

From surface mineralization to deep concealed ore bodies: Integration of Holographic Anatomy and Exploration technologies for gold Mineralization systems

Xiaoguang Xu Jingxin Ge

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

Abstract

Under the current trend that global gold resource exploration is gradually advancing from shallow to deep, how to scientifically understand the full-spatial evolution structure of gold mineralization systems and construct a systematic anatomical path from surface mineralization phenomena to deep concealed ore bodies has become an important issue in the field of geological prospecting. Based on a systematic summary of the metallogenic characteristics of typical gold deposits, this paper introduces the concept of "holographic anatomy of metallogenic systems", integrates multi-dimensional elements such as tectonic evolution, hydrothermal activities, lithological assemblage, and metallogenic stage division, and constructs a three-dimensional spatial model of metallogenic systems. Meanwhile, by comprehensively applying various technologies such as remote sensing extraction, geophysical measurement, geochemical analysis, and three-dimensional geological modeling, a technical integration system is formed to realize the inversion of the predicted path of deep concealed ore bodies from surface information. The research results have been applied in multiple typical ore concentration areas, verifying the practicability and forward-looking nature of this method, which is of great guiding significance for improving the efficiency and scientificity of deep exploration in gold mines.

Keywords

gold mine; Mineralization system; Surface deep anatomy; Mineral prediction; Comprehensive exploration technology

从地表矿化到深部隐伏矿体：金矿成矿系统全息解剖与勘查技术集成

许小光 葛景新

河北九华勘查测绘有限责任公司，中国·河北保定 071000

摘要

在当前全球金资源勘查由浅部向深部逐步推进的趋势下，如何科学认知金矿成矿系统的全空间演化结构，构建从地表矿化现象到深部隐伏矿体的系统解剖路径，成为地质找矿领域的重要课题。本文在系统总结典型金矿床成矿特征的基础上，引入“成矿系统全息解剖”理念，融合构造演化、热液活动、岩性组合、成矿阶段划分等多维要素，构建三维成矿系统空间模式。同时，综合运用遥感提取、地球物理测量、地球化学分析、三维地质建模等多种技术，形成技术集成体系，实现从地表信息反演深部隐伏矿体的预测路径。研究成果在多个典型矿集区应用，验证了该方法的实用性和前瞻性，对提升金矿深部勘查的效率与科学性具有重要指导意义。

关键词

金矿；成矿系统；地表—深部解剖；找矿预测；综合勘查技术

1 引言

金矿作为战略性金属资源，其分布多具有阶段性与隐伏性特征，传统以地表地质现象为主的找矿方式已难以适应当前深部找矿需求。在地质体演化具有连续性与层级结构的背景下，地表的矿化现象往往是深部成矿系统的一种外在表达。因此，如何从已知地表矿化出发，透视成矿系统的空间

演变、探明控制因素、精准预测深部矿体位置，是推动找矿技术与理论进步的关键命题。近年来，随着地学理论的深化与技术手段的进步，构建多维、多尺度、多参数融合的金矿成矿系统全息解剖模型，成为地质勘查的重要发展方向。本文以成矿系统的空间结构为主线，系统剖析从地表至深部的成矿模式演化规律，结合新兴地学技术手段，构建金矿找矿技术集成体系，为我国金矿资源的深部勘查提供理论支撑与技术参考。

【作者简介】许小光（1980-），男，中国河北雄安人，本科，工程师，从事地质勘查类研究。

2 金矿成矿系统的成因特征与结构框架

2.1 金矿成矿系统的形成机制与演化驱动

金矿的成因通常与区域构造背景密切相关，其形成过程涉及多个关键要素，包括深部热源、成矿流体、运移通道和沉淀环境。热流活动为成矿提供了能量支持，构造运动则为成矿流体的运移提供了通道。这些热液流体在上升过程中携带成矿元素，通过与围岩的相互作用，形成矿物沉淀的“场”。适宜的岩性组合和物化条件在成矿过程中扮演着至关重要的角色，它们提供了成矿反应的稳定环境，从而促成金矿的富集与沉积。

在金矿成矿系统的演化过程中，成矿过程并非静态，而是受到多期次构造活动和地应力调整的控制，成矿系统随着时间推移不断发生变化，逐步演化出叠加型、多阶段、多源复合的成矿样式。例如，变质作用和后期热液活动的多次叠加，尤其是在不同构造作用下的热液流体交替作用，是金矿赋存和富集的关键过程。这些变质作用、热液充填和金的富集往往发生在多个阶段，形成复杂的矿体结构。

通过深入解析金矿成矿系统的演化轨迹，研究者可以更好地理解金矿床的空间分布与成矿规律，为深部矿体的找矿和预测提供更加精准的理论依据，从而指导实际勘探工作，提高矿产资源的开发效率。

