

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2023.121

引用格式: 赵相宽,张炜,高曦,等. 欧盟层面矿产资源地球物理勘探技术主要研发进展及对我国的启示[J]. 中国地质调查, 2025,12(4): 16-23. (Zhao X K,Zhang W,Gao X,et al. Research and development progresses of mineral resource geophysical exploration technology funded by European Union and its implications for China [J]. Geological Survey of China,2025,12(4): 16-23.)

欧盟层面矿产资源地球物理勘探技术主要研发进展及对我国的启示

赵相宽^{1,2}, 张炜^{1,2}, 高曦^{1,2}, 吴西顺^{1,2}

(1. 中国地质调查局地学文献中心,北京 100083; 2. 中国地质图书馆,北京 100083)

摘要: 2014年以来,欧盟在“地平线2020”(Horizon 2020)计划和欧洲创新与技术研究院(The European Institute of Innovation and Technology,EIT)支持下,先后资助了9个地球物理勘探技术研发项目,对我国矿产资源地球物理勘探技术的研发具有参考意义。通过系统整理相关项目,发现“地平线2020”计划和欧洲创新与技术研究院原材料部门的主要研发方向为穿透深度大、分辨率和精度更高、绿色环保、具有经济性的地球物理技术,具体包括地震、航空磁测、航空电磁、航空高光谱和钻探等。其研发历程给我国地球物理勘探技术的发展带来以下4点启示:①被动源地震和电动震源是更加绿色环保的技术,压电地震仪可作为勘探隐伏石英矿床的有效手段;②无人机航空地球物理勘探系统是重要的研发方向;③随钻测井可能成为固体矿产勘探领域的重点研发方向之一;④利用新型央地企关系有望推动相关技术的商业化应用和创新。研究在查明欧盟地球物理勘探技术最新研发方向的同时,对我国的相关技术领域研发和项目部署等具有启示意义。

关键词: 矿产勘探; 地球物理; 欧盟; 地震; 航空地球物理

中图分类号: P315.0; P318.6; P319.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8706(2025)04-0016-08

0 引言

矿产资源是现代工业社会的基础,随着能源转型和全球人口增长,新兴国家和发展中国家人民生活水平提高,矿产资源的需求也在不断增加^[1-4]。2014年以来,欧盟为保障其矿产资源供应的安全性和可持续性,在“地平线2020”(Horizon 2020)计划和欧洲创新与技术研究院(The European Institute of Innovation and Technology,EIT)支持下,持续资助先进地球物理勘探技术的研发与应用。相比之下,我国在地震、航空磁测、航空电磁等领域与国际先进水平仍存在差距,如被动源地震探测技术在理论和实践上仍需深入研究^[5]、无人机载航空地球物理调查系统的紧急避障能力仍有待提高^[6]、航空磁测三

分量技术仍需攻关^[7-8]、超导量子干涉器件(superconducting quantum interference device,SQUID)性能仍然有待提升^[9]。

本文整理了2014—2023年欧盟层面资助的矿产资源地球物理勘探技术,包括“地平线2020”计划及EIT资助的相关研发项目,阐明了欧盟在矿产资源地球物理勘探技术方面的战略部署和取得的最新进展,以期对我国矿产资源地球物理勘探技术的研发应用起到启示作用。

1 “地平线2020”计划和EIT资助项目

“地平线2020”计划始于2014年,为期7a(2014—2020年),预算总额约770.28亿欧元^[8],共资助5个项目,资助经费超过3000万欧元。EIT创立于2008年,其下辖的EIT原材料部门共资助4个项目(表1)。

收稿日期: 2023-02-27; 修订日期: 2025-07-21。

基金项目: 中国地质调查局“战略性矿产勘查战及综合勘查技术跟踪与研究(编号: DD20242476)”项目资助。

第一作者简介: 赵相宽(1990—),男,工程师,主要从事矿业科技情报研究。Email: 414857282@qq.com。

表1 欧盟资助的矿产资源地球物理勘探技术项目及其重点研发方向

Tab.1 Mineral resource geophysical exploration technology projects funded by the European Union and their major research and development fields

