

文章编号: 1000-4734(2014)02-0234-13

# 贵州省遵义铝土矿矿物学及地球化学特征

李玉娇<sup>1,2</sup>, 张正伟<sup>1\*</sup>, 周灵洁<sup>1,2</sup>, 吴承泉<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 遵义铝土矿成矿区是贵州省的主要成矿区之一, 其铝土矿层大多赋存于下石炭统九架炉组。文章运用薄片鉴定、X射线粉晶衍射及扫描电子显微镜等多种分析测试方法, 研究了铝土矿的矿物组成、含量及晶体形态, 认为铝土矿成矿过程中不同层位一水硬铝石的晶体形态有所差异, 且一水硬铝石含量与粘土矿物及石英含量均呈此消彼长的关系。同时, 分析含矿岩系组构和元素地球化学特征得出, 遵义仙人岩、后槽和新站3个矿区铝土矿的成矿物质来源极有可能同源且与其基底有关, 成矿过程中成矿母岩在氧化还原条件交替的沉积环境下经历了较为充分的均一化, 反映了成矿过程与古风化壳作用的一致性。上述的矿物学及地球化学特征标志对铝土矿的找矿和选矿具有一定的指示意义。

**关键词:** 铝土矿; 矿物学; 地球化学; 遵义; 贵州

**中图分类号:** P579; P618.45

**文献标识码:** A

**作者简介:** 李玉娇, 女, 1988年生, 硕士研究生, 地球化学专业. E-mail: liyjiao06@163.com

贵州铝土矿分布广泛, 南起贵阳—清镇及凯里—黄平一线, 向北经由修文、息烽、遵义、务川、正安、道真, 直至南川, 自南向北构成修文—清镇、凯里—黄平、息烽—遵义及务—正—道4个矿集区<sup>[1-3]</sup>。贵州铝土矿多为沉积型, 其成矿过程中伴随着易溶元素(如Na、K、Ca、Mg等)的溶解迁出和难溶元素(Al、Ga、Sc、HFS等)的沉淀富集<sup>[4-7]</sup>。近来, 我们在研究对比贵州石炭系九架炉组和二叠系梁山组含铝土矿层特征时发现, 2个含矿层具有不同的矿物学和地球化学特征。由此引出: 2个含矿层在成因上有何区别, 影响其成因的因素是什么等问题。本文以遵义县的仙人岩、后槽和新站铝土矿为研究对象, 开展了成矿作用与含矿岩系地层结构相互关系的研究, 并对3个矿区进行实测剖面取样分析, 通过薄片鉴定、X射线粉晶衍射及扫描电子显微镜分析与含矿岩系的地层结构组成和元素地球化学特征的研究, 探索含矿层成矿规律。

## 1 区域地质背景

研究区位于扬子准地台西南部(图1), 以

褶皱发育为主, 在轴、翼部伴生有断裂构造。区内构造总体呈NNE向和NE向。仙人岩矿区主要构造为NE向的仙人岩向斜(图1), 后槽矿区分布有NE向的两路口背斜及两路口断裂(图1), 新站矿区由NNE向的马石岩背斜和刀靶水断层(图1)组成。研究区内构造控制着含矿岩系下石炭统九架炉组(C<sub>1j</sub>)的分布范围和展布方向。区内其他出露地层及岩性有: 中上寒武统娄山关群(C<sub>2-3ls</sub>)白云岩; 下奥陶统桐梓组(O<sub>1t</sub>)、红花园组(O<sub>1h</sub>)和湄潭组(O<sub>1m</sub>)白云岩、页岩及生物碎屑灰岩, 中上奥陶统(O<sub>2-3</sub>)生物屑泥灰岩、碳质页岩; 下志留统龙马溪组(S<sub>1l</sub>)页岩、碳质页岩; 下二叠统梁山组(P<sub>1l</sub>)、栖霞组(P<sub>1q</sub>)生物碎屑灰岩、页岩, 中二叠统茅口组(P<sub>2m</sub>)生物碎屑灰岩, 上二叠统龙潭组(P<sub>3l</sub>)、长兴组(P<sub>3c</sub>)泥岩、砂岩、硅质岩及灰岩; 下三叠统夜郎组(T<sub>1y</sub>)、茅草铺组(T<sub>1m</sub>)泥岩、泥灰岩、角砾状灰岩及白云岩, 中三叠统松子坎组(T<sub>2s</sub>)、狮子山组(T<sub>2sh</sub>)灰岩及白云岩, 上三叠统二桥组(T<sub>3e</sub>)石英砂岩; 下侏罗统自流井组(J<sub>1zl</sub>)石英砂岩、砂岩及泥岩, 中侏罗统下沙溪庙组(J<sub>2x</sub>)泥岩及砂岩; 第四系(Q)粘土及松散砂砾。

研究区铝土矿均赋存于下石炭统九架炉组(C<sub>1j</sub>)。仙人岩矿区含矿岩系与下伏中上寒武统

收稿日期: 2013-10-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 41173064); 中国科学院战略性先导项目(XDA08090500)

\* 通讯作者, E-mail: zhangzhengw@hotmail.com

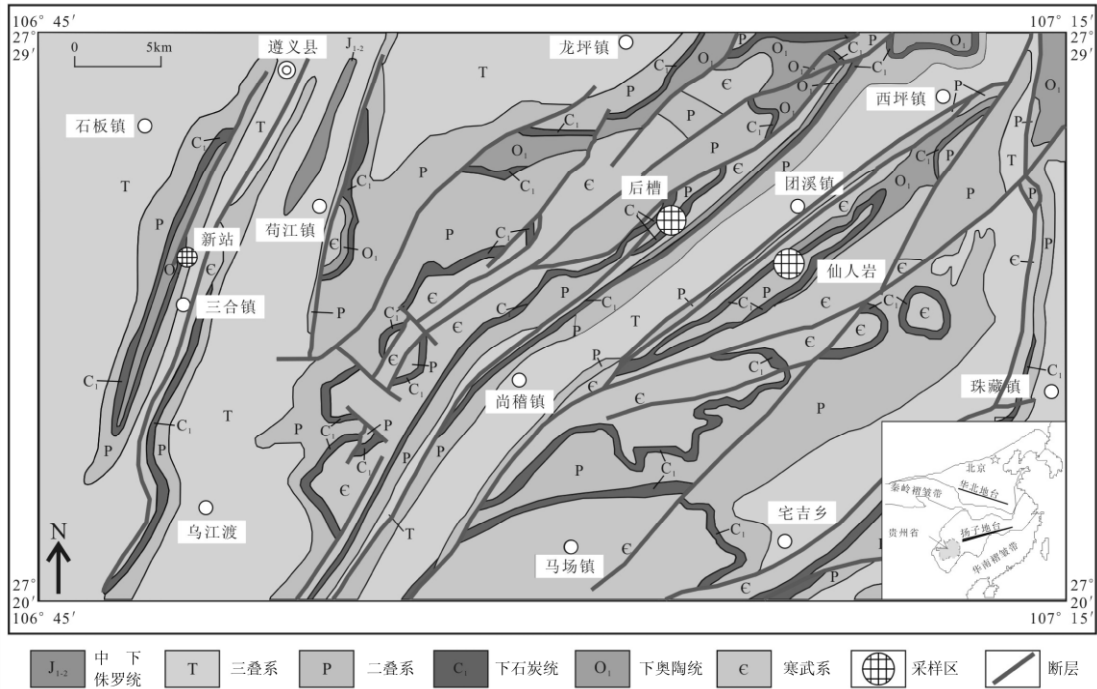


图 1 贵州省遵义铝土矿区地质简图

Fig. 1. Simplified geological map of Zunyi bauxite deposit, Guizhou Province, China.

娄山关群 (C<sub>2-3ls</sub>)、下奥陶统桐梓组 (O<sub>1t</sub>) 呈假整合或微角度不整合接触, 与上覆下二叠统梁山组 (P<sub>1l</sub>) 呈假整合接触, 缺失中、上志留统、泥盆系及中、上石炭统; 后槽矿区含矿岩系与下伏中上寒武统娄山关群 (C<sub>2-3ls</sub>)、下奥陶统桐梓组 (O<sub>1t</sub>) 呈假整合接触, 与上覆下二叠统梁山组 (P<sub>1l</sub>) 呈假整合接触, 缺失中、上奥陶统、志留系、泥盆系及中、上石炭统; 新站矿区含矿岩系与下伏下奥陶统湄潭组 (O<sub>1m</sub>)、桐梓组 (O<sub>1t</sub>) 呈假整合接触, 与上覆下二叠统梁山组 (P<sub>1l</sub>) 呈假整合接触, 缺失中、上志留统、泥盆系及中、上石炭统。表明在含矿地层形成之前, 存在长期的沉积间断过程。含矿岩系的分布和展向分别受矿区仙人岩向斜、两路口背斜和两路口断裂及马石岩背斜和刀靶水断层控制。

## 2 矿床地质特征

### 2.1 含矿岩系物质组成与结构特征

#### 2.1.1 仙人岩矿区含矿岩系

含矿岩系下石炭统九架炉组 (C<sub>1j</sub>) 主要由铝土矿和粘土岩组成, 其上上覆下二叠统梁山组 (P<sub>1l</sub>) 碳质页岩, 下伏中上寒武统娄山关群 (C<sub>2-3ls</sub>)、下奥陶统桐梓组 (O<sub>1t</sub>) 白云岩、粘土页岩。按岩性变化, 含矿岩系自下而上划分为 7 个小层 (图 2a): 灰白色碎屑状铝土矿, 碎屑颗

