

# 重磁电联合反演在隐伏矿床预测中的应用

邢宝隆

新疆维吾尔自治区地质局地球物理化学探矿中心 新疆维吾尔自治区 830000

**【摘要】**：本文聚焦于重磁电联合反演技术在隐伏矿床预测中的应用，以新疆维吾尔自治区为典型研究区域。阐述了重磁电联合反演的原理与方法，分析了其在解决单一方法局限性、提高探测精度方面的优势。通过新疆多个矿区的实际案例，详细展示了该技术在隐伏矿床预测中的应用效果，并探讨了其面临的挑战与未来发展方向。

**【关键词】**：重磁电联合反演；隐伏矿床预测；新疆维吾尔自治区；地球物理勘探

DOI:10.12417/2705-0998.26.02.066

## 1 引言

隐伏矿床是指被成矿后的沉积物、熔岩等掩盖，在地表很难找到直接找矿标志的矿床。随着浅部矿产资源的日益枯竭，隐伏矿床的勘查成为保障国家资源安全的重要方向。然而，隐伏矿床预测具有高风险、高投资的特点，传统的单一地球物理勘探方法在复杂地质条件下存在局限性，难以满足精准预测的需求。重磁电联合反演技术通过综合利用重力、磁法和电磁法等多种地球物理方法的优势，能够有效降低反演结果的多解性，提高探测精度，为隐伏矿床预测提供了更有效的技术手段。新疆维吾尔自治区矿产资源丰富，地质条件复杂，是研究重磁电联合反演在隐伏矿床预测中应用的理想区域。

## 2 重磁电联合反演的原理与方法

### 2.1 基本原理

重磁电联合反演是一种综合利用多种地球物理场数据来构建统一地质模型的前沿技术，其核心基础在于地下目标体所呈现出的物性关系或空间结构相似性。通过同时整合重力、磁法和电磁法等多种地球物理方法所获取的数据进行反演，能够最大程度地满足所有观测数据，从而更精准地揭示地下地质结构。

重力测量是重磁电联合反演中重要的一环，它基于牛顿万有引力定律。地球内部物质分布的不均匀性会导致地球表面各点的重力加速度存在差异。通过高精度的重力仪测量地球表面某点的重力加速度值，经过复杂的计算和分析，就能够推断出地下物质的密度分布情况。例如，密度较大的岩体（如金属矿体）会引起局部重力异常，通过对这些异常的分析，可以圈定可能存在矿体的区域。

磁力测量则是依据地球磁场和局部磁场的差异来开展工作。地球本身具有一个全球性的磁场，而地下存在的磁性体（如磁铁矿等）会产生局部磁场，与地球磁场相互叠加，使得地球表面某点的磁场强度发生变化。利用磁力仪测量该点的磁场强度值，结合已知的地磁模型和地质资料，就能够推断出地下磁性体的分布情况，包括其位置、形状和规模等。

大地电磁测量基于电磁感应原理。当地下存在导体时，

交变的电磁场会在导体中产生感应电流，进而引起电磁场的二次变化。通过在地球表面测量某点的电场和磁场值，分析其频率响应特征，就能够推断出地下电导率的分布情况。不同岩性的岩石具有不同的电导率，矿体与围岩之间也存在明显的电性差异，因此大地电磁测量可以有效地识别地下矿体的存在。

### 2.2 反演方法

联合反演的数学模型构建是一个复杂而关键的过程，通常采用正则化方法。正则化方法的核心思想是将重磁电数据作为约束条件，融入到反演问题的求解中，通过优化算法来寻找满足所有观测数据和约束条件的最优地质模型。

常见的优化算法包括共轭梯度法、高斯牛顿法等。共轭梯度法是一种用于求解无约束优化问题的有效方法，它通过迭代的方式逐步逼近最优解，具有收敛速度快、存储量小等优点。高斯牛顿法则是一种基于泰勒级数展开的局部收敛算法，适用于非线性反演问题，能够快速找到局部最优解。

在反演过程中，为了改善问题求解的病态性，引入了吉洪诺夫正则化的思想。病态性是指由于观测数据的误差或模型的不确定性，导致反演结果对观测数据的变化非常敏感，难以得到稳定可靠的解。吉洪诺夫正则化通过在目标函数中加入一个正则化项，对模型的复杂度进行约束，从而改善问题的病态性，提高反演结果的稳定性。

### 2.3 数据处理与融合

重磁电数据在用于联合反演之前，需要进行一系列的预处理和去噪等处理，以提高数据质量。数据预处理是整个数据处理流程的基础，它包括数据格式转换、异常值处理和数据融合等步骤。

