重力仪为代表，从1965年研制出世界上第一台重力仪以来，到目前的TAGS-7、AT1A勘查系统，内符合精度分别达到 $\pm 1.0$  mGal和 $\pm 0.7$  mGal（3.0 km半波长）<sup>[5]</sup>，由于技术原理的局限性限制了精度的进一步提高。

第二代技术是三轴惯性稳定平台式和捷联-惯导式航空重力技术。前者是21世纪初发展起来的一种精度更高、性能更好的测量技术，以加拿大Sander Geophysics Limited公司的AIRGrav和俄罗斯Gravimetric Technology（GT）公司的GT勘查系统为代表，内符合精度优于 $\pm 0.6$  mGal，是目前勘查应用的主流技术<sup>[24-26]</sup>。后者是利用“数学平台（高精度姿态测量）”来代替物理平台，以加拿大卡尔加里大学的基于捷联惯导系统的航空标量重力测量系

统（SISG）、GT公司的GT-X勘查系统为代表，内符合精度可达 $\pm 0.6$  mGal，除SISG系统少量应用大地水准面测量外，尚未形成商业化产品<sup>[5]</sup>。

第三代技术是航空重力梯度技术。1971年，美国Bell Aerospace公司开始进行旋转加速计式航空重力梯度仪可行性研究；1997年，澳大利亚必和必拓（BHP）公司与美国洛克希德·马丁空间系统（Lockheed Martin）公司合作研究出首套航空重力梯度部分张量测量系统Falcon™ AGG，1999年投入商业勘探；2001年，Lockheed Martin公司将Bell Geospace公司的3D-FTG技术升级为Air-FTG™航空重力梯度全张量测量系统，于2003年初用于商业勘探和军事领域<sup>[27]</sup>。航空重力梯度技术具有空间分辨率高、抗动态干扰能力强等特色，已成为国际上发展较快的新一代高新技术，并实施严格的技术封锁。下一代技术将是量子航空全张量重力梯度勘查技术。超导航空重力梯度仪是目前研究的重点和热点<sup>[27,28]</sup>，美国Gedex公司和马里兰国立大学已联合研制出测量精度达到 $\pm 20$  E的HD-AGG系统；力拓集团（Rio Tinto Group）和西澳大学（UWA）联合研制出VK-1系统，地面车载测量精度达到 $\pm 20$  E，目标精度是 $\pm 1$  E<sup>[17,29]</sup>。近20年来快速发展起来的另一种新型仪器是原子干涉型航空重力梯度仪，美国斯坦福大学、美国航空航天局（NASA）、欧洲非线性光谱实验室（LENS）等多家机构已研制出冷原子干涉重力梯度仪实验室样机<sup>[29,30]</sup>，不过目前离实用化还有较大的差距，但作为一项前沿技术，已引起广泛关注。

### （二）航空磁测勘查技术

航空磁测是一种发展最早、应用最广泛的航空物探方法。1935年，苏联开始研制旋转线圈感应式航空磁力仪，并于1936年开展第一次航空磁测试验。第二次世界大战期间，美国发明了灵敏度近 $\pm 1$  nT的磁通门式航空磁力仪，最早用于侦察敌国的潜艇，1946年开始用于地质勘探，1951年开始实施“磁铁计划”（1951—1994年）<sup>[5]</sup>。大致经历了总场、总场梯度和张量（矢量）梯度测量三个发展阶段。

航磁总场测量一直是实用的主流技术，通过不断提高磁力仪的灵敏度和飞机干扰磁场补偿精度关键核心技术实现地磁场强度的精细探测。目前，以美国GeoMetrics公司和加拿大Scintrex公司生产的Cs-3铯光泵航磁仪为主导，灵敏度达到 $\pm 0.35$  pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ <sup>[5,6]</sup>。

近年来, 具有更高灵敏度的量子磁力仪研制取得重要进展, 如无自旋交换弛豫 (SERF) 和基于相干布局数囚禁 (CPT) 原理的原子磁力仪、利用金刚石 Nitrogen-Vacancy (NV) 色心性质的固态量子磁力仪等, 灵敏度好于 pT 级, 但距实用化还有差距<sup>[31,32]</sup>。近年来, GeoMetrics 研发出重量不到 1 kg 的小型无人机吊挂式磁测系统 (MagArrow), 噪声小于  $\pm 5 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ , 具有广阔的应用前景<sup>[33]</sup>。国外对灵敏度优于  $\pm 20 \text{ pT}$  的高精度磁力仪及其技术进行严密封锁。

近 20 年来, 航磁梯度、航磁三分量 (矢量) 测量技术得到较快发展。航磁梯度测量可获取更精细的磁场信息, 具有探测弱小磁异常的能力; 航磁三分量测量有助于确定磁性地质体的属性, 提高磁异常源的地质解释可靠性。加拿大 Sanders Geophysics 公司研发的航磁全轴梯度勘查系统, 水平梯度噪声为  $\pm 5 \text{ pT/m}$ , 垂直梯度噪声为  $\pm 20 \text{ pT/m}$ , 是目前国外最先进水平。澳大利亚 BHP 公司、日本千叶大学和法国斯特拉斯堡大学等研发了航磁三分量勘查系统, 同时获得地磁场矢量的 7 个要素, 但测量精度较低 (动态噪声为 50~100 nT)<sup>[5,6,17]</sup>。

超导航磁全张量梯度测量技术是新一代技术。该技术是探测弱小异常及空间变化的理想方法, 可以很好地描述磁异常源的磁化方向和几何形态, 西方国家处于领先和垄断地位<sup>[6,34,35]</sup>。德国耶拿物理学高技术研究所 (IPHT) 已研制出低温超导航磁全张量梯度测量系统, 测量精度达到了  $\pm 10 \text{ pT/m}/\sqrt{\text{Hz}}$ <sup>[17,18,36]</sup>。2004 年, 澳大利亚联邦科学与工业研究组织 (SCIRO) 研制出用于探矿的全张量磁梯度仪 GETMAG, 静止条件下的灵敏度达到  $\pm 10 \text{ pT/m}/\sqrt{\text{Hz}}$ ; 2010 年研制出一种应用于军事领域探寻未爆炸物的全张量磁梯度系统, 测量精度为  $\pm 2.9 \text{ pT/m}/\sqrt{\text{Hz}}$ <sup>[17,18,36]</sup>, 在高温超导磁力梯度技术方面处于世界领先水平。