粒粒径约 2 mm, 变化不大, 厚约 4 m; 灰白色致密块状铝土矿, 厚约 2.5 m; 灰白色豆鲕状铝土矿, 位于矿体边缘, 被断层错断, 厚约 3.6 m; 铝质粘土岩, 含黄铁矿, 位于断层裂隙中, 厚约 3 m; 灰绿色高岭石, 厚约 1.8 m; 绿泥石化粘土岩, 厚约 5.6 m; 高岭石硬质粘土岩, 与碳质页岩呈假整合接触, 厚约 2 m。

#### 2.1.2 后槽矿区含矿岩系

含矿岩系主要由粘土岩和铝土岩夹铝土矿组成, 与上覆下二叠统梁山组 (P<sub>1l</sub>) 碳质页岩、下伏中上寒武统娄山关群 (C<sub>2-3ls</sub>) 和下奥陶统桐梓组 (O<sub>1t</sub>) 白云岩均呈假整合接触。该含矿岩系自下而上按岩性变化分为 5 个小层 (图 2b): 灰白色碎屑状铝土矿, 直接覆于白云岩之上, 具碎屑状结构, 厚约 3.2 m; 灰白色致密块状铝土矿, 与上覆铝土矿层渐变, 厚约 2 m; 灰白色豆状铝土矿, 具豆状结构, 豆粒粒径约 2~4 mm, 厚约 1.8 m; 灰白、浅灰色块状铝土矿, 具块状结构, 地表部分风化后呈土状、半土状, 厚约 3.6 m; 灰绿、灰色致密状铝土岩、高岭土岩, 具块状结构, 厚约 2 m。

#### 2.1.3 新站矿区含矿岩系

含矿岩系由粘土岩、含铝土质粘土岩夹铝土矿组成, 其上覆下二叠统梁山组 (P<sub>1l</sub>) 黑色页岩、

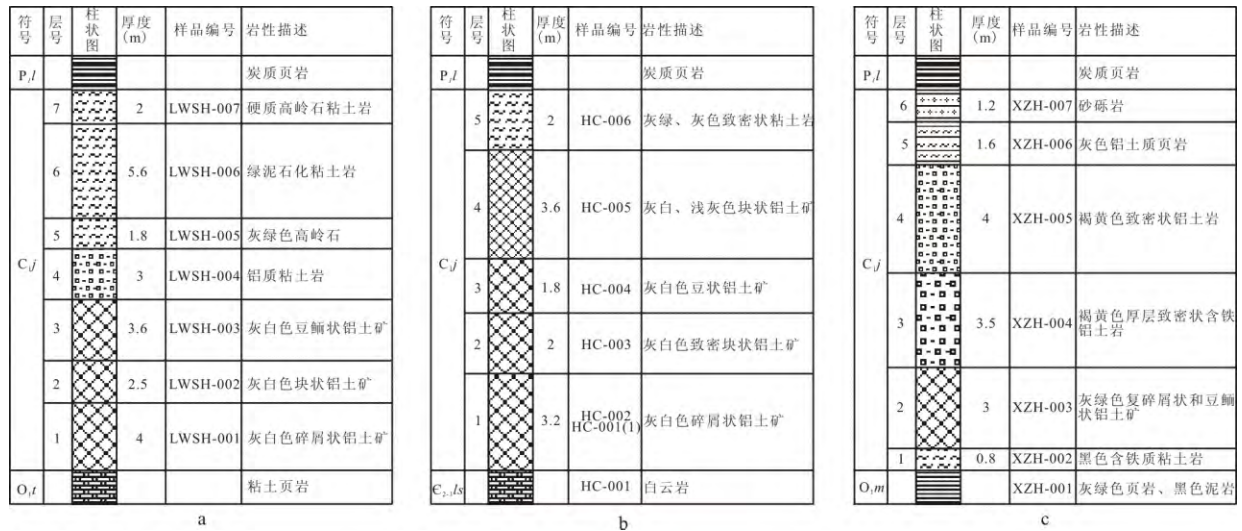


图 2 贵州省遵义铝土矿区含矿岩系地层柱状图 (野外实测 2012)

Fig. 2. Stratigraphic column of ore-bearing rock series in the Zunyi bauxite, Guizhou Province, China.

碳质页岩, 下伏下奥陶统湄潭组 (O<sub>1</sub>m) 灰绿色页岩、黑色泥岩、桐梓组 (O<sub>1</sub>t)。该含矿岩系由下至上按岩性划分为 6 小层 (图 2c): 黑色含铁质粘土岩, 厚约 0.8 m; 灰绿色复碎屑状和豆鲕状铝土矿, 具碎屑、鲕粒结构, 厚约 3 m; 褐黄色厚层致密状含铁铝土岩, 与上覆铝土矿层呈渐变过渡, 为高铁铝土矿层, 厚约 3.5 m; 褐黄色致密状铝土岩、粘土岩, 厚约 4 m; 灰色铝土质页岩, 时夹黑色碳质页岩, 含黄铁矿, 厚约 1.6 m; 砂砾岩, 厚约 1.2 m。

## 2.2 矿床特征

### 2.2.1 仙人岩矿区矿床特征

仙人岩铝土矿产于下石炭统九架炉组 (C<sub>1</sub>j), 矿体呈层状、似层状、透镜状、漏斗状或不规则状产出, 分布于仙人岩向斜两翼, 其产状受下伏基底白云岩的岩溶侵蚀不整合面控制, 沿走向矿体呈“串珠”状产出。矿体形态大小、厚度及品位也受含矿岩系之下古岩溶侵蚀面的控制, 其变化较大。矿体结构简单, 一般为单层矿, 局部地段见两层矿, 产状与地层基本一致, 平面外形不规则, 由粘土岩组成的边缘无矿地段常呈港湾状伸入矿体内部, 矿体形态较简单, 但沿走向方向延伸不稳定。

含矿岩系中, 主要分布有碎屑状、致密块状及豆鲕状铝土矿, 其次有浅紫灰、深灰、灰、灰绿色含硫铁矿粘土岩、粘土岩、少部分铁质粘土岩、铝土质粘土岩。铝土矿产于该组的中、上部, 硫铁矿多产于下部。其厚度受沉积底板控制, 厚度变化大。与下伏娄山关群、桐梓组地层呈假整合或微角度不

整合接触。厚度 0.70~61.78 m。分析测试得出铝土矿主要化学成分有 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 及 TiO<sub>2</sub>; 平均品位: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 66.03%, SiO<sub>2</sub> 13.84%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.61%, TiO<sub>2</sub> 3.70%, Al/Si 比值 8.11。

矿石结构主要有碎屑状结构、豆鲕状结构及碎屑状和豆鲕状的复合结构, 隐晶结构少见。碎屑状结构由砾、砂屑组成, 多呈椭圆形, 部分为不规则形; 豆鲕状结构由呈椭圆形和球形的豆、鲕组成; 复砾、豆鲕结构仅于沙坝附近矿体出现, 产于碳质页岩之下。矿石主要构造有中—厚层状构造、豆鲕状构造、土状、半土状构造、斜层理构造、微波状层理和层纹状构造等。

含矿岩系顶部为与其假整合接触的梁山组黑色页岩, 上覆栖霞组深灰、灰黑色厚层至块状含生物碎屑灰岩, 底部夹黑色燧石条带或结核, 偶含星点状硫铁矿。底部为含铁岩段, 与下伏中上寒武统娄山关群 (C<sub>2-3</sub>ls)、下奥陶统桐梓组 (O<sub>1</sub>t) 浅灰色微晶至细晶白云岩、粘土页岩假整合或微角度不整合接触。

### 2.2.2 后槽矿区矿床特征

后槽铝土矿赋存于下石炭统九架炉组 (C<sub>1</sub>j) 中上部, 下部也有少数矿体产出。矿体呈似层状、透镜状、漏斗状或不规则状产出, 矿体底界距基底岩溶侵蚀面 0~63.98 m, 层位稳定, 产状平缓, 大致与围岩产状一致。矿体形态、大小、厚度及品位受基底古岩溶洼地的形态和大小的控制。往往在基底岩溶低洼处矿体厚度大, 连续性好, 层数多, 且矿石质量亦佳, 而凸起部位或相对隆起区矿体厚度薄, 成单层矿, 矿石品位较低而形成

无矿“天窗”(带)。

矿石中矿物主要为三水硬铝石, 偶有少量一水软铝石, 其次为粘土矿物, 包括伊利石、蒙脱石、高岭石; 再次为褐铁矿、纤铁矿、黄铁矿、石英、方解石等; 局部矿层底部矿石中黄铁矿较多。经分析矿石中主要成分为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$ , 次要成分为  $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{NaO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{S}$ 、 $\text{P}$ 、 $\text{Ga}$  等; 平均品位:  $\text{Al}_3\text{O}_2$  69.70%,  $\text{SiO}_2$  11.16%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  0.83%,  $\text{TiO}_2$  2.87%,  $\text{Al/Si}$  比值 13.63。

铝土矿由泥晶基质和粒屑两部份组成。根据这两部份比例不同划分有 4 种结构类型: 碎屑结构、豆鲕结构、复碎屑结构及泥晶结构。矿区的矿石构造为碎屑状、豆鲕状、块状、土状、半土状、斜交层理构造及藻铝叠层石状构造。碎屑状矿石一般分布在矿体顶部, 致密状矿石分布在矿体的边缘和矿体顶部。

