

老挝波罗芬高原红土型 铝土矿地质特征与成矿规律

薛 静, 高光明, 成 功

(中南大学 地学与环境工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 老挝南部占巴塞省的波罗芬高原分布大面积的玄武岩。该区气候属热带季风型, 炎热多雨、干湿交替。在这种湿热气候和地貌间歇性抬升、基地裂隙发育排水通畅的地质背景下, 形成了丰富的红土型铝土矿资源。

关键词: 波罗芬高原; 三水铝土矿; 玄武岩; 稀土元素; 成矿规律; 老挝

中图分类号: P613; 618.45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2009)04-0297-06

0 引言

近年来, 随着我国氧化铝产能的迅速扩大, 国内的铝土矿资源供应将出现严重的缺口, 我国企业抓住机遇“走出去”, 积极开发和利用国外铝土矿资源。据专家预测, 老挝的波罗芬高原蕴藏有约 20 亿 t 红土型铝土矿的资源量^[1-3], 由于没有开展过系统调查工作, 尚缺乏详实资料。2005~2006 年, 中南大学地学院组成了一支科研小组远赴老挝, 研究波罗芬高原红土型铝土矿的地质特征和成矿规律, 经过为期一年半的研究工作, 预测整个波罗芬高原铝土矿远景储量达 51 亿 t, 这对于我国寻找境外铝土矿资源, 开展国际合作开发具有重要意义。

1 区域地质

矿区位于呵叻盆地南东侧昆嵩(安南)隆起区与呵叻盆地沉降带的过渡区——波罗芬高原, 构造位置为西太平洋沿岸华南沿海—印支半岛岩浆火山活动带; 同时又处于印度板块与欧亚板块碰撞后沿红河断裂产生的东南半岛板块拖曳调整带^[5]。

波罗芬高原可以分出 4 个构造层, ①结晶基底由前寒武系变质杂岩和部分下古生界构成; ②盖层

为石炭—二叠系; ③下三叠统一白垩统; ④古近系、新近系和第四系。

中生界由 3 个沉积层组成, 中下三叠统为海相沉积, 上三叠统一侏罗统是海、陆交替的过渡相沉积, 中上侏罗统一白垩系为陆相沉积。

新生界为河湖和滨海沉积, 古近系和新近系只分布在老挝、泰国的北部和越南中部; 第四系分布普遍, 主要分布在湄公河平原。

波罗芬高原周边的三叠系和侏罗系中发育一系列裙边状皱褶, 但二者的皱褶并不协调, 后期皱褶显示出呵叻盆地受 NE-SW 向的挤压作用, 并在盆缘形成叠瓦状逆冲推覆断层。由于盖层褶皱的关系, 造成早、中白垩系沉积盆地之间大小和沉积物厚度的差异; 进入新生代后, 波罗芬高原急剧上升, 沿袭早期的构造运动, 形成区内的 NW 向、SN 向和 NE 向断裂, 在这些断裂的交汇部位产生大面积的玄武岩喷发活动, 一直延续到第四纪早期(图 1)。

2 矿区地质

2.1 地层

矿区地层主要为三叠系—白垩系紫红色、灰白色—浅灰色复矿砂岩, 含铁质砂岩、泥质粉砂岩、含砾砂岩等, 主要出露于河流河床、冲沟及陡坎, 地层

收稿日期: 2008-10-26

基金项目: 中色国际矿业国际合作项目(L-2005-01)资助。

作者简介: 薛静(1980), 男, 陕西宁强人, 博士研究生, 矿产普查与勘探专业, 从事矿床地球化学研究。通信地址: 湖南省长沙市中南大学地学楼 303; 邮政编码: 410083; E-mail: xuejing0118@126.com