### (三) 航空电磁勘查技术

航空电磁测量是金属矿产勘查最有效的航空地球物理方法之一, 按方法原理和探测方式不同可分为人工场源的频率域和时间域航空电磁测量方法, 以及天然场源的航空大地电磁测量方法<sup>[5,6]</sup>。

第一代技术是频率域航空电磁技术。1950 年第一台航空电磁仪在加拿大试用成功以来得到快速发展, 由于对探测目标的分辨率比较高, 在浅部隐伏

矿产勘查、工程和环境领域得到了广泛应用, 成为 20 世纪 90 年代末期的主流技术, 但因探测深度有限 (一般在 150 m 以内) 限制了其在深部找矿中的应用<sup>[5,37]</sup>。

第二代技术是时间域航空电磁技术。进入 21 世纪, 具有较大探测深度的时间域航空电磁勘查技术得到快速发展, 尤其是直升机时间域航空电磁勘查技术发展迅速, 占全球航空电磁测量工作的 90% 以上。2003 年, 加拿大 Aeroquest 公司研发出 AeroTEM 直升机时间域航空电磁勘查系统, 目前已发展了三代系统, 勘探深度达到 400 m 以上<sup>[5,6,38-40]</sup>。2004 年, 加拿大 Geotech 公司研发出 VTEM 直升机时间域航空电磁勘查系统, 截至目前已有 VTEMET、VTEMTM、VTEMPPlus、VTEMMMax 等多种针对不同应用需要的系统, 最大发射磁矩超过  $1.3 \times 10^6 \text{ Am}^2$ , 累计飞行超过 300 万测线千米<sup>[6,38-40]</sup>。加拿大 Fugro 公司 2001 年开始研制固定翼时间域航空电磁勘查系统, 主要有 GEOTEM 和 MEGATEM II 两种型号, 探测深度可达 800 m 左右, 但因经济效益不理想, 除公司自己使用外, 国际上不再研发或使用<sup>[6,38-40]</sup>。

第三代技术是航空大地电磁技术。2006 年, 加拿大 Geotech 公司使用电离层电流或自然界产生的 25~720 Hz 的雷电信号作为激发场源, 研制出基于直升机或固定翼飞行平台的天然源航空电磁法 (ZTEM) 系统, 该系统具有较低的噪声、较大的勘探深度 (可达到 3000 m), 其特点是探测深度较大, 但空间分辨率比较低<sup>[38-40]</sup>。

下一代技术将是发展基于超导量子传感器的航空电磁探测技术、电场和磁场直接测量技术、集频率域和时间域于一体的航空电磁测量技术、“天空地”一体化的电磁测量技术等。

### (四) 航空放射性勘查技术

航空放射性测量是铀矿勘查和核辐射监测的有效方法。自 1944 年开始试验性飞行、1950 年开始勘查应用以来, 经历了航空伽马测量、4 道航空伽马能谱测量和多道 (256~1024 道) 航空伽马能谱测量发展阶段<sup>[5,41,42]</sup>。

20 世纪 60 年代, 美国和加拿大开发了基于 NaI (TI) 闪烁计数器的 4 道 (总道、铀道、钍道和钾道) 航空伽马能谱仪。20 世纪 70 年代, 美国和加拿大开发了 256 道航空伽马能谱测量系统, 并应用于美国全国铀资源评价计划 (NURE) 航空放射性测

量<sup>[5,41,42]</sup>。20世纪90年代末,加拿大SAIC-Exploranium公司研制出GR-820系列。进入21世纪,加拿大、美国等国家实现了航空伽马能谱测量仪的全数字化、模块化、智能化,如加拿大Radiation Solutions Inc公司的RS500、Pico Envirotec公司的GRS16等航空伽马能谱仪。上述仪器的探测器均基于NaI(Tl)晶体开发,近年来,系统能量分辨率并无提升( $\leq 8.5\%$ @661 keV),但由于先进方法技术的应用,航空测量效率、稳定性和操作性有了很大的提升<sup>[5,41-43]</sup>。

近年来,国外核仪器公司开发了一系列无人机航空伽马能谱系统,如Exploranium公司于2004年开发的GR-460伽马能谱仪已广泛用于辐射安全与核应急监测<sup>[42]</sup>。

### (五) 软件平台技术

20世纪70年代,国外便开始开发航空地球物理数据处理与解释软件系统,并逐步形成了商业化软件在全球范围内推广<sup>[44,45]</sup>。21世纪以来,形成了专业和综合类两类软件。专业类软件,如电磁数据处理解释软件主要包括加拿大Petros Eikon公司的Emigma软件、澳大利亚EMIT公司的Maxwell软件、丹麦Aarhus大学的Aarhus Workbench软件等,其中包括了航空电磁数据处理解释功能。综合类软件以OASIS Montaj软件平台为代表,是集非地震物探、化探、钻探数据处理解释于一体的软件。这类软件综合性较强、兼容性好,主要具备数据存取、处理、解释、共享、可视化、地球物理交互建模等功能,具备大数据处理性能,能满足大面积实际资料快速处理与解释。此外,多数平台具有二次开发功能,吸引了全世界地球物理开发者的加盟,使软件开发力量不断发展壮大,已广泛应用于地球物理勘探、环境地球物理、矿产勘查、油气勘探、地质工程、矿业开发、石油工程和水利工程等领域。

## 三、我国航空地球物理勘查技术的发展现状

我国航空物理勘查于1953年起步,实际勘查应用总体上比国外要晚10~40年,其中航空重力领域约晚40年,航空磁测领域约晚17年,航空电磁领域约晚20年,航空放射性领域约晚10年。主要经历了中低精度测量(20世纪50年代—70年代末期)、高精度测量(20世纪80年代初期—90年代中期)和高

分辨综合测量(20世纪末至现在)三个阶段,亦即三代技术的发展历程,实现了从引进技术为主—引进与自主技术并重—自主技术为主、与国际同步发展<sup>[6,7]</sup>。

长期以来,我国航空地球物理仪器装备和软件主要依靠进口,只有航磁总场和频率域航空电磁仪器部分实现了国产化<sup>[7]</sup>。2006年以来,在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和地质调查项目的持续支持下,我国航空地球物理勘查技术实现了跨越式发展:① 仪器装备实现了自主创新;② 飞行平台和勘查系统多样化、系列化;③ 实际测量参数(参量)由第二代技术的13个增加到42个;④ 实现复杂地形条件下的高分辨率综合数据采集;⑤ 数据处理方法和软件基本实现国产化;⑥ 航空找矿勘查理论方法不断完善<sup>[5-7]</sup>。目前,整体技术达到国际先进水平,其中航空矢量重力、航磁梯度、航磁矢量和航空伽马能谱测量技术达到了国际一流水平,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。