含矿岩系顶板为下二叠统梁山组 ( $\text{P}_1\text{l}$ ) 碳质页岩, 顶板与含矿层的界线较清楚, 接触面平整, 与含矿层呈整合接触, 对含矿层的完整性无影响。含矿岩系底板为中上寒武统娄山关群 ( $\text{C}_{2-3}\text{ls}$ )、下奥陶统桐梓组 ( $\text{O}_{1\text{t}}$ ) 白云岩, 底板与含矿层接触面平整, 界线明显, 两者呈假整合接触, 含矿层的完整性也不受其底板的影响。

### 2.2.3 新站矿区矿床特征

铝土矿层主要产于下石炭统九架炉组 ( $\text{C}_{1\text{j}}$ ) 的含铝岩系中, 产状与围岩一致, 走向南东, 倾向北西, 产状倒转, 倾角  $75^\circ\sim 80^\circ$  左右。矿体呈透镜状、扁豆状、囊状产出, 沿走向呈“串珠”状产出。矿体结构简单, 一般为单层矿, 但沿走向方向延伸不稳定。矿体规模较小, 其形态大小、厚度及品位均受矿系之下古岩溶侵蚀面的控制, 变化较大。

铝土矿矿石中主要矿物成分为一水硬铝石, 其次为粘土矿物 (水云母、高岭石、绿泥石、蒙脱石等), 也有黄铁矿、褐铁矿、水针铁矿、锐钛矿和少量电气石、锆石等。测试分析结果显示铝土矿中主要化学成分为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 其次是  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 含少量  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{S}$ 、 $\text{P}$ , 并伴生稀有元素  $\text{Ga}$ 、 $\text{REE}$  等; 平均品位:  $\text{Al}_3\text{O}_2$  67.17%,  $\text{SiO}_2$  14.49%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  13.30%,  $\text{TiO}_2$  2.76%,  $\text{Al/Si}$  比值 10.11。

矿石主要有碎屑状结构、豆鲕状结构和致密状结构等。碎屑状结构中碎屑呈椭圆形或不规则形, 碎屑边缘轮廓不清, 粒径大小不等, 一般  $0.124\sim 15\text{ mm}$ , 部分  $0.0789\sim 0.62\text{ mm}$ ; 鲕状结

构常与碎屑状结构混存, 无一定规律, 大的碎屑或大鲕粒中常又由小的鲕粒组成; 致密状结构质硬, 呈块状, 表面细腻, 主要见于矿体顶部过渡带。矿石构造主要为厚层、块状构造, 由于地表浅部矿石受风化淋滤作用, 质地疏松, 故可见土状、半土状次生构造。

矿体的直接顶板主要为致密状铝土岩、粘土岩, 其次有黑色页岩和碳质页岩, 岩石稳固性均较差; 间接顶板栖霞组厚层至块状生物碎屑灰岩, 岩石完整稳固性较好。矿体的直接底板含铝土质粘土岩、碎屑状水云母粘土岩等稳固性差; 间接底板湄潭组页岩稳固性较差, 而红花园组厚层状灰岩和桐梓组及娄山关群中厚层状白云岩, 岩石完整稳固性相对较好。

## 3 矿物学特征

研究区全部样品已进行薄片磨制并完成偏光显微镜观察。选取 20 件样品于中科院地化所完成 X 射线粉晶衍射分析 (XRD), 矿物组半定量计算的方法源于 K 值法<sup>[8]</sup>, 实验仪器为 D/Max-2200 型 X 射线衍射仪,  $\text{Cu K}_\alpha$  辐射, 电压为 40 kV, 电流为 20 mA, 石墨单色器滤波, 扫描范围为  $2^\circ\sim 60^\circ$ , 扫描步长为  $0.04^\circ$ , 扫描速度为  $10^\circ/\text{min}$ ; 另选取 9 件样品于中国科学院地球化学研究所完成扫描电子显微镜分析 (SEM), 使用仪器为 JSM-6460LV 低、高真空数字化扫描电子显微镜, 高真空分辨率为 3.0 nm, 低真空分辨率为 4 nm, 加速电压  $0.3\sim 30\text{ kV}$ 。

研究区铝土矿建造由灰白色、灰绿色铝土岩、灰色、灰绿色粘土岩和碳质页岩组成厚层状构造, 且不整合于基底岩组之上。单个矿体厚度变化大, 走向延伸不等, 有的矿层可见尖灭。矿层中矿物结晶程度差, 含大量沉积碎屑。X 射线粉晶衍射分析结果显示, 研究区铝土矿矿石矿物组合较为简单, 以一水硬铝石为主 (图 3、表 1), 次要矿物为粘土矿物包括高岭石、蒙脱石及伊利石, 部分样品含少量的勃姆石、锐钛矿、普通角闪石、石英、方解石、白云石/或含铁矿物。仙人岩矿区的香炉山组中上部可见夹黄铁矿的绿泥石夹层 (图 4a, 表 1) 与石膏 (表 1); 新站矿区的香炉山组底部及矿层顶部见明显的黑色磁铁矿 (图 4b、c, 表 1)。

X 射线粉晶衍射半定量分析结果 (表 1) 显示, 仙人岩矿区一水硬铝石含量为  $69.02\%\sim 93.21\%$ , 均值为  $81.70\%$ ; 粘土矿物含量为  $4.37\%\sim 21.26\%$ ,

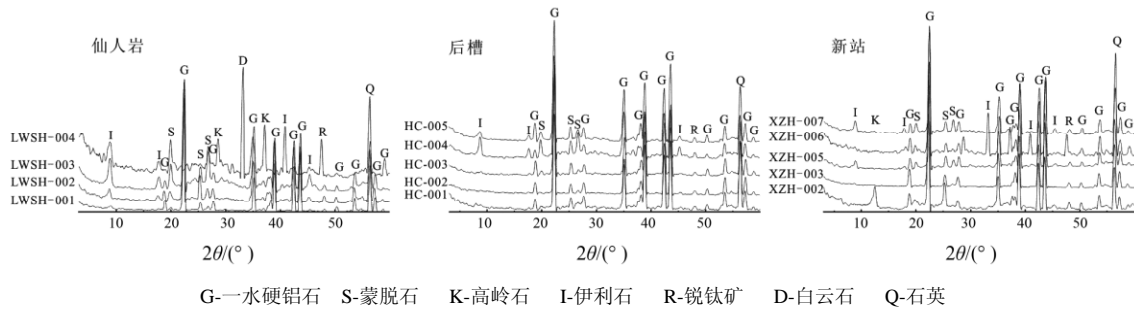


图 3 贵州省遵义铝土矿区矿物 XRD 图谱  
 Fig. 3. X-ray diffraction patterns of Zunyi bauxite deposit, Guizhou Province, China.

表 1 典型铝土矿样品矿物组成 X 射线衍射半定量分析结果 (w<sub>B</sub>/%)

Table 1. Semi-quantitative mineralogical analyses of typical bauxite samples

样品	一水硬铝石	蒙脱石	伊利石	高岭石	锐钛矿	勃姆石	石英
LWSH-001	93.21	2.62	1.75				1.82
LWSH-002	82.88	4.32	5.24	0.6			4
LWSH-003	69.02	2	18.62	0.64			7.15
LWSH-004	2.86	10.25	19.16	1.34			6
HC-001(1)	88.17	4.86			2.11		3.24
HC-002	95.31	1.22			1.85		1.62
HC-003	91.16	3.18	1.42	1	2.1		1.14
HC-004	87.25	-	7.25		-		4.16
XZH-002	79.44	5.62		13.12			1.1
XZH-003	97.23		1.52				1.25
XZH-004	26.88	6.18	3.52	33.13		1.62	3.15
样品	角闪石	方解石	白云母	黄铁矿	磁铁矿	石膏	铁矿物
LWSH-001	0.6						
LWSH-002	0.51						2.45
LWSH-003		1.12	1			0.45	-
LWSH-004	1	0.82	3.76	53.69		1.12	
HC-001(1)	1.62						
HC-002							
HC-003							
HC-004			1.34				
XZH-002							0.72
XZH-003							
XZH-004	3						22.52

注：“-”代表检测出该矿物，但含量低未计算。

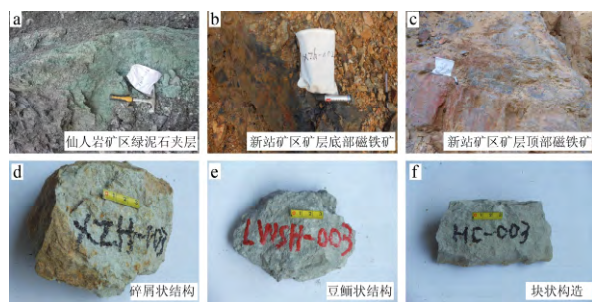


图 4 贵州省遵义铝土矿矿石结构构造图  
 Fig. 4. Ore structure of Zunyi bauxite, Guizhou Province, China.

