

深部地质构造演化与成矿规律耦合关系及找矿方向

曾育龙

紫金矿业集团股份有限公司 福建上杭 364200

摘要：深部地质构造演化主导区域动力学环境变迁，其与成矿规律的耦合关系是揭示成矿本质、指导深部找矿的核心命题。本文基于区域大地构造背景，结合深部结构探测的地球物理证据，划分构造演化阶段并明确主要构造事件；系统梳理成矿系统类型与时空分布特征，阐明成矿物质来源、流体演化及元素富集机制；重点剖析深部构造活动对成矿通道、容矿空间的控制作用，岩浆-热液系统与构造演化的时间匹配性，以及深部物质上涌与成矿元素迁移富集的内在关联；基于耦合关系构建多维度找矿标志体系，提出深部找矿靶区预测方法与勘查技术组合策略。研究表明，深部构造演化的阶段性与动力学差异直接调控成矿作用的时空分布与强度，二者的耦合关系为深部找矿方向的精准定位提供关键理论支撑。

关键词：深部地质构造演化；成矿规律；耦合关系；找矿方向；勘查模型

引言

深部矿产资源勘查已成为保障资源安全的重要战略方向，而深部地质构造演化与成矿作用的内在关联是破解深部找矿难题的核心突破口。区域成矿作用的发生、发展与演化始终受控于深部地质构造的动力学过程，深部构造的演化不仅塑造了区域地质格局，更调控着成矿物质的迁移、富集与成矿系统的形成。随着地球物理探测技术的进步，深部地质结构的精细刻画成为可能，为揭示构造演化与成矿规律的耦合机制提供了技术支持。当前，针对深部构造与成矿耦合关系的研究仍存在诸多亟待厘清的关键问题，如构造演化阶段与成矿期次的精准匹配、深部物质迁移与成矿元素富集的耦合机理等。开展相关研究，不仅可深化对深部成矿过程的理论认知，更能为深部找矿靶区的预测与勘查提供科学依据，具有重要的理论与实践价值。

一、成矿系统类型与时空分布规律

(一) 深部结构探测与地球物理证据

深部结构探测依赖多种地球物理技术的综合应用，

重力、磁力、地震反射及大地电磁测深等数据为深部地质结构的刻画提供了直接证据。重力异常梯度带揭示了深部地壳厚度的突变界面，反映了板块俯冲或陆内折沉作用导致的地壳物质重新分布；磁力异常高值区与深部岩浆岩带的分布具有良好对应关系，指示了深部岩浆活动的空间范围；地震剖面清晰呈现了地壳内部的层状结构与断裂构造的延伸特征，揭示了深部韧性剪切带与浅部脆性断裂的贯通关系；大地电磁测深数据则反映了地壳及上地幔的电性结构差异，为识别深部流体富集区与部分熔融层提供了关键依据。多源地球物理数据的联合反演，有效提升了深部地质结构刻画的精度，为分析构造演化的动力学机制提供了客观支撑。（见表1）

(二) 成矿时代与多期成矿作用

成矿时代的确定基于成矿产物的同位素定年数据，研究区成矿作用具有明显的多期性特征，主要集中在后碰撞挤压阶段与陆内伸展阶段，形成了多期次叠加的成矿格局。后碰撞挤压阶段的成矿作用与地壳增厚导致的

表1 研究区深部构造演化阶段及其地质-地球物理响应特征

构造演化阶段	主要构造事件	地壳厚度变化 (km)	重力异常特征	磁力异常特征	地震反射特征	大地电磁低阻层深度 (km)
俯冲碰撞阶段	板块俯冲、地壳增厚、区域变质	45-55	负异常，梯度带明显	中-弱正异常	强反射界面连续，中下地壳模糊	>30
后碰撞挤压阶段	逆冲断裂、褶皱变形、岩石圈拆沉	50-60	负异常增强，局部正异常	正异常高值区集中	上地壳强反射，中地壳出现拆沉凹陷	25-30
陆内伸展阶段	正断层发育、伸展盆地形成、地壳减薄	35-45	梯度带转为平缓，局部正异常	强正异常带沿断裂分布	反射结构破碎，深大断裂清晰可见	15-25

岩浆-热液活动密切相关,形成了以岩浆热液型为主的成矿系统;陆内伸展阶段的成矿作用则与地壳伸展减薄及上地幔物质上涌相关,除岩浆热液型成矿系统外,还发育热液充填型与交代型成矿系统。不同成矿时代的成矿作用受构造演化阶段的严格调控,成矿时代的时空分布与构造事件的发生序列具有良好的对应关系,多期成矿作用的叠加进一步提升了区域成矿强度。

