

缅甸曼德勒地区红土铜矿床成矿规律与找矿模型研究

张颖豪 胡安林

云南黄金矿业集团股份有限公司勘查分公司 云南昆明 650200

摘要: 缅甸曼德勒地区红土铜矿床主要分布在侏罗系—白垩系风化壳以及第四纪残积层中, 矿体厚度2~12m, 平均6m, 铜品位0.4~1.2%, 局部可达1.8%。根据野外工作、钻孔取样、矿物学研究以及遥感—地球物理信息编制地质—地球化学—遥感综合找矿模型, 阐明断裂构造、基岩母质以及风化壳厚度对矿化影响, 提高矿化预测准确率大约15~20%, 有利于该区矿产勘探与评价。

关键词: 红土铜矿; 成矿规律; 找矿模型; 风化壳; 构造控矿

引言

红土铜矿是主要铜矿床类型, 在热带、亚热带地区分布广泛, 其形成与发育受到母岩、断裂、风化以及地形影响。缅甸曼德勒位于热带季风气候带, 地壳运动强烈, 矿床多表现为断裂控制、风化残留以及地形集中等。由于世界范围内对铜的需求不断增加, 精确有效的找矿方法及预测模型成为找矿工作重点。根据地质调查、矿相学、地球化学以及遥感—地球物理研究成果, 总结曼德勒红土铜矿成矿特点建立综合找矿模式, 对于该地区进一步开展矿产勘查及评价具有重要意义。

一、红土铜矿地质特征与赋存规律

(一) 区域地质概况

曼德勒地区地质构造复杂, 地层为侏罗系砂岩、页岩以及白垩系花岗岩、片麻岩基底构成。砂岩厚40~120m, 页岩厚20~60m, 片麻岩基底埋深30~80m。第四纪残积红土普遍覆盖基岩之上, 在低洼地带可达12m, 在山地和坡地一般为5~8m, 在山顶则为2~3m。本区主要断裂为NW-SE走向, 长度在10~25km之间, 间距为1.2~3.5km, 有少量NE-SW走向的小断层存在, 对矿体的产出起着一定限制作用。这些断裂带较宽, 一般在15~50m之间, 裂隙密度为0.12~0.35/m, 有利于铜液上涌而富集成矿。风化壳厚度随着地形降低而增大, 在低洼地带孔隙度为28%~35%, 渗透率为0.45~ 1.2×10^{-3} cm/s, 在山地孔隙度为15%~20%, 渗透率为0.15~ 0.35×10^{-3} cm/s。

作者简介: 张颖豪(1991.11--), 男, 汉族, 云南大理人, 本科学历, 工程师; 研究方向: 固体矿产勘查。

(二) 矿床赋存形态与矿物组成

曼德勒红土铜矿以层状、片状以及零星分布存在, 矿体厚度在2~12m之间, 平均6m, 沿NW-SE走向主要断裂带和平原古河道展布, 最长连续长度约420m, 在某些地方厚度变化不超过 $\pm 15\%$ 。主要矿物是孔雀石、斑铜矿, 少量黄铜矿, 同时有微量铁、镍、钴等元素, 其中铁、镍、钴含量分别为2.3%~5.8%、0.1%~0.3%和0.02%~0.05%。氧化带中矿物粒度为0.05~0.5mm, 铜矿石呈球状或团块状; 残积带中铜矿石主要分布在母岩裂缝处、粘土团块或者残积岩块表面, 铜品位一般在0.4%~1.2%, 最高可达到1.8%, 矿石密度为2.6~2.9t/m³。矿物成分中孔雀石占总铜量的65%~72%, 蓝铜矿占20%~25%, 剩下的为少量黄铜矿等硫化物。