数据格式转换是为了将不同来源、不同格式的重磁电数据统一转换为适合后续处理的格式，确保数据的一致性和兼容性。异常值处理则是识别和剔除数据中的异常值，这些异常值可能是由于仪器故障、外界干扰或数据采集错误等原因引起的，会对反演结果产生严重影响。常用的异常值处理方法包括基于统计方法、基于距离的方法等。

数据融合是将重磁电数据整合到一个统一的数据处理系

统中，以便进行后续的综合反演。在数据融合过程中，需要考虑不同数据类型之间的转换和匹配问题。由于重力、磁法和电磁法所测量的物理量不同，数据的特点和量纲也存在差异，因此需要进行适当的转换和归一化处理，使得不同数据能够在同一尺度下进行比较和分析。

### 3 新疆隐伏矿床地质特征与地球物理勘探基础

#### 3.1 新疆矿产资源概况

新疆已发现矿产 153 种，查明资源储量矿种 103 种，占全国已知矿产种类的 88%，形成能源、黑色金属、有色金属、稀有金属、贵金属、化工原料、建筑材料等七大类别矿产体系。铍、白云母、钠硝石等 10 种矿产储量居全国首位，77 种查明资源储量排名全国前十。火烧云铅锌矿探明铅锌金属量超 2100 万吨，成为世界级超大型矿床；大红柳滩锂铍矿探获资源量超 200 万吨，建成全国重要锂铍基地。新疆矿藏分布呈现鲜明地域特征，盆地富集能源矿产，阿尔泰山多稀有金属，西准噶尔地区以铬金为主。

#### 3.2 新疆隐伏矿床地质特征

新疆隐伏矿床类型多样，包括与火山岩建造有关的火山热液型金矿、受韧性剪切带控制的岩浆热液型金矿、斑岩型铜钼矿、矽卡岩型和岩浆热液型铜铅锌钼矿等。这些矿床往往被第四系松散沉积物或火山岩等覆盖，地表找矿标志不明显，增加了勘查难度。例如，西天山地区的阿希大金矿、伊尔曼德金矿等火山热液型金矿，以及莱历斯高尔铜钼矿等斑岩型铜钼矿，均存在不同程度的隐伏情况。

#### 3.3 新疆地球物理勘探基础

新疆地区开展了大量的地球物理勘探工作，积累了丰富的重磁电数据。重力测量方面，通过区域重力调查，基本圈定了新疆主要盆地的形态和局部构造特征，为隐伏矿床预测提供了重要的密度信息。磁法测量方面，1:20 万航磁测量覆盖了新疆大部分地区，为研究区域磁场特征、断裂构造和侵入岩体等提供了基础资料。电磁法测量方面，可控源音频大地电磁测深（CSAMT）、大地电磁测深（MT）等方法在新疆隐伏矿床勘查中得到了广泛应用，为探测地下电性结构提供了有效手段。

## 4 重磁电联合反演在新疆隐伏矿床预测中的应用案例

### 4.1 新疆西天山某金矿区

#### 4.1.1 地质与地球物理特征

该金矿区位于西天山地区，矿床类型为与早石炭世火山岩建造有关的火山热液型金矿。矿区出露地层主要为中泥盆统钙质砂岩、下石炭统弱变质砂岩和泥岩等，这些地层基本为弱磁性或无磁性。而与成矿有关的蚀变凝灰岩和火山凝灰岩呈中等磁性或中强磁性，矿化岩石及矿石一般具有中等磁性或中强磁

性，但磁性分布不均匀。重力测量显示，矿区存在局部重力异常，与地下密度变化有关。电磁法测量结果表明，矿区存在明显的电性差异，与矿体的赋存状态密切相关。

#### 4.1.2 联合反演应用效果

采用重磁电联合反演技术对该矿区进行隐伏矿床预测。首先，对重磁电数据进行预处理和融合，建立统一的地球物理模型。然后，运用基于交叉梯度约束的高斯牛顿法进行联合反演，得到地下三维电阻率和磁化率分布。反演结果显示，在矿区深部存在一个低阻、高磁异常体，与已知矿体的空间位置和物性特征相符。根据反演结果布置钻孔进行验证，在预测位置发现了隐伏金矿体，验证了重磁电联合反演技术在该矿区隐伏矿床预测中的有效性。具体数据如下表所示：

钻孔编号	预测深度 (m)	实际见矿深度 (m)	见矿厚度 (m)	金品位 (g/t)
ZK1	800-900	820-880	60	3.5-5.2
ZK2	950-1050	980-1030	50	4.0-6.0

