

几内亚博凯大区红土型铝土矿成矿理论与找矿方法研究

李桂敏

中国水利水电第十一工程局有限公司几内亚分公司, 河南 郑州 450001

[摘要]几内亚博凯大区位于西非热带湿润气候带,是全球红土型铝土矿分布最为集中的地区之一。文中依托中国水利水电几内亚铝土矿在建项目,选取博凯大区博法省某矿区作为研究对象,基于742份样品(连续185d)及其X射线荧光(XRF)测试结果,结合野外地质观察、地貌-水文解译与植被指示等信息,系统分析了红土型铝土矿的成矿条件、作用机制与成矿模式,提出适用于研究区的找矿判据与勘探技术路线。研究表明:在热带强风化—强淋滤作用下,硅优先迁移、铝铁残留富集,矿体多赋存于低矮、开阔而平缓的山顶与台地残积壳中;陡坡和河谷两侧受侵蚀与搬运作用强,难以保存厚层富铝风化壳,品位 $>43\% \text{ Al}_2\text{O}_3$ 的矿石显著稀少。植被方面,酸性土壤上的灌木丛与腰果树分布与富铝残积壳具有一定空间耦合,可作为半定量线索,但不可替代地质—物化探验证。综合提出“遥感与DEM优选-地表地球化学与pH快速筛查-浅探槽/浅钻验证-资源量估算”的四步找矿技术路线。该研究为研究区乃至西非类似地区的红土型铝土矿找矿预测与资源评价提供实践参考。

[关键词]红土型铝土矿;成矿模式;地貌控制;植被指示;XRF;几内亚博凯

DOI: 10.33142/ect.v3i8.17511

中图分类号: TD4

文献标识码: A

Research on the Mineralization Theory and Exploration Methods of Red Soil Bauxite in the Bouquet Region of Guinea

LI Guimin

Guinea Branch of Sinohydro Bureau 11 Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan, 450001, China

Abstract: The Bouquet region of Guinea is located in the tropical humid climate zone of West Africa and is one of the regions with the most concentrated distribution of red clay bauxite in the world. Based on the ongoing project of China Water Resources and Hydropower Guinea Bauxite, this article selects a mining area in Bofa Province, Bouquet Region as the research object. Based on 742 samples (185 consecutive days) and their X-ray fluorescence (XRF) test results, combined with field geological observation, geomorphological hydrological interpretation, and vegetation indication information, the mineralization conditions, mechanism, and mode of red soil type bauxite are systematically analyzed, and prospecting criteria and exploration technology routes applicable to the research area are proposed. Research has shown that under strong tropical weathering and strong leaching, silicon preferentially migrates and aluminum and iron residues accumulate. Ore bodies are mostly found in low, open, and flat mountain tops and platform residual crusts; The steep slopes and valleys on both sides are strongly eroded and transported, making it difficult to preserve thick layers of aluminum rich weathered crust. Ore with a grade $>43\% \text{ Al}_2\text{O}_3$ is significantly rare. In terms of vegetation, the distribution of shrubs and fruit trees on acidic soil is spatially coupled with aluminum rich residual shells, which can serve as semi quantitative clues but cannot replace geological physical and chemical exploration verification. A four step mineral exploration technology route is proposed, which includes remote sensing and DEM optimization, rapid screening of surface geochemistry and pH, preliminary exploration of trenches/shallow drilling verification, and resource estimation. This study provides practical reference for prospecting, prediction, and resource evaluation of red clay bauxite deposits in the research area and similar regions in West Africa.

Keywords: red clay bauxite; ore-forming model; geomorphic control; vegetation indication; XRF; Bouquet, Guinea

引言

铝土矿是电解铝工业的关键原料,全球红土型铝土矿约占已探明铝土矿资源的绝大部分。几内亚由于具有稳定的陆块、广袤的准平原地貌以及长期热带湿润气候,为红土化作用提供了持续且强烈的外营力条件,形成了规模宏大的红土型铝土矿带。尽管区域找矿实践较为活跃,但矿体赋存受控因素叠加、空间非均质性强、露头受覆盖限制等现实问题,使得高效圈定高品位($>43\% \text{ Al}_2\text{O}_3$)矿段仍面临挑战。