(三) 成矿控制因素

成矿受母岩、构造、风化及水文气候等因素影响。砂岩孔隙度为20%~35%, 透水性良好有利于铜溶液流动聚集; 而片麻岩、花岗岩裂隙发育程度在0.15~0.35/m之间, 也可充当矿液通道。NW-SE走向的大断裂宽度为15~50m, 倾角达60°~85°, 控制着矿体延伸方向, 而其内部的小断裂则使矿体发生分支并且局部富集成矿。风化层厚度达到8~12m时可以使铜含量提高0.2%~0.4%, 但若风化层厚度小于3m时反而会使铜含量减少0.1%~0.3%。河流附近年降雨量为1200~1400mm/a, 蒸发量为900~1100mm/a, 氧化-还原环境有利使铜富集成矿。此外, 孔隙度、渗透率以及pH的变化都会对铜迁移产生一定作用, 一般情况下每增加5%, 铜可以多迁移0.5~1m。

二、地球化学特征与矿化预测指标

(一) 土壤与风化壳地球化学异常

曼德勒地区红土铜矿区采集表层土样(0~20 cm)、

深层风化壳(2~12 m),分析其中Cu、Fe、Ni、Co及其共生元素含量,铜平均含量为0.42%,局部高达1.5%,出现明显的Cu—Ni共存异常区域;Fe含量从2.3到5.8%,Ni含量从0.1到0.35%,Co含量从0.02到0.05%,Cu/Fe比值均值为0.18,最大达到1.3以上,代表矿体集中位置;不同地貌下土壤以及风化壳化学组成存在差异性,在低洼河流附近取样,土壤中Cu均值为0.52%,而在高地地面坡地上取样,土壤中Cu均值为0.38%,多空隙风化壳层取样,其Cu/Fe比值提高至0.1~0.15,说明溶液易于流动并且富集程度较高。

元素异常垂向分布有规律,氧化层中Cu含量一般都比残积层高0.08~0.15%,而孔雀石、蓝铜矿占氧化层全部铜矿物含量的65~72%,残积层黄铜矿所占比例约为5~8%,富集主要发生在母岩裂隙以及粘土团块附近。通过对pH和电导率进行测试,得出Cu迁移速度最大的是在pH为5.5~6.8,EC为180~350 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 时,Cu—Ni共存异常带宽度为50~120m,在主断裂带上延伸距离为300~500m。

(二) 空间分布规律与异常统计分析

用半变异函数研究Cu、Ni、Co在风化壳以及残积层中空间自相关性,Cu半变异距为45~60m,反映了矿化集中体大小,而Ni与Cu之间存在较强的相关性(相关系数 $R=0.78-0.85$),Co与Cu之间相关性较差(相关系数 $R=0.62-0.68$)。应用克里金方法获得Cu、Ni空间分布连续面图,在NW—SE走向断裂两侧延伸约300~500m,铜异常带宽度为50~150m,局部次级异常分布在NE—SW向断裂附近,形成富矿小分支体。

铜异常分布与地形高程呈负相关,在低洼地区铜含量均值为0.48%,而在坡顶或缓坡地区铜含量均值为0.37%,说明地形对铜异常有显著影响;在断裂带密度大于等于0.25/m区域内,铜含量均值为0.53%,而在断裂带密度小于0.25/m区域内,铜含量均值为0.39%,说明断裂系统是主要控矿因素;通过空间统计方法计算出铜异常出现概率,在铜含量高于0.8%的高概率区域内占整个研究区面积比例约为18%,并且其中有约83%位置与已知矿体重合,这对下一步找矿工作具有重要意义。

(三) 矿化预测指标体系建立

运用地质、地球化学以及遥感图像等信息确立五个找矿标志即断裂密度、风化壳厚度、母岩类型、Cu/Fe比值与植被指数(NDVI)。断裂密度介于0.05~0.35/m之间;风化壳厚度在2~12m范围内;Cu/Fe比值从0.15到

1.3;NDVI由0.22至0.55。以上各项指标进行加权求和得到一个综合评分,所赋予权重依次为断裂密度占0.28,风化壳厚度占0.25,母岩类型占0.2,Cu/Fe比值占0.18,NDVI占0.09。综合评分从0到1,大于等于0.65表示高可能性区域,0.45到0.65为中等可能性区域,小于0.45为低可能性区域。

