

Analysis of the correlation between structural geological features and the distribution of metal deposits

Biaoming Liu

Guangdong Coal Geological Exploration Team No. 152, Meizhou, Guangdong, 514031, China

Abstract

This article systematically explores the intrinsic correlation between structural geological features and the distribution of metal deposits. By integrating regional structural evolution, ore controlling structural types, and typical deposit case analysis, the control mechanism of structural activity on the formation, enrichment, and spatial distribution of metal deposits is revealed. Research has shown that structural units such as fault structures, fold structures, and magma intrusions significantly affect the occurrence and scale of metal deposits by controlling hydrothermal migration pathways, ore-forming fluid accumulation spaces, and physicochemical conditions. Combining the theory of plate tectonics and the model of tectonic magmatic mineralization system, the spatiotemporal coupling law of tectonic mineralization is proposed, which provides a theoretical basis for the exploration and prediction of metal mineral resources and is of great significance for optimizing the direction of deep mineral exploration and improving resource utilization efficiency.

Keywords

structural geological features; Metal deposits; Ore controlling structure; Correlation analysis

构造地质特征与金属矿床分布的关联性分析

刘标明

广东煤炭地质一五二勘探队, 中国·广东 梅州 514031

摘要

本文系统探讨了构造地质特征与金属矿床分布之间的内在关联性, 通过整合区域构造演化、控矿构造类型及典型矿床案例分析, 揭示了构造活动对金属矿床形成、富集及空间分布的控制机制。研究表明, 断裂构造、褶皱构造及岩浆侵入体等构造单元通过控制热液运移通道、成矿流体聚集空间及物理化学条件, 显著影响金属矿床的赋存状态与规模。结合板块构造理论、构造-岩浆-成矿系统模型, 提出构造-成矿时空耦合规律, 为金属矿产资源勘查与预测提供理论依据, 并对优化深部找矿方向、提高资源利用效率具有重要意义。

关键词

构造地质特征; 金属矿床; 控矿构造; 关联性分析

1 引言

构造地质特征通过控制成矿物质的迁移、聚集与保存条件, 成为决定矿床空间分布的关键因素。近年来, 随着板块构造理论、深部探测技术及成矿系统研究的深入, 构造与成矿的关联性研究逐渐从定性描述转向定量模型构建。然而, 不同构造背景下金属矿床的控矿机制仍存在争议, 尤其是构造变形强度、多期次构造叠加对成矿的复合效应尚未完全厘清。本文从构造地质学视角出发, 结合典型矿床实例, 系统分析构造特征与金属矿床分布的关联性, 旨在为区域成矿规律总结及矿产勘查提供科学参考。

【作者简介】刘标明(1986-), 男, 中国广东梅州人, 本科, 工程师, 从事地质勘查与找矿类研究。

2 构造地质特征与成矿作用的基本理论

2.1 构造地质学基础

构造地质学以研究岩石圈变形特征及其动力学机制为核心, 其基础理论包括构造类型划分、变形机制分析等等。其中, 构造类型与特征构造变形可表现为脆性变形和韧性变形。断裂构造是岩石破裂后沿破裂面发生明显位移的构造, 按走向可分为纵向断裂、横向断裂和斜向断裂, 按力学性质可分为张性断裂、压性断裂和扭性断裂。褶皱构造是岩石层在侧向压力作用下形成的连续弯曲, 其形态、轴面产状及波长等参数反映构造应力场特征^[1]。

此外, 构造变形机制与动力学构造变形机制涉及岩石的流变学性质、应力状态及温度-压力条件。例如, 浅部低温条件下岩石以脆性变形为主, 形成断裂构造; 而深部高温高压环境下岩石表现为韧性流动, 形成褶皱或片理化带。构

造动力学分析则通过应力场模拟、构造节理统计等方法，还原古构造应力方向与强度，为成矿环境重建提供依据。

2.2 成矿作用分类

矿产资源作为地球上不可再生的自然资源，对于国家的经济发展、社会进步以及国家安全具有极其重要的意义。它们不仅是工业生产的重要原材料，也是能源供应的主要来源，直接关系到国家的经济命脉。成矿作用是地质作用中导致有用组分富集形成矿床的过程，根据成矿能量来源与物质迁移方式，可划分为以下主要类型：