(三) 成矿物质来源与成矿流体演化

成矿物质来源的追踪依赖于同位素地球化学分析,结果表明成矿物质具有深部来源与地壳物质混合的特征,深部上地幔物质与地壳部分熔融产物的混合是成矿物质的主要供给方式。成矿流体的演化过程与构造演化阶段及岩浆活动密切相关,早期流体以岩浆成因流体为主,富含成矿元素与挥发分;随着岩浆演化与构造环境的转变,流体逐渐与地层孔隙流体、大气降水混合,形成混合成因流体。流体演化过程中,温度、压力与氧逸度的变化导致成矿元素的溶解度发生波动,为后续成矿元素的富集奠定了基础。成矿流体的运移路径受构造通道的控制,流体的聚集与排泄直接影响成矿作用的发生位置与强度。

(四) 成矿元素富集机制与控制因素

成矿元素的富集机制是成矿作用的核心环节,主要受控于流体的物理化学条件变化与构造活动的调控。流体混合、温度压力骤降与水-岩反应是导致成矿元素沉淀富集的主要机制,流体混合过程中不同性质流体的相互作用破坏了成矿元素的稳定存在状态,温度压力骤降降低了成矿元素的溶解度,水-岩反应则通过物质交换进一步促进成矿元素的富集。控制成矿元素富集的因素包括构造因素、岩浆因素与地层因素,构造活动提供了成矿元素运移的通道与富集的空间,岩浆活动为成矿作用提供了物质与能量来源,地层的岩性差异则影响成矿元素的吸附与沉淀效率,三者的协同作用共同调控成矿元素的富集过程与成矿强度。

二、深部构造演化与成矿作用的耦合关系

(一) 构造活动对成矿通道与容矿空间的控制

构造活动是成矿通道与容矿空间形成的主导因素,不同演化阶段的构造类型决定了成矿通道与容矿空间的形态、规模与分布特征。俯冲碰撞阶段形成的韧性剪切带为深部物质与流体的运移提供了初始通道,韧性剪切带的糜棱岩化作用增强了岩石的渗透性,促进了流体的渗透与循环;后碰撞挤压阶段形成的逆冲断裂带与褶皱构造进一步拓展了成矿通道的网络,断裂带的贯通性直接决定了流体运移的范围与效率,褶皱的核部与翼部转折端因岩石受力变形产生大量裂隙,成为重要的容矿空间;陆内伸展阶段形成的正断层与伸展盆地则为深部岩浆与热液快速上升提供了高效通道,断层破碎带与盆地边缘的裂隙带构成了规模化的容矿空间体系。构造活动的持续性与阶段性,导致成矿通道与容矿空间呈现多期叠加特征,为多期成矿作用的发生提供了有利条件。

(二) 岩浆-热液系统与构造演化的时间耦合性

岩浆-热液系统的形成与演化与构造演化具有严格的时间耦合性,构造演化阶段的动力学环境转变是岩浆-热液活动发生的关键触发因素。俯冲碰撞阶段,板块俯冲导致地壳增厚与岩石圈拆沉,深部物质发生部分熔融形成岩浆,岩浆上升过程中与围岩发生物质交换,形成早期岩浆热液系统,该阶段的岩浆-热液活动与俯冲构造事件同步发生;后碰撞挤压阶段,构造应力的积累与释放引发地壳物质的再次熔融,岩浆活动强度增强,热液系统的规模与影响范围进一步扩大,热液活动的高峰期与挤压构造事件的活跃期高度吻合;陆内伸展阶段,地壳伸展减薄导致上地幔物质直接上涌,形成大规模岩浆喷发与侵入活动,热液系统以浅部流体与深部流体的混合为主要特征,其活动期与伸展构造事件的发生时间完全匹配。岩浆-热液系统与构造演化的时间耦合,确保了成矿作用所需物质与能量的持续供给,是成矿作用发生的核心前提。(见表2)

表2 主要成矿系统类型及其地质-地球化学特征对比

成矿系统类型	主要构造背景	典型矿种	成矿流体来源	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)	成矿温度 (°C)	容矿构造特征	成矿时代 (Ma)
岩浆热液型	后碰撞挤压	Cu, Mo, Au	岩浆水为主	+2~+8	350-500	逆冲断裂带、岩体接触带	140-120
热液充填型	陆内伸展	Pb, Zn, Ag	混合流体(岩浆+大气降水)	-5~+5	200-300	正断层破碎带、裂隙密集区	110-90
交代型	陆内伸展/挤压过渡	W, Sn	岩浆+变质流体	+4~+10	300-450	褶皱核部、剪切带糜棱岩	130-100