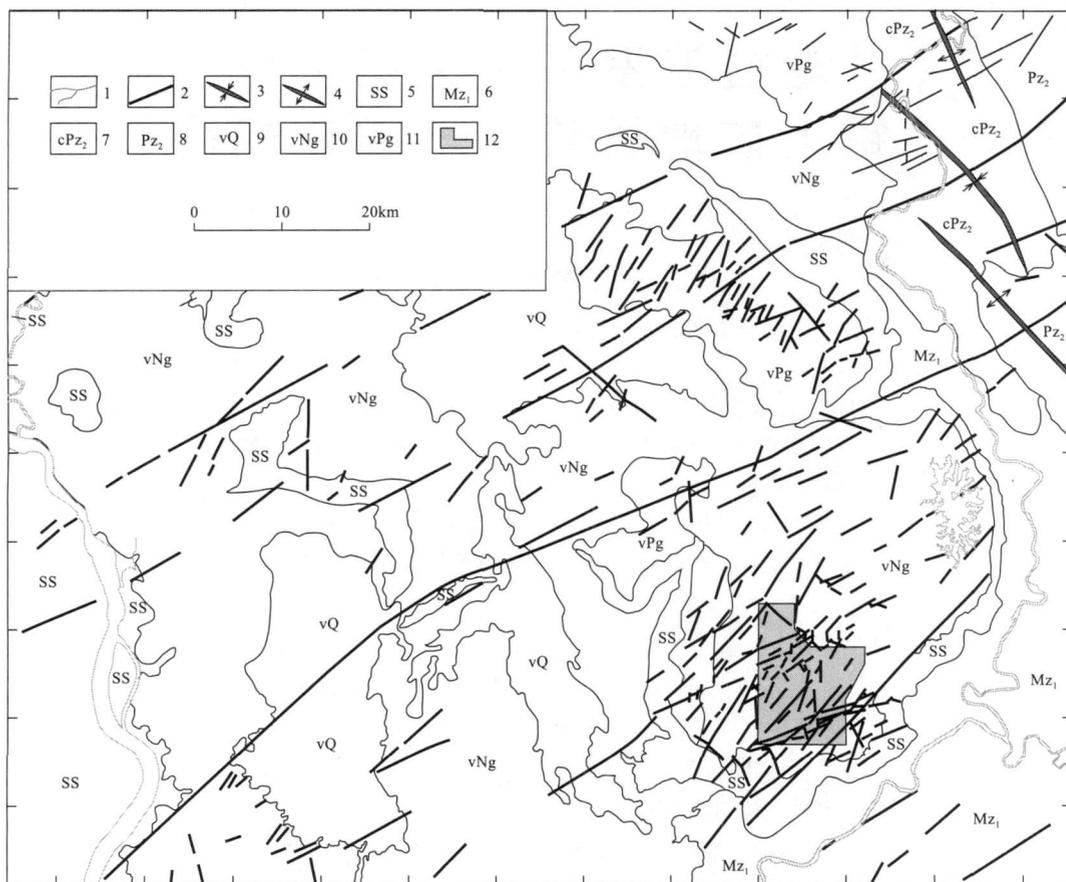


图1 老挝南部波罗芬高原及周边区域遥感解译图

Fig. 1 Remote sensing image interpretation map of Boloven plateau in Laos

1. 河流 2. 断层 3. 向斜 4. 背斜 5. 砂岩 6. 下中生界

7. 下石炭统 8. 上古生界 9. 第四纪玄武岩 10. 新近纪玄武岩 11. 古近纪玄武岩 12. 工作区

产状平缓, 交错层理发育。受断裂和褶皱构造影响, 地层倾向不一; 由下而上, 砂岩岩性有所变化, 下部一般为长石、石英复矿砂岩, 中部为灰白-紫红色中-粗粒砂状结构的砂岩, 顶部为含砾砂岩。

第四系主要为土灰色砂岩风化土(砂土)和桔红-桔黄色玄武岩风化土及红土组成。森林覆盖地区往往为灰黑色腐殖土, 其颜色受母岩的控制, 底部为砂岩则形成砂质腐殖土, 底部为玄武岩则形成红土型腐殖土。

波罗芬高原红土型铝土矿直接出露于地表, 直接覆盖于砂岩之上, 根据矿石分带特征和成因分为两种类型: ①玄武岩就地风化-原地风化堆积型; ②短距离搬运-残坡堆积型(图2)。

2.2 构造

2.2.1 褶皱构造

区内褶皱构造以宽缓的背斜和向斜构造为主, 主要出露于 Houay Xoy 和 X Namnay 两条 SN



图2 两种不同成因的铝土矿矿床

Fig. 2 Two different metallogenies of bauxite

a, b. 原地堆积型 c, d. 短距离搬运型

向的河沟及后者的支流 Houay Namleng 河沟中, 轴

向大多为 NE 向, 两翼地层产状平缓。矿区外围波罗芬高原周边褶皱以裙边状宽缓褶皱为主。玄武岩侵入后, 矿区以块断作用为主, 因此矿区褶皱一般分布于低洼处, 对成矿作用的影响不大。