均值为 11.93%；石英含量为 1.82%~7.15%，均值为 4.32%，铝土矿层顶部见黄铁矿及石膏。后槽矿区一水硬铝石含量为 87.25%~95.31%，均值为 91.24%；粘土矿物含量为 1.22%~7.25%，均值为 4.69%；石英含量为 1.14%~4.16%，均值为 2.31%，矿层中可见锐钛矿。新站矿区一水硬铝石含量为 79.44%~97.23%，均值为 88.34%；粘土矿物含量为 1.52%~18.74%，均值为 10.13%；石英含量为 1.1%~1.25%，均值为 1.18%，矿层顶部出现勃姆石和磁铁矿。总的来说，含铝土矿层呈现由下到上粘土矿物含量增加而一水硬铝石含量减少的趋势，石英含量与一水硬铝石含量呈一定的负相关关系。

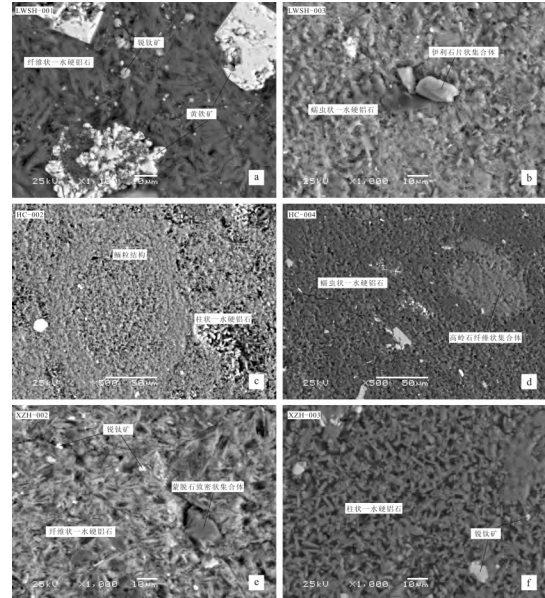
矿石颜色多样，可见灰白色、灰色及灰绿色

(图 4); 矿石结构以碎屑状结构 (图 4d) 及豆鲕状结构 (图 4e) 为主, 粒状结构、胶状结构、隐晶及微晶结构次之; 矿石构造主要为块状结构 (图 4f) 和土状构造, 也见层状构造及孔隙状构造。扫描电镜和偏光显微镜研究表明, 香炉山组含矿层中一水硬铝石呈柱状 (图 5c、f)、纤维状 (图 5a、e) 及蠕虫状 (图 5b、d), 其中柱状晶体晶形较好, 它的集合体组成鲕粒 (图 5c); 风化后的高岭石呈纤维状集合体 (图 5d); 伊利石为片状集合体 (图 5b); 蒙脱石呈致密状集合体 (图 5e) 充填于一水硬铝石的缝隙中; 黄铁矿遭受风化后保留球形草莓状及立方体结构 (图 5a); 锐钛矿呈粒状 (图 5a) 分布于矿石中。由此看出, 在铝土矿成矿过程中, 源岩随着风化淋滤作用的进行不断被风化分解, 残留成分各有不同, 不同层位形成的一水硬铝石晶体形态有所差异。

### 4 矿床地球化学特征

采集的实验样品均位于下石炭统九架炉组 (C<sub>1j</sub>), 实测剖面分别位于遵义县茅栗镇仙人岩矿区老娃山矿点、遵义县团溪镇后槽矿区及遵义县三合区新站矿区, 按不同岩性和层位自下而上各矿区分别采集 7 个样品 (按岩性变化取样品)。样品全岩的主量元素在澳实分析检测 (广州) 有限公司完成, 以 XRF 法测定, 为硅酸盐岩常规分析, 采用硼酸锂/偏硼酸锂熔融, X 荧光光谱分析, 检测范围在 0.01% ~ 100% 之间。微量元素以

ICP-MS 测定, 为微量稀土、稀有元素专门分析, 采用硼酸锂熔融、等离子质谱定量, 检测范围在  $0.01 \times 10^{-6} \sim 10000 \times 10^{-6}$  之间。分析结果见表 2 和表 3。



a. 纤维状一水硬铝石, 其间有球形草莓状和立方体状黄铁矿及粒状锐钛矿分布; b. 蠕虫状一水硬铝石, 可见伊利石片状集合体; c. 柱状一水硬铝石, 形成鲕粒结构; d. 蠕虫状一水硬铝石, 高岭石纤维状集合体分布其中; e. 纤维状一水硬铝石, 蒙脱石致密状集合体及粒状锐钛矿分布其间; f. 柱状一水硬铝石, 晶型较完整

图 5 贵州省遵义铝土矿扫描电镜照片  
Fig. 5. SEM photographs for Zunyi bauxite, Guizhou Province, China.

表 2 贵州省遵义铝土矿主量元素分析结果 (w<sub>B</sub>%)

Table 2. Analytical results of major elements from Zunyi bauxite deposit, Guizhou Province, China

样品编号	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZrO <sub>2</sub>	Total	LOI	CIA
LWSH-001	76.1	4.61	0.66	2.75	0.03	0.07	0.92	0.11	0.03	0.03	0.49	0.07	0.1	100	14.04	98.58
LWSH-002	66.5	11.9	0.59	5.51	0.06	0.06	2.54	0.18	0.03	0.07	0.58	0.04	0.13	100	11.8	95.81
LWSH-003	55.5	25	0.57	2.83	0.09	0.06	5.35	0.37	0.03	0.03	0.52	0.11	0.1	99.96	9.39	90.24
LWSH-004	18.05	25	29.7	0.6	0.13	0.02	4.54	0.49	0.04	0.03	5.33	0.11	0.02	103.1	19	77.58
LWSH-005	36.1	44.6	0.61	2.06	0.11	0.03	>6.3	0.32	0.06	0.09	0.93	0.05	0.06	100.1	5.62	83.53
LWSH-006	13.35	28.2	29.6	0.47	0.37	0.01	4.3	1.08	0.05	0.2	4.43	0.02	0.01	100.05	17.97	71.16
LWSH-007	38.5	44.7	0.35	1.66	0.04	0.03	0.46	0.08	<0.01	0.05	0.57	0.02	0.03	99.95	13.45	98.50
HC-001	57.4	22.8	0.96	3.24	0.02	0.04	4.52	0.26	0.05	0.02	0.24	0.04	0.11	99.92	10.2	91.97
HC-001(1)	73.6	6.9	1.12	3.03	0.01	0.05	1.28	0.13	0.04	0.02	0.1	0.05	0.1	99.99	13.55	98.04
HC-002	79	1.77	1.02	2.9	0.01	0.07	0.27	0.06	0.03	0.07	0.08	0.11	0.09	99.97	14.48	99.55
HC-003	76.1	5.3	0.62	2.57	0.01	0.03	1.02	0.1	0.03	0.06	0.05	0.05	0.05	99.95	13.96	98.48
HC-004	61.7	19.15	0.79	2.79	0.03	0.06	4.11	0.25	0.04	0.06	0.01	0.07	0.08	99.97	10.78	93.11
HC-005	70.4	11.05	0.49	2.68	0.01	0.03	2.33	0.17	0.03	0.03	0.01	0.05	0.05	99.95	12.59	96.45
HC-006	40.7	41.5	0.5	1.48	0.02	0.02	>6.3	0.33	0.05	0.08	0.08	0.02	0.02	100.05	6.36	85.44
XZH-001	42	38.9	1.04	1.84	0.03	0.02	>6.3	0.64	0.05	0.06	0.12	0.05	0.03	99.96	7.65	85.79
XZH-002	59.9	12	7.94	2.81	0.03	0.04	0.17	1	0.03	0.11	0.24	0.05	0.07	99.97	15.56	99.52
XZH-003	77.8	2.26	0.75	3.86	0.01	0.07	0.36	0.1	0.04	0.04	0.07	0.05	0.11	99.98	14.46	99.39
XZH-004	23.7	8.44	55.2	1.1	0.01	0.04	0.02	0.84	0.07	0.05	0.29	0.06	0.03	99.98	10.1	99.35
XZH-005	69.5	9.34	2.67	2.8	0.01	0.05	1.83	0.17	0.04	0.07	0.26	0.06	0.06	99.98	13.1	97.11
XZH-006	61.5	4.34	10.6	1.79	0.01	0.07	0.84	0.12	0.04	0.08	2.84	0.06	0.05	100	17.67	98.41
XZH-007	68.6	11.65	1.55	2.34	0.01	0.06	2.55	0.19	0.04	0.06	0.33	0.06	0.06	99.94	12.41	96.02

注: 样品岩性见图 2; CIA=[Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CaO-10/3P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)]×100<sup>[9]</sup>.

仙人岩矿区矿石化学成分  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为 55.5%~76.1%，平均为 66.0%； $w(\text{SiO}_2)$  为 4.61%~25%，平均为 13.84%； $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$  为 0.57%~0.66%，平均为 0.61%； $w(\text{TiO}_2)$  为 2.75%~5.51%，平均为 3.70%；Al/Si 为 8.11。

后槽矿区矿石化学成分  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为 57.4%~79%，平均为 69.7%； $w(\text{SiO}_2)$  为 5.3%~22.8%，平均为 11.16%； $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$  为 0.49%~1.12%，平均为 0.83%； $w(\text{TiO}_2)$  为 2.57%~3.24%，平均为 2.87%；Al/Si 为 13.63。

新站矿区矿石化学成分  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为 42%~77.8%，平均为 67.2%； $w(\text{SiO}_2)$  为 2.26%~38.9%，平均为 14.49%； $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$  为 0.75%~55.2%，平均为 13.29%； $w(\text{TiO}_2)$  为 1.1%~3.86%，平均为 2.76%；Al/Si 为 10.11。在分析样品中， $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、