资助项目来源	资助项目中文名称	资助项目英文简称	重点研发方向	资助经费/欧元
“地平线2020”计划	环境友好、成本低廉的被动源地震矿产勘探技术	PACIFIC	地震	320万
	创新勘探技术	NEXT	航空磁测、航空电磁	690万
	创新的非侵入式勘探技术	INFACT	航空磁测、航空电磁、航空放射性、地面电磁、地面重力	562万
	保障可持续矿产资源供给的创新勘探技术	Smart Exploration	地震、航空电磁、钻探	522万
	用于勘探欧洲伟晶岩的绿色创新勘探工具	GREENPEG	地震、航空电磁、航空高光谱	925万
EIT 原材料部门	用于地质填图的多传感器无人机系统	MULSEDRO	航空磁测、航空高光谱	-
	用于矿产资源勘探的创新性地球物理测井工具	InnoLOG	地震、钻探	-
	多用途勘探无人机	MuVerDrone	航空磁测	-
	用于矿产资源勘探的地震成像技术	SIT4ME	地震	-

注:“-”表示无数据,资助经费一栏中,EIT 相关项目网站未标明其经费资助情况,因此无具体数据。

“地平线2020”计划和EIT 原材料部门资助的重点研发方向为穿透深度大、分辨率和精度更高、绿色环保、具有经济性的地球物理技术,具体包括地震、航空磁测、航空电磁、地面电磁、地面重力等。

2 欧盟矿产资源地球物理勘探技术重点研发方向及最新进展

2.1 地震技术

PACIFIC、Smart Exploration、GREENPGE、InnoLOG 和 SIT4ME 这5个项目涉及地震技术研发(表1),具体研发方向包括被动源地震方法、电动

震源和压电地震仪。

2.1.1 被动源地震方法

矿产资源勘探常用的地震技术包括主动源地震技术和被动源地震技术,其典型目标及优缺点见表2^[10]。利用环境噪声的被动源地震方法是一种较新的技术,无需人工激发震源。该方法通过固定位置的地震仪台站或检波器等连续记录在地壳内传播的地震噪声,利用地震干涉从背景噪声记录中提取波场传播信号。被动源地震成像的常见方法有面波层析成像和体波反射成像,由于被动源地震中面波振幅较强,体波能量被压制,因此提取体波较为困难,对环境噪声的分布要求十分苛刻^[10]。

表2 不同地震方法的优缺点对比

Tab.2 Advantages and disadvantages of different seismic methods

	地震和成像方法		
	主动源地震技术 反射成像	被动源地震技术 面波层析成像	被动源地震技术 体波反射成像
原理	利用人工爆炸震源激发的地震反射波,得到地下结构和分层	利用环境噪声,使用层析成像方法对地下进行面波速度成像	利用环境噪声,采用互相关、反褶积和互相关等方法,从被动源地震记录中检索体波进行成像
典型目标	具有密度差异的水平到浅倾斜的单元,横向尺度有限的目标,如地下空洞或隧道	具有横向和纵向速度差异的构造	具有密度和速度差异的水平到倾斜的单元
缺点	需要主动震源; 成本较高; 潜在的安全风险 破坏环境; 需要进行大量预处理; 噪声信号弱; 需要特定的阵列设计	依赖于噪声源特征; 无通用处理规则; 分辨率较低	依赖于噪声源特征; 数据以面波能量主导; 提取体波无通用规则; 有时难以解释; 特殊阵列设计
优点	能在有利环境中直接圈定矿体; 软件工具有明确的协议和行业标准; 分辨率更高; 能提供高分辨构造信息	成本较低; 无需主动震源; 能通过速度变化圈定控矿岩石; 环境影响较小	成本较低; 无需主动震源; 能够应用有行业标准的工具; 与主动地震反射法相似的流程; 如果存在高频噪声,可能分辨率较高

PACIFIC 项目开发了一种基于抗噪性能良好的 Radon 积分变换提取体波的方法。根据不同的积分路径, Radon 变换可分为线型、双曲型以及抛物型。Radon 相关性通过双曲型 Radon 变换提取传播速度高于面波的体波, 可用于接收器线性阵列, 并最终构建速度模型^[11]。

此外, PACIFIC 项目还开发了一种适用于大型阵列的自动化工作流程, 利用海洋噪声和火车经过引起的震动, 能够在非常宽的频率范围内测量高频面波相速度, 获取 0.5 ~ 30 Hz 频率范围内的瑞利波相速度值, 横跨 5.9 个倍频程^[12]。目前, 该项目支撑的初创企业 SisProbe 已被 Egis 集团收购, 将被动地震解决方案用于矿产勘探、尾矿监测和覆盖层下的地质填图等领域^[13]。

2.1.2 电动震源

可控震源是当前地面地震数据采集工作中最主要的震源之一, 包括电磁式可控震源和液压伺服可控震源等。近年来, 地震数据低频信号和宽频带信号受到关注, 在保持驱动水平恒定和最小谐波失真的前提下, 液压伺服可控震源因受制于液压油流量的精确控制, 尤其在低频工况下, 难以产生稳定的宽频带信号^[14]。