2.2.2 断裂构造

矿区断裂构造发育, 主要发育 NE 向、NW 向及近 SN 向 3 组断裂, 其中以 NW 向和 NE 向最为发育, 断裂两侧的错动位移一般不大, NE 向断裂一般为右行平移, NW 向断裂为左行平移。NW 向与 SN 向断裂交汇部位往往形成锯齿状张性断裂, 断裂性质多为正断层或平移断层。NE 向断裂明显分为两组, 一组为 65° , 另一组为 35° 左右。前者与区域性大断裂相平行, 控制了外围及矿区的火山机构, 同时控制了矿化带的延伸方向, 以岩块之间的左行或右行平移为特征; 后者控制了单个矿体的长轴方向和 NE 走向的边界。

在部分地段, 铝土矿矿体被断层错动, 如矿区北部的 I 矿体; 或矿体受断层差异性升降活动所切割, 矿化不连续; 在矿区北东角, 由于块断作用, Houay Namheng 河北东、高原平台北西与南东两侧砂岩抬升, 直接与中部铝土矿呈断层接触, 微地貌景观表现为明显的微型沟坎。

3 矿床地质特征

3.1 矿床形态、规模

矿床形态受古地形(侵蚀面)控制比较明显, 部分矿体呈不规则椭圆状, 大部分矿体形态极不规则。主要沿 SN 向、NE 向、NW 向山脊(山坡)及两侧展布或分布于圆顶山丘四周。在山顶及坡度适中的地段, 地表出露大小不一的豆状、结核状、蜂窝状、团块状的铝土矿矿石; 缓坡部位地表被红土层覆盖仅见零星的细小铝土矿结核或红土。矿体面积 $0.24 \sim 6.11 \text{ km}^2$, 平均厚度达到 4.5 m , 最厚达到 7.8 m , 矿石的品位为 $34.67\% \sim 41.48\%$, 平均 37.36% 。

3.2 矿石矿物组成

矿石主要以三水铝石为主, 兼有少量的铝赤铁矿、铝针铁矿。颜色以黄褐色、红褐色、砖红色为主, 次有灰色及杂色。

主要矿物: 根据镜下鉴定及 X 射线衍射分析(图 3), 矿石中矿物成分主要包括: 三水铝石和铁类矿物(如铝赤铁矿、铝针铁矿), 其次为硅类矿物(如

高岭石、鲕绿泥石和极少量的石英)和钛矿物(如金红石、锐钛矿)等。

图谱中三水铝石衍射峰高, 峰形尖锐、对称, 其结晶程度较高; 而赤铁矿、锐钛矿、金红石、针铁矿、长石的衍射峰一般较低, 峰形较弥散, 对称性较差, 其结晶程度低。从最大特征峰的面积观察, 从三水铝石 \rightarrow 赤铁矿 \rightarrow 针铁矿 \rightarrow 高岭石 \rightarrow 锐钛矿(金红石)依次减小, 反映其相对含量依次减少。

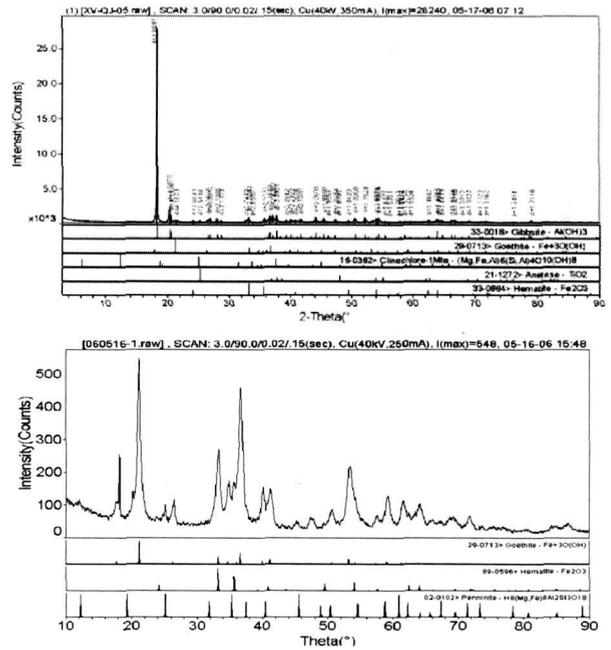


图 3 矿石 X 射线衍射图

(1 号: XV-QJ-05; 2 号: p432)

