

# Research on the Correlation between Altered Mineral Assemblages and the Metallogenic Potential of Metal Mines

Lichang Feng Qifeng Deng

Yunnan Gold Mining Group Co. Ltd., Kunming, Yunnan, 650200, China

## Abstract

During the formation of metal deposits, the interaction between fluids and rocks directly creates altered mineral assemblages, whose types, intensities, spatial distribution patterns, and mineralization potential are closely related. This paper comprehensively studies the indicator value of different types of altered mineral assemblages for metal mineralization from four dimensions: theoretical basis, research methods, key achievements and suggestions. By integrating multiple methods such as field geological investigation, remote sensing interpretation, geochemical analysis and mineral spectral identification, an evaluation index system for altered mineral assemblages and mineralization potential is constructed. Furthermore, a mineralization prediction model based on multi-source data fusion is proposed. Research results show that specific altered mineral assemblage can serve as a key basis for rapidly delineating prospecting target areas and enhancing exploration efficiency, which is of great significance for effectively predicting deep and concealed deposits.

## Keywords

Altered mineral assemblage Metal mine Mineralization potential Relevance; Mineralization prediction

## 蚀变矿物组合与金属矿山成矿潜力的关联性研究

冯礼昌 邓其锋

云南黄金矿业集团股份有限公司, 中国·云南昆明 650200

## 摘要

金属矿床形成过程中, 流体与岩石相互作用直接造就了蚀变矿物组合, 其类型、强度以及空间分布规律和矿化潜力关联紧密。本文从理论依据、研究手段、关键成果和建议这四个维度, 全面研究了不同类型蚀变矿物组合对金属矿化的指示价值, 借助野外地质调查、遥感解译、地球化学分析以及矿物光谱识别等多种方法的综合, 构建了蚀变矿物组合与成矿潜力评价指标体系, 进而提出基于多源数据融合的成矿预测模型。研究成果显示, 特定蚀变矿物组合能作为快速圈定找矿靶区、提升勘探效率的关键依据, 对有效预测深部和隐伏矿床意义重大。

## 关键词

蚀变矿物组合; 金属矿山; 成矿潜力; 关联性; 成矿预测

## 1 引言

金属矿产资源作为支撑现代工业发展的关键物质基础而存在, 伴随浅部、易发现矿床的逐步枯竭, 地质勘查的核心任务变为深部找矿与隐伏矿床探测。矿床形成时, 含矿流体和围岩产生水-岩反应, 形成一系列有特定组合特征的蚀变矿物, 这些矿物既记录下成矿时的物理化学条件, 又在空间上与矿体紧紧相依, 成了寻找隐伏矿的关键标志。近年来高光谱遥感、地球物理探测以及大数据分析技术进步, 蚀变矿物信息提取精度不断提高, 应用范围持续扩大。本文系统研究蚀变矿物组合与金属矿山成矿潜力的内在联系, 为区域成矿预测及勘探靶区优选提供科学依据。

【作者简介】冯礼昌(1990-), 男, 中国云南大理人, 本科, 工程师, 从事地质勘查研究。

## 2 理论基础

### 2.1 蚀变矿物形成机理

含矿流体在特定的温度和压力条件下与围岩产生化学反应, 进而形成了蚀变矿物, 不同属性(酸性、中性、碱性)的流体与不同类别(岩浆岩、沉积岩、变质岩)的围岩会产生不同的矿物组合, 花岗岩受酸性流体作用常形成云英岩化, 而基性火山岩遭遇中低温流体则容易发生绿泥石化和绿帘石化。这些矿物组合既体现了成矿流体的物理化学条件, 又留存了流体运移路径和发展过程的记录, 对这些组合特征开展研究, 能助力追溯成矿环境, 进而推断矿床类型。