2.2 成矿单元的空间层级与结构分化

金矿成矿系统通常可以划分为多个成矿单元，这些单元包括区域成矿带、成矿区、矿田、矿床和矿体等不同空间层次。每一层级之间存在着控制与被控的关系，呈现出从大尺度控制到小尺度聚集的结构特征。例如，区域性的大规模断裂构造和岩浆活动通常是成矿带的主控因素，它们为金矿成矿提供了热源和流体运移的通道。在这些区域成矿带内部，次级断裂、接触带和蚀变带等细分构造特征则更加精细地控制着矿床和矿体的分布，决定了金矿的富集与沉积位置。

从纵向结构角度看，金矿体常呈现韧性剪切带型、破碎带型或层控型等不同的成矿形式，并且具有明显的带状或透镜状展布特征。这些特征反映了成矿过程中的构造背景和矿物沉淀规律。矿体在纵深方向上的分布不仅与构造运动和岩浆活动密切相关，还与局部岩性变化、热液流体的分布以及物理化学条件的变化密切相互作用。

从三维空间视角来看，矿体与围岩之间通常存在显著的物性差异和成分差异，这些差异往往构成了未来深部找矿的突破口。通过对这些物性与化学界面的研究，地质学者可以更加精确地确定潜在的金矿体位置，从而提高深部矿体的预测精度，推动金矿勘探和资源评估的有效性。

2.3 矿化指征在地表与深部的空间映射关系

金矿床的地表矿化现象，包括蚀变带分布、围岩蚀变、次生晕异常、碎屑物金含量等，实际上是深部成矿系统作用向地表的响应表现。随着成矿流体的上升与运移，金和其他

成矿元素在地表的矿化现象成为深部成矿过程的外在标志。这些矿化现象的空间分布往往呈现出明显的方向性和规律性，通常受到构造、岩性以及流体运移路径的共同影响。矿化指征的这种规律性和方向性可以通过遥感、物探、化探等技术手段进行精细刻画和定量分析。遥感影像可用于识别蚀变带及次生矿化的区域，物探技术帮助揭示地下异常体的深度和范围，化探则通过土壤或水样分析进一步确认成矿元素的空间分布。

通过建立矿化指征与深部矿体之间的映射模型，能够实现从“地表迹象”反演“地下实质”的过程。这种映射关系的确立为深部矿体的预测提供了重要依据。在实践中，基于这一映射关系的空间建模，可以通过地表的矿化指征进行区域性找矿目标的优选，进而推测深部矿体的潜在位置。该技术路径通过整合各类地质勘探数据，逐步提高金矿深部预测的精确性，是金矿找矿领域的重要创新方法，为深部资源勘探提供了强有力的技术支撑。

3 金矿典型矿集区的系统解剖与模式归纳

3.1 华北克拉通金矿成矿系统剖析

华北克拉通是我国重要的金矿产出区，金矿资源主要以破碎带型和变质岩型为主。这一区域的地质构造演化经历了多期的碰撞与裂解，形成了韧性剪切带和岩浆侵入体，成为金矿成矿系统的主要构造基础。由于该区域构造活动强烈，断裂带的发育为成矿提供了重要的流体通道和矿体富集的良好条件。在某典型金矿集区，成矿热液活动呈现出多期叠加的特征，金矿主要分布在断裂带次生构造与剪切滑动面之间，成矿期主要集中在燕山期。在该区的成矿系统中，矿体的空间构造呈现“上宽下窄”的漏斗状形态，表明金矿物在成矿过程中沿着特定的构造带向下迁移和富集。浅部蚀变带发育，表明热液流体曾在浅层作用强烈，而深部岩浆供能较为稳定，为深部隐伏矿体的存在提供了有利的空间与物质条件。

通过三维建模与物探验证的结合，模型所指示的深部异常区的找矿成果显著，成功发现了新的金矿体。这一过程充分展示了通过地质构造特征与成矿系统的深度理解，结合现代勘探技术，如三维建模与物探技术，可以有效提升金矿深部找矿的成功率和精确度，为金矿资源的勘探提供了重要的理论指导与技术支持。

3.2 滇黔桂交界区金矿系统解剖实践

该区域位于扬子地块与华南褶皱系的交界处，地质构造复杂，岩性种类多样，成矿类型丰富，是我国多金属矿产资源聚集的重要区域。金矿床的分布特征主要呈现为岩体边缘蚀变带控制型，矿化与围岩之间存在明显的接触蚀变界限，这种特征为金矿的勘探提供了重要的指示。在典型矿田中，矿体沿构造裂隙延伸，金矿体已经探明可达地下400米以上，表明该金矿成矿系统具备较好的纵向延伸性与深部成

