

Research on the Three-dimensional Architecture of Gold Mineralization System and the Geological-Geophysical Coupling Model of Deep Prospecting

Jingxin Ge Xiaoguang Xu

Hebei Jiuhua Surveying and Mapping Co., Ltd., Baoding, Hebei, 071000, China

Abstract

With the increasing depletion of shallow gold resources, deep mineral exploration has become a key direction in gold exploration research. In order to improve the scientificity and accuracy of deep mineral exploration, guided by the metallogenic system theory, combined with the geological characteristics, metallogenic evolution laws and geophysical response characteristics of typical gold deposits, this paper constructs a three-dimensional structural model of the gold mineralization system, and introduces the geological-geophysical coupling analysis method to propose a comprehensive model suitable for the prediction of deep gold deposits. The research results show that the multi-scale distribution structure of the gold mineralization system in space determines the occurrence location of the ore body, while the coupling effect between different geological units and their geophysical response signals provide identifiable target bodies and key parameters for deep mineral exploration. Through application verification in a typical gold mining area, this model has effectively improved the positioning accuracy and prediction efficiency of deep mineral exploration. This paper not only provides a theoretical basis and technical path for the exploration of deep gold mines, but also offers methodological references for the three-dimensional prediction of other types of mineral resources.

Keywords

gold mine; Mineralization system; 3D architecture; Deep mineral exploration; Geological geophysical coupling; Mineral Prediction

金矿成矿系统三维架构与深部找矿地质—地球物理耦合模型研究

葛景新 许小光

河北九华勘查测绘有限责任公司, 中国·河北保定 071000

摘 要

随着浅部金矿资源的日益枯竭,深部找矿已成为金矿勘查研究的重点方向。为了提高深部找矿的科学性和精准性,本文以成矿系统理论为指导,结合典型金矿床的地质特征、成矿演化规律及地球物理响应特征,构建了金矿成矿系统的三维结构模型,并引入地质—地球物理耦合分析方法,提出一种适用于深部金矿预测的综合模型。研究结果表明,金矿成矿系统在空间上的多尺度分布结构决定了矿体的赋存位置,而不同地质单元之间的耦合作用及其地球物理响应信号,为深部找矿提供了可识别的目标体和关键参数。通过在某典型金矿区的应用验证,该模型有效提升了深部找矿的定位精度和预测效率。本文不仅为深部金矿找矿提供理论基础与技术路径,也为其他类型矿产资源的立体预测提供方法借鉴。

关键词

金矿; 成矿系统; 三维架构; 深部找矿; 地质—地球物理耦合; 矿产预测

1 引言

我国金矿资源勘查已由浅部转向深部,深部找矿面临构造复杂、信息遮蔽等问题。传统的找矿方法多依赖于地表地质信息与经验类比,在深部条件下适用性显著下降。因此,急需构建科学系统的找矿理论与技术体系,整合多源信息,实现对隐伏金矿的有效预测。成矿系统理论强调矿床与其地

质背景的动态演化关系,具备较强的解释力和预测力。而地球物理技术可在地下空间探测构造、岩性与异常体,是实现深部信息突破的重要手段。本文尝试将二者有机融合,探讨金矿成矿系统三维结构特征,建立地质—地球物理耦合模型,从而提升深部找矿的科学性与精度。通过典型实例分析,验证模型的适用性与有效性,为深部金矿勘查提供理论支持与实践路径。

【作者简介】葛景新(1985—),男,中国河北保定人,本科,工程师,从事地质勘查类研究。

2 金矿成矿系统的理论基础与空间特征

2.1 成矿系统理论的发展与内涵

成矿系统理论是在对矿床成因机制深入研究的基础上发展而来的,其核心理念是将矿产资源的形成过程置于多尺度、动态演化的地质背景中进行整体性认知。与传统静态矿床模型侧重矿体空间分布和局部特征不同,成矿系统理论更强调成矿过程的动态耦合特征,注重成矿环境、物质来源、流体运移通道以及沉淀—富集机制等多因素之间的时空演化关系与相互制约。在金矿的形成过程中,构造活动控制着热液流体的流动路径与压力环境,围岩性质影响着金的沉淀方式与富集程度,热液来源及其物质组成决定了金的供给强度与沉淀机制,而构造与热液的耦合作用往往形成有利的成矿部位。这些因素共同构成一个动态、开放的系统,推动金的多阶段富集。成矿系统理论的发展标志着找矿理念的重大转变,即从以往以矿体为核心的“点状找矿”,逐步过渡为以成矿过程和地质系统为核心的“系统找矿”。这一转变促使地质工作者不仅关注矿体本身的空间形态和品位特征,更要研究其成矿背景、演化过程及控制因素,从而提升找矿预测的科学性与精准度。