2.3 岩浆成矿作用

由岩浆分异或结晶作用导致成矿元素富集，如岩浆熔离作用形成的铬铁矿床、岩浆结晶分异形成的铜镍硫化物矿床。

2.4 热液成矿作用

热液成矿作用是地球内部热能驱动下，流体与岩石相互作用形成矿床的关键过程。岩浆热液源于岩浆分异晚期释放的挥发分（如 H_2O 、 CO_2 、 Cl^- 等），具有高温、高盐度特征；变质热液由变质作用过程中岩石脱水形成，温度中等，地下水热液则因深部循环被地热加热，温度较低。这些热液流体沿断裂、裂隙等构造通道运移时，通过溶解、络合等作用萃取围岩中的 Cu 、 Au 、 Pb 、 Zn 等成矿元素，形成含矿热液。当物理化学条件发生突变时，成矿元素以硫化物或自然金属形式沉淀，最终形成斑岩型铜矿、脉状金矿等典型热液矿床。

3 构造地质特征对金属矿床的控制作用

3.1 断裂构造与矿床分布

断裂是岩石破裂后发生位移的构造，根据力学性质，断裂可分为张性断裂（如正断层）、压性断裂（如逆断层）和扭性断裂（如平移断层），它们对矿床的控制作用各有千秋。张性断裂：开放的“成矿仓库”张性断裂因岩石受拉伸作用破裂形成，裂隙宽大且连通性好。

热液流体（如岩浆水、地下水）沿张性断裂上升时，压力骤降导致气体逸出，引发流体物理化学条件剧变，促使铜、铅、锌等金属硫化物迅速沉淀。例如，江西德兴铜矿的斑岩型铜矿体，便沿北东向张性断裂带密集分布，断裂的开放性为矿液提供了充足的运移通道和沉淀空间。压性断裂：封闭的“成矿陷阱”压性断裂由岩石受挤压形成，裂隙狭窄且常被碎裂岩填充，虽然压性断裂本身透水性差，但其两侧的劈理带或虚脱空间可成为矿液聚集的“陷阱”。

3.2 褶皱构造与矿床分布

一是背斜构造。矿液的“汇聚盆地”背斜轴部因受张力作用，岩层破碎且渗透性增强，如同地下“洼地”。热液流体沿背斜两翼向轴部汇聚时，温度、压力降低，导致金属硫化物沉淀。例如，湖南水口山铅锌矿的矿体主要赋存于背斜轴部的虚脱空间，褶皱的“汇聚效应”使矿液在轴部富集，形成厚大矿体。

二是向斜构造。矿液的“保存密室”向斜轴部因受挤压作用，岩层致密且渗透性差，如同地下“保险箱”。虽然向斜本身不利于矿液运移，但其封闭环境可阻止矿液氧化流失，为矿床保存提供条件。

三是褶皱-断裂复合构造。成矿的“黄金组合”当褶皱与断裂叠加时，褶皱控制矿液的大范围运移，断裂则提供局部聚集通道，形成“区域控矿+局部定位”的成矿模式。

3.3 岩浆侵入体与矿床分布

3.3.1 岩体形态与矿床定位

岩体的形态（如岩基、岩株、岩脉）决定其热液活动的范围。大型岩基（如花岗岩基）可形成环状或放射状矿带，例如福建紫金山铜金矿的矿体沿岩体外接触带呈环状分布；而小规模岩脉则控制脉状矿床，如云南个旧锡矿的锡石-硫化物矿脉严格沿石英脉分布。

3.3.2 岩体侵位深度与成矿类型

岩体侵位深度影响热液成分和成矿温度。浅成侵入体（如次火山岩）因冷却快，常形成高温热液型矿床；而深成侵入体（如花岗岩）因冷却慢，可形成中低温热液型矿床。例如，安徽铜陵地区的铜矿床，其成矿类型随岩体侵位深度变浅而从矽卡岩型过渡为斑岩型。