Fig. 3 X-ray diffraction pattern of sample

3.3 矿石结构构造

铝土矿石的构造类型简单, 常见的有块状或巨砾状、多孔状及角砾状构造。块状或巨砾块构造最为主要, 特点是组成矿石的晶体、颗粒或豆鲕粒等排列无规律、无方向。

铝土矿石的主要结构类型为: ①胶状结构: 针铁矿呈胶状胶结三水铝石, 部分铝土矿呈豆鲕状结构, 该结构较为普遍; 鲕粒核心可以为三水铝石及铁质, 也可以是粘土质矿物, 或者是它们的混合物; 包壳的圈层有的具明显界线; ②结晶结构: 三水铝石为自形粒状集合体, 沿针铁矿间隙充填; ③溶蚀交代结构: 针铁矿溶蚀交代赤铁矿呈残余状; ④交代残余结构。

3.4 矿石化学特征

(1) 矿石化学成分。根据对矿区所采的 1 940 个铝土矿样品化学分析数据统计结果得出: w

(Al₂O₃) = 34.62% ~ 40.51%, 平均 39.6%; w (Fe₂O₃) = 26.47% ~ 40.84%, 平均 33.7%; w (SiO₂) = 1.88% ~ 4.40%, 平均 3.4%; w (TiO₂) 较高, 为 3.06% ~ 5.59%, 平均 4.10%。矿石化学分析中的灼失量包括 H₂O⁺、H₂O、有机质、碳质等, 其中绝大部分为 H₂O⁺, 主要为三水铝石、针铁矿和高岭石等的结构水。本区铝土矿石中 w (灼失) = 19.31% ~ 21.45%, 平均 20.62%, w (H₂O⁺) = 18.50% ~ 20.56%, 平均 19.85%。样品中 A/S 最高为 34.95, 最低为 6.20, Al₂O₃/SiO₂ 平均值 12.70。

(2) 矿石的微量组分特征。微量元素的研究意义在于查明影响沉积物, 特别是影响风化壳物质化学成分、形成过程和形成环境, 其中源岩成分为主要因素。从表 1 中可以看出, 铝土矿石中除 Cr, Zn, Ga, Nb, Cd, Sn, Pb, Bi, Th, U 等元素的丰度相对于它们的克拉克值较高以外, 其余元素没有利用价值。

在矿区中 Ga 比较富集, 可以综合利用。Cd 在铝土矿石中富集比较强烈, 从而反映出 Cd 是在陆相条件下古风化物质吸附所致。

(3) 矿石的稀土元素特征。从表 2 中可以看出, 矿石稀土元素总量 (ΣREE) 较高, 变化于 99.35 × 10⁻⁶ ~ 266.78 × 10⁻⁶。矿石中 La/Yb = 9.44 ~ 17.84, 反映出铝土矿石中 LREE 的富集程度远大于 HREE, 轻稀土 (ΣLREE) 明显高于重稀土 (ΣHREE), 且两者的比值变化于 10.49 ~ 11.69, 表明成矿物质可能来自陆源。矿石中 Eu/Sm 比值与球粒陨石的 Eu/Sm 值 (0.37) 比较, 均 < 0.37 (为 0.25 ~ 0.27), δ(Eu) 值均接近于 1, 说明矿石的分异程度不太大, Eu 的富集与亏损主要取决于矿石中含钙造岩矿物的聚集和迁移。δ(Ce) 值均小于或微大于 1, 为 Ce 的负异常 (即 Ce 亏损) 或弱正异常 (图 4), 说明铝土矿石是在表生氧化条件下沉积作用形成的。

表 1 帕克松地区铝土矿石微量元素组成(据戴塔根等^[4])

