

地质矿产勘查新技术在某区域找矿应用中的有效性研究

杨万贵

特变电工股份有限公司 新疆 吉昌 831100

摘要: 随着浅部、易识别矿产资源的日益枯竭,全球矿产勘查工作正全面转向深部、隐伏及复杂地质条件下的“攻深找盲”阶段。这一战略转型对勘查技术的精度、深度和效率提出了前所未有的挑战。本文系统性地梳理了当前地质矿产勘查领域涌现的一系列新技术,包括高光谱与InSAR遥感、高精度重磁电震地球物理、深穿透地球化学、三维地质建模与人工智能等,并深入剖析了这些技术在解决特定地质难题(如覆盖层下目标识别、深部微弱异常提取、多源数据融合解释)方面的内在机理与独特优势。在此基础上,论文构建了一个基于“空-天-地-井”一体化的综合勘查技术体系,并从信息获取能力、异常识别精度、模型构建可靠性及找矿预测成功率四个维度,建立了评价新技术有效性的理论框架。研究表明,单一技术的应用已难以满足现代找矿需求,唯有通过多技术、多尺度、多参数的深度融合与协同验证,才能显著提升对成矿系统复杂性的认知水平,有效降低勘查风险,为在新区、新类型、新深度发现大型-超大型矿床提供坚实的技术保障。

关键词: 地质矿产勘查; 新技术; 有效性; 综合勘查; 深部找矿

引言

经过长期高强度的开发,全球范围内暴露于地表或近地表的、易于发现和开采的矿产资源已大幅减少。当前,矿产勘查的主战场已从传统的露头区、浅覆盖区,全面转向被厚层第四系、火山岩或植被覆盖的隐伏区,以及埋藏深度超过500米甚至上千米的深部空间。这类“难识别、难到达”的勘查目标,其直接找矿标志往往缺失或极其微弱,传统的、以经验为主导的、单一方法的勘查模式已显现出明显的局限性,导致勘查成本高企、成功率低下。在此背景下,以信息技术、材料科学、精密仪器制造等为代表的高新技术向地质勘查领域的渗透与融合,催生了一系列革命性的勘查新技术、新方法。这些技术不仅极大地拓展了人类的感知边界,能够探测到更微弱、更深部的地质信息,更重要的是,它们提供了从不同物理、化学角度观测地球的“多维视角”,使得我们能够以前所未有的精度和广度来刻画复杂的成矿系统。因此,系统评估这些新技术在特定找矿场景下的有效性,并探索其最优的组合应用模式,已成为指导新时期矿产勘查实践、提高找矿突破概率的核心科学问题。

1 地质矿产勘查面临的核心挑战与技术需求

1.1 勘查目标的“三深”特征

现代矿产勘查的目标普遍呈现出“深、隐、盲”的“三深”特征。“深”指矿体埋藏深度大,常规的地表方法难以触及;“隐”指矿体上方存在巨厚的、无直接指示意义的覆盖层(如沙漠、黄土、冰川、水体或年轻

火山岩),屏蔽了来自深部的直接信息;“盲”则指缺乏可供肉眼或简单工具识别的矿化露头、蚀变带等地表找矿标志。这使得传统的地质填图、路线踏勘等方法效果甚微,迫切需要能够穿透覆盖层、探测深部信息的间接手段。

1.2 成矿系统的高度复杂性

大型-超大型矿床的形成是多种地质作用在长时间尺度上耦合演化的结果,其控矿因素(如构造、岩浆、流体、地层)相互交织,形成了一个高度非线性、非均质的复杂系统。在这种系统中,矿体与围岩的物性、化性差异可能非常微小,产生的地球物理、地球化学异常信号往往淹没在背景噪声之中^[1]。此外,后期的构造改造、热液叠加等作用,会进一步模糊甚至破坏原始的成矿信息。因此,勘查技术必须具备强大的信号提取、噪声压制和多参数关联分析能力,才能从海量、混杂的数据中识别出真正有价值的找矿线索。

1.3 勘查经济性与环境约束

随着社会对环境保护要求的日益提高和勘查成本的持续攀升,矿产勘查活动必须兼顾经济效益与生态效益。这意味着勘查技术不仅要“找得到”,还要“找得准”、“找得快”。高效率、低成本、低扰动的绿色勘查技术成为必然选择。例如,航空、航天遥感技术可以快速覆盖大面积区域,精准圈定靶区,从而大幅减少地面工作的盲目性和对环境的破坏。同时,精准的定位能力也能显著降低后续钻探工程的投入,提升整个勘查项目的投资回报率。