$\text{SiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$  等氧化物的含量是最高的。

研究区铝土矿均以低铁型为主，中高铁型较少。矿石中钙碱性和碱性元素变化小，且均处于较低的范围。

在连续剖面的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量相关性图解(图 6)中， $\text{Al}_2\text{O}_3$  或与  $\text{SiO}_2$  或与  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  呈负相关关系。仙人岩矿区  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  相关系数  $R^2$  分别为-0.6100 和-0.7968；后槽矿区  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与  $\text{SiO}_2$  相关系数  $R^2$  为-0.9990；新站矿区  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  相关系数  $R^2$  为-0.8004。这些充分说明了铝土矿成矿过程是一个去硅除铁富铝的过程，即随着铝土矿矿化过程的进行，相对易溶的 Si、Fe 等元素在适宜的条件下被淋滤带走，而相对难溶的 Al 沉淀聚集，从而形成铝土矿。

表 3 贵州省遵义铝土矿微量元素组成 ( $w_B/10^{-6}$ )

Table 3. Trace elements compositions of Zunyi bauxite deposit, Guizhou Province, China

样品	LWSH-001	LWSH-002	LWSH-003	LWSH-004	LWSH-005	LWSH-006	LWSH-007	HC-001	HC-001 (1)	HC-002
Ba	20.3	44.9	52.6	72.9	185	117	47.9	174	50.3	19.6
Cr	550	470	500	180	260	90	260	310	450	570
Cs	0.66	1.42	2.91	5.78	6.29	16.4	0.57	1.06	0.18	0.13
Ga	115.5	110	93.3	25.5	42.3	27.4	35.5	89.2	116.5	129
Hf	26.3	32.2	24.5	4.5	14	2.4	9.5	26.4	26.1	24.3
Nb	54.7	108	55.1	12.5	40.1	8.2	30.9	66.6	65.2	58.4
Rb	10.3	27	52.2	62.1	86.3	100	5.4	37.6	13.1	3.7
Sn	15	16	14	5	22	3	8	14	17	14
Sr	40.3	181	74.3	56.8	270	112	166	35.6	31.9	180.5
Ta	4.4	9.2	4.7	1	3.4	0.7	2.6	5.6	5.2	4.6
Th	102	102.5	94.3	53.2	49.6	10.5	39.4	60.1	94.5	104.5
Tl	<0.5	0.8	<0.5	<0.5	0.7	0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
U	15.1	16.35	19	7.43	9.66	3.88	6.81	14.35	12.1	11.4
V	419	212	647	657	306	128	119	241	330	675
W	7	10	6	6	4	1	4	11	10	7
Zr	980	1220	910	170	510	90	350	990	990	930
La	9.6	87.7	23.3	23.4	105.5	41.9	65.8	15.6	9.4	33.1
Ce	18.2	169	45	35.4	214	78.6	107.5	28.8	21.2	61.6
Pr	1.66	12.35	3.46	4.97	27.7	8.58	11.75	2.99	1.96	4.93
Nd	5.4	32.7	9.3	17.7	101.5	31.6	40	10.4	6.8	15
Sm	1.42	5.6	1.67	3.78	17.5	6.64	6.61	2.2	1.65	3.84
Eu	0.43	1.2	0.4	1	3.2	1.58	1.25	0.57	0.46	0.97
Gd	2.66	4.93	2.8	3.63	13.15	7.74	5.2	3.97	3.26	5.09
Tb	0.61	0.88	0.66	0.6	1.61	0.99	0.68	0.85	0.77	1
Dy	4.69	6.03	4.97	3.65	6.78	5.06	3.42	6.1	5.51	6.61
Ho	1.11	1.48	1.22	0.78	1.23	0.98	0.66	1.43	1.35	1.45
Er	3.79	5.13	4.1	2.51	3.75	2.56	2.1	4.79	4.48	4.65
Tm	0.63	0.86	0.68	0.42	0.6	0.35	0.34	0.79	0.73	0.74
Yb	4.35	6.4	4.74	2.7	4.09	2.11	2.49	5.58	5.08	4.95
Lu	0.64	0.99	0.7	0.36	0.58	0.27	0.37	0.83	0.77	0.73
Y	30.8	40.2	33.8	16.7	25.3	27.1	15.8	39.7	38.2	41.6
ΣREE	85.99	375.45	136.8	117.6	526.49	216.06	263.97	124.6	101.62	186.26
ΣLREE	36.71	308.55	83.13	86.25	469.4	168.9	232.91	60.56	41.47	119.44
ΣHREE	49.28	66.9	53.67	31.35	57.09	47.16	31.06	64.04	60.15	66.82
ΣLREE/ΣHREE	0.74	4.61	1.55	2.75	8.22	3.58	7.50	0.95	0.69	1.79
Ce/Ce*	1.01	1.11	1.10	0.75	0.93	0.93	0.85	0.94	1.13	1.03
Eu/Eu*	0.86	0.97	0.71	1.19	0.96	1.09	0.97	0.78	0.75	0.93

续表 3

样品	HC-003	HC-004	HC-005	HC-006	XZH-001	XZH-002	XZH-003	XZH-004	XZH-005	XZH-006	XZH-007
Ba	17.6	316	169	268	375	35.6	21.5	15.1	116.5	70.6	194.5
Cr	240	490	280	170	140	350	550	250	380	510	480
Cs	0.21	1.21	0.33	2.27	3.18	0.1	0.09	0.1	0.79	0.52	1.01
Ga	88.3	139.5	105	41.2	56.9	105.5	130	42.3	98.2	142.5	119
Hf	13.1	19	13.6	5.5	7.8	17.3	25.9	6.1	16	12.6	16
Nb	51	55.9	55.8	28.3	37.4	53.6	72.8	18.4	53.7	37.7	46.5
Rb	9	44.4	22	81.7	65.3	2.5	4.2	0.5	23.6	9.9	28.9
Sn	16	15	15	7	12	15	15	6	14	13	12
Sr	122	134	34	360	134	186	38.7	53	125	107.5	65.5
Ta	4.3	4.7	4.7	2.4	3.1	4.4	5.8	1.4	4.6	3	3.8
Th	45.1	95	52.7	28.3	42.2	66.2	104.5	62	64.5	89.9	86
Tl	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
U	19.2	12	11.75	4.1	9.25	6.7	11.25	15.65	10.35	8.35	9.39
V	294	433	279	114	302	317	319	340	344	390	352
W	8	9	8	4	13	12	9	2	9	5	6
Zr	470	700	500	200	280	650	980	230	600	470	590
La	72.6	63.2	12	116.5	94.4	69.4	12.9	21	58	41.2	53
Ce	170.5	139	24.3	198.5	390	140	26.4	43.3	97.2	106.5	78.8
Pr	14	17.5	2.95	19.95	16.55	12.4	2.72	5.34	9.97	16.8	8.15
Nd	34.2	57.8	11	60.4	38.3	39.9	9.9	18.9	30.3	75.9	25.2
Sm	5.48	7.21	2.78	9.32	6.4	8.92	3.07	4.17	4.81	15.85	4.56
Eu	1	1.17	0.61	1.76	1.41	2.78	0.72	1.11	0.98	2.86	0.79
Gd	4.86	5.48	3.75	6.09	4.19	9.66	4.13	4.51	4.42	17.65	4.15
Tb	0.96	0.91	0.82	0.8	0.59	1.23	0.92	0.69	0.77	3.11	0.83
Dy	6.19	5.44	5.75	3.87	3.01	6.51	6.42	3.7	5.15	17.55	5.63
Ho	1.35	1.2	1.26	0.75	0.62	1.29	1.46	0.72	1.13	3.33	1.32
Er	4.26	4.07	3.98	2.27	2.15	3.88	4.92	2.14	3.77	8.54	4.21
Tm	0.67	0.63	0.65	0.36	0.37	0.61	0.81	0.34	0.61	1.03	0.66
Yb	4.55	4.26	4.33	2.33	2.68	4.26	5.87	2.21	4.22	5.79	4.31
Lu	0.65	0.62	0.61	0.34	0.38	0.62	0.83	0.31	0.64	0.78	0.63
Y	33.3	32.6	33.3	19.5	13.2	38.3	40.1	19.2	28.2	106	34.9
ΣREE	354.57	341.09	108.09	442.74	574.25	339.76	121.17	127.64	250.17	422.89	227.14
ΣLREE	297.78	285.88	53.64	406.43	547.06	273.4	55.71	93.82	201.26	259.11	170.5
ΣHREE	56.79	55.21	54.45	36.31	27.19	66.36	65.46	33.82	48.91	163.78	56.64
ΣLREE/ΣHREE	5.24	5.18	0.99	11.19	20.12	4.12	0.85	2.77	4.11	1.58	3.01
Ce/Ce*	1.30	1.02	0.94	0.92	2.34	1.07	1.01	0.97	0.91	0.91	0.82
Eu/Eu*	0.79	0.79	0.76	1.01	1.16	1.47	0.81	1.18	0.91	0.75	0.74

注: 样品岩性见图 2; Ce\*是基于 La 和 Pr 内插的 Ce 数值,  $Ce/Ce^* = (3Ce/Ce_{NASC}) / (2La/La_{NASC} + Pr/Pr_{NASC})$ ; Eu\*是基于 Sm 和 Gd 内插的 Eu 数值,  $Eu/Eu^* = (3Eu/Eu_{NASC}) / (2Sm/Sm_{NASC} + Gd/Gd_{NASC})^{[10]}$ .