### (一) 航空重力勘查技术

我国航空重力勘查技术研究起步较晚,基础差且国外技术严密封锁,2006年才开始进行系统的技术攻关,通过“小步快跑”的发展模式取得了突破性进展,自主研制出捷联惯导式、平台+捷联惯导、三轴惯性平台式航空重力仪,精度均优于 $\pm 0.6$  mGal,仪器总体性能达到国际先进水平,在起伏飞行条件下的仪器测量精度、稳定性、小型化、轻量化等方面达到国际领先;集成了多飞行平台航空重力勘查系统,建立了航空重力测量技术标准,形成了航空重力勘查技术体系,广泛应用于基础地质调查、油气和矿产资源勘查、国家大型工程勘察、测绘等领域<sup>[5,26,46-48]</sup>。航空重力梯度测量技术也取得了系列重要进展<sup>[27]</sup>,研制出旋转平台式航空重力梯度仪样机,精度达到 $\pm 30$  E;突破了冷原子航空重力梯度仪、超导重力梯度仪研制的部分关键技术<sup>[27,49,50]</sup>,但与国外先进技术相比还有明显差距。

### (二) 航空磁测勘查技术

航空磁测是我国航空物探的传统优势技术,自20世纪80年代以来,相关技术发展基本与国际同步。自主研制出高灵敏度航空氦光泵磁力仪、航磁

三轴梯度仪、航磁矢量（三分量）磁力仪、航磁全张量梯度仪（样机）、多通道航磁补偿仪等系列航磁仪器，技术指标达到或优于国外同类产品<sup>[5-7]</sup>。集成了多飞行平台的航磁总场、梯度和矢量勘查系统，发展了航磁总场、梯度、矢量和全张量梯度测量技术，形成了较成熟的具有自主知识产权的技术体系，初步实现了由单一地磁场参量（总场）向地磁场全要素（7个）、多参量（12个）的航空测量，总体技术达到国际一流水平，但在航磁全张量梯度测量技术方面与国外还有一定的差距。

### （三）航空电磁勘查技术

我国自20世纪60年代开始仪器研制，但实用化的仪器不多，在实际应用中仍以国外频率域航空电磁系统为主<sup>[5]</sup>。2006年以来，自主研制出新型固定翼飞机频率域航空电磁系统、直升机吊舱式时间域航空电磁勘查系统（包括硬支架系统和软支架系统）、固定翼飞机时间域航空电磁系统和直升机航空大地电磁系统，初步实现了工程化应用，总体技术水平达到或接近国际先进水平，但在探测深度、数据处理解释和技术成熟度等方面与国外还有一定差距。近年来，具有较高分辨率和较大探测深度的半航空（地面发射、空中接收）电磁技术得到迅速发展，并成功应用于找矿勘查实践等<sup>[51,52]</sup>。

### （四）航空放射性勘查技术

我国航空放射性测量始于20世纪50年代中期。20世纪70—80年代，先后研制出FD-123型和AS2000型4道航空伽马能谱仪，但随后研发工作因故停止，仪器装备完全依赖进口<sup>[5]</sup>。2006年以来，突破了探测器研制等关键技术，自主研制出基于NaI(Tl)晶体探测器的AGS-863数字化航空伽马能谱测量系统（能量分辨率优于8.0% @661 keV），并实现批量生产<sup>[43]</sup>；2021年，研制出基于国产LaBr3/CeBr3新型晶体探测器的高分辨率航空伽马测量系统（能量分辨率优于4.0% @661 keV），性能指标优于国外同类仪器<sup>[53]</sup>，形成了高分辨航空伽马能谱勘查技术体系，初步实现了“领跑”。

### （五）软件平台技术

我国航空物探数据处理长期使用国外软件。从2000年开始研发国产软件<sup>[44,45]</sup>，经过20多年的持续

攻关，攻克了自主软件平台底层构建、软件集成与扩展性等难题，自主研发出国内首套支持二次开发的GeoProbe软件平台，集成了“地学探针”航空地球物理软件系统（GeoProbe Mager），目前已发展到4.0版本，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，软件功能与国际同类软件相当<sup>[46]</sup>，已成为行业通用软件，初步实现了“软装备”的自主可控，但在软件性能、产品化、国际化等方面与国外先进软件还有一定差距。

## 四、我国航空地球物理勘查技术发展面临的挑战

### （一）前沿性技术创新能力不够强

由于研究基础差，我国自主研制的航空地球物理仪器装备以跟踪国外技术为主，原始创新能力还不强，尤其是量子扰动超导探测器磁场和磁矢量梯度芯片、高分辨率加速度计、超导重力梯度传感器等在设计、加工、噪声水平、灵敏度等指标方面与国际最先进指标差距较大；高稳定基准惯性平台、大磁矩电磁发射、冷原子体系的单量子态产生等制备技术还不够成熟；量子探测器噪声抑制、高动态噪声条件下微弱信号提取、智能数据处理等基础核心技术的研究不充分、不透彻，导致航磁全张量梯度仪、航空重力梯度仪、大深度航空电磁仪技术等与国际一流水平还有较大差距。

面向以中高山—深切割区快速找矿和覆盖区深部找矿为主的需求，急需研发复杂条件下的高分辨快速找矿勘查、强动态干扰下微弱信息提取和智能化数据处理解释等关键技术，以提高对隐伏目标的探测能力。

### （二）航空物探新质生产力的作用尚未得到充分发挥

#### 1. 技术成熟度不高

由于研制的新技术装备示范应用不够，普遍存在工程化、实用化程度不高的问题，装备系统的稳定性、耐用性较差，产品化程度低，难以实现对国外技术装备的国产化替代。实现高性能技术装备的产品化和规模化应用是航空地球物理勘查技术发展面临的现实挑战。

### 2. 技术适应性不强

现有的仪器装备难以满足中高山-深切割等“难进入”地区快速勘查的“轻便化”和覆盖区深部找矿的需求；具有较低成本的无人机平台勘查技术发展较慢，难以满足矿田或矿床尺度的小范围精细勘查需求；复杂地形条件的高精度数据采集、复杂地形和复杂地质“双复杂”条件下的数据处理技术不完善，与国外还有较大差距、不易推广；支撑全球资源调查能力不足。