### 2.2 成矿流体演化与蚀变分带

成矿流体从源区演化为矿化富集区时, 物理化学条件改变使蚀变矿物呈规律性空间分布。靠近矿的部位大多是由高温、高盐度流体形成的蚀变组合, 往外部逐渐转变为中低

温组合,出现了明显的蚀变分带现象,分带特征这一特性,给判断矿体的位置和规模提供了重要线索。斑岩铜矿从中心到外围往往会形成钾化带—绢云母化带—青磐岩化带这样的分带模式,对各带矿物组合的识别有利于圈定矿化中心。

### 2.3 蚀变组合与矿床类型的对应关系

各类金属矿床一般都具备特定的蚀变矿物组合,常见的斑岩铜矿具有钾化-硅化-绢云母化的组合特征,火山岩型铜矿多呈现出绿泥石化、绿帘石化、硅化的情况,而钨锡矿床的特征是云英岩化和电气石化。这些对应关系为区域成矿预测奠定了理论根基,建立矿床类型与蚀变组合的对应模型,可在未知区域迅速判断潜在矿床类型,引领勘探工作部署。

## 3 研究方法与数据来源

### 3.1 野外地质调查

开展详细的路线地质填图与剖面测量工作,系统地记录蚀变的类型、强度、分布范围,以及其与构造、岩浆岩之间的关系,选取有代表性的岩石、矿石样品,为室内分析提供基础数据<sup>[1]</sup>。开展野外工作时,运用标准化的记录表格,让不同区域数据具有可比性,利用便携式GPS记录观察点的坐标,从而为后续空间分析提供精确的位置数据。

### 3.2 遥感与高光谱技术

利用高光谱遥感数据,按照波谱特征信息,完成大范围蚀变矿物组合识别及制图。高光谱技术可精准捕捉矿物的精细吸收特征,提升识别的精准度,借助大气校正、几何精校正以及端元提取等处理流程,得到研究区蚀变矿物分布图,为后续分析提供宏观信息支持。

### 3.3 地球化学分析

对采集到的样品开展主量、微量以及稀土元素的测试,探究元素迁移富集规律,剖析蚀变过程对成矿元素富集产生的影响。主量元素的分析可辅助判断岩石类型以及风化程度,微量元素和稀土元素的特征则可反映成矿流体性质及物质来源。借助元素比值与多元统计分析手段,可识别出和成矿相关的地球化学异常,为评估成矿潜力提供关键依据。

### 3.4 矿物光谱与显微分析

运用便携式光谱仪在现场对矿物种类进行识别,同时结合显微镜鉴定与电子探针分析,准确确定矿物的成分及结构特征<sup>[2]</sup>。显微分析可明确矿物的共生关系和生成顺序,协助重建成矿过程,电子探针分析可精准测定矿物的化学成分,识别出固溶体矿物成分的变动,为解读成矿条件的变化提供微观依据。

### 3.5 数据融合与建模

将地质、遥感、地球化学等多源数据放到GIS平台进行空间叠加分析,建立蚀变矿物组合与矿化的关系模型,为成矿潜力评估提供定量参考。借助建立蚀变强度指数、构造控矿指数以及地球化学异常指数,搭建综合成矿潜力指数模型,利用随机森林、支持向量机等机器学习算法对多源数据

开展融合建模,达成成矿潜力的定量预测。

## 4 关键性结果

### 4.1 蚀变组合与矿化强度正相关

蚀变矿物组合与矿化强度之间存在显著的内在联系。这种关系源于含矿流体在成矿过程中与围岩发生的水-岩反应,流体演化路径、物理化学条件变化以及物质迁移规律,决定了蚀变矿物的类型、强度与分布特征。一般而言,矿体附近的强蚀变带往往对应着流体活动最为强烈的区域,这些区域的矿物组合记录了成矿流体从形成、运移、到沉淀的全过程。随着远离矿体中心,流体能量逐渐减弱,物理化学条件趋于温和,相应的蚀变强度也随之降低,形成由内向外的蚀变分带。