矿潜力。区域内构造的复杂性和岩性多样性为金矿的富集提供了有利的地质条件。

通过地球化学剖面与地震剖面的叠合分析,研究团队成功构建了金矿成矿系统的全空间框架图,直观反映了不同成矿阶段的叠加分布规律。这一框架图不仅揭示了金矿体与构造、岩性之间的关系,还帮助识别了多个潜在的深部矿化远景区。这些远景区的存在已通过钻探得到了证实,为金矿勘探提供了新的方向和目标区域。该研究成果为进一步的金矿资源勘探提供了坚实的理论依据,并推动了深部矿体的精准预测与开发。

4 金矿勘查技术集成体系构建与应用

4.1 多源数据融合下的综合信息提取

金矿深部找矿面临着较高的难度与成本,单一的技术手段往往无法提供足够的精准预测。因此,结合多源数据融合手段成为提高深部金矿勘探效率和准确性的关键。通过整合遥感、地球物理、地球化学等多种数据类型,可以构建一个系统化的信息库,从而更好地揭示深部矿体的潜在分布。遥感技术能够在在大尺度上识别线性构造、蚀变带以及地表异常,这些特征通常指示着地下的构造和矿化趋势。地球物理数据,如激电、电阻率、重磁异常等,可以揭示地下的结构特征和潜在异常体的分布,而这些异常往往与金矿体的形成密切相关。地球化学数据则提供了成矿元素在空间上的分布与垂直变化趋势,帮助识别矿体的富集区域。

基于这些多源数据,利用主成分分析、判别分析等统计方法,以及机器学习建模技术,可以有效提取出与金矿成矿相关的预测因子,并实现不同数据源之间的有效融合。

4.2 三维地质建模与深部预测应用

借助三维建模软件(如 Leapfrog、Surpac 等),将地质剖面、钻孔数据与物探结果进行空间集成,构建成矿系统的三维结构模型。建模过程中,构造面、岩性界线与矿体位置需保持地质一致性,确保模型具备地质合理性与预测指导性。在具体预测过程中,通过叠合矿化指标图、异常体空间图与构造系统图,识别深部潜在富集区。以实际矿区为例,通过模型叠加分析,圈定深部潜在金矿体五处,后续钻探验证中发现三处存在明显矿化,证实模型的有效性。

4.3 集成模型在找矿实践中的应用成效

该集成技术体系已在多个典型金矿区试验应用,并取得显著成果。在某深部找矿项目中,通过构建地表—深部一体化成矿系统图谱,并结合物探数据反演,成功预测两个隐伏矿体,平均品位达到 4.6g/t,钻探验证准确率达 85% 以上。实践表明,通过建立金矿成矿系统的全息结构模型,并集成

多源勘查技术手段,不仅提升了找矿效率,也有效降低了预测误差与风险。

5 关键问题讨论与技术发展趋势

5.1 金矿深部成矿机制的复杂性认知

深部金矿成矿涉及高温高压环境下的岩浆-热液相互作用,其流体动力学过程远较浅部复杂。目前对深部热液体系的理解仍相对粗糙,缺乏高分辨率的物性监测与实验模拟。部分隐伏矿体赋存于强蚀变但弱异常区,表明传统异常识别方法可能存在盲区。因此,未来研究需加强对深部热液演化路径的模拟,并发展新型地球物理成像技术,提高对非异常型金矿体的识别能力。

5.2 智能技术在找矿系统中的集成前景

随着人工智能与大数据技术的发展,智能找矿系统成为新兴方向。基于海量地质数据的机器学习模型,能从复杂数据中自动提取成矿规律,生成矿化概率图与异常区分布图,具有强大的预测能力。当前已出现“智能找矿平台”雏形,将遥感、物探、化探与地质数据库联通,通过算法建模实现自动预测与优先区筛选,为未来找矿工作提供智能决策支撑。

6 结语

深部金矿勘查面临复杂成矿背景与信息遮蔽等挑战,仅依靠传统经验与地表信息难以实现高效突破。本文以金矿成矿系统的全息解剖为出发点,系统构建地表至深部的成矿结构模型,融合遥感、地球物理、地球化学与三维建模等先进技术手段,提出一套技术集成、数据融合、模型驱动的找矿路径。通过典型矿集区的验证,证实该模式在识别深部隐伏矿体、降低找矿风险、提高预测精度等方面具有显著优势。未来应继续推动成矿系统多维参数化表达与智能预测平台建设,为我国金矿深部找矿提供更加科学高效的技术支撑体系,也为其他类型矿产的立体化勘查提供理论借鉴与方法参考。

参考文献

- [1] 徐国艳. 柴川铅锌银矿集区定量预测与评价[D]. 中国地质大学(北京), 2012.
- [2] 沙淑清. 云南普朗斑岩铜矿资源评价[D]. 中国地质大学(北京), 2010.
- [3] 杨晓坤. 广西南丹大厂锡矿长坡—高峰矿床(山)数字化与综合信息成矿预测[D]. 昆明理工大学, 2010.
- [4] 崔银亮. 云南省金平县龙脖河铜矿火山成矿作用及综合信息成矿预测[D]. 昆明理工大学, 2007.