### 3. 技术“大众化”不够

航空地球物理勘查的快速、高效等特点决定了少数机构和人员承担了全球绝大多数探测任务，技术高精、专业性非常强致使只有少数专业技术人员掌握该技术。由于技术与推广应用缺乏协同机制，导致技术推广难度大，航空物探资料应用“大众化”程度较低，远没有充分发挥其作为新质生产力的作用。

## （三）科技创新基础薄弱制约可持续发展

航空地球物理勘查技术的发展缺乏有效的统筹规划和协调统一的运行机制，顶层设计和统筹协调不足，导致科技资源分散，目前尚没有国家级的科技创新平台，技术装备研制尚未完全摆脱“小作坊”方式；基础研发能力薄弱，一些关键的基础平台还受制于国外；技术标准、全国物性数据库和基准网建设滞后；掌握关键核心技术的高端专业人才欠缺，国际合作难度大。

## 五、我国航空地球物理勘查技术的发展目标与路径

### （一）发展趋势与目标

持续提高探测分辨率、精度、深度、维度是航空地球物理勘查技术的发展方向。仪器装备研发将向全参量、多平台、更高精度方向发展，方法技术将向智能化、定量化、多源信息综合处理解释方向发展。

从应用需求角度讲，发展趋势将向“深”和“浅”精细探测两个方向发展<sup>①</sup>。“深”就是以满足覆盖区深部找矿（金属矿产3000 m，油气资源10 000 m）需求为主要目标，攻关重点是在保证较高空间分辨率的前提下不断提高探测深度；“浅”

就是探测地表（水面）200~300 m以浅的目标物，主要目标是支撑中高山-深切割区快速找矿勘查、生态地质与环境地质调查、地下空间和军事（如水下目标物）探测等，攻关重点是不断提高对探测目标的空间与属性分辨率。

总体发展目标是建立以无人机集群、智能化、精细探测为特色的新一代航空地球物理勘查技术（即第四代技术）和空-地-井协同勘查技术体系，实现高分辨率、高精度、多深度、多维度的立体探测<sup>②</sup>，满足资源能源勘查、环境监测、国防建设和地球系统科学研究各领域的需求，整体达到国际一流水平。具体目标是，通过攻克硬件和方法软件的关键核心技术，研制出更高灵敏度的抗强干扰精密仪器装备，实现高分辨率、高精度数据采集；研发出智能化的航空地球物理软件平台，实现数据处理解释的智能化、精细化和精准化。

### （二）发展路径

我国航空物探技术的发展将在遵循国际发展趋势的同时，针对新一轮战略性矿产资源勘查等特殊应用场景需求，构建和完善航空地球物理科技创新体系（见图1），重点突破高灵敏度传感器、高精度定姿定位与稳定平台、微弱信号检测和智能化数据处理解释等关键核心技术，根据各有关分技术的发展水平，有区别的发展；研发多飞行平台多参数航空地球物理综合探测等技术装备，实现各测量系统模块化、即插即用（见图2）。形成高精度、宽域全波段航空重力/重力梯度立体勘查技术体系；地磁场全要素、全参量的综合航磁勘查技术体系；基于多种电磁效应的多平台、多参数航空电磁勘查技术体系；高纯锗等高能量分辨率伽马射线探测器的阵列式多平台航空放射性勘查、监测、应急技术体系；星-空-地-海-井地球物理一体化的大数据管理、智能数据处理、高效反演与建模的综合软件平台，实现全流程航空地球物理勘查的智能化。