2 主要勘查新技术及其原理优势

2.1 空-天基遥感与地理信息技术

现代遥感技术已从传统的可见光-近红外多光谱遥感,发展到高光谱、热红外、雷达(特别是合成孔径雷达干涉测量InSAR)等多种手段并用的新阶段。高光谱遥感能够获取地物连续、精细的光谱曲线,其“图谱合一”的特性使其能够像“指纹”一样识别出特定的蚀变矿物(如绢云母、绿泥石、明矾石等),即使这些矿物分布稀疏或被植被部分遮挡,也能通过光谱分解技术予以提取,为圈定蚀变分带和找矿远景区提供直接依据^[2]。InSAR技术则通过分析不同时间获取的雷达影像相位差,能够以毫米级精度监测地表形变。这种能力可用于识别由深部隐伏构造活动或岩浆侵入引起的微弱地表抬升或沉降,为寻找与构造或岩浆活动相关的矿床提供全新的线索。这些空-天基技术具有宏观、快速、周期性重复观测的优势,是开展区域性快速扫面和靶区优选的首选工具。

2.2 高精度地球物理勘查技术

地球物理方法通过探测岩石在密度、磁性、电性、弹性等方面的物性差异来间接推断地下地质体的性质。针对深部、微弱异常的探测需求,地球物理技术正朝着“高精度、大深度、强分辨”的方向发展。在重力勘探方面,航空重力梯度测量(AGG)技术利用安装在飞机上的超导重力梯度仪,能够快速获取高空间分辨率的重力场二阶导数信息,对深部密度体的边界和形态刻画更为清晰。在电磁法勘探中,广域电磁法(WEM)、音频大地电磁法(AMT)和可控源音频大地电磁法(CSAMT)等方法,通过优化场源和接收方式,有效克服了传统MT法在人文干扰区的局限性,实现了对深部(可达2公里以上)高阻或低阻地质体的有效探测。瞬变电磁法(TEM)则以其对良导体(如硫化物矿体)的高度敏感性,在金属矿勘查中扮演着关键角色^[3]。地震勘探技术,特别是高分辨率、宽方位、宽频带的三维地震技术,虽然成本较高,但其在精细刻画复杂地下构造格架、识别岩性界面方面具有无可比拟的优势,正越来越多地被应用于关键成矿区带的精细勘查。

2.3 深穿透地球化学勘查技术

地球化学勘查旨在通过分析地表介质(如土壤、水系沉积物、植物、气体)中元素的含量和组合异常,来追溯深部隐伏矿体的存在。传统的地球化学方法在厚覆盖区效果不佳,因为来自深部的成矿元素信号在向上迁移过程中被极度稀释和改造。深穿透地球化学技术则致力于捕捉那些能够穿越数百米厚覆盖层的“深穿透”信息载体。例如,活动态金属离子测量(MMI)通过特殊

的化学试剂提取土壤中处于活动态、易于迁移的金属离子,能有效放大深部矿化信息。地气测量法则直接采集从地下深处向上运移的惰性气体(如氦、氩)及其携带的超微细金属颗粒,这些气体通道被认为是连接深部矿体与地表的直接“窗口”。生物地球化学测量则利用某些植物对特定元素的选择性吸收和富集特性,通过分析植物组织中的元素含量来间接指示深部矿化。这些方法为在厚覆盖区寻找盲矿体开辟了新的途径。

2.4 三维地质建模与人工智能技术

上述各种技术产生了海量、多源、异构的勘查数据。如何将这些数据有机融合,构建一个统一的、可视化的、量化的三维地质-地球物理-地球化学模型,是实现精准找矿的关键。三维地质建模技术利用计算机图形学和地质统计学方法,将离散的钻孔、剖面、物化探数据集成起来,动态地重构地下地质体的空间展布和相互关系。在此基础上,人工智能(AI)技术,特别是机器学习(ML)和深度学习(DL),正在深刻改变矿产勘查的数据解释范式。AI算法能够从历史成功矿床的勘查数据中自动学习成矿模式和异常特征,并将这些知识应用于新区的预测。例如,卷积神经网络(CNN)可以用于自动识别遥感影像中的蚀变信息或地球物理剖面中的异常模式;随机森林(Random Forest)等集成学习算法则擅长处理高维、非线性的物化探数据,进行多源信息融合和成矿有利度预测^[4]。AI技术的引入,使得找矿预测从依赖专家经验的定性判断,转变为基于大数据的定量、客观、可重复的智能决策过程。