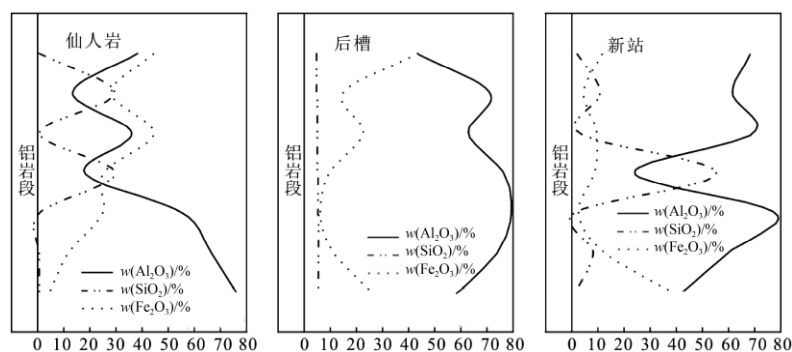


图 6 贵州省遵义铝土矿 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 相关性图解

Fig. 6. Correlation graph of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for Zunyi bauxite deposit, Guizhou Province, China.

Zr、Hf、Nb、Ta 均为地球化学性质不活泼的稳定元素, 在表生条件下其氧化物较稳定且难以溶解, 可残留堆积下来, 在成矿物源相同的各类

岩、矿石中, Zr、Hf、Nb、Ta 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的比值一般很接近<sup>[11]</sup>, 在氧化条件下 Al 和 Ti 也相对比较稳定。因此非活泼性微量元素与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的比值可



以用来探讨铝土矿在成岩成矿过程中的物质来源及地质环境<sup>[12]</sup>。在遵义铝土矿实测 3 个矿区各自的含矿岩系中,  $Al_2O_3/TiO_2$ 、 $Al_2O_3/Zr$ 、 $Al_2O_3/Hf$ 、 $Al_2O_3/Ta$ 、 $Al_2O_3/Nb$  比值都比较接近(表 4), 这反映了 3 矿区铝土矿各自的主要物质来源可能具同源性, 且后槽和新站矿区的这些比值与其基底相差不大, 说明基底可能是各自的源岩。同时, 稳定元素的正相关性越高, 说明其母岩的一致性越好<sup>[13-14]</sup>。铝土矿层中  $Al_2O_3$  与  $TiO_2$  呈正相关关系(图 7), 相关系数  $R^2$  分别为 0.8165、0.8797 和 0.8469, 3 矿区的总相关系数  $R^2$  为 0.7606, 这

也说明遵义铝土矿 3 矿区各自的物质来源极有可能是同源的。Nb、Ta、Zr、Hf 等被广泛用来追踪铝土矿的母岩<sup>[8]</sup>, 遵义铝土矿实测 3 矿区各自的含矿岩系中 Nb-Ta 和 Zr-Hf 正相关明显(图 8), 说明遵义铝土矿成矿母岩都经历了较为充分的

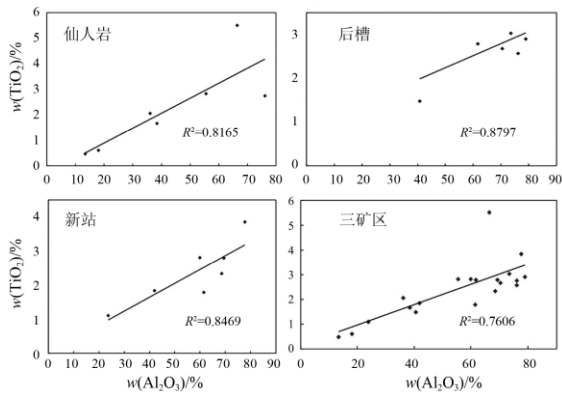


图 7 贵州省遵义铝土矿  $Al_2O_3-TiO_2$  相关性图解  
Fig. 7. Correlation graph of  $Al_2O_3-TiO_2$  for Zunyi bauxite deposit, Guizhou Province, China.

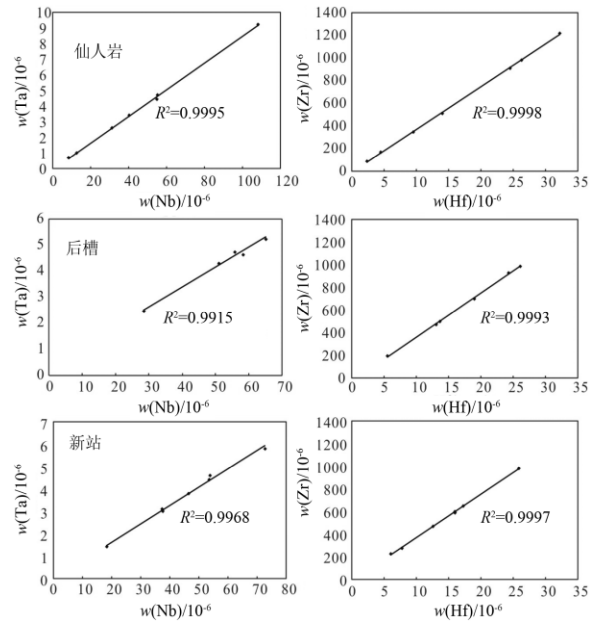


图 8 贵州省遵义铝土矿 Nb-Ta 和 Zr-Hf 相关图解  
Fig. 8. Correlations between Nb and Ta, and Zr and Hf from Zunyi bauxite deposit, Guizhou Province, China.

表 4 贵州省遵义铝土矿部分元素含量比值

Table 4. Specific ratios of some elements from Zunyi bauxite deposit, Guizhou Province, China

样品编号	$Al_2O_3/TiO_2$	$Al_2O_3/Zr$	$Al_2O_3/Hf$	$Al_2O_3/Ta$	$Al_2O_3/Nb$	$TiO_2/Zr$	$TiO_2/Nb$
LWSH-001	27.67	0.08	2.89	17.30	1.39	0.0028	0.0503
LWSH-002	12.07	0.05	2.07	7.23	0.62	0.0045	0.0510
LWSH-003	19.61	0.06	2.27	11.81	1.01	0.0031	0.0514
LWSH-004	30.08	0.11	4.01	18.05	1.44	0.0035	0.0480
LWSH-005	17.52	0.07	2.58	10.62	0.90	0.0040	0.0514
LWSH-006	28.40	0.15	5.56	19.07	1.63	0.0052	0.0573
LWSH-007	23.19	0.11	4.05	14.81	1.25	0.0047	0.0537
HC-001	17.72	0.06	2.17	10.25	0.86	0.0033	0.0486
HC-001 (1)	24.29	0.07	2.82	14.15	1.13	0.0031	0.0465
HC-002	27.24	0.08	3.25	17.17	1.35	0.0031	0.0497
HC-003	29.61	0.16	5.81	17.70	1.49	0.0055	0.0504
HC-004	22.11	0.09	3.25	13.13	1.10	0.0040	0.0499
HC-005	26.27	0.14	5.18	14.98	1.26	0.0054	0.0480
HC-006	27.50	0.20	7.40	16.96	1.44	0.0074	0.0523
XZH-001	22.83	0.15	5.38	13.55	1.12	0.0066	0.0492
XZH-002	21.32	0.09	3.46	13.61	1.12	0.0043	0.0524
XZH-003	20.16	0.08	3.00	13.41	1.07	0.0039	0.0530
XZH-004	21.55	0.10	3.89	16.93	1.29	0.0048	0.0598
XZH-005	24.82	0.12	4.34	15.11	1.29	0.0047	0.0521
XZH-006	34.36	0.13	4.88	20.50	1.63	0.0038	0.0475
XZH-007	29.32	0.12	4.29	18.05	1.48	0.0040	0.0503

均一化, 反映了成矿过程与古风化壳作用的一致性。Nesbitt<sup>[9]</sup>提出风化剥蚀指数 (CIA) 代表风化程度的高低, 次生的粘土矿物如高岭石的 CIA 指数为 100, 而伊利石和蒙脱石的 CIA 指数为 70~85。基底粘土岩的 CIA 指数大于 70, 而 3 个矿区的 CIA 指数分别位于 71.16~98.58、85.44~99.55 和 85.79~99.52 之间, 说明源岩经过强烈的风化分解, 铝土矿是强风化作用的产物。

在风化和热液过程中, Ti、Hf、Zr、Th、Nb 及 Cr 等被认为是稳定元素<sup>[15-17]</sup>。在铝土矿中, 稳定元素比值 (如 Ti/Zr) 类似于母岩, 因此可用稳定元素的比值来判别铝土矿母岩<sup>[18]</sup>。在遵义铝土矿中, 3 个矿区各自的含矿岩系中 Zr、Nb 与 TiO<sub>2</sub> 均呈正相关关系 (图 9), Zr、Nb 与 Ti 的正相关暗示基底岩石风化过程中 Zr、Nb 和 Ti 相对富集。在后槽和新站矿区的基底岩石和含矿岩系中, Ti/Zr 和 Ti/Nb 的比值十分接近, 并且这些值都靠近风化线 (WL)<sup>[19]</sup>, 表明遵义铝土矿后槽和新站矿区铝土矿的形成与其各自的基底桐梓

组 (O<sub>1t</sub>) 和湄潭组 (O<sub>1m</sub>) 粘土页岩有关, 说明基底可能是其源岩, 与上述结论一致。朱永红<sup>[20]</sup>等工作也显示仙人岩、后槽及新站铝土矿的形成与其基底粘土页岩有一定的联系。

稀土元素 (REE) 在海水和河水中的含量很低且不可溶, 所以碎屑岩中稀土元素含量主要受控于物源区的岩石成分, 沉积岩中稀土配分模式能够反映它们源区的地球化学特征。在遵义铝土矿 3 个实测剖面的含矿岩系中, 尽管稀土元素富集程度不高, 但各矿区的稀土配分模式具有一个共同特征, 那就是重稀土的稳定性高于轻稀土。此外, 3 个矿区 REE 配分模式中 Nd 均出现不同程度的负异常 (图 10), 这可能与稀土的四分组效应有关。仙人岩与后槽矿区 REE 配分模式十分相似且不同于新站矿区, 后槽和新站矿区矿石与基底岩石的 REE 配分模式十分相似。这些也说明了遵义铝土矿 3 个实测矿区铝土矿的形成与其各自的基底粘土页岩有关, 说明基底可能是其物源。