3.3.3 岩浆分异与成矿元素富集

岩浆在上升侵位过程中，受温度、压力及组分过饱和度和等因素的动态控制，会发生显著的分异演化。早期阶段，随着温度梯度下降，高熔点矿物（如橄榄石、辉石）优先结晶，这些矿物对 Mg 、 Fe 等元素具有强烈的选择性吸附能力，导致大量 Mg 、 Fe 从熔体中析出并进入晶体相，使残余岩浆中 Mg 、 Fe 含量急剧降低。与此同时，岩浆中的 Cu 、 Au 等成矿元素因熔点较低且与早期矿物结晶关系较弱，得以保留在残余熔体中。随着分异进程持续，晚期残余岩浆的成分逐渐富集 Cu 、 Au 等不相容元素，其浓度可达原始岩浆的数倍至数十倍。当此类富集成矿元素的残余岩浆沿构造裂隙上升至浅部，伴随压力骤降与挥发分出溶，会发生流体-熔体不混溶作用，促使这些金属以硫化物或自然金属形式沉淀，最终形成具有经济价值的矿床。这一过程清晰揭示了岩浆分异对成矿元素富集的关键控制作用。

4 构造-成矿时空耦合规律与预测模型

4.1 构造活动期次与成矿时代的匹配性分析

构造活动具有多期次、分阶段演化的特征，而成矿作用往往与特定构造期次密切相关。通过同位素定年、构造变形序列解析等方法，可建立构造活动期次与成矿时代的“时间轴”，揭示二者匹配规律。

构造-成矿时代的“同步性”在活动大陆边缘或造山带，构造活动（如板块俯冲、碰撞）常直接触发大规模岩浆-热液活动，导致成矿时代与构造主期高度一致。例如，中国西南三江成矿带的中生代斑岩铜矿，其成矿年龄（约 200-180

Ma)与印支期构造碰撞事件同步,构造挤压引发的岩浆活动为铜矿形成提供了热源和物质基础。

构造-成矿时代的“滞后性”部分矿床的成矿时代晚于主构造期,反映构造活动对成矿的间接控制。例如,华北克拉通破坏期的金矿床,其成矿年龄(约130-120 Ma)晚于中生代构造体制转折期(约140 Ma),构造活动导致的岩石圈减薄和软流圈上涌,按照这种方式能够为后期热液活动提供了持续动力^[2]。

多期次构造叠加的“复合成矿”若区域经历多期次构造活动,成矿作用可能呈现“多阶段”特征。例如,长江中下游成矿带的铜矿集区,早白垩世(约140 Ma)的构造伸展引发岩浆侵入,形成斑岩型铜矿;而晚白垩世(约100 Ma)的走滑断裂活动则改造早期矿体,其中会形成脉状叠加矿化。通过构造期次与成矿时代的匹配分析,可识别“主成矿期”与“叠加成矿期”,进而能够为深部找矿提供时间约束。

4.2 构造应力场数值模拟与成矿有利区预测

构造应力场是控制岩浆活动、断裂开启和热液运移的“隐形推手”。通过数值模拟还原古构造应力场,可定量预测成矿有利区的空间分布。

应力场模拟的“关键参数”模拟需输入岩石力学参数(如弹性模量、泊松比)、边界条件(如板块运动速率)和构造变形历史。例如,模拟青藏高原东南缘的应力场时,需考虑印度板块与欧亚板块的碰撞速率(约50 mm/a)和岩石圈流变结构,以准确还原主压应力方向(近南北向)和应力集中区。

应力集中与成矿的“因果链”应力集中区(如断层端部、褶皱转折端)因岩石破碎、渗透性增强,常成为热液运移的“通道”和沉淀的“场所”^[3]。例如,通过有限元模拟发现,滇西北地区北西向断裂与北东向断裂的交汇部位,应力值较周围高30%-50%,研究人员在实际勘查过程中发现该区域金矿床密度是其他区域的2倍,从而进一步验证了应力集中对成矿的控制作用。