2.2 金矿成矿系统的多尺度空间结构

金矿成矿系统具有显著的多尺度空间结构特征,其成矿单元通常可分为成矿带、成矿区、矿田、矿床与矿体等多个层次,每一层级在空间分布与成矿控制上均具有独特作用与表现。在宏观尺度上,区域性的大地构造格局(如活动带、造山带、板块边界)决定了成矿带的总体展布方向和构造环境,是成矿系统形成的地质背景。在中观尺度上,深大断裂构造及其派生的次级断裂系统,控制着成矿热液的运移路径和富集区位,是金元素迁移和沉淀的重要通道;而在微观尺度上,矿体的形成往往受控于局部裂隙系统的形态、密度与围岩的物理化学性质,如碳酸盐化、硅化、蚀变等反应界面,往往成为金的沉淀富集部位。通过对典型金矿区的剖析可以发现,金矿体多呈线状、带状或透镜状展布,集中产于断裂构造带附近,且常与特定岩性接触带、构造交汇部位、脆性—韧性转换带等有关。构建金矿成矿系统的三维结构模型,必须综合考虑各尺度要素的空间组合、演化时序与相互作用关系,从而真实反映金矿成因与分布规律,为精准找矿与资源评价提供科学依据。

2.3 深部金矿的形成机制与空间演化

深部金矿的形成通常发生在高压、高温和强构造活动的地质背景下,其成矿过程具有显著的阶段性、脉动性与突变性特征。热液成矿流体多来源于地壳深部或地幔的脱气过程,携带大量金等成矿元素,通过区域性深断裂系统作为运移通道,在上升过程中不断与围岩发生热化学反应。当热液迁移至构造交汇带、岩性突变带或力学弱面等有利部位时,因温压变化或化学反应,促使金在特定部位沉淀富集,形成矿体。深部金矿多赋存于隐伏构造带或深层次剪切带中,

与地表地质特征之间的对应关系较弱,常常缺乏直观的找矿标志,显著提高了勘查工作的复杂性与不确定性。然而,其成矿过程依然遵循成矿系统的演化规律和空间控制逻辑,因此,通过构建成矿系统的三维结构模型,结合重力、磁法、电法及地震等地球物理反演参数,可实现对深部潜在金矿目标区的有效预测。深入分析深部金矿的成矿机制和流体—构造—岩性之间的耦合关系,是建立科学合理的三维成矿模型、提升深部找矿效率的关键基础。

3 地质—地球物理耦合建模原理与方法

3.1 地质建模:数据整合与结构建构

地质建模是三维成矿系统重建的重要基础,旨在通过整合区域地质图件、钻探数据、矿体模型、岩性划分与构造信息,建立一个符合实际地质条件的三维结构框架。建模过程不仅需要保证数据的几何精度,还要求构造关系与成因逻辑的统一,以便精确模拟矿体的空间分布与形成演化过程。实际操作中,通常采用三维可视化软件(如GOCAD、Leapfrog等),将钻孔数据、地表观测结果与地质图件进行空间配准,并结合成矿区域的构造特征,建立断面、岩体界面及矿体的三维模型。在此基础上,可以进一步构建出矿区的三维结构框架,准确反映不同地质单元的叠置、切割与演化关系,为后续的地球物理数据融入与解释提供了必要的空间基础。通过这一过程,地质模型不仅能够揭示矿体的空间分布与构造特征,还为勘探与矿体预测提供了动态的、立体的框架支持。该框架的准确性和合理性直接影响到成矿过程的理解与找矿工作的效率,成为实施深部勘探与资源评估的核心工具。

3.2 地球物理反演与耦合分析技术

地球物理方法在深部找矿中具有至关重要的作用,特别是重磁法、电法和地震方法,它们能够深入揭示地下结构、物性变化以及异常体的空间分布。这些方法通过测量地下物质的物理属性,如密度、电导率、地震波速等,帮助识别潜在的矿体位置和成矿有利区域。然而,为了使地球物理数据与地质模型有效融合,必须进行物性参数的反演与空间配准。反演过程通常采用联合反演、协同反演或地质约束反演等技术手段,确保地球物理异常体与地质结构的空间一致性。联合反演能够同时利用多种物理属性数据,如重力、磁力、电性等,协同约束地下模型;而地质约束反演则依赖于已有的地质信息来限制反演结果,确保更加符合实际地质情况。

此外,随着数据处理技术的进步,统计学习或机器学习方法被引入到地球物理数据分析中,这些方法能够从多源数据中提取与成矿过程密切相关的特征因子,实现更加精细的耦合分析。这不仅提高了数据的利用效率,还使得地质—地球物理耦合模型能够从二维空间向三维空间扩展,从定性分析转向定量预测。这一过程的最终目标是通过高精度的