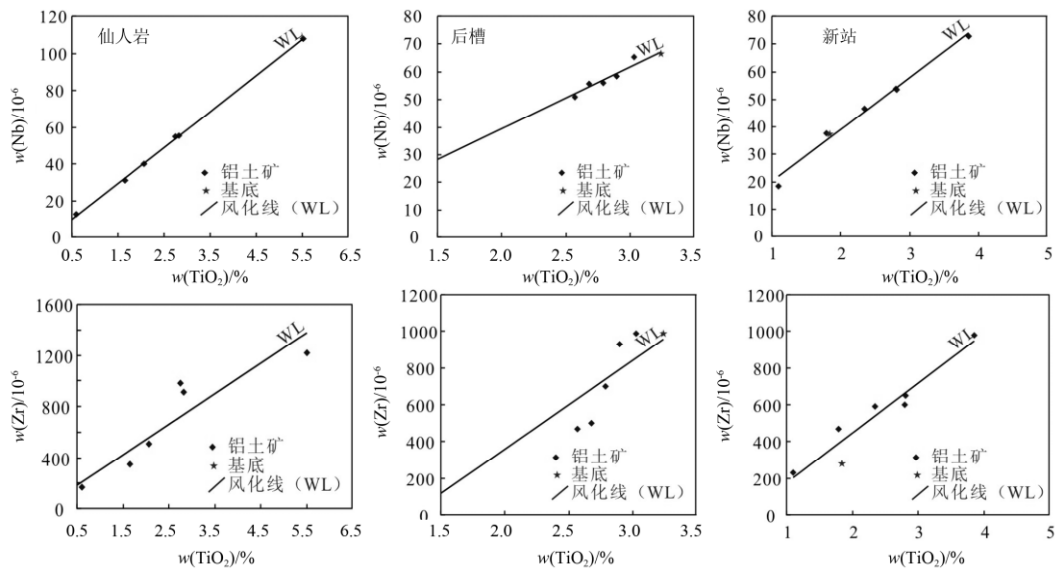


图 9 贵州省遵义铝土矿 Zr-TiO<sub>2</sub> 和 Nb-TiO<sub>2</sub> 相关性图解

Fig. 9. Diagrams of correlation between Zr-TiO<sub>2</sub> and Nb-TiO<sub>2</sub> for Zunyi bauxite deposit, Guizhou Province, China.

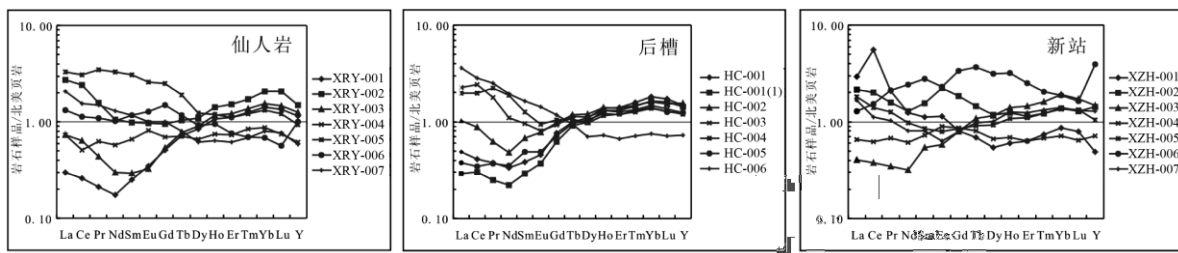


图 10 遵义铝土矿石北美页岩 (NASC) 标准化后的 REE 配分型式

Fig. 10. North America shale standardization REE patterns of bauxite rocks from Zunyi bauxite deposit, Guizhou Province, China.

稀土元素(REE)的原子结构、化学与晶体化学性质的相似性使其具有很独特的地球化学行为。稀土元素中Ce异常值 $Ce/Ce^* = 3Ce_{NASC} / (2La_{NASC} + Nd_{NASC})$ 能灵敏地反映沉积环境的氧化还原条件。当 $Ce > 1$ 时,表示Ce富集,为正异常,指示氧化环境;当 $Ce < 1$ 时,表示Ce亏损,为负异常,指示还原环境<sup>[21-22]</sup>。表3中看出仙人岩矿区 $Ce/Ce^*$ 介于1.01~1.11之间,平均值为1.07,表明Ce富集,为轻微正异常, $Eu/Eu^*$ 位于0.71~0.97之间,平均值为0.84,表明Eu亏损,为负异常;后槽矿区 $Ce/Ce^*$ 介于0.92~1.30之间,平均值为1.06,表明Ce富集,为轻微正异常, $Eu/Eu^*$ 位于0.75~1.01之间,平均值为0.84,表明Eu亏损,为负异常;新站矿区 $Ce/Ce^*$ 介于0.82~1.07之间,平均值为0.94,表明Ce亏损,为轻微负异常, $Eu/Eu^*$ 位于0.74~1.47之间,平均值为0.98,表明Eu亏损,为负异常。Ce的正异常是由Ce处于氧化环境的淋滤作用下, $Ce^{3+} \rightarrow Ce^{4+}$ 水解沉淀,其他REE被淋失造成的,且具有海相沉积的特点,而Ce的负异常则是由Ce处于还原环境下形成的。Eu的负异常是由缺氧环境下 $Eu^{3+}$ 被还原为 $Eu^{2+}$ 是沉积物中Eu发生分离所致。3个实测剖面中含矿岩系上部的含煤铝土页岩、碳质页岩和砂岩为一套海陆交互沉积建造,是一套以还原环境为主的沉积组合,含矿岩系中部铝土矿层的形成与海陆交互复杂多变的物理化学环境紧密相关。结合上述Ce和Eu异常分析可知,遵义铝土矿矿化过程中氧化还原环境相互交替。

遵义铝土矿中普遍富含镓、稀土、铬、钒、铌、锆及钽等伴生元素,且在多数矿床中已达到可利用的平均工业品位。3个实测剖面的测试结果显示铝土矿中伴生元素具有以下分布特点:  
(1) Ga在铝土矿石中含量最高。仙人岩矿区Ga分布于 $25.5 \times 10^{-6} \sim 115.5 \times 10^{-6}$ 之间,平均 $64.2 \times 10^{-6}$ ,后槽矿区Ga分布于 $41.2 \times 10^{-6} \sim 139.5 \times 10^{-6}$ 之间,平均 $101.2 \times 10^{-6}$ ,新站矿区Ga分布于 $42.3 \times 10^{-6} \sim 142.5 \times 10^{-6}$ 之间,平均 $99.2 \times 10^{-6}$ 。Ga与 $Al_2O_3$ 呈正相关关系,仙人岩、后槽及新站矿区相关系数 $R^2$ 分别为0.9557、0.6928及0.8666;(2)含矿岩系中稀土元素总量均较高,铝土矿中最高,基本上达到可综合利用水平,稀土元素总量与 $Al_2O_3$ 和 $TiO_2$ 呈明显的正相关。仙人岩、后槽及新站矿区铝土矿中稀土元素总量分别为 $86.0 \times 10^{-6} \sim 526.5 \times 10^{-6}$ 、 $101.6 \times 10^{-6} \sim 442.7 \times 10^{-6}$ 和 $121.2 \times 10^{-6} \sim 574.3 \times$

$10^{-6}$ ,平均值分别为 $246.1 \times 10^{-6}$ 、 $237.0 \times 10^{-6}$ 及 $294.7 \times 10^{-6}$ ;(3)此外,Cr、V、Nb、Zr和Th等有益伴生元素在铝土矿含矿岩系中均具有一定的富集程度,含量大多接近或超过平均工业品位,具有较高的潜在的经济效益。在3个矿床中,Cr、V、Nb、Zr和Th含量分别位于 $90 \times 10^{-6} \sim 570 \times 10^{-6}$ 、 $144 \times 10^{-6} \sim 675 \times 10^{-6}$ 、 $8.2 \times 10^{-6} \sim 108 \times 10^{-6}$ 、 $90 \times 10^{-6} \sim 1220 \times 10^{-6}$ 和 $10.5 \times 10^{-6} \sim 104.5 \times 10^{-6}$ 之间,平均分别为 $356.2 \times 10^{-6}$ 、 $343.7 \times 10^{-6}$ 、 $48.1 \times 10^{-6}$ 、 $610.0 \times 10^{-6}$ 和 $68.9 \times 10^{-6}$ ,这些元素与 $Al_2O_3$ 都呈一定的正相关关系。镓、铬、钒、铌、锆及钽等元素为难溶元素,在风化淋滤过程中难以溶解得以保存,因而在强风化形成的铝土矿中较为富集。

## 5 讨论

志留纪末期和泥盆纪初期的广西运动使遵义地区抬升为陆,进入剥蚀期,遭受长期的风化剥蚀形成长期的沉积间断面,基底被夷平为准平原化。基底中上寒武统娄山关群、下奥陶统桐梓组白云岩和湄潭组粘土页岩在炎热湿润的古气候条件下在准平原上由于剥蚀程度不同形成若干大小不一、形状不同、疏密不均的古岩溶洼坑和古岩溶漏斗,为研究区铝土矿的形成提供了构造条件和有利的富集场所。