Smart Exploration 项目研发了电动震源 E - Vib, 采用直线同步电机, 频带范围为 0.5 ~ 200 Hz, 最大出力为 6.7 kN, 总重量为 1.65 t, 适用于 800 m 以浅到 3000 m 以深的穿透深度。经测试, E - Vib 原型机与重 14.1 t、最大出力 67.5 kN 的液压伺服可控震源的信号穿透深度相似, 处理后得出的标志层位相同, 且 E - Vib 具有较低的总谐波失真^[14-15]。Seismic Mechatronics 公司已将 E - Vib 系统进行市场化应用, 并推出了 Lightning E - Vib 和 7KN E - Vib 两种系统。

2.1.3 压电地震仪

GREENPEG 项目旨在开发用于勘探石英 - 伟晶岩矿床的压电地震仪。压电地震仪基于压电效应和地震流动电势效应(E 效应), 可勘探伟晶岩、磷灰石 - 霞石、闪锌矿、金伯利岩、以及富含金、锡、钨、钼、锌、水晶、高纯石英等的石英矿床。富石英隐伏矿体由于磁性响应和辐射响应低, 一般的地球物理方法很难识别, 但天然石英脉的压电效应最强, 因此应用压电地震仪勘探隐伏石英矿床的潜力较大^[16-17]。压电地震仪可用于远景尺度 (< 25 km²) 的绿地和棕地勘探, 直接探测伟晶岩的压电效应特

征, 圈定后续的勘探靶区, 并结合钻探、探地雷达、电阻率层析成像等数据, 进行隐伏富石英伟晶岩体的三维建模, 但无法直接判别伟晶岩体是否具有工业开采价值^[18]。

2.2 航空磁测系统

涉及航空磁测技术的项目包括 NEXT、INFAC T、MULEDRO 和 MuVerDrone(表 1), 研发方向包括三分量矢量磁测系统、SQUID 和磁力仪吊舱无人机系统。

2.2.1 三分量矢量磁测系统

基于总磁场进行磁化矢量反演是识别剩磁影响的磁性数据的重要手段。相比总磁场标量测量, 三分量矢量磁测量可以提供关于磁源方向和性质的更丰富的信息, 有助于降低数据的多解性, 更有效地识别和揭示剩磁影响的区域^[19-20]。

NEXT 项目资助 Radai 公司开发了三分量矢量磁测系统。该系统在 Albatros VT2 固定翼无人机平台上安装磁通门三分量磁力仪, 噪声水平为 $\pm 0.5 \mu\text{T}$, 动态范围为 $\pm 10 \mu\text{T}$, 采样频率最高为 137 Hz^[19-21]。

MULEDRO 项目在固定翼和多旋翼无人机系统上安装了三分量磁通门磁力仪。两套系统得到的磁测数据的分辨率与地面磁测相当。该项目还开发了配套的数据处理软件, 计算相对稳定高度的连续磁场^[22]。

2.2.2 SQUID

SQUID 已成为地球科学应用领域的成熟技术, 分为低温和高温 SQUID。SQUID 能够提供极低的本底白噪声 ($< 1 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$)、较高的转换速率(高达约 250 mT/s)、相对于传递函数独立的宽频波段, 运用反馈电子器件测量相对磁场^[23-24]。

INFAC T 项目使用了德国 Supracon 公司的 Jessy Star 系统。该系统是全球首套全张量航空磁梯度测量系统, 能够快速进行大范围地球磁场梯度张量填图。相比传统技术, Jessy Star 系统具备 4 方面优势: ①分辨率更高, 覆盖范围更大; ②相比地球磁场的总场测量, 其梯度张量包含更多信息; ③受地球磁场时间波动的影响较小; ④传感器直接提供梯度数据^[25-26]。

2.2.3 磁力仪吊舱无人机系统

MuVerDrone 项目开发了用于轻型无人机的磁力仪吊舱系统 CMAGTRES - S100。该系统挂载在 DJI M210 中型四旋翼无人机下, 以吊舱的形式搭载

GEM Systems 的 Potassium GSMP-35u 光泵标量磁力仪,高速灵活,数据质量高,测量范围与直升机磁测系统相当^[27]。

MuVerDrone 项目已在法国布列塔尼地区进行测试,结果表明,获取的高分辨率数据能够弥补野外观测与区域航空磁测调查间的空白,结合野外磁化率测量和区域磁场建模能够推导跨尺度的连续模型^[28-29]。