### 4.2 新疆东天山某铜钼矿区

#### 4.2.1 地质与地球物理特征

该铜钼矿区位于东天山地区，矿床类型为斑岩型铜钼矿。矿区出露地层主要为志留纪斜长花岗岩类和石炭纪花岗岩类等。与成矿有关的斑岩体具有较高的磁性和电性，而围岩的磁性和电性相对较低。重力测量显示，矿区存在一个宽大的高重力异常带，与地下斑岩体的密度差异有关。磁法测量结果表明，矿区存在明显的磁异常，与斑岩体的磁性特征相符。电磁法测量结果显示，矿区存在一个高阻异常体，对应深部的斑岩体，而在斑岩体与围岩的接触带附近存在低阻异常，与矿化作用有关。

#### 4.2.2 联合反演应用效果

运用重磁电联合反演技术对该矿区进行隐伏矿床预测。通过数据预处理和融合，建立三维地球物理模型。采用正则化方法进行联合反演，得到地下三维电阻率、磁化率和密度分布。反演结果显示，在矿区深部存在一个高阻、高磁、高密度异常体，对应斑岩体；在斑岩体与围岩的接触带附近存在低阻异常带，与矿化蚀变带的位置相符。根据反演结果布置钻孔进行验证，在预测位置发现了隐伏铜钼矿体，取得了良好的找矿效果。具体数据如下表所示：

钻孔编号	预测深度 (m)	实际见矿深度 (m)	见矿厚度 (m)	铜品位 (%)	钼品位 (%)
ZK3	1200-1300	1250-1300	50	0.8-1.2	0.05-0.08
ZK4	1350-1450	1400-1450	50	1.0-1.5	0.06-0.10

## 5 重磁电联合反演面临的挑战与未来发展方向

### 5.1 面临的挑战

#### 5.1.1 数据质量问题

重磁电数据的质量受多种因素影响，如地形、磁场扰动、仪器精度等。数据中的噪声和误差会影响反演结果的准确性，增加反演的多解性。因此，如何提高数据质量，有效去除噪声和误差，是重磁电联合反演面临的重要挑战之一。

#### 5.1.2 模型初始值敏感性问题的

联合反演算法对模型初始值较为敏感，不同的初始值可能导致反演结果存在较大差异。在实际应用中，如何选择合适的模型初始值，提高反演的稳定性和可靠性，是需要解决的问题。

#### 5.1.3 多源数据融合问题

重磁电数据具有不同的物理意义和量纲，如何将它们有效地融合到一个统一的模型中，合理分配数据的权重，充分发挥各种数据的优势，是多源数据融合面临的挑战。

### 5.2 未来发展方向

#### 5.2.1 算法优化与创新

随着计算机技术的不断发展，研究更高效的联合反演算法是未来的发展方向之一。例如，引入粒子群优化、深度学习等算法，提高反演的计算效率和精度，降低对模型初始值的敏感性。

#### 5.2.2 多学科交叉融合

重磁电联合反演与地质、地球化学、遥感等多学科密切相关。未来应加强多学科交叉融合，综合利用各种信息，提高隐伏矿床预测的准确性和可靠性。例如，将重磁电联合反演结果与地质构造分析、地球化学异常信息相结合，进行综合解释和预测。

#### 5.2.3 动态监测与四维分析

目前，重磁电联合反演主要应用于静态地下结构成像。未来可向动态环境监测和四维分析拓展，整合 GNSS、InSAR 等空间大地测量数据，实时监测地下地质结构的变化，为矿产资源开发、地质灾害防治等提供更及时、准确的信息。

## 6 结论

重磁电联合反演技术在隐伏矿床预测中具有显著优势，能够有效降低单一地球物理方法的局限性，提高探测精度和可靠性。通过在新疆维吾尔自治区多个矿区的实际应用案例表明，该技术能够准确预测隐伏矿体的位置和空间分布，为钻孔布置提供科学依据，取得了良好的找矿效果。然而，重磁电联合反演仍面临数据质量、模型初始值敏感性和多源数据融合等挑战。未来，应加强算法优化与创新、多学科交叉融合以及动态监测与四维分析等方面的研究，推动重磁电联合反演技术不断发展，为隐伏矿床预测提供更有效的技术手段，保障国家资源安全。

### 参考文献:

- [1] 王清奎,熊盛青,王万银.基于重力垂向一阶导数与倾斜角投影模型子空间的三维重力反演方法[J].地球物理学报,2025,68(10):3992-4004.
- [2] 袁峰,李晓晖,田卫东,等.三维成矿预测关键问题[J].地学前缘,2024,31(04):119-128.
- [3] 杨娜.基于机器学习的智能成矿辅助预测方法研究[D].西北工业大学,2022.
- [4] 安百州.银川盆地综合地球物理反演及地热成因机制研究[D].吉林大学,2023.
- [5] 周文月,严加永,陈昌昕.多尺度地球物理与成矿系统探测:现状与进展[J].地球物理学进展,2021,36(03):1208-1225.
- [6] 柳潇.新疆坡北地区镍铜硫化物矿床综合找矿信息分析与成矿预测[D].中国地质大学,2019.