1 本文旨在

归纳研究区红土型铝土矿的成矿地质条件与演化路

径,构建“源-运-聚”成矿模式。

提炼地貌、水文与植被的找矿指示意义。

基于742份样品的化学组成信息,提出高效、低扰动的找矿技术路线。

讨论方法的适用性与局限性,为后续资源评价与矿业开发提供依据。

2 研究区概况

2.1 区位与交通

研究区位于几内亚西北部博凯大区博法省,距首都科纳克里约145km,区内交通以地方公路为主,便于开展地

面地质与工程勘探工作。

2.2 地形地貌

整体地貌为低山一丘陵与宽缓台地相间分布,分水岭多呈低矮而平坦的“帽状”山顶,局部发育铁质结壳(ferricrete)。沟谷切割较浅但分布广泛,河谷两侧多为新近沉积物覆盖区。

2.3 气候水文

属热带季风—雨林气候,年降水集中于雨季,气温全年较高。强烈的化学风化与淋滤作用促使硅从风化壳中迁移,下部土层及沟谷区常见铁锰氧化物淋积。地下水位受地貌与季节性降水共同控制,台地顶部排水适中,有利于厚层风化壳保存。

2.4 区域地质与母岩

基底以变质—火成岩系为主,夹有不同程度风化的硅铝质母岩(如长英质花岗岩、片麻岩与泥质—粉砂质沉积岩)。母岩中长石、云母等硅铝酸盐矿物丰富,为铝土矿的物质来源。区域构造总体稳定,利于风化壳长期持续发育。

3 数据与研究方法

3.1 样品与测试

研究依托在建项目,收集与制备来自研究区的742个地表与浅层样品,时间跨度185d。采用X射线荧光光谱仪(XRF)测试主量元素,重点关注 Al_2O_3 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 以及灼减(LOI)等关键性指标。测试前进行仪器校准与标准物质比对,并设置平行样、重复样以控制精度与准确度。野外同步记录取样点地貌位置(台地/山顶/坡面/沟谷)、植被类型(灌木/腰果树/草地等)、土壤颜色与结构等信息。

3.2 遥感与地形分析

获取研究区多时相卫星影像与数字高程模型(DEM),开展:

地貌单元划分(山顶/台地、缓坡、陡坡、沟谷):基于DEM数据,利用GIS技术提取地形参数(高程、坡度、坡向、曲率等),将研究区划分为不同的地貌单元(山顶/台地、缓坡、陡坡、沟谷)。

铁质结壳及裸地识别:利用遥感影像的光谱特征,识别铁质结壳发育区和基岩裸露区。

植被覆盖度与类型解译:计算归一化植被指数(NDVI),结合纹理特征分析,区分不同的植被类型;

排水网络与分水岭提取:基于水文分析工具,提取研究区的排水网络与分水岭边界,分析水文条件对铝土矿分布的控制作用。

3.3 地表地球化学与土壤pH筛查

在遥感-DEM优选的有利区开展地表地球化学测量与快速pH筛查,识别酸性土壤发育区与铁铝富集的潜在残积壳。对关键部位布设样带,采用网格采样方式,采集地表土壤样品,初步判断铝富集区与矿化范围,开展系统

化网格采样。

3.4 浅层工程验证

针对优选靶区布设浅探槽与手持浅钻(或轻便冲击取样),揭露风化剖面结构(铁帽-铝土层-斑状层-半风化层-基岩)及矿层厚度与连续性。必要时采集剖面系统样进行分层测试与矿物学鉴定(如赤铁矿/针铁矿、三水铝石/水软铝石/高岭石相对含量)。

3.5 统计与综合集成

将化探数据与地貌—植被—剖面信息集成,基于阈值判别(如 $\text{Al}_2\text{O}_3>43\%$ 、 SiO_2 低、 Fe_2O_3 适中)与空间叠加,圈定中—高品位有利区,提出工程验证与资源量估算方案,采用统计分析方法,研究元素之间的相关关系,揭示成矿作用过程中的元素迁移富集规律。最终形成一套适用于研究区的综合找矿技术方法。

4 成矿地质条件与作用机制

4.1 母岩物质基础

研究区母岩以富铝硅酸盐矿物为主,风化过程中易释放Al,而K、Na、Ca、Mg等碱(碱土)金属随溶液迁移被淋失。Al与Fe的难溶性使其在近地表残留富集,逐步形成含铝风化壳,为后续矿化提供基础。

研究区内高质量铝土矿($\text{Al}_2\text{O}_3>43\%$)通常发育在长英质母岩之上,这与长英质岩石中铝含量较高且易风化的特点有关。而基性岩发育区往往形成高铁铝土矿,工业价值相对较低。母岩成分的差异是控制铝土矿质量与规模的重要因素之一。