#### 1. 航空重力勘查技术

发展趋势：由“并跑”转向部分“领跑”。进一步提高航空重力/重力梯度测量精度和空间分辨率。

重点发展方向：①加快推进航空重力/矢量重力勘查技术的实用化。近期重点研发无人机航空重力勘查系统并产品化，满足新一轮找矿突破的急需；

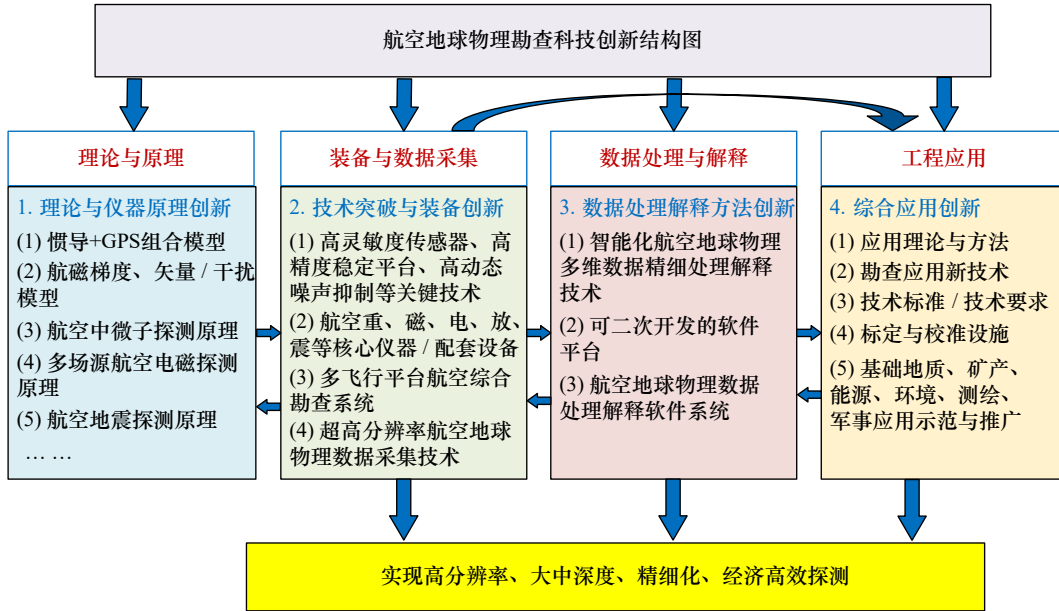


图1 航空地球物理勘查科技创新结构图  
注：GPS指全球定位系统。

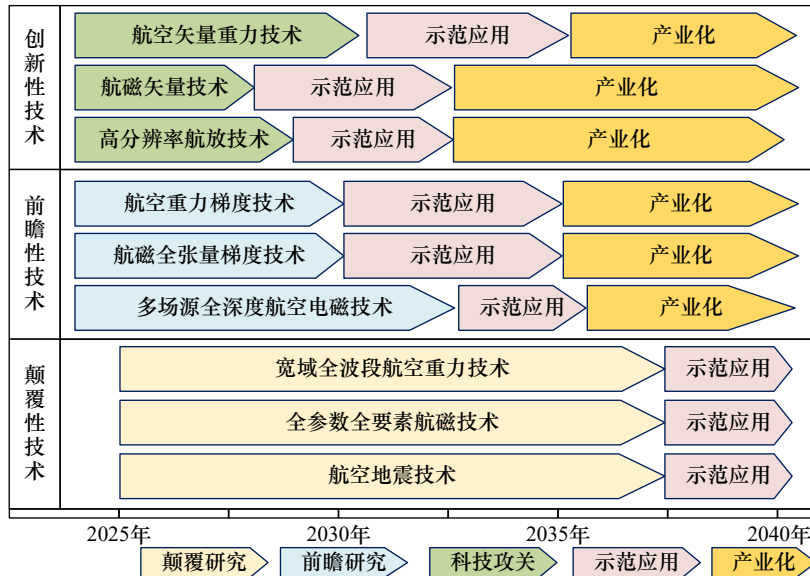


图2 航空地球物理勘查技术发展路线图

中长期发展是基于北斗卫星导航系统的新一代高精度航空重力勘查技术，实现系列化、产品化和高精度大深度勘查。② 重点攻关航空重力梯度测量技术。近期进一步攻克超高分辨率加速度计技术，实现旋转加速度计式航空重力梯度勘查系统的实用化研制与找矿勘查示范应用，测量精度达到 $\pm 10 E \sim \pm 20 E$ ；中期突破超导重力传感器和小型化冷原子干涉重力梯度仪技术，研制出航空重力全张量梯度测量原理

样机；长期目标是航空重力梯度勘查技术与装备达到国际领先水平，测量精度优于 $\pm 1 E$ 。③ 发展宽域全波段航空重力勘查技术。该项技术是代表未来战略性发展方向的颠覆性技术，近期开展全波段航空重力测量理论研究；中期力争突破仪器研制的主要关键技术，研制集航空重力梯度、矢量重力和标量重力为一体的全波段航空重力勘查系统样机；长期目标是研制出实用化的全波段航空重力技术与装

备，并实现产业化。

另外，“海陆天空”一体化的立体重力观测技术也是重要的发展方向<sup>[54]</sup>。

### 2. 航空磁测勘查技术

发展趋势：由部分“领跑”转向全面“领跑”。首先是补齐短板，加快发展相对落后的航磁全张量梯度测量技术，重点发展全要素、全参量地磁场测量技术，将在高灵敏磁传感器、智能化平台与高精度姿态测量技术等方面重点攻关。

重点发展方向：近期发展新一轮找矿突破急需的无人机航磁、实用化的直升机航磁全轴梯度和航磁矢量勘查技术与装备；中期攻克量子超导干涉磁力仪传感器技术，发展先进实用的航磁多参量数据精细处理与解释技术，实现航磁全张量梯度测量；长期突破地磁场全要素、全参量航磁探测关键核心技术，研制出一体化的航磁综合勘查系统，实现对地磁场全要素、全参量、全维度的高精度与高分辨率探测，形成由浅层到深层、多要素综合测量体系，进一步提升我国航磁勘查技术水平和探测能力。此外，发展高高空（真高15 km左右）航空磁测技术，实现航磁数据与地面和卫星磁测数据的链接，构建精细的地球磁场模型，促进地球系统科学发展，也是重点发展方向之一。

### 3. 航空电磁勘查技术

发展趋势：由“跟跑”转向“并跑”。主要发展时间域电磁测量技术，包括人工场源和天然场源等，将在量子传感器、发射技术、数据处理等方面重点攻关。

重点发展方向：近期实现时间域航空电磁系统的轻型化和产品化，完善半航空电磁系统和航空电磁数据处理解释技术与软件，实现探测深度300 m左右的精细探测，满足快速找矿勘查的急需；中期突破高温超导三分量电磁传感器、三维精细反演成像、时间域电磁激发极化法效应信息提取和反演等关键技术，研制较大探测深度的时间域航空电磁系统和航空大地电磁系统并产品化，力争探测深度分别达到500~800 m和2000 m左右，以满足厚覆盖区深部找矿和地球深部探测的需求；长期创新多场源全深度航空电磁探测理论方法，攻克空中电场和磁场探测、空-地一体化的电磁测量与多维度电磁正反演解释等关键技术，实现多参数（量）、0~3000 m全深度的精细探测。

### 4. 航空放射性勘查技术

发展趋势：由部分“领跑”转向全面“领跑”。主要发展高灵敏度、高分辨率、数字化、模块化的辐射场测量技术，将在新型探测器、脉冲信号采集与处理技术等方面重点攻关。

重点发展方向：近期攻克基于LaBr<sub>3</sub>/CeBr<sub>3</sub>晶体的探测器实用化技术、航空伽马能谱精细解析技术，研制高能量分辨率的新型晶体探测器和无人机航空伽马能谱勘查系统并产品化，初步实现资源与环境的综合探测与精细评价；中期攻克电制冷阵列高纯锗探测器等传感器制造和加工技术、低噪声低漂移微弱信号检测技术、精细全谱解析方法等，研制出超高分辨率的航空伽马能谱仪系统并产品化；长期突破伽马、中子、阿尔法和贝塔等多种射线高精度航空放射性联测的前沿技术，研制出多种射线高精度航空放射性联测仪，实现对粒子事件的参数测定和航空放射性多参量测量，显著提升放射性核素定量解析和空间分辨能力，高效应用于资源、环境和核应急等领域。