Table 1 The composition of trace elements analyzed

样号	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Nb	Cd	Sn	Ba	Pb	Tl	Bi	Th	U
综合样 1	68.34	8.001	27.94	57.61	283.8	29.6	25.59	1.262	26.00	174.3	31.23	0.020	0.316	11.98	2.90
综合样 2	167.0	11.12	25.99	58.70	176.8	32.79	62.81	1.618	27.99	168.4	33.80	0.032	0.393	15.00	4.05
综合样 3	142.0	12.51	16.52	61.70	160.6	28.70	23.25	0.792	24.82	166.0	26.66	0.038	0.542	7.878	2.65
综合样 4	633.6	9.46	26.04	63.41	228.6	30.86	21.46	4.755	15.21	136.6	48.75	0.015	0.309	8.585	3.15
平均值	252.74	10.27	24.12	60.36	212.45	30.49	33.28	2.11	23.51	161.33	35.11	0.03	0.39	10.86	3.19
克拉克值	110	25	89	63	94	18	19	0.15	1.7	390	12	0.5	0.004	5.8	1.70
富集系数	2.30	0.41	0.27	0.96	2.26	1.69	1.75	14.05	13.83	0.41	2.93	0.06	97.50	1.87	1.88

分析单位: 中南大学地质研究所 ICP-MS 室(等离子质谱分析法)。
量的单位: w_B/10⁻⁶。

表 2 帕克松地区铝土矿石的稀土元素组成(据戴塔根等^[4])

Table 2 The composition of trace elements analyzed

样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm
球粒陨石	0.32	0.94	0.12	0.6	0.2	0.073	0.31	0.05	0.31	0.073	0.21	0.033
综合样 1	61.22	113.6	12.83	44.47	10.85	2.794	7.705	1.383	5.742	1.147	2.359	0.363
综合样 2	58.09	117.3	12.12	41.38	10.11	2.577	7.426	1.335	5.978	1.313	2.882	0.514
综合样 3	19.53	47.13	4.484	15.44	3.777	1.013	2.606	0.457	1.949	0.388	0.998	0.178
综合样 4	42.26	76.62	9.526	33.73	8.327	2.175	5.966	1.035	4.225	0.799	1.726	0.247

样号	Yb	Lu	ΣREE	LREE/HREE	δ(Eu)	δ(Ce)	Eu/Sm	Ce/Yb	(La/Sm)N	(Gd/Yb)N	(La/Yb)N
球粒陨石	0.19	0.031	3.46	1.87			0.37	4.95			
综合样 1	2.038	0.281	266.78	11.69	0.97	0.81	0.26	55.74	3.53	2.32	17.84
综合样 2	3.121	0.466	264.61	10.49	0.95	0.88	0.25	37.58	3.59	1.46	11.05
综合样 3	1.228	0.176	99.35	11.45	1.02	1.02	0.27	38.38	3.23	1.30	9.44
综合样 4	1.421	0.195	188.25	11.06	0.98	0.77	0.26	53.92	3.17	2.57	17.66

分析单位: 中南大学地质研究所 ICP-MS 室(等离子质谱分析法)。
量的单位: w_B/10⁻⁶。

4 矿床条件与成矿规律

4.1 成矿条件

4.1.1 成矿物质的来源

据有关资料, 易风化、含铝较高的岩石都可能成为铝土矿的成矿母岩。除了玄武岩外, 花岗岩、闪长岩及碳酸盐岩均可以是红土型铝土矿的成矿母岩。越南和我国广西平果、贵港等地红土型铝土矿的成矿母岩为上古生界碳酸盐岩经红土型风化残积而成, 澳大利亚红土型铝土矿的成矿母岩为含粘土砂岩。

波罗芬高原玄武岩地表分布面积超过 2 000 km², 厚度 700~800 m。Maycock 和 Stone 研究认为, 波罗芬高原玄武岩从中新世开始喷发, 熔岩在波罗芬高原周围平原河谷中都有分布^[6]。根据波罗芬高原玄武岩 Sm-Nd 同位素测年数据也证明了这一观点的正确(另文叙述)。毋庸置疑, 新生代玄武岩的喷出为波罗芬高原铝土矿的形成提供了有利的成矿母岩。

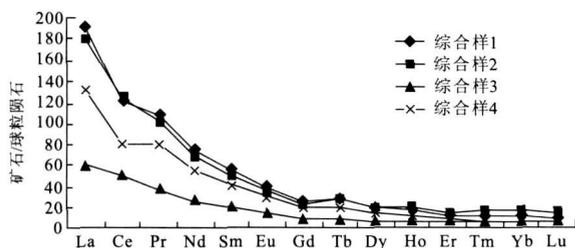


图 4 帕克松地区铝土矿稀土元素分布模式图

(据戴塔根等^[4])