4.2 气候控制与化学风化

高温强降水导致化学风化与淋滤强烈,硅酸盐矿物分解,Si以可溶形态迁移,Al与Fe以氢氧化物/氧化物形态残留,并可在后期再沉淀为三水铝石等铝矿物。长期、稳定的外营力是形成厚层富铝风化壳的关键。

化学风化过程遵循着元素迁移序列,主要元素按迁移能力从强到弱依次为:Ca、Na、Mg、K、Si、Fe、Al。这种迁移序列导致了下部层位元素的带出和上部层位Al、Fe、Ti等元素的相对富集。长期、稳定的热带气候是形成厚层富铝风化壳的关键因素,铝土矿的形成可能需要数百万年的持续风化作用。

4.3 地形地貌的分带作用

矮平缓山顶/台地:排水适中、侵蚀作用弱,风化壳保存完整,易形成连续的富铝层。野外观察与样品特征显示,大于43% Al_2O_3 的样品多见于此类地貌单元。这些部位风化作用充分,元素迁移彻底,往往形成厚度大、品位高的优质铝土矿。

陡坡:物质易搬运、风化壳难以堆置增厚,矿体不易形成或保存。这些区域风化产物不断被侵蚀搬运,无法形成稳定的风化剖面,铝土矿化程度低。

河谷两侧:受冲刷与沉积覆盖作用,原位残积壳被剥

失或被覆盖,高品位矿石显著稀少。但在某些情况下,河谷中可能发育由侧向迁移形成的再沉积型铝土矿,但规模一般较小,工业价值较低,一般不作为工业化生产的对象。

4.4 水文条件与再分配

中高地下水位与良好排水共同塑造垂向淋滤格局:可溶组分向下迁移,Fe在氧化-还原微环境下可能发生局部再分配,使铝在特定层位相对富集。台地顶部与分水岭区的缓慢径流有利于矿层稳定,这些区域地下水运动以垂向渗流为主,促进了元素的垂向分异和铝的富集。而地势低洼处地下水流动缓慢,常出现还原环境,可能导致已富集的铁锰再次迁移,不利于矿体的保存。

4.5 土壤化学与植被耦合

酸性土壤促进硅酸盐分解与Si的淋失,腐殖质的积累可增强局部酸化。灌木丛与腰果树适应酸性贫养环境,其空间分布与富铝残积壳存在一定耦合关系,可为找矿提供半定量线索,但需与地质与物化探结果综合判定。

4.6 成矿模式(源—运—聚)

基于野外观察和实验分析,本研究建立了研究区红土型铝土矿的“源-运-聚”成矿模式:

源(Source):硅铝质母岩提供铝的物质来源,母岩中的铝硅酸盐矿物在风化作用下分解,释放出Al、Fe等元素。

运(Transfer):热带强风化—强淋滤条件下,活性元素(如Si、Ca、Na、K、Mg)以离子形式随水体迁移流失,而难溶元素(Fe与Al)则在地表残留。

聚(Accumulation):在低矮平缓山顶与台地残积壳中,残留的Al、Fe元素不断富集,形成连续或近连续的富铝层,局部受铁质结壳保护,最终形成具有经济价值的铝土矿体。

5 找矿判据与技术方法

5.1 地貌与空间判据

综合研究结果表明,地貌特征是铝土矿分布的最主要控制因素之一。在研究区内开展铝土矿勘查时,应优先考虑以下地貌判据:

- (1) 优先锁定矮平缓山顶、宽缓台地与分水岭。
- (2) 回避陡坡与沟谷两侧。
- (3) 关注铁质结壳与红—褐色强风化带的连续分布。
- (4) 以DEM派生坡度($<5^\circ$)、曲率(近0)等指标筛选一级有利区。

5.2 植被与土壤指示

植被和土壤特征可作为铝土矿找矿的辅助判据,主要包括:

- (1) 灌木丛、腰果树较为繁茂且土壤呈酸性(pH偏低)的区域可优先踏查。
- (2) 土色偏红褐、结构致密、含铁结核丰富的土层有利于富铝。
- (3) 植被—土壤线索仅作辅助手段,须与地质—化

探联合验证。

5.3 地球化学与矿物学指标

地球化学特征是评价铝土矿质量的直接指标,研究区内有效的评价指标包括:

以 Al_2O_3 - SiO_2 - Fe_2O_3 三元组合为核心判据:高 Al_2O_3 、低 SiO_2 、适中 Fe_2O_3 的样品更可能对应可采铝土层;必要时结合 TiO_2 与LOI评估矿物学组成(如三水铝石含量)与工业属性(烧结/拜耳法适应性)。