### 5. 航空地震勘查技术

发展趋势：航空地震勘查技术是利用装载在航空器上的仪器远程对地面的震动进行观测和测量的方法。这是一种极具挑战性的全新勘查技术，迄今为止，国内外的相关报道非常少，仅有国内学者提出了一些设想<sup>[55-57]</sup>，开展了基于无人机遥控震源等实验研究<sup>[58]</sup>。如果启动探索研究，有可能成为一种原创性颠覆性的领先技术，并成为复杂环境（山地、沼泽、森林、河滩、沙漠等）难以开展地面地震勘探时的一种低成本的补充方法。其基本思路，一是在航空器上装载地震震源冲击单元和地震信号采集器，通过空中投放震源冲击单元在地表激发地震波，采集器记录地震信号，实现地震数据采集，这实质上是一种在空中实现的无缆地震仪布设方法，也是一种相对容易实现的航空人工地震方法；二是在航空器上安装航空地震仪，通过在空中发射激光等光束，测量采集器与地表之间的距离，二次测量之间的时间差即为地震信号的采样间隔（采用率），通过连续不断的测量获得地表的震动波形，这种模式既可接收人工地震信号也可接收天然地震信号，但实现难度非常大。

重点探索方向：近期按不同思路开展理论探索性研究，先开展半航空地震探索研究，即利用无人机在空中投放震源，在地面接收地表的震动波形，

实现半航空测量；然后在空中接收地表的震动波形，开展航空地震探索性试验。中期突破基于第二种思路或其他新思路的航空地震勘查理论原理，攻克主要关键技术，研制航空地震仪和配套的数据处理方法，实现飞行测试。长期是研制航空地震技术系统，开展应用示范，逐步实现在矿产资源勘探等领域的应用。

#### 6. 软件平台技术

**发展趋势：**全面实现航空地球物理软件平台和数据处理解释系统的国产化与国际化。高性能计算、多元多尺度数据融合、弱信号增强处理和目标智能识别、三维精细联合反演、大数据云计算下智能化处理与解释等将是航空地球物理勘查软件平台技术的攻关重点。

**重点发展方向：**近期开发 64 位智能化的海量地球物理数据融合处理解释系统，并尽快产品化，同时开发国际版软件；中期发展基于国产操作系统的地球物理软件平台技术，研发基于国产软件操作系统的软件平台，开发综合数据智能处理技术、数据和模型双驱动的智能地质解释技术方法，实现航空勘查数据远程实时传输、监测、处理与解释；长期将建立完善的星-空-地-海-井一体化的数据处理、高效反演与智能建模的综合软件平台，实现地球物理软件平台的国际化。

## 六、对策建议

### (一) 组建国家级航空地球物理技术创新中心

加强科技创新和科研基础条件平台建设，组建航空地球物理国家技术创新中心或全国重点实验室，保障科技资源投入，由专业机构牵头，联合跨行业多学科的优势力量，形成一支相对稳定的队伍，集中力量着力攻克“卡脖子”技术。加快地球物理综合试验场、海陆一体的航空地球物理数字基准等重大科技基础设施平台建设。形成航空地球物理科技攻关、平台与人才队伍建设一体化的科技创新体系，促进我国航空地球物理技术健康、快速、可持续发展，提升国际竞争力。

### (二) 开展第四代航空地球物理勘查技术研发

以战略性矿产资源等国家战略需求为导向，以解决关键“卡脖子”问题或占据前沿技术制高点为

目标，以第三代高分辨航空地球物理综合测量技术为依托，整合国内超导芯片、重力灵敏元件、高分辨率闪烁能谱探测器、冷原子重力梯度、量子磁力仪、专用芯片集成电路、微弱信号检测、数据采集、数据传输、搭载平台和系统集成等研发优势资源与科技力量，构建航空地球物理探测仪器研发的创新体系。在基础研究方面，探索航空地震、多种射线航空放射性联测等原创性新理论；在装备关键技术攻关方面，攻克专用芯片、重力灵敏元件、高性能电子线路模块制备，超导加速度计、超导量子磁强计、超导磁矢量梯度场和电磁场传感器制作，冷原子航空重力梯度仪和大磁矩电磁发射机研制等“卡脖子”技术，提高灵敏度、分辨率、动态范围和稳定性等性能；在数据处理方面，解决探测噪声抑制与微弱信号提取、智能数据增强处理等关键核心技术；研制高性能的系列航空探测仪器与软件，实现国产化和实用化，形成第四代航空地球物理勘查技术体系，服务深部矿产与油气探测等多领域，充分发挥其“战略侦察”和“精准打击”的作用。

### (三) 构建一体化的航空地球物理技术装备发展体系

针对航空地球物理新技术装备示范应用不够、工程化程度低、技术适应性不强、只面向小众化等突出问题，构建技术装备研发、中试、应用、推广和产品化的全链条协同发展机制，可设立高端装备发展专项资金，同时引导和鼓励装备制造企业和社会资金投入，依托专业机构研发新的技术与装备，在应用单位开展不同场景的技术示范，在装备骨干企业建立产业化基地并实现产品化。通过工程化和更新迭代研究，解决技术装备的稳定性、耐用性差等问题，形成成熟的技术装备，打破国产仪器不能用、不好用和不适用的局面。同时面向中高山-深切割区、重点勘查区尺度小范围精细勘查、全球资源调查等需求，解决技术装备轻便化、易用化和智能化等难题，开发易推广应用的硬件和软件产品，满足不同场景精细调查和不同专业背景大众使用的要求，充分发挥其作为新质生产力的作用。

#### 利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: July 1, 2024; Revised date: July 23, 2024

Corresponding author: Xiong Shengqing is a professor-level senior

engineer from China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Natural Resources. His major research fields include theory, technology and application of airborne geophysical exploration. E-mail: xshengqing@mail.cgs.gov.cn

**Funding project:** Chinese Academy of Engineering project “Research on the Development Strategy of China’s Engineering Science and Technology of the Next 20 Years” (2021-XBZD-13); Key Project of the National Natural Science Foundation of China (U224420)

参考文献

[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 J W, Yang Z X, Xie G Q, 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 J H, Zhang Z Z, Pan Z S, 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] 鞠建华, 王婧, 陈甲斌. 新时代中国矿业高质量发展研究 [J]. 中国矿业, 2019, 28(1): 1–7.  
Ju J H, Wang Q, Chen J B. Study on the high quality development of China mining industry in the new era [J]. China Mining Magazine, 2019, 28(1): 1–7.

[4] 熊盛青. 发展中国航空物探技术有关问题的思考 [J]. 中国地质, 2009, 36(6): 1366–1374.  
Xiong S Q. The strategic consideration of the development of China’s airborne geophysical technology [J]. Geology in China, 2009, 36(6): 1366–1374.

[5] 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 S Q, Zhou X H, Xue D J, et al. Aero-geophysical integrated exploration theory, technology, method, equipment and application [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018.