4.3 深部构造探测技术在矿床定位中的应用

可以看到的是,矿床的形成与深部构造密切相关,但地表出露信息有限。深部探测技术通过“透视”地下结构,可直接定位控矿构造和隐伏岩体。按照这种形式能够进一步揭示深部断裂与岩体形态高分辨率地震剖面可识别地下数千米的断裂带和岩体边界。例如,在长江中下游成矿带,相关地震剖面显示深部存在一条北东向的莫霍面隆起带,与地表铜矿床分布高度吻合,表明莫霍面隆起可能控制了岩浆上升通道。追踪隐伏岩体和构造界面重力异常可反映地下密度差异,磁法异常则能识别磁性矿物(如磁铁矿)的分布。例如,在胶东金矿集区,研究人员通过布格重力异常解析,发现深

部存在一个规模达200 km²的重力低异常区,对应隐伏花岗岩基;而磁法异常则圈定了岩体与围岩的接触带,直接指导了金矿体的定位。

5 某大型斑岩铜矿的构造控矿特征实例分析

西藏驱龙铜矿作为冈底斯成矿带的典型代表,其构造控矿特征显著,集中体现为多期断裂与褶皱的复合控制。矿床位于南北向逆冲断裂与东西向走滑断裂的交汇部位,这种构造叠加环境为岩浆上升和热液运移提供了通道与空间。具体而言,北西向断裂控制了含矿斑岩体的侵位方向,而北东向断裂则作为导矿构造,引导热液向浅部迁移;同时,矿区背斜核部因岩石破碎、渗透性增强,成为矿液沉淀的主要场所,形成厚大的矿体。驱龙矿床的含矿斑岩体以花岗闪长斑岩为主,呈岩株状产出,侵位深度较浅,其顶部常发育安山岩或英安岩岩盖,形成封闭的成矿环境。围岩蚀变呈现典型的“大白菜模式”分带:中心为钾化带,向外依次为石英绢云母化带、泥化带和青磐岩化带,铜矿化主要集中于钾化带与石英绢云母化带。此外,矿体形态受构造裂隙控制明显,细脉浸染状矿石沿裂隙充填,形成网脉状构造,进一步印证了构造对矿化的直接控制作用。该案例表明,斑岩铜矿的形成是构造、岩浆与热液协同作用的结果,其中断裂交汇区与褶皱核部是关键控矿部位,为同类矿床勘查提供了重要指向。

6 结语

构造地质特征作为金属矿床形成与分布的核心控制要素,贯穿于成矿作用的全过程——从构造变形引发的应力释放与岩石破碎,到岩浆活动携带的成矿物质运移,再到热液循环过程中的元素沉淀与富集,无一不深刻体现着构造对成矿的“全过程调控”。面向未来,随着矿产勘查向“深部、隐伏、复杂”方向的深入,对构造-成矿关系的认知需从“定性描述”迈向“定量解析”。这要求我们融合高精度地质调查技术、多学科数据以及人工智能算法在构造解析与成矿预测中的应用,从而精准刻画深部构造的几何形态与动力学过程,定量揭示构造-成矿的时空耦合机制。唯有如此,方能为隐伏矿体的精准定位与资源潜力的科学评价提供更可靠的技术支撑,推动矿产勘查理论与方法实现跨越式发展。

参考文献

- [1] 牛欢欢.烟台地区金多金属矿床成矿构造特征及地质勘查研究[J].中国金属通报,2025(10).
- [2] 饶峰,赵立民,潘永盛,等.江西石坞金矿床地质特征和金的赋存状态及对选矿工艺的指示意义[J].科学技术与工程,2024,24(5):1789-1798.
- [3] 司建涛,白德胜,赵志强,等.豫西九仗沟金矿床黄铁矿地球化学特征及其找矿意义[J].地质力学学报,2024,31(1):61-79.