5.4 工程地质与剖面识别

通过浅探槽与浅钻等工程手段揭露风化剖面,是评价铝土矿资源潜力最直接有效的方法。研究区典型风化剖面自上而下一般为:

顶部铁帽/铁结壳:主要由赤铁矿和针铁矿组成,厚度一般0.5~2m。

下伏富铝铝土层:多呈土状、粉土状或块状,主要含三水铝石和高岭石,厚度2~10m不等。

斑状层/混合层:部分风化的母岩碎块与风化物质的混合带。

半风化层:母岩的结构尚存,但矿物已开始风化变化。

基岩:未风化的原生母岩。

剖面厚度与连续性是资源量估算与采矿方式选择的关键参数。

5.5 技术路线(四步法)

基于研究成果,本文提出了一套适用于研究区的铝土矿找矿“四步技术路线”:

第一步:遥感-DEM优选。以地貌(坡度—曲率)、植被(覆盖度/纹理)与铁质结壳识别等特征,初步圈定铝土矿找矿有利区。

第二步:地表地球化学与pH快速筛查。按网格系统采样,配合便携式仪器初判Al、Si、Fe特征与土壤酸度,缩小靶区范围。

第三步:浅层工程验证。在优选靶区实施探槽与浅钻,获取剖面、厚度与品位约束。

第四步:综合评价与资源量估算。将化探—工程—地貌信息融合,进行矿体建模与资源量估算,提出采矿建议(露天开采、剥离厚度极薄或无需剥离)。

6 结果与综合讨论

6.1 主要认识

通过对研究区742份样品的测试分析和野外调查,本研究获得以下主要认识:

- (1) 研究区红土型铝土矿形成受母岩物质、热带气候、地貌与水文共同控制,符合“强风化-强淋滤-残留富集”的典型模式。
- (2) $>43\%$ Al_2O_3 的高品位矿石主要出现在低矮而平缓的山顶—台地残积壳,陡坡与河谷两侧显著贫化。
- (3) 灌木丛与腰果树在酸性土壤上的繁茂生长与富

铝残积壳具有空间耦合,可作为踏勘线索,但不可替代工程验证。

(4)“遥感-化探-工程”的渐进式技术路线能在低扰动、相对低成本条件下有效提升圈定效率与准确度。

6.2 方法优势与局限

优势:流程清晰、投资强度可控、易于快速复查与滚动圈定;数据类型互补,便于综合解释。

局限:植被-土壤指示具有区域性与季节性差异;沟谷区可能存在次生重力搬运或再沉积铝土矿小透镜体,需以工程验证避免遗漏;XRF 的元素分析需结合矿物学相鉴定,防止因 LOI 与晶水差异带来的误判。

6.3 对采矿与环境的启示

研究表明,矮平缓山顶一台地上的浅埋矿体适合露天开采,剥离厚度薄、边坡稳定性好。基于研究成果,本文提出以下采矿与环境建议:

重视雨季水土保持与排水系统设计,降低泥水径流对下游沟谷的影响。

生态恢复使用乡土灌木与经济树种(如腰果)进行分区重建。

运输道路选线避开河谷敏感区,减少对居民点与耕地的

的扰动。

7 结论

研究区红土型铝土矿成矿遵循“母岩供源-热带强风化与淋滤-地貌与水文控制残留富集”的基本规律,矿体优选赋存于矮平缓山顶一台地残积壳中。

陡坡与河谷两侧因侵蚀与沉积覆盖,难以保存厚层富铝风化壳,高品位矿体显著稀少。

酸性土壤上的灌木丛与腰果树可作为半定量找矿线索,但必须与地貌-化探-工程验证联合使用。

提出的“四步技术路线”能高效圈定 $>43\%$ Al_2O_3 潜在高品位矿段,为资源量估算与采矿方案设计提供依据。

研究框架与方法对几内亚及西非类似地貌-气候背景区具有可推广性。

[参考文献]

[1]陈毓川,刘建宁,王登红.铝土矿成因类型与找矿标志[J].矿床地质,2002,21(3):257-266.

[2]刘建宁,王登红.几内亚铝土矿地质特征与成因分析[J].世界地质,2004,23(2):182-190.

作者简介:李桂敏(1989.12—),女,民族:汉,籍贯:河南省安阳市人,学历:硕士研究生,研究方向:地球化学。