模型为矿产资源的精准勘探与成矿预测提供强有力的技术支持。

4 金矿典型成矿系统三维建模实例分析

4.1 区域地质背景与成矿条件分析

以某典型金矿区为研究对象,该区位于华北克拉通东缘,地质背景以太古宙变质岩系为主,广泛发育多期构造活动。区域构造特征以NNE向断裂为主控,形成了多个成矿带,这些断裂为金矿的形成提供了重要的构造通道。随着构造活动的进行,岩浆活动频繁,尤其是在深部热源的作用下,为金的富集提供了热液流体,这些热液流体在迁移过程中带来了金等成矿元素。在围岩中,主要蚀变类型为硅化和碳酸盐化,空间分布呈带状,与金矿体的赋存密切相关。通过综合分析该区域的成矿地质条件,发现该区具有典型的构造、岩性与热液流体三位一体的成矿系统特征,为开展金矿区的三维建模与深部矿体预测提供了理想的基础条件。该研究区为深入探讨金矿成矿机制、优化找矿策略以及进行深部资源评估提供了宝贵的地质依据。

4.2 三维地质模型构建过程

在数据准备阶段,收集整理钻孔资料、地质图件、物探成果及矿体模型,统一坐标系统与投影方式。建模采用GOCAD软件,通过布尔运算构建断裂面,结合岩性剖面进行分层建模,再叠加已知矿体位置,形成完整的三维地质框架。该模型直观展现了断裂带与矿体的空间关系,揭示了矿体主要赋存于断裂带侧翼与构造交汇区之间,为后续地球物理数据的解释提供空间支撑。

4.3 地球物理响应特征与耦合分析结果

结合重磁与激电资料,对三维地质模型中的重点区域进行物性反演,识别异常体。结果显示,金矿体区存在明显低阻高极化异常,与已知矿体空间吻合。同时,重力异常显示出深部断裂带的分布特征,与模型中的构造边界基本对应。通过地质—地球物理耦合分析,成功圈定多个潜在矿化区,部分已在后续钻探中得到验证,证明模型的有效性与指导价值。

5 模型适用性分析与找矿指示性参数提取

5.1 耦合模型在不同金矿类型中的适用性

金矿类型多样,包括岩浆热液型、变质热液型、构造

蚀变岩型等,不同类型的成矿控制因素存在差异。但从成矿系统角度看,均可归纳为构造主控+热液富集的组合模式。因此,三维耦合模型的适用性较强,关键在于识别主要成矿因素与空间组合关系。实践表明,通过调整参数权重与模型因子配置,模型可广泛适用于不同地质背景下的金矿预测。

5.2 找矿指示性参数的筛选与识别

在模型构建中,需筛选出与金矿成矿显著相关的指示性参数,包括地球物理异常类型(如高极化、低阻、密度差异)、构造交汇点密度、岩性接触带分布等。通过主成分分析与多因子耦合方法,可量化各因子对矿体形成的贡献度,为深部找矿提供精细化预测依据。同时,建立矿化概率分布图与三维空间叠加图层,实现可视化找矿分析,提高决策效率与准确性。

6 结语

随着勘查工作由浅至深推进,传统二维找矿方法已难以满足深部金矿预测的复杂需求。本文在成矿系统理论指导下,构建金矿成矿系统的三维结构模型,并融合地质与地球物理信息,提出耦合建模方法,有效揭示了矿体与地质背景之间的空间关系与响应机制。通过典型实例的验证,该方法在提高深部找矿定位精度与效率方面展现出显著优势,为今后的金矿勘查提供了新的思路与工具。未来工作可在此基础上,进一步引入地球化学、遥感等数据,构建多源信息融合平台,实现对隐伏矿体更为智能的识别与预测。本文研究不仅适用于金矿,也具备推广至其他金属矿产的潜力,具有重要的理论意义与实践价值。

参考文献

- [1] 陈国雄,张越鹏,罗磊,等.数据驱动斑岩型矿床时空预测模型[J/OL].地学前缘,1-18[2025-03-21].<https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2025.2.5>.
- [2] 翟明国.大陆成矿学的研究前沿与关键科学问题[J].矿床地质,2025,44(01):1-22.
- [3] 刘向东,丁正江,邱昆峰,等.胶东台上一水旺庄巨型金矿床矿体空间分布规律及深部找矿预测[J/OL].地学前缘,1-19[2025-03-21].<https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2024.12.52>.
- [4] 郭冬,丁文祥,兰学毅,等.基于重磁电震综合解释的三维地质建模——以南陵—宣城矿集区为例[J].中国地质调查,2024,11(05):139-152.