[6] 熊盛青. 航空地球物理勘查科技创新与应用 [J]. 地质力学学报, 2020, 26(5): 791–818.  
Xiong S Q. Innovation and application of airborne geophysical exploration technology [J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(5): 791–818.

[7] 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 S Q, Xu X Y. Application prospect of aerogeophysics in strategic mineral exploration [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(2): 143–156.

[8] 《中国矿床发现史·物探化探》编委会. 中国矿床发现史: 物探化探卷 [M]. 北京: 地质出版社, 2002.  
Editorial Committee of *History of deposit discovery in China: geophysical and geochemical exploration*. History of deposit discovery in China: volume of geophysical and geochemical exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.

[9] 姚培慧. 中国铁矿志 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.  
Yao P H. Iron ore records of China [M]. Beijing: Metallurgical

Industry Press, 1993.

[10] 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 H Y, Jiang M Z, Chen G S, et al. The brilliant achievements and technological innovation of airborne radioactivity survey in China [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(4): 645–652.

[11] Paterson N R. Geophysical developments and mine discoveries in the 20th century [J]. The Leading Edge, 2003, 22(6): 558–561.

[12] 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.

[13] Witherly K. Building effective mineral system models; the importance of merging geophysical observation with geological inference [J]. ASEG Extended Abstracts, 2015 (1): 1–4.

[14] Killen P G. Mineral exploration trend and developments in 2014 [J]. The Northern Miner, 2015, 101(2): 1–28.

[15] SNL Metals Economics Group. Worldwide exploration trends [R]. Toronto: SNL Financial, 2015.

[16] 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 Q B, Ma B, Zhang G P. The trends and developments of mining geophysics in recent years abroad [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(6): 1261–1266.

[17] 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 J, Ji Y J, Zhao J, et al. Development strategy of quantum-based deep geophysical exploration technology and equipment [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(4): 156–166.

[18] 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 J, Diao S, Zhang Y, et al. Research progress of geophysical vector magnetic field survey technology [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(23): 2606–2618.

[19] 李莉, 鲁长国. 征途漫漫的航空物探梦——记国家重点领域航空地球物理与遥感地质科技创新团队 [J]. 中国科技奖励, 2017 (10): 66–69.  
Li L, Lu C G. The dream of aerogeophysical exploration with a long journey—A record of the innovation team of aerogeophysical and remote sensing geology in national key fields [J]. China Awards for Science and Technology, 2017 (10): 66–69.

[20] 高维, 舒晴, 屈进红, 等. 国外航空物探测量系统近年来若干进展 [J]. 物探与化探, 2016, 40(6): 1116–1124.  
Gao W, Shu Q, Qu J H, et al. New progress of aerogeophysical techniques abroad [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(6): 1116–1124.

[21] 张昌达. 重磁与时间域电磁法发展趋势研究 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2013.  
Zhang C D. Research on the development trend of gravity and magnetism and time domain electromagnetic [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press Co., Ltd., 2013.

[22] Thompson L G D. Airborne gravity meter test [J]. Journal of Geophysical Research, 1959, 64: 488.

[23] Nettleton L L, LaCoste L, Harrison J C. Tests of an airborne gravity meter [J]. Geophysics, 1960, 25(1): 181–202.