2.3 航空电磁系统

涉及航空电磁技术的项目包括 NEXT、INFACT、Smart Exploration 和 GREENPEG 项目(表1),研发方向包括无人机电磁测量系统、无人机和直升机时域电磁系统以及无人机频域电磁测量系统。

2.3.1 无人机电磁测量系统

航空电磁测量方法的优点是可以避开地形障碍,基于无人机的航空电磁测量部署便捷,成本低廉,环境影响小,但最大载荷限制了电磁法的适用性^[30]。

NEXT 项目资助 Radai 公司开发了一种基于无人机的频域电磁测量系统 Louhi,由电磁发射器和一架无人机的三分量电磁接收器组成(图1),发射器可以是无人机携带的小型移动回线,也可以是铺设在地面的大型电流回线。双无人机系统可以克服一些地形障碍,便于快速部署。地面回线则拥有更大的电磁场源矩,拥有更好的信噪比(S/N)和更大的勘探深度^[31-32]。

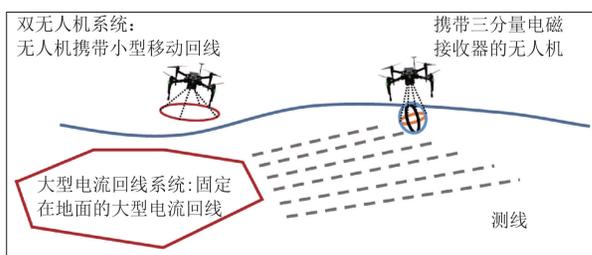


图1 Radai 公司无人机电磁测量方法概念图

Fig.1 Schematic diagram of Radai's drone electromagnetic method

2020年,NEXT 项目在芬兰对 Louhi 系统进行测试,使用直径1m的无人机移动回线和120m×120m的大型电流回线,结果表明两个回线系统数据都识别出相同的100m宽的低阻区域^[31-32]。

2.3.2 VTEM ETTM时域电磁系统

INFACT 项目使用 Geotech 公司的 VTEM ETTM 系统进行航空时域电磁测量^[26]。VTEM ETTM 系统发射器具有直径为17.4m的回线,拥有较强的接

地响应,接收器测量的信号幅度更大,信噪比更高。INFACT 项目使用该系统获得的测量结果具有较高的信噪比,低频为30 Hz/25 Hz,穿透深度为300 m,空间分辨率为2~3 m^[26, 33]。

2.3.3 ZTEMTM音频电磁系统

INFACT 项目使用 Geotech 公司的 ZTEMTM 系统进行航空音频电磁测量^[24]。ZTEMTM 是一种电磁测量技术系统,能够识别低阻岩体(如铜、镍硫化物矿床),或者比围岩电阻率更高的高阻岩体(如斑岩矿床中发现的硅质蚀变)。该系统能够测量地下横向电导率差异引起的垂直场响应,在极低的噪声水平下获取数据,测量频率范围为25~720 Hz,穿透深度超过1~2 km,适合勘探深部构造控矿及斑岩型矿床^[34-35]。

2.3.4 无人机电磁测量系统和扩展极低频波段测量系统

Smart Exploration 项目研发了一个搭载新型宽波段电磁数据采集系统的无人机系统,包括3套子系统:使用GSMP-35U传感器的无人机电磁调查系统、无人机扩展极低频(VLF)波段测量系统(有效波段1~350 kHz)、陆基电磁系统(有效波段10 Hz~250 kHz)^[36]。

Smart Exploration 项目在瑞典测试了该系统,测量结果与2016年夏季在同一地区采集的航空数据质量相当。该系统在平均电阻率为1000 Ω·m的区域,1 kHz的穿透深度为500 m,适用于棕地和小范围绿地勘探^[36]。

2.3.5 基于直升机的深部探测时域电磁系统

Smart Exploration 项目研发了基于直升机的深部探测时域电磁/瞬变电磁系统。该系统能够以6.25 Hz的基频运行,并记录断电后晚时段响应(约60 ms),为深地勘探带来两方面优势:一是增加穿透深度,二是提高已知深度勘探目标的分辨率^[35]。Smart Exploration 项目在瑞典、西班牙、希腊(棕地)和科索沃地区(绿地)均进行了测试^[37]。

2.3.6 直升机互补式尾刺磁力仪

GREENPEG 项目开发了直升机互补式尾刺磁力仪,并推动该系统获得欧洲航空安全局认证。该系统是首个欧盟认证的直升机尾刺磁探测系统,能够有效降低飞行高度,获取更高分辨率的信息^[16-17, 38]。