根据上述 $Al_2O_3$ 与 $TiO_2$ 、Zr、Hf、Nb、Ta的比值,Ti/Zr和Ti/Nb比值及稀土配分模式特征分析,基底下奥陶统桐梓组和湄潭组粘土页岩的地球化学特征与含矿岩系的相似,说明基底粘土页岩可能为铝土矿母岩。从Ce和Eu异常特征,结合含矿岩系矿物组合及沉积建造分析得出,铝土矿成矿过程中氧化还原条件复杂多变,铝土矿可能形成于氧化还原环境交替变化的沉积环境。根据含矿岩系CIA指数高于基底粘土页岩,推测铝土矿可能是强风化作用的产物。

综上所述,我们认为遵义铝土矿是基底粘土页岩在氧化还原交替的沉积环境中经过强烈的风化作用形成的。即在炎热湿润的古气候条件下,基底粘土页岩经过风化作用形成的粘土矿物在氧化还原环境变化的情况下进一步分解,即发生硅、铁和铝的分离,在适宜的条件下硅和铁溶解被地下水带走,而铝保存下来形成富铝的风化产物;随后在地表水的作用下,富铝风化产物经短距离搬运或原地堆积于剥蚀期形成的古岩溶洼坑和古岩溶漏斗中,因堆积或再沉积时所处古

岩溶洼地和古岩溶漏斗的形态、大小和内部环境不同富铝风化产物发生一系列有所差异的风化淋滤作用, 从而使富铝风化产物经历不同的演变过程形成不同类型的铝土矿; 随着地质历史的发展, 铝土矿被新的沉积物所覆盖, 而后的构造运动使得铝土矿暴露地表或埋藏于浅部, 进一步遭受风化淋滤去硅除铁, 进入表生富集阶段, 从而形成今天所见到的各种铝土矿。

## 6 结论

(1) 薄片鉴定、X 射线粉晶衍射 (XRD) 及扫描电子显微镜 (SEM) 研究表明, 遵义铝土矿矿物组成以一水硬铝石为主, 其次为粘土矿物高岭石、蒙脱石及伊利石等, 含少量的勃姆石、锐钛矿、普通角闪石、石英、方解石、白云石/或含铁矿物; 含铝土矿层中不同层位一水硬铝石晶体形态有所差异且其含量与粘土矿物和石英含量呈一定的负相关关系。这表明各矿区铝土矿含矿层中矿物的空间分布特点和元素的迁移变化规律大体上是一致的。

(2) 由  $Al_2O_3/TiO_2$ 、 $Al_2O_3/Zr$ 、 $Al_2O_3/Hf$ 、 $Al_2O_3/Ta$ 、 $Al_2O_3/Nb$  比值, Nb-Ta、Zr-Hf 及 Zr-TiO<sub>2</sub> 和 Nb-TiO<sub>2</sub> 相关性分析可知, 遵义铝土矿成矿母岩极有可能来源于含矿岩系基底粘土页岩, 且在成矿过程中成矿物质经过了充分的均一化。结合 CIA 指数分析得知铝土矿形成过程中, 源岩经过强烈的风化分解, 铝土矿是强风化作用的产物。

(3) REE 配分模式及 Ce/Ce\* 和 Eu/Eu\* 特征结合含矿岩系矿物组合特征研究表明, 遵义铝土矿形成的沉积环境具有海相沉积的特点, 在铝土矿的成矿过程中物理化学条件经历了氧化还原的交替。这表明铝土矿的形成环境复杂, 控矿因素多变。

(4) 镓、铬、钒、铋、锆及钽等难溶元素富集于强风化作用形成的铝土矿中, 他们的含量均与  $Al_2O_3$  含量呈正相关关系。

(5) 遵义铝土矿是基底粘土页岩在氧化还原交替的沉积环境中经过强烈的风化作用形成的。不同类型铝土矿的形成是由富铝风化产物堆积或再沉积时所处的古岩溶洼地和古岩溶漏斗的形态、大小及内部环境不同造成的。

## 参考文献:

- [1] 刘平. 四论贵州之铝土矿——黔中—川南成矿带铝土矿的希散、稀土组分特征[J]. 贵州地质, 1994, 11(3): 179-187.
- [2] 刘平. 五论贵州之铝土矿——黔中—川南成矿带铝土矿含矿岩系[J]. 贵州地质, 1995, 12(3): 185-203.
- [3] 董家龙. 贵州铝土矿基本地质特征及勘查开发的思考——以凯里—黄平铝土矿为例[J]. 矿产与地质, 2004, 18(6): 555-558.
- [4] 李启津, 侯正洪. 铝土矿矿床中稀土、铋(钽)元素的地球化学行为[J]. 地质与勘探, 1986, 10: 17-21.
- [5] Maclean W H, Bonavia F F, Sanna G. Argillite debris converted to bauxite during karst weathering: evidence from immobile element geochemistry at the Olmedo Deposit, Sardinia [J]. *Mineralium Deposita*, 1997, 32(6): 607-616.
- [6] Karadag M M, Kùpeli S, Arýk F, Ayhan A. Rare earth element (REE) geochemistry and genetic implications of the Mortas bauxite deposit (Seydisehir/Konya-Southern Turkey) [J]. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 2009, 69(2): 143-159.
- [7] Mameli P, Mongelli G, Oggiano G, Dinelli E. Geological, geochemical and mineralogical features of some bauxite deposits from Nurra (Western Sardinia, Italy): insights on conditions of formation and parental affinity [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2007, 96(5): 887-902.
- [8] Liu X, Wang Q, Deng J, Zhang Q, Sun S, Meng J. Mineralogical and geochemical investigations of the Dajia Salento-type bauxite deposits, western Guangxi, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2010, 105(3): 137-152.
- [9] Nesbitt H, Young G. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715-717.
- [10] Rollison H R. 著, 杨学明, 杨晓勇, 陈双喜, 译. 岩石地球化学[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2000.
- [11] 刘长龄, 覃志安. 论中国岩溶铝土矿的成因与生物和有机质的成矿作用[J]. 地质找矿论丛, 1999, 14(4): 24-28.
- [12] 金中国, 武国辉, 黄智龙, 鲍森, 周家喜. 贵州务川瓦厂坪铝土矿床地球化学特征[J]. 矿物学报, 2009, 29(4): 458-462.
- [13] Mordberg L E. Geochemistry of trace elements in Paleozoic bauxite profiles in northern Russia [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1996, 57(1-3): 187-199.
- [14] Hill I G, Worden R H, Meighan I G. Geochemical evolution of a palaeolaterite: The Interbasaltic Formation, Northern Ireland [J]. *Chemical Geology*, 2000, 166(1-2): 65-84.
- [15] MacLean W H, Kranidiotis P. Immobile elements as monitors of mass transfer in hydrothermal alteration: Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec [J]. *Economic Geology*, 1987, 82: 951-962.
- [16] MacLean W H, Barrett T J. Lithochemical techniques using immobile elements [J]. *Geochemical Exploration*, 1993, 48: 109-133.
- [17] Panahi A, Young G M, Rainbird R H. Behavior of major and trace elements (including REE) during Paleoproterozoic pedogenesis and diagenetic

- alteration of an Archean granite near Ville Marie, Quebec, Canada [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(13): 2199-2220.
- [18] Valeton I, Biermann M, Reche R, Rosenberg F. Genesis of nickel laterites and bauxites in Greece during the Jurassic and Cretaceous, and their relation to ultrabasic parent rocks [J]. *Ore Geology Reviews*, 1987, 2: 359-404.
- [19] Ali Asghar Calagari, Ali Abedini. Geochemical investigations on Permo-Triassic bauxite horizon at Kanisheeteh, east of Bukan, West-Azarbaidjan, Iran [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2007, 94: 1-18.
- [20] 朱永红, 朱成林. 遵义铝土矿(带)找矿模式及远景预测[J]. 地质与勘探, 2007, 43(5): 23-28.
- [21] Elderfield H, Greaves M J. The rare elements in seawater [J]. *Nature*, 1982, 296: 214-219.
- [22] 任明达, 王乃梁. 现代沉积环境概论[M]. 北京: 科学出版社, 1985.

## Mineralogical and Geochemistry Feature of Zunyi Bauxite Deposit, Guizhou Province, China

LI Yu-jiao<sup>1,2</sup>, ZHANG Zheng-wei<sup>1</sup>, ZHOU Ling-jie<sup>1,2</sup>, WU Cheng-quan<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Zunyi metallogenic area is one of the main metallogenic areas of bauxite in Guizhou deposit occurred within the Lower Carboniferous Jiujiang Formation mostly. Researches on bauxite of mineralogical characteristics such as mineral composition, content and crystal morphology were carried out, by means of thin section analysis, X-ray diffraction (XRD) analysis and scanning electron microscope (SEM) analysis. Result shows that there is difference between the crystal morphology of diaspore in different horizon in the process of bauxite mineralization. In addition, the content of diaspore increases with decreasing contents of clay mineral and quartz. At the same time, systematical study on fabric and element geochemistry of ore-bearing rock series shows that the source of Zunyi bauxite deposit is homologous and relates to the basement. In the process of bauxite mineralization, the parent rock has full homogenization in the alternation of oxidation-reduction of sedimentary environment, showing that the mineralization process is consistent with ancient weathering crust. Therefore, the mineralogical and geochemical features indicate prospecting and mineral processing indication meaning for bauxite deposit.

**Key words:** bauxite; mineralogy; geochemistry; Zunyi; Guizhou Province