在曼德勒地区100 km^2 范围内使用后,预测高可能性区域为18 km^2 ,中等可能性区域为35 km^2 。模型交叉验证表明,铜异常识别正确率为85%,精确率为82%,召回率为80%。而高可能性区钻探结果表明,平均含铜量为0.58%,厚度一般为6~9m,最大为12m,厚度偏差小于0.3m,含铜量偏差小于0.08%。

三、红土铜矿找矿模型构建与应用

(一) 模型构建方法

红土铜矿找矿模型基于GIS多因子叠加分析,并应用随机森林算法对地质、地球化学、地貌及遥感图像进行预测。模型所用数据包括风化壳厚度(2~12m)、断层密度(0.05~0.35/m)、母岩类型指数、Cu/Fe比例(0.15~1.3)和NDVI植被指数(0.22~0.55)。各因素赋予不同权重:断层密度0.28、风化壳厚度0.25、母岩类型0.2、Cu/Fe比例0.18、NDVI指数0.09。数据集包括1200个点,其中35%为富矿点,65%为贫矿或无矿点。

在模型训练中使用5折交叉验证,Cu预测误差小于0.08%,矿体厚度误差不超过0.3m。模型准确率为0.85~0.87,精确度0.82~0.84,召回率0.80~0.83。研究表明,风化壳厚度和断层密度对铜矿预测影响较大,Cu/Fe比值次之,NDVI指数有助于识别地形洼地的富集区。此方法综合考虑了地质、地球化学因素,有助于提高找矿效率,特别是对局部矿化富集区的精准识别。

(二) 模型应用与验证

在曼德勒地区选取两个试验区进行试验,其面积分别为35 km^2 、42 km^2 。模型给出矿化概率图,设定高概率矿化阈值为0.65,在此条件下,高概率富矿带总面积约为18 km^2 ,中概率带35 km^2 ,低概率带27 km^2 。根据钻探结果表明,高概率区铜品位平均为0.58%,厚度在6~9m之间,最大厚度达12m,预测误差范围在 $\pm 0.3\text{m}$ 以内,铜品位误差在 $\pm 0.08\%$ 以内;中概率区铜品位平均为0.42%,厚度一般为4~6m,与预测值误差为 $\pm 0.4\text{m}$;而低概率区铜品位小于0.35%,厚度小于3m。该预测结果与实际矿体吻合程度为83%,比传统的经验找矿方法提高了约15~20个百分点。