2.4 航空高光谱系统

在航空高光谱技术方面, GREENPEG 项目开

发、配置并测试了基于无人机的高光谱数据采集硬件, MULSEDRO 项目开发了搭载 Rikola 高光谱成像相机的无人机高光谱测量系统。

2.4.1 重型无人机系统和声光单色仪

GREENPEG 项目开发了基于无人机的高光谱数据采集系统, 包括重型无人机系统和用于高光谱成像的声光单色仪。该系统可收集地表可见光和近红外波长范围的高空间分辨率的高光谱信息, 用于勘探包括伟晶岩在内的小型矿体。GREENPEG 项目已经在挪威多个地区进行了现场测试, 并制定了适用于无人机的 Pixhawk 飞行控制标准^[16-17, 38]。

2.4.2 无人机高光谱测量系统

MULSEDRO 项目开发了搭载 Rikola 高光谱成像相机的无人机系统, 基于多旋翼无人机平台捕获电磁波谱(604~900 nm)可见光和近红外波段的图像, 图像整合时间为1~2 s。该系统可勘探在可见光-近红外光谱中具有显著光谱特征的赤铁矿、黄钾铁矾、针铁矿等含铁矿物, 并有潜力勘探稀土矿。MULSEDRO 项目已在芬兰多地进行了现场测试^[22]。

2.5 钻探技术

钻探技术方面, Smart Exploration 项目开发了小口径钻孔系统, InnoLOG 项目开发了地下原位自动矿物识别系统。

2.5.1 小口径钻孔系统

Smart Exploration 项目资助 BitSim 公司和乌普萨拉大学研发了 Slimhole(小口径钻孔)系统, 用于 NQ 尺寸小口径钻孔的井下勘探。Slimhole 是首个能够在深井中进行低噪声数字化数据传输的模块化系统, 该系统可选择钻孔中部署的节点数量, 能够同时测量附近的钻孔, 实时记录和传输几乎无噪声的数据, 具有良好的同步性和较大的数据容量^[39]。

2.5.2 地下原位矿物自动识别系统

InnoLOG 项目开发了地下原位自动矿物自动识别系统。该系统包括高光谱钻孔测井工具、激光诱导等离子体光谱/拉曼光谱钻孔测井工具和机器学习解释软件。其中光学、多光谱和高光谱成像用于采集井壁矿物的颜色和成分信息, 拉曼光谱和激光诱导等离子体光谱用于采集分子和元素数据, 同时通过高分辨率三维钻孔定向图像分析岩石形状信息。该系统能够分析不同波段的实时高光谱图像(VN-SWIR 和 LWIR)。LWIR 波段的识别准确

率达 96%, VN-SWIR 波段的识别准确率为 85%^[40]。

3 对我国地球物理勘探的启示

2014—2023 年, 依托“地平线 2020”计划和 EIT 原材料部门在矿产资源地球物理勘探技术研发领域的支持, 欧盟在 seismic、航空地球物理勘探和钻探等方面取得了许多进展, 给我国地球物理勘探技术的发展带来以下 4 点启示。

(1) 在地震技术方面, 被动源地震和电动震源是更加绿色环保的技术, 压电地震仪可作为勘探隐伏石英矿床的有效手段。被动源地震无需人工激发震源, 目前在我国已用于甘肃省大桥金矿等矿床勘探, 并基于被动源地震的反演和成像方法不断进行创新^[41-44]; 电动震源则采用绿色能源^[10, 14-15]。以上技术均有望在绿色勘查中发挥重要作用。压电地震仪能够勘探隐伏的伟晶岩型稀有金属和高纯石英矿床, 有望在新一轮找矿突破战略行动中发挥作用。

(2) 在航空地球物理和遥感勘探技术方面, 无人机系统的研发占据重要地位。相比传统的航空系统, 无人机系统具有快速、便捷、高效、安全、成本低廉等优势, 且能在山地等复杂环境开展低空勘探工作。在欧盟资助的航空磁测、航空电磁和航空高光谱研发项目中, 有多个涉及无人机系统的研发和应用, 且部分系统已取得与地面物探和传统航空物探技术相当的分辨率和穿透深度^[22, 27-29, 31-32, 36]。我国有大量人员难以进入的深切割复杂地形, 无人机航空物理勘探系统是在这些复杂地形实现找矿突破的重要手段。