3 新技术有效性的评价体系与协同应用策略

3.1 有效性评价的多维框架

评价一项勘查新技术的有效性,不能仅看其能否发现一个矿床,而应建立一个多维度的综合评价体系。首先,是信息获取能力,即该技术所能探测的最大深度、最小可识别异常体的规模、以及对特定地质目标(如某种蚀变矿物、某种物性界面)的敏感度和特异性。其次,是异常识别精度,指该技术所圈定的异常位置、范围和强度与真实地质体的吻合程度,以及其抗干扰能力和信噪比。再次,是模型构建可靠性,即该技术所提供的数据对构建准确三维地质模型的贡献度,能否有效约束模型的不确定性。最后,也是最根本的,是找矿预测成功率,即在应用该技术(或技术组合)后,经工程验证的见矿率和发现大型矿床的概率是否得到显著提升。这个框架强调,有效性是一个相对的、情境依赖的概念,必须结合具体的地质背景和勘查目标来评判。

3.2 “空-天-地-井”一体化协同勘查模式

面对复杂的勘查对象，没有任何一种单一技术是万能的。最有效的策略是构建一个“空-天-地-井”多层次、一体化的协同勘查体系。该体系遵循由区域到局部、由宏观到微观、由定性到定量的逻辑顺序。首先，利用卫星和航空遥感进行大区域扫面，快速识别构造格架、岩性单元和蚀变异常，圈定若干个一级找矿远景区。接着，在远景区内，部署高精度的地面地球物理（如重磁电）和地球化学剖面或网格测量，对遥感异常进行查证和深化，提取深部信息，进一步缩小靶区范围，形成二级找矿靶区。然后，针对最有希望的靶区，采用更高分辨率的地球物理方法（如高密度电法、激电测深、二维/三维地震）和深穿透地球化学方法进行精细勘查，精确刻画控矿构造和矿化中心的位置、产状和规模。最后，利用三维地质建模平台，将所有多源数据进行融合反演，构建高可信度的找矿预测模型，并据此设计最优化的钻探验证方案。在整个过程中，人工智能技术贯穿始终，用于数据的自动处理、特征提取、信息融合和智能预测，极大地提升了整个勘查流程的效率和科学性。

3.3 数据融合与不确定性管理

协同勘查的核心在于数据融合。然而，不同来源、不同尺度、不同精度的数据之间存在固有的不一致性。有效的数据融合不仅仅是简单的叠加，而是要基于地质先验知识，建立合理的物理或统计关联模型。例如，在联合反演中，可以将重力数据对密度的约束、磁法数据对磁化率的约束以及地震数据对速度结构的约束，共同施加于同一个地质模型上，求解一个能同时拟合所有观测数据的最优模型。此外，必须高度重视勘查全过程中的不确定性。无论是原始数据采集、处理解释，还是模型构建，都存在不同程度的不确定性。一个成熟的勘查

技术体系，应当包含完善的不确定性量化与传递机制。例如，可以利用蒙特卡洛模拟等方法，评估不同地质模型的可能性，并将这种不确定性直观地反映在最终的找矿预测图上，为决策者提供风险评估依据，避免因过度解读单一数据而造成的重大投资失误。

4 结语

地质矿产勘查正处在一个由新技术驱动的深刻变革时代。高光谱遥感、高精度地球物理、深穿透地球化学、三维建模与人工智能等前沿技术的涌现，为破解“攻深找盲”的世纪难题提供了强大的工具集。然而，技术的价值并非孤立存在，其有效性根植于对特定地质问题的针对性解决能力以及与其他技术的协同增效作用。本文提出的基于“空-天-地-井”一体化的协同勘查模式和多维度有效性评价框架，旨在为勘查工作者提供一个系统性的思维范式。未来的找矿突破，将越来越依赖于对成矿系统复杂性的深刻理解、对多源异构数据的智能融合能力以及对勘查全过程中不确定性的科学管理。唯有如此，才能在浩瀚的地质信息海洋中，精准地捕捉到那指向深埋宝藏的微弱而确定的信号，为国家资源安全和经济社会可持续发展提供坚实的物质保障。

参考文献

- [1]谢晓亮.矿产地质勘查新技术与方法的应用研究[J].中国金属通报,2025,(07):203-205.
- [2]刘晓龙.地质矿产勘查新方法与新技术的探索与实践[J].内蒙古科技与经济,2025,(12):149-151+156.
- [3]苏瀚.矿产资源地质勘查新思维及新技术研究[J].世界有色金属,2021,(11):92-93.
- [4]王海荣,霍燕.地质矿产勘查中的数字化与信息化技术应用研究[J].西部资源,2026,(02):102-104.