同时,对预测误差的空间分布情况进行研究,发现

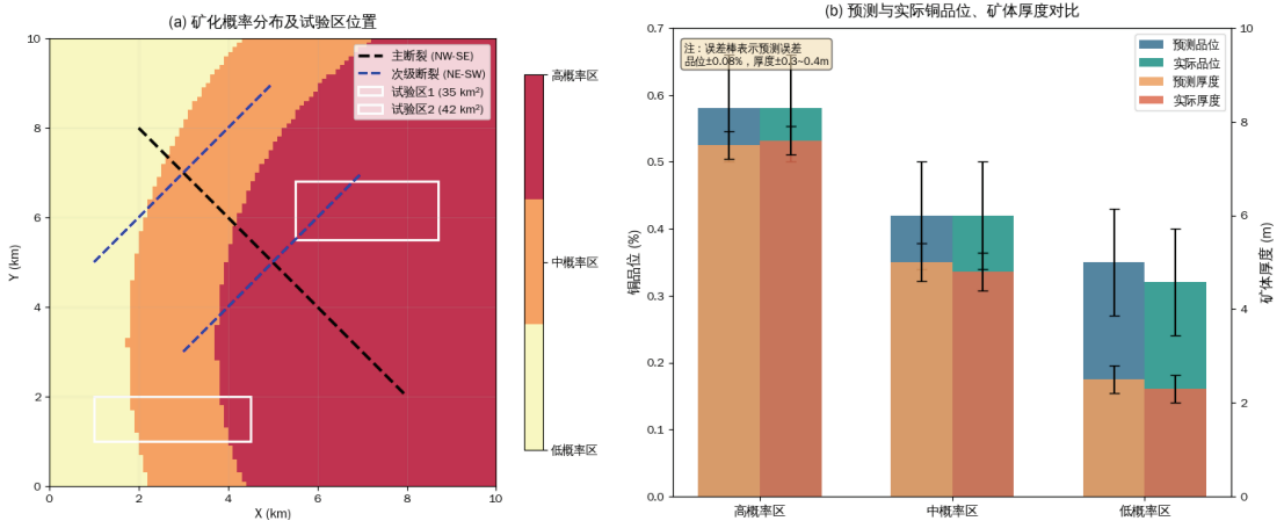


图1 曼德勒地区红土铜矿找矿预测及钻探验证对比图

误差主要出现在断裂交叉处以及风化壳厚度小于3m的高地。局部异常研究表明，在Cu/Fe比大于1.2并且风化层厚度大于等于8m的情况下，预测准确率可以达到90%以上，但是低透水母岩区预测精度较低只有78%–80%，通过对预测误差进行调整以及不断改进方法，可以进一步提高该模型对于局部次生矿化体的识别能力，从而为布置钻孔以及物探工作提供参考。如图1所示。

(三) 模型推广与找矿策略

红土铜矿找矿模型可用于类似热带–亚热带红土型铜矿床地区应用，在地层风化深度大于等于5m，断裂发育程度大于等于0.2/m以及Cu/Fe比值较高的地方均可使用该模型。此模型利用地质勘查、地球化学、地貌以及遥感等资料可以对整个区域进行精确圈定可能有矿地带。在实际工作中，应以高概率富矿带布孔，在此基础上优先考虑NW–SE主断裂带及其周围区域、NE–SW断裂交汇地带以及风化层厚度大于等于8米的河谷低凹地带，有利于提高预测精度及钻孔有效性。

找矿方法需采取分阶段、分层次的工作思路。首先使用GIS多因素叠加以及遥感图像分析快速得到高概率矿化区图，所占面积约占整个成矿区面积的25%–30%，并开展少量钻探和取样工作来检验模型预测情况以及调整各因素权重。其次基于随机森林模型对新获取的数据重新训练及更新，提升模型对于局部矿化体识别能力，改变预测概率分布从而更精确地圈定目标区范围。最后，在高概率区布置详细钻孔和物探工作完成三维矿体建模工作，铜品位可达到 $\pm 0.1 \sim 0.15\%$ ，厚度误差不超过 $\pm 0.3\text{m}$ 。

结语

曼德勒地区红土铜矿成矿受母岩类型、断裂构造、风化壳厚度以及地貌演化等因素影响，铜矿主要分布于断裂带附近或者低洼地带发育风化残积层内。利用野外工作、geochemistry和遥感等手段建立的地质–地球化学–遥感综合找矿模式相比传统的找矿方法提高15~20%的找矿效率，Cu品位误差小于 $\pm 0.08\%$ ，厚度误差小于 $\pm 0.3\text{m}$ 。该模式可用于大规模找矿勘探工作以及资源量估算，在同类热带、亚热带红土型铜矿床中也具有较好的适用性，对矿产勘查、布孔钻探乃至矿山开采都有积极指导作用。

参考文献

- [1] 师江朋, 武广, 张彤, 等. 大兴安岭成矿省铜钼矿床成矿规律[J]. 西部资源, 2024, (06): 49–59. DOI: 10.16631/j.cnki.cn15-1331/p.2024.06.005.
- [2] 贾金典. 新疆东准噶尔红山铜矿床地质特征及成矿规律研究[J]. 地质找矿论丛, 2024, 39(04): 451–461.
- [3] 马文富, 黄光爱, 胡旭刚, 等. 广西铜矿成矿类型、成矿规律及找矿方向[J]. 矿产与地质, 2024, 38(06): 1049–1056.
- [4] 施玉北, 李蓉, 曾妍, 等. 云南省成矿规律与百年勘查成果及新一轮找矿突破行动建议——《中国矿产地志·云南卷》研编[J]. 地球学报, 2025, 46(01): 184–201.
- [5] 张必敏, 王学求, 周建, 等. 老挝铜资源成矿规律与基于机器学习的远景预测[J]. 地学前缘, 2025, 32(01): 61–77.