Fig. 4 REE distribution pattern of Paksong bauxite

4.1.2 气候条件

低纬度湿热气候条件有利于母岩的化学风化作用。湿度大则淋滤作用强, 有利于地壳表面表生地质作用(风化作用)的进行, 使得硅酸盐中的硅、铝分离, 形成大量的三水铝石, 为三水铝土矿的形成提供丰富的矿物质。

含有氢氧化铝的铁质土壤是在年平均温度 18~25℃、年降雨量 1 000~2 500 mm 条件下形成的。气温、降雨量是与纬度有关的。近期研究表明, 新生代铝土矿的数量和规模从低纬度带到高纬度带发生急剧下降, 而且铝土矿的质量也明显降低。据统计, 世界上大部分高品质的铝土矿都位于低纬度区, 如最大的三水型铝土矿床就位于圭亚那、几内亚、澳大利亚、巴西和印度^[7]。

老挝南部占巴塞波罗芬高原位于北纬 15°附近, 属热带季风气候, 气温 20~30℃之间, 年降雨量 1 250~3 750 mm, 旱季、雨季气候分明, 温暖、湿热, 年平均气温 25℃以上^[8]。单就气候而言, 老挝波罗芬高原形成铝土矿的条件明显优越于中国。

4.1.3 地形地貌

地形是在红土型铝土矿形成过程中的一个重要因素, 最有利的地形是起伏不大的多丘或低山地形, 或者高原边缘地形。据有关资料显示, 铝土矿的分布都与准平原地貌和侵蚀面有关^[9]。新生代玄武岩喷发后期的地壳活动总体趋于平缓, 进入了陈国达教授所称的地洼活动余末期, 工作区构造运动以小规模的块断作用为主, 呈面型抬升(隆升)。相对稳定的地壳间隙性抬升, 在一定的海拔高程上形成夷平面。这种有限的构造侵蚀环境, 有利于红化作用的进行及其产物的保存, 形成准原地-原地红土型铝土矿。

在矿区及周边地区, 地势为低山丘陵区, 落差一般 60 m 左右, 山势起伏不大, 坡度一般较为平缓, 坡角 6°~25°。矿区内部, 剥蚀夷平面上相对平缓或低洼的地带对红土型铝土矿的成矿与保存是比较有利的; 而在矿区周边, 红土型铝土矿则可以分布于长而缓的熔岩流斜坡上。

4.1.4 水文地质条件

水文地质条件, 特别是地下水的动态水文地质系统, 对红土型铝土矿的形成有着非常密切的关系。一般说, 位于上部的地下水渗透带是活跃组分进行水解化的主要地带, 中间的地下水流动带则处于红土型铝土矿形成的下界, 一方面潜水面附近有基底砂岩的渗滤作用, 另一方面, 出现地表河流, 形成活跃组分运移带出的通道。当地壳相对稳定并处于面型缓慢抬升的背景下, 潜水面也缓慢下移, 可以有充分时间进行红土化作用, 从而有利于铝土矿的形成。波罗芬高原放射状水系发育, 将高原玄武岩切割成若干狭窄、险峻的谷地, 造成强烈的冲刷剥蚀; 地表水下渗形成潜水层, 经水岩反应, 将风化壳中可溶于水体中的元素搬运迁移, 有利于富铝、富铁、去硅, 形成丰富的铝土矿资源。

当然, 地表一些短暂水流对矿源体的搬运及其他作用对红土型铝土矿的保存也值得注意和深入研究。此外, 红土型铝土矿的成矿控制条件还包括微生物及其生物化学作用等方面, 尚待深入研究。

4.2 成矿规律

4.2.1 矿床(点)空间展布特征

从成矿空间上来看,全球三水型铝土矿床均分布于赤道两侧的热带-亚热带地区、南纬30°至北纬30°之间。从现代三水型铝土矿床的分布来看,绝大多数矿床位于临海陆缘区和大洋岛屿中,如印尼、西加里曼丹岛、巴布亚新几内亚,而在内陆发现三水铝土矿床很少。东南半岛与新生代火山喷发玄武岩风化作用有关的铝土矿成矿带主要位于100°~109°30'E, 10°20'~16°N;波罗芬高原与新生代火山喷发玄武岩风化作用有关的铝土矿位于106°~107°E, 14°40'~15°40'N。