- [24] 王静波, 熊盛青, 周锡华, 等. 航空重力测量系统研究进展 [J]. 物探与化探, 2009, 33(4): 368–373.  
Wang J B, Xiong S Q, Zhou X H, et al. The advances in the study of the airborne gravimetry system [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2009, 33(4): 368–373.
- [25] 张虹, 周能, 邓肖丹, 等. 国外航空重力测量与数据处理技术最新进展 [J]. 物探与化探, 2019, 43(5): 1015–1022.  
Zhang H, Zhou N, Deng X D, et al. The latest progress in air gravity measurement and data processing technology abroad [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(5): 1015–1022.
- [26] 王晨阳, 骆遥, 熊盛青, 等. 海域航空重力快速构建区域大地水准面 [J]. 地球物理学报, 2021, 64(3): 907–915.  
Wang C Y, Luo Y, Xiong S Q, et al. A fast approach for determining geoid using airborne gravity data of sea area [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(3): 907–915.
- [27] 舒晴. 航空重力梯度测量技术研究 [D]. 长春: 吉林大学 (博士学位论文), 2018.  
Shu Q. Research on airborne gravity gradient measurement technology [D]. Changchun: Jilin University (Doctoral dissertation), 2018.
- [28] Stray B, Lamb A, Kaushik A, et al. Quantum sensing for gravity cartography [J]. Nature, 2022, 602(7898): 590–594.
- [29] Bonvalot S, Bresson A, Bidet Y, et al. Airborne absolute gravimetry using cold-atom interferometry: First experiment and comparisons with classical technologies [C]. San Francisco: AGU Fall Meeting Abstracts, 2019.
- [30] He S X, Wu D W, Miao Q. The principle of cold atom interference and its application in navigation [C]. Tianjin: 2020 International Conference on Artificial Intelligence and Electromechanical Automation (AIEA), 2020.
- [31] Chen L Z, Wu P L, Zhu W H, et al. A novel strategy for improving the aeromagnetic compensation performance of helicopters [J]. Sensors, 2018, 18(6): 1846.
- [32] Kirschvink J L, Isozaki Y, Shibuya H, et al. Challenging the sensitivity limits of Paleomagnetism: Magnetostratigraphy of weakly magnetized Guadalupian-Lopingian (Permian) limestone from Kyushu, Japan [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2015, 418: 75–89.
- [33] Kim B, Lee S, Park G, et al. Development of an unmanned airship for magnetic exploration [J]. Exploration Geophysics, 2021, 52(4): 462–467.
- [34] Stolz R, Schmelz M, Zakosarenko V, et al. Superconducting sensors and methods in geophysical applications [J]. Superconductor Science and Technology, 2021, 34(3): 1–10.
- [35] 郭华, 王明, 岳良广, 等. 吊舱式高温超导全张量磁梯度测量系统研发与应用研究 [J]. 地球物理学报, 2022, 65(1): 360–370.  
Guo H, Wang M, Yue L G, et al. Development and application of a full-tensor magnetic gradient measurement system for the cabin HTS [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(1): 360–370.
- [36] Schmidt P, Clark D, Leslie K, et al. GETMAG—A SQUID magnetic tensor gradiometer for mineral and oil exploration [J]. Exploration Geophysics, 2004, 35(4): 297–305.
- [37] 王卫平, 王守坦, 周锡华, 等. 频率域航空电磁法及应用 [M]. 北京: 地质出版社, 2011.  
Wang W P, Wang S T, Zhou X H, et al. Frequency domain airborne electromagnetic method and its application [M]. Beijing: Geology Publishing House, 2011.
- [38] Siemon B, Christiansen A V, Auken E. A review of helicopter-borne electromagnetic methods for groundwater exploration [J]. Near Surface Geophysics, 2009, 7(5/6): 629–646.
- [39] 殷长春, 张博, 刘云鹤, 等. 航空电磁勘查技术发展现状及展望 [J]. 地球物理学报, 2015, 58(8): 2637–2653.  
Yin C C, Zhang B, Liu Y H, et al. Review on airborne EM technology and developments [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(8): 2637–2653.
- [40] 武欣, 薛国强, 方广有. 中国直升机航空瞬变电磁探测技术进展 [J]. 地球物理学进展, 2019, 34(4): 1679–1686.  
Wu X, Xue G Q, Fang G Y. Development of helicopter-borne transient electromagnetic in China [J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(4): 1679–1686.
- [41] 刘裕华, 顾仁康, 候振荣. 航空放射性测量 [J]. 物探与化探, 2002, 26(4): 250–252.  
Liu Y H, Gu R K, Hou Z R. Airborne radiometrics survey [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2002, 26(4): 250–252.
- [42] 万建华, 熊盛青, 范正国. 航空伽马能谱测量方法技术现状与展望 [J]. 物探与化探, 2012, 36(3): 386–391.  
Wan J H, Xiong S Q, Fan Z G. The status and prospects of airborne gamma-ray spectrometry technology and its application [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(3): 386–391.
- [43] 葛良全, 熊盛青, 曾国强, 等. 航空伽马能谱探测技术与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.  
Ge L Q, Xiong S Q, Zeng G Q, et al. Airborne gamma ray spectrum detection and application [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [44] 王林飞, 熊盛青, 何辉, 等. 非地震地球物理软件发展现状与趋势 [J]. 物探与化探, 2011, 35(6): 837–844.  
Wang L F, Xiong S Q, He H, et al. Current status and future trends of non-seismic geophysical software [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35(6): 837–844.
- [45] 刘浩军, 薛典军, 郭志宏, 等. 航空物探软件系统研制 [J]. 物探与化探, 2003, 27(2): 146–149, 165.  
Liu H J, Xue D J, Guo Z H, et al. The development of the aero geophysical software system [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2003, 27(2): 146–149, 165.
- [46] 陈靖, 王万银. 重磁处理及反演软件发展现状及未来趋势探讨 [J]. 地球物理学进展, 2017, 32(3): 1106–1113.  
Chen J, Wang W Y. Discussion on the development and future trends of gravity and magnetic softwares for data processing and inversion [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(3): 1106–1113.
- [47] 熊盛青, 周锡华, 郭志宏, 等. 航空重力勘探理论方法及应用 [M]. 北京: 地质出版社, 2010.  
Xiong S Q, Zhou X H, Guo Z H, et al. Airborne gravity prospecting theory, method and application [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010.
- [48] 中华人民共和国自然资源部. 航空重力测量技术规范: DZ/T 0381—2021 [S]. 北京: 地质出版社, 2021.  
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Specification for airborne gravity survey: DZ/T 0381—2021 [S]. Beijing: Geological Publishing House, 2021.

- [49] 白金海, 马慧娟, 胡栋, 等. 冷原子重力仪研究进展综述 [J]. 宇航计测技术, 2023, 43(5): 1–10.  
Bai J H, Ma H J, Hu D, et al. Review of research advance on cold-atom gravimeter [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2023, 43(5): 1–10.
- [50] 刘向东, 刘习凯, 马东, 等. 超导重力仪器: 机遇与挑战 [J]. 导航与控制, 2019, 18(3): 7–13.  
Liu X D, Liu X K, Ma D, et al. Superconducting gravity instrument: Opportunities and challenges [J]. *Navigation and Control*, 2019, 18(3): 7–13.
- [51] 林君, 薛国强, 李貅. 半航空电磁探测方法技术创新思考 [J]. 地球物理学报, 2021, 64(9): 2995–3004.  
Lin J, Xue G Q, Li X. Technological innovation of semi-airborne electromagnetic detection method [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(9): 2995–3004.
- [52] 嵇艳鞠, 王远, 徐江, 等. 无人飞艇长导线源时域地空电磁勘探系统及其应用 [J]. 地球物理学报, 2013, 56(11): 3640–3650.  
Ji Y J, Wang Y, Xu J, et al. Development and application of the grounded long wire source airborne electromagnetic exploration system based on an unmanned airship [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(11): 3640–3650.
- [53] 杨寿南. 高分辨率阵列探测器航空伽马能谱仪研制 [D]. 成都: 成都理工大学(博士学位论文), 2020.  
Yang S N. Development of airborne gamma spectrometer with high resolution array detector [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (Doctoral dissertation), 2020.
- [54] 孙和平. 对我国重力学未来发展的几点思考 [J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(5): 881–890.  
Sun H P. Some reflections on developing trend of gravimetry in China [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2024, 39(5): 881–890.
- [55] 郭建. 一种航空地震勘探系统和方法: ZL202111106488.2 [P]. 2023-04-25.  
Guo J. An airborne seismic exploration system and method: ZL202111106488.2 [P]. 2023-04-25.
- [56] 熊盛青, 钱荣毅, 马振宁. 航空震源冲击单元位置的确定方法及系统: CN114509795A [P]. 2022-05-17.  
Xiong S Q, Qian R Y, Ma Z N. The method and system of determining the location of the shock unit of aviation source: CN114509795A [P]. 2022-05-17.
- [57] 马振宁, 王娇, 钱荣毅, 等. 一种无人机航空地震仪: CN202210491366.8 [P]. 2022-07-05.  
Ma Z N, Wang J, Qian R Y, et al. An aerial seismometer for unmanned aerial vehicle: CN202210491366.8 [P]. 2022-07-05.
- [58] 吴志勇, 钱荣毅, 马振宁, 等. 地震探测无人机遥控震源实验研究 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(29): 12739–12745.  
Wu Z Y, Qian R Y, Ma Z N, et al. Experimental research on unmanned aerial vehicle remote control source of seismic exploration [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(29): 12739–12745.