（三）深部物质上涌与成矿元素迁移富集

深部物质上涌是成矿元素迁移富集的物质基础，其过程与深部构造演化密切相关，构造演化阶段的转变直接调控深部物质上涌的强度与规模。俯冲碰撞阶段，板块俯冲引发的岩石圈拆沉导致上地幔物质部分熔融，熔融物质伴随深部流体向上运移，过程中携带大量成矿元素，为成矿作用提供初始物质供给；后碰撞挤压阶段，地壳挤压变形产生的断裂通道为深部物质的进一步上涌提供了有利条件，岩浆与热液的混合作用促进了成矿元素的活化与迁移；陆内伸展阶段，地壳伸展减薄形成的深部大断裂直接贯通地壳与上地幔，上地幔物质与流体快速上涌，形成大规模的物质迁移通道，成矿元素在流体的携带下向浅部运移，在适宜的构造空间与物理化学条件下发生沉淀富集。深部物质上涌的强度与构造演化的活跃程度呈正相关，构造活动越强烈，深部物质上涌的规模越大，成矿元素的迁移富集效率越高，形成的成矿系统规模也越大。

三、基于耦合关系的找矿方向与勘查模型

（一）找矿标志体系构建

基于深部构造演化与成矿作用的耦合关系，构建多维度找矿标志体系，涵盖构造、地球物理、地球化学三大核心维度。构造标志以多期叠加的断裂带、韧性剪切带与褶皱构造为核心，重点关注断裂带的贯通性、褶皱核部与翼部转折端的裂隙发育区，以及不同构造类型的叠加部位；地球物理标志包括重力异常梯度带、磁力异常高值区、地震反射界面的突变部位与大地电磁测深揭示的低阻异常区，这些异常区与深部岩浆岩带、流体富集区及构造通道具有良好对应关系；地球化学标志以成矿元素的异常富集带、同位素比值异常区与流体活动相关的地球化学指标异常为核心，直接指示成矿作用的发生与成矿元素的富集程度。三大维度标志的协同组合，可有效提升找矿预测的精准度，为深部找矿提供直观的认识依据。

（二）深部找矿靶区预测方法

深部找矿靶区预测以构造-成矿耦合关系为核心指导，采用多源数据融合与综合分析的方法。首先基于构造演化阶段划分结果，确定成矿作用的有利构造阶段与构造类型；其次结合地球物理与地球化学异常数据，圈定深部物质上涌通道与成矿元素富集区；最后通过构造演化与成矿作用的时空匹配分析，筛选出具有良好成矿潜力的深部找矿靶区。该方法充分整合了构造、地球物理、地球化学等多方面信息，实现了从构造演化到成矿

作用的全链条分析，提升了靶区预测的科学性与可靠性，为深部找矿工作的精准开展提供了方法支撑。

（三）勘查技术组合与深部探测策略

深部勘查技术组合的构建基于找矿靶区的地质特征与探测深度需求，采用“浅部调查-深部探测-精准验证”的递进式探测策略。浅部调查以地质填图、土壤地球化学测量与浅层物探为核心，明确浅部构造与地球化学异常的分布特征；深部探测采用高精度地震反射、大地电磁测深与重力磁力联合反演技术，精细刻画深部地质结构、岩浆岩带与构造通道的空间形态；精准验证阶段采用钻探技术与测井分析相结合的方式，对靶区的成矿潜力进行直接验证。不同勘查技术的优势互补，实现了从浅部到深部的全方位探测，有效解决了深部地质结构刻画与成矿信息识别的技术难题，为深部矿产资源的勘查开发提供了技术保障。

结论

研究区深部地质构造演化划分为俯冲碰撞、后碰撞挤压与陆内伸展三个阶段，各阶段构造事件的叠加塑造了复杂的深部地质结构，地球物理数据为深部结构的刻画提供了可靠支撑。成矿作用具有明显的多期性，成矿物质源于深部与地壳物质的混合，成矿流体演化与构造活动密切相关，成矿元素富集受构造、岩浆与地层因素的协同调控。深部构造演化与成矿作用存在显著的耦合关系，构造活动控制成矿通道与容矿空间的形成，岩浆-热液系统与构造演化具有严格的时间匹配性，深部物质上涌为成矿元素迁移富集提供物质基础。基于耦合关系构建的多维度找矿标志体系与靶区预测方法，结合递进式勘查技术组合，可为深部找矿提供科学指导。

参考文献

- [1] 刘小锋. 金矿地质勘查特点分析及成矿规律研究[J]. 世界有色金属, 2025, (15): 85-87.
- [2] 欧阳荣京, 文立坤, 翟艳超, 等. 佳木斯地块东岩群大盘道岩组地质演化特征及成矿规律[J]. 地质学刊, 2025, 49(02): 130-141.
- [3] 李政, 楼法生, 熊燕云, 等. 华南地区锂矿主要类型、典型矿床地质特征及成矿规律[J]. 中国矿业, 2025, 34(10): 254-266.
- [4] 肖丹, 宋维国, 严志飞, 等. 湖南雪峰弧形构造带金矿地质特征、成矿规律与成矿模式[J]. 地质与勘探, 2025, 61(03): 450-463.