另外,根据铝土矿分布区的成矿母岩来看,红土型铝土矿的成矿母岩十分广泛,除了玄武岩外,花岗岩、闪长岩及碳酸盐岩均可以是铝土矿的成矿母岩。

4.2.2 成矿时间演化规律

在成矿时间上,全球三水型铝土矿床的形成时代主要是新生代。波罗芬高原玄武岩大规模的喷发活动主要为4期:第一期为印支运动的产物,分布于波罗芬高原南部地区老柬边界一带;第二期玄武岩为古近纪产物;第三期玄武岩为新近纪产物;第四期玄武岩为第四纪中期。新生代的3期玄武岩喷发均与铝土矿形成息息相关,其中,波罗芬高原第二期和第三期(新近纪和第四纪)玄武岩与成矿关系最为密切。

据Brown和Garrels研究,形成1m厚的铝土矿需要2.5万年,这一数据与Kronberg等(1979)的实验数据(2万年形成1m厚的铝土矿)相接近;洪金益(1994)对红土型铝土矿的矿化时间进行了研究,认为火成岩地区红土型铝土矿以化学溶解迁移为主,每年可形成0.01~0.015mm厚的红土,1Ma可形成10~15m厚的红土型风化层^[10]。因此,波罗芬高原玄武岩喷发后有足够的时间进行红土化反应。矿区大部分地方见不到新鲜玄武岩的露头,三

水铝土矿直接与基底砂岩层接触,说明玄武岩水解完全,红土化作用进行得彻底。

5 结论

老挝南部波罗芬高原铝土矿为玄武岩风化而成的红土型三水型铝土矿,具有中铝、高铁、低硅、储量大、覆盖浅、地势平缓等特征,适合于大型机械化露天开采。根据已有工程控制并利用遥感信息提取技术,预测整个波罗芬高原铝土矿潜在资源量可达51亿t。

参考文献:

- [1] Bardossy Gy, Aleva G J J (顾皓明译). 红土型铝土矿[M]. 沈阳:辽宁科技出版社,1994:4-25.
- [2] 宋国明. 我国与周边国家进行矿业投资合作的前景分析[M]. 北京:地质出版社,2004:12-25.
- [3] 国土资源部信息中心. 世界矿产资源年评(2000~2001)[M]. 北京:地质出版社,2002.
- [4] 戴塔根. 老挝Paksong铝土矿物质组分查定及矿石可溶性试验研究[R]. 长沙:中南大学地学院,2007:10-15.
- [5] 李通芝. 东亚地体构造演化研究的回顾与展望[J]. 科学发展月刊,2001,28(10):754-763.
- [6] Maycock L D, Stone C. Guide Book for Fieldtrip[R]. Vientiane: Laos Hunt Oil Company, 1994.
- [7] 杨重愚. 世界铝土矿储量及其分布[J]. 世界有色金属,1990,(8):7-11.
- [8] 中国科学院地理所外国地理研究室. 老挝地理[R]. 北京:中国地理学会,1977.
- [9] Dominique Chardon, Violaine Chevillotte, Anicet Beauvais, et al. Planation, bauxites and epeirogeny: One or two paleosurfaces on the West African margin? [J]. Geomorphology, 2006, 82: 273-282.
- [10] 洪金益. 红土型铝土矿的矿化时间研究[J]. 有色金属矿产与勘查,1994,6(3):141-145.

GEOLOGICAL CHARACTERISTICS AND METALLOGENIC REGULARITIES OF LATERITE BAUXITE IN BOLOVEN PLATEAU, LAOS

XUE Jing, GAO Guang-ming, CHENG Gong

(School of Geosciences & Environment Engineering, Central South University,

Changsha 410083, China)

Abstract: Basalt is widely distributed in the Boloven plateau, Champasak province, the south LAOS. Here belongs to the tropic monsoon zone with alternated dry and plenty of rainfall climate. The alternating wet and dry climate and intermittent uplifting of the land, together with the excellent water drainage resulted in abundant lateritic bauxite mineral resources here.

Key Words: Boloven plateau; gibbsite; basalt; rare earth element; metallogenic regularities; Laos