因此,通过识别不同类型的蚀变矿物组合及其空间分布特征,可以推断矿化中心的位置与范围。特定组合(如钾化、硅化、绢云母化等)常与高品位矿化相伴生,成为直接指示矿体存在的重要标志。不同矿床类型的成矿流体性质与围岩条件各异,导致其蚀变强度与矿化关系表现出一定的差异性,需要结合具体地质背景进行综合分析。

### 4.2 特定组合模式的指示意义

研究表明不同矿床类型存在独特的蚀变矿物组合模式,可凭借这些模式识别矿床类型,钾化、硅化和绢云母化构成了斑岩铜矿的典型组合,钾化带一般出现在矿体核心区,表明存在高品位矿化。朝外侧过渡成为绢云母化带,矿化强度逐步变弱;最外面一圈是青磐岩化带,矿化呈现微弱状态或完全缺失<sup>[3]</sup>。火山岩型铜矿的特征表现为绿泥石化—绿帘石化—硅化组合,这些矿物大多在中低温条件下形成,与玄武岩、安山岩等火山岩中的裂隙充填矿化紧密相关,这些组合大多顺着特定层位或断裂带分布,能作为层控或构造控矿的关键标志。钨锡稀有金属矿床展现出云英岩化-电气石化-锂云母化这种典型组合,一般与花岗岩体顶部高演化的流体活动存在关联。这些组合既体现了成矿环境具备酸性、高温的特点,还和钨、锡、铋、钼等元素的富集紧密相关,铅锌矿床最常见的是硅化—碳酸盐化—重晶石化—萤石化组合,多数在低温热液环境里生成,常与受断裂构造控制的溶洞充填矿化或交代矿化相关联,对这些组合的识别有利于在碳酸盐岩分布区找寻隐伏的铅锌矿体。

### 4.3 多源数据融合提高预测精度

多源数据融合是提升成矿潜力预测科学性与可靠性的重要途径。地质、遥感、地球化学、地球物理等不同类型的数,从不同维度反映了成矿系统的特征:地质数据揭示构造与岩浆活动背景,遥感数据提供大范围的地表蚀变信息,地球化学数据反映元素富集规律,地球物理数据则揭示深部结构特征<sup>[4]</sup>。将这些数据在统一的空间框架下进行整合,可以更全面地刻画成矿环境与矿化分布规律。理论上,多源数据的互补性能够有效弥补单一数据源的局限性,减少信息盲区,提高对成矿有利区的识别能力。通过构建综合评价模型,

将不同类型的找矿标志进行系统集成,可以实现对成矿潜力的全方位评估。同时,数据融合技术有助于揭示不同成矿要素之间的内在联系,为深入理解成矿过程、优化勘探部署提供科学依据。随着智能化分析方法的发展,多源数据融合在成矿预测中的应用前景将更加广阔。

该模型可高效识别出具备高潜力的找矿区域,多源数据融合不仅可以提升预测精度,还可以强化对深部和隐伏矿床的识别能力,在对火山岩型铜矿进行勘查时,凭借绿泥石化—绿帘石化—硅化组合信息,进一步判断金属矿山成矿潜力,提升成矿潜力评价的科学性与准确性,为区域勘查部署提供坚实技术支撑。

## 5 建议

### 5.1 建立区域性蚀变组合—矿床类型数据库

建议创建覆盖主要成矿区带、反映蚀变矿物组合和矿床类型对应关系的数据库,为区域成矿预测提供基础数据支持。数据库应当囊括典型矿床的蚀变类型、强度、空间分布特性和相关地球化学数据,达成数据共享,增进勘查效率。同时,应建立动态更新机制,定期补充新发现矿床的实测数据,并引入标准化数据质量评估流程,确保信息的准确性与时效性。

### 5.2 发展高分辨率探测技术

加大无人机高光谱、航空磁法、大地电磁测深等技术应用力度,增强深部和隐伏矿床探测能力。无人机高光谱技术可获取精细的地表蚀变信息,而航空磁法和大地电磁测深能揭示深部构造与岩体分布,为解析成矿系统提供三维结构信息。此外,应推进多平台、多参数联合探测技术的研发,实现从地表到深部的连续探测与数据一体化反演。结合实时数据传输与云计算平台,可为野外勘查提供快速解释与动态调整方案,显著提高深部找矿的成功率与效率。