(3) 在钻探技术方面, 随钻测井技术可能成为固体矿产勘探领域的重点研究方向之一。目前, 随钻测井技术已成为油气行业自动化智能化钻井的核心, 但在固体矿产勘探中应用较少。欧盟针对固体矿产钻井开发了数据传输模块化和原位矿物自动识别系统以提升勘探效率。随钻测井技术有望提高固体矿产的自动化和智能化水平, 形成推动地球物理勘探技术高质量发展的新质生产力。

(4) 利用新型央地企关系, 有望推动相关技术的商业化应用和创新。在“地平线 2020”计划和 EIT 资助项目中, 地质调查机构、科研机构或高校与企业共同参与, 从立项、研发到技术推广, 重视技术的经济

可行性,最终促成了 E - Vib 电动震源和 Radai 无人机系统等多项技术的商业化落地^[14-15, 19-22, 31-32]。在地球物理勘探技术的研发过程中,利用新型央地企关系,也有助于勘探技术的商业化应用和推广,进而促成技术改进与创新。

4 结论

(1) 本文系统整理了 2014 年以来欧盟层面部署的矿产资源地球物理勘探技术研发项目及其取得的进展,发现“地平线 2020”计划和 EIT 原材料部门的主要研发方向为穿透深度大、分辨率和精度更高、绿色环保、具有经济性的地球物理技术,包括地震、航空磁测、航空电磁、航空高光谱和钻探等,并成功实现了多项技术的商业化应用。

(2) 研究给我国地球物理勘探技术的发展带来 4 点启示: ① 在地震技术领域,欧盟重视研发更加绿色环保的被动源地震技术和电动震源,并研发用于勘探富石英隐伏矿体的压电地震仪; ② 在航空地球物理和遥感领域,欧盟更加重视无人机的研发,部分系统已取得与地面物探和传统航空物探技术相当的分辨率和穿透深度; ③ 在钻探领域,随钻测井是欧盟的最新重点研发方向之一; ④ 欧盟在项目设置中重视技术研发的同时,同样十分关注商业性应用和推广效果,相关经验值得学习。

参考文献 (References):

- [1] Gulley A L, Nassar N T, Xun S. China, the United States, and competition for resources that enable emerging technologies[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4111 - 4115.
- [2] 范国强, 秦宇龙, 詹涵钰, 等. 四川攀西地区稀土资源成矿规律及找矿靶区[J]. 中国地质调查, 2022, 9(1): 23 - 31.
Fan G Q, Qin Y L, Zhan H Y, et al. Metallization regularity and prospecting target area in Panzhihua - Xichang area of Sichuan Province[J]. Geological Survey of China, 2022, 9(1): 23 - 31.
- [3] 王登红, 王成辉, 孙艳, 等. 我国锂铍钽矿床调查研究进展及相关问题简述[J]. 中国地质调查, 2017, 4(5): 1 - 8.
Wang D H, Wang C H, Sun Y, et al. New progresses and discussion on the survey and research of Li, Be, Ta ore deposits in China[J]. Geological Survey of China, 2017, 4(5): 1 - 8.
- [4] 王登红, 孙艳, 刘喜方, 等. 锂能源金属矿产深部探测技术与找矿方向[J]. 中国地质调查, 2018, 5(1): 1 - 9.
Wang D H, Sun Y, Liu X F, et al. Deep exploration technology and prospecting direction for lithium energy metal[J]. Geological Survey of China, 2018, 5(1): 1 - 9.
- [5] 王柯洪, 王治国, 高静怀, 等. 金属矿产资源探测的地震方法: 综述与展望[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(4): 1607 - 1629.
Wang K Q, Wang Z G, Gao H J, et al. Seismic methods for exploration of metal mineral resources: Review and prospect[J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(4): 1607 - 1629.
- [6] 刘富波, 李巨涛, 刘丽华, 等. 无人机平台半航空瞬变电磁勘探系统及其应用[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(5): 2222 - 2229.
Liu F B, Li J T, Liu L H, et al. Development and application of a new semi - airborne transient electromagnetic system with UAV platform[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(5): 2222 - 2229.
- [7] 熊盛青. 我国航空重磁勘探技术现状与发展趋势[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(1): 113 - 117.
Xiong S Q. The present situation and development of airborne gravity and magnetic survey techniques in China[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(1): 113 - 117.
- [8] 刘双, 胡祥云, 郭宁, 等. 无人机航磁测量技术综述[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2023, 48(6): 823 - 840.
Liu S, Hu X Y, Guo N, et al. Overview on UAV Aeromagnetic Survey Technology[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 24(1): 113 - 117.
- [9] 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 for the cabin HTS[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(1): 360 - 370.
- [10] Pacific. D1. 3 - Report Comparing Best Practice in Active and Passive Exploration Methods[R]. PACIFIC consortium, 2018.
- [11] Naghadeh D H, Bean C J, Brenguier F, et al. Retrieving reflection arrivals from passive seismic data using Radon correlation[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2021, 18: 177 - 191.
- [12] Xu Y, Lebedev S, Meier T, et al. Optimized workflows for high - frequency seismic interferometry using dense arrays[J]. Geophysical Journal International, 2021, 227: 875 - 897.
- [13] Egis, Sisprobe by Egis [EB/OL]. <https://www.egis-group.com/sisprobe-by-egis>.
- [14] Brodic B, Ras P, Kunder R D, et al. Seismic imaging using an e - vib - A case study analyzing the signal properties of a seismic vibrator driven by electric linear synchronous motors[J]. Geophysics, 2021, 86(3): B223 - B235.
- [15] Kunder R D. Electric Seismic Source with broadband frequency (E - Vib) [J]. First Break, 2020, 38(8): 82 - 83.
- [16] Greenpeg. Deliverable D 1. 1 Project Management Plan - July