### 5.3 推广多源数据融合与智能预测

推广多源数据融合技术用于矿产勘查,运用人工智能算法搭建高精度成矿预测模型,提升找矿效率与成功率。倡导开发针对矿产勘查的专用AI平台,达成地质、遥感、地球物理、地球化学数据的自动融合及建模,降低技术难度,拓宽应用范围<sup>[5]</sup>。应注重模型的可解释性与可移植性研究,结合地质先验知识约束算法优化,减少数据噪声带来的误判。同时,通过跨区域模型验证与共享,形成适应不同地质背景的预测模型库,为实际勘查提供灵活可靠的决策支持。

### 5.4 加强蚀变机理与成矿过程研究

深入开展流体—岩石相互作用动力学研究,揭示不同

地质背景下蚀变矿物组合的形成机制,为成矿预测筑牢更坚实的理论根基。需强化实验模拟研究,利用高温高压实验重现不同条件下的蚀变过程,对野外观察和理论推断加以验证,增强预测模型的可靠性。应重点关注成矿流体来源、运移路径与沉淀机制的多尺度耦合研究,结合同位素示踪与数值模拟方法,构建从微观到宏观的成矿过程可视化模型。这将有助于提高对复杂成矿系统的理解,为深部隐伏矿床预测提供更具针对性的理论指导。

## 5.5 制定蚀变信息提取标准规范

构建统一的蚀变信息提取与解释规范,增强不同研究成果的可比性和应用价值。标准要包含数据从采集、处理、解译到验证全过程的规范,保障蚀变信息可靠且可重复,需加大人员培训力度,提升从业人员技术水平与标准化意识。

## 6 结语

蚀变矿物组合作为成矿过程的直接呈现,藏着大量找矿信息,通过全面系统的研究,搭建起蚀变矿物组合与金属矿山成矿潜力的关联模型,提出基于多源数据的成矿预测手段。特定的蚀变矿物组合能显著指示金属矿化情况,多源数据融合技术可有效提升成矿潜力预测的精准度。伴随深部地质勘查需求持续增加,蚀变矿物组合研究将在下面这些方面起到愈发关键的作用。提升探测技术的分辨率、打造精细的三维蚀变结构模型、拓展机器学习算法的应用、促进多学科交叉研究。凭借不断的理论创新和技术发展,蚀变矿物组合研究将给我国金属矿产资源保障提供更强大的科技支撑。

## 参考文献

- [1] 薛伟,方维萱,李建旭,等.甘肃录斗艘金矿蚀变矿物填图及对找矿方向的启示:以伊利石为例[J].矿产勘查,2025,16(S1):328-330. DOI:10.20008/j.kkcc.2025S1042.
- [2] 吴德文,鲁佳,杨自安,等.高光谱蚀变矿物与成矿元素异常耦合及定量反演研究[J].矿产勘查,2025,16(05):1220-1230. DOI:10.20008/j.kkcc.202505026.
- [3] 王斌,周明岭,丁正江,等.胶西北蚀变岩型金矿构造控矿机制与三维深部定位预测[J].地质前缘,2025,32(04):140-154. DOI:10.13745/j.esf.sf.2025.4.61.
- [4] 郭娜,卓焯鑫,周维瑞,等.西藏斑岩成矿系统蚀变矿物的高光谱响应及找矿指示[J].岩石学报,2025,41(05):1490-1508. DOI:CNKI: SUN:Ysxb.0.2025-05-002.
- [5] 宋国学,秦彰玮,张岱岳,等.大兴安岭中段破头山高岭土矿床:蚀变岩帽识别及其意义[J].中国科学院大学学报(中英文),2025,42(03):289-303. DOI:CNKI:SUN:ZKYB.0.2025-03-001.