- 2020[R]. GREENPEG,2020.
- [17] Greenpeg. Deliverable D 7. 1 GREENPEG Market analysis[R]. GREENPEG,2020.
- [18] Müller A, Brönnner M, Menuge J, et al. The GREENPEG Project Toolset to Explore for Buried Pegmatites Hosting Lithium, High – Purity Quartz, and Other Critical Raw Materials [J]. *Economic Geology*,2025,120(3):745–778.
- [19] Karinen A. Magnetic vector inversion using XYZ measured by fluxgate magnetometer in UAV [C]. EGU General Assembly 2021, online,19–30 Apr 2021, EGU21–13006.
- [20] Karinen A, Pirttijärvi M, Saartojoja A. DELIVERABLE 3. 12 Vector magnetic surveys with drones[R]. NEXT,2020.
- [21] Karinen A, Pirttijärvi M, Saartojoja A. DELIVERABLE 3. 7 Vector magnetic surveys with drones[R]. NEXT,2020.
- [22] Heincke B, Jackisch R, Saartojoja A, et al. Developing multi – sensor drones for geological mapping and mineral exploration; set-up and first results from the MULSEDRO project. [J]. *GEUS Bulletin*,2019,43:1–5.
- [23] Stolz R, Schifer M, Becken M, et al. SQUIDS for magnetic and electromagnetic methods in mineral exploration[J]. *Mineral Economics*,2022,35:467–494.
- [24] Stolz R, Schmelz M, Zakosarenko V, et al. Superconducting sensors and methods in geophysical applications[J]. *Superconductor Science and Technology*,2021,34:033001.
- [25] Supracon. SQUID[EB/OL]. <http://www.supracon.com/>.
- [26] Infact. Technical information [EB/OL]. <https://www.infact-project.eu/technical-information/>.
- [27] Døssing A, Silva E L S D, Martelet G, et al. A High – Speed, Light – Weight Scalar Magnetometer Bird for km Scale UAV Magnetic Surveying: On Sensor Choice, Bird Design, and Quality of Output Data[J]. *Remote Sensing*,2021,13(4):649.
- [28] Døssing A, Martelet G, Rasmussen T M K, et al. A Multidisciplinary UAV – and Ground – Geophysical Mapping of Complex Mineralisations in an Inter – Tidal Coastal Zone, Brittany (France) [C]. NSG2020 3rd Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining, online,7–8 Dec 2020, p. 1–5.
- [29] Martelet G, Gloaguen E, Døssing A, et al. Airborne/UAV Multi-sensor Surveys Enhance the Geological Mapping and 3D Model of a Pseudo – Skarn Deposit in Ploumanac’ h, French Brittany [J]. *Minerals*,2021,11(11):1259.
- [30] Ketelaere D DSpiteri A. A Practical Toolkit addressed to Mineral Exploration and Mining Companies[R]. Malta:IRMCo,2021.
- [31] Pirttijärvi M, Saartojoja A Korkeakangas P. DELIVERABLE 3. 10 EM surveys II with drones[R]. NEXT,2021.
- [32] Pirttijärvi M Korkeakangas P. DELIVERABLE 3. 5 EM surveys with drones[R]. NEXT,2020.
- [33] Eadie T, Legault J M, Plastow G, et al. VTEM ET: An improved helicopter time – domain EM system for near surface applications [J]. *ASEG Extended Abstracts*,2018,1:1–5.
- [34] Legault J M, Prikhodko A, Lzarra C, et al. VtemTM and ZtemTM Helicopter EM Case – Study Over the Nuqrah Cu – Pb – Zn – Au Sedex Massive Sulphide Deposit in Western Arabian Shield, KSA [C]. 13th SAGA Biennial Conference & Exhibition, South Africa, Oct 2013, cp – 378 – 00027.
- [35] Wijns C, Legault J M. What is ZTEM seeing over these tropical porphyry deposits? [J]. *ASEG Extended Abstracts*,2018,1:1–5.
- [36] Bastani M, Johansson H, Paulsson A, et al. Unmanned Aerial Vehicles (UAV) and ground – based electromagnetic (EM) systems [J]. *First Break*,2020,38(8):87–89.
- [37] Gisselø P. Deep – probing time – domain electromagnetic helicopter – based system (HTEM) [J]. *First Break*,2020,38(8):80–81.
- [38] Müller A, Reime W, Wall F, et al. GREENPEG – exploration for pegmatite minerals to feed the energy transition; first steps towards the Green Stone Age [J]. *Geological Society, London, Special Publications*,2022,526(1):27.
- [39] Sivard A, Jansson N, Juhlin C, et al. Slimhole System [J]. *First Break*,2020,38(8):78–79.
- [40] Andrés B, Carlos R D – B, Fernando J, et al. Mineral interpretation results using deep learning with hyperspectral imagery [C]. EGU General Assembly 2020,2020, EGU2020–19667.
- [41] 闫浩飞, 刘国峰. 主被动源地震勘探在金属矿勘查中的应用 [J]. *地球物理学进展*, 2024,39(5):1810–1823.
- Yan H F, Liu G F. Application of active and passive source seismic exploration in mineral exploration [J]. *Progress in Geophysics*,2024,39(5):1810–1823.
- [42] 张伟, 王海华, 房大任. 天然氢产业发展分析与展望 [J]. *中国地质调查*,2025,12(2):20–29.
- Zhang W, Wang H H, Fang D R. Analysis and prospect of natural hydrogen industry development [J]. *Geological Survey of China*, 2025,12(2):20–29.
- [43] 李沐洁, 赵俐红, 孔庆翰, 等. 沂沭断裂带地壳结构特征: 来自远震接收函数的证据 [J]. *山东科技大学学报: 自然科学版*, 2023,2:13–21.
- Li S J, Zhao L H, Kong Q H, et al. Crustal structure in Yishu fault zone: Evidence from teleseismic receiver functions [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*,2023,2:13–21.
- [44] 张伟, 张剑, 白雪, 等. 多类型地震数据融合技术及软件应用 [J]. *山东科技大学学报: 自然科学版*,2023,42(6):19–29.
- Zhang W, Zhang J, Bai X, et al. Multiformat seismic data fusion technology and software application. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*,2023,42(6):19–29.

Research and development progresses of mineral resource geophysical exploration technology funded by European Union and its implications for China

ZHAO Xiangkuan^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, GAO Xi^{1,2}, WU Xishun^{1,2}

(1. *Geoscience Documentation Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China*; 2. *National Geological Library of China, Beijing 100083, China*)

Abstract: Since 2014, the European Union (EU) has funded nine geophysical exploration technology research and development (R&D) projects under the support from Horizon 2020 and European Institute of Innovation and Technology (EIT), which has significant reference value for China's mineral resource geophysical exploration technology development. A systematic review of these projects reveals that the main R&D direction of Horizon 2020 and EIT is geophysical technologies with greater penetration depth, higher resolution and accuracy, environmental friendliness, and cost-effectiveness, including seism, airborne magnetic surveys, airborne electromagnetic surveys, airborne hyperspectral imaging, and drilling. The EU's R&D progress offers four key insights for the advancement of geophysical exploration technologies in China. ① Passive-source seismic methods and electrodynamic seismic generator are environmentally friendly technologies, and piezoelectric seismometers prove effective for exploring quartz deposits. ② Drone-based airborne geophysical exploration system is a critical R&D direction. ③ Logging-while-drilling may become one of the key R&D priorities in solid mineral exploration. ④ Utilization of new partnership of government, institutions and enterprise could facilitate the commercialization and innovation of related technologies. This research not only identifies the EU's latest geophysical technology trends but also could provide strategic implications for China's R&D planning and project deployment in related fields.

Keywords: mineral exploration; geophysics; European Union; seism; aerogeophysics

(责任编辑: 刘丹)