

# 中国铝土矿勘查研究进展

于 蕾<sup>1</sup>, 侯恩刚<sup>1</sup>, 高亦文<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 广东省地质局 719 地质大队, 广东 肇庆 526020)

**摘 要:** 铝是世界上仅次于铁的第二大金属, 是国民经济发展的基础原料和战略矿种。中国是世界上最大的铝生产和消费国, 但铝资源/储量保证程度低, 对外依存度居高不下, 资源供需矛盾突出。本文在分析我国铝土矿资源现状基础上, 系统地总结论述了中国近年来在铝土矿资源勘查、铝土矿中稀有与稀土元素的新发现、矿床成因及元素地球化学在铝土矿成因研究中的应用等方面所取得的新认识和新进展, 以期对铝土矿资源勘查开发提供一定的参考。

**关键词:** 铝土矿; 勘查研究; 地球化学

中图分类号: F407.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-2464 (2011) 03-0027-07

## PROGRESS IN BAUXITE EXPLORATION IN CHINA

YU Lei<sup>1</sup>, HOU En-gang<sup>1</sup>, GAO Yi-wen<sup>2</sup>

(1. School of the Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

2. No. 719 Geological Party of Bureau of Geology of Guangdong Province, Guangdong 526020, China)

**Abstract:** Alumina as the second metal after iron is a basic material and strategic ore for economy. China ranks the No.1 in alumina production and consumption, but low in guaranteeing extent in alumina resource/reserve, largely depending upon exporting. This paper, based on the status of China's alumina resources, summarizes the progress in alumina ore exploration, in new discoveries of rare elements and rare earth elements, in deposit genesis from geochemistry, aiming at providing references in bauxite exploration and development.

**Key words:** bauxite; progress in exploration; geochemistry

## 1 引言

铝是世界上仅次于铁的第二大金属, 具有多种优良性能, 是国民经济发展的基础原料和战略金属, 主要由铝土矿提炼而成。铝土矿在世界上分布广泛, 主要分布于几内亚、澳大利亚、巴西、牙买加、中国、印度和印度尼西亚等国家。三水铝石是世界上提取氧化铝的主要矿物原料, 占世界铝土矿

资源的 92%。中国铝土矿资源主要为产于古生界和下中生界古风化壳上的一水硬铝石<sup>[1]</sup>, 主要分布在山西 (35.9%)、河南 (20.6%)、广西 (18.37%) 和贵州 (15.39%) 等省<sup>[2]</sup>。

中国是世界上最大的铝生产和消费国, 但三水铝石原料基本依赖进口, 对外依存度超过 50%, 铝土矿资源/储量保证程度低, 资源供需矛盾突出。2006 年, 我国铝土矿产量 2 000 万 t, 占世界铝土矿产量的 11.3%, 而可采储量仅占世界可采储量

收稿日期: 2010-09-13; 修订日期: 2011-03-25; 责任编辑: 刘英姿。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40672021)。

第一作者简介: 于蕾 (1974—), 女, 博士生, 主要从事矿床学、古生物学与地层学研究。E-mail: oohyaya@sohu.com

的 2.8 %。此外,我国铝土矿勘查程度较低,勘查深度较浅;基础储量少,后备资源严重不足;大型矿床少,且矿石以一水硬铝石为主,品位、品级不高,电解铝能耗高,经济效益低。

铝土矿为我国的大宗紧缺矿产。总结铝土矿在勘查、矿床成因研究等方面取得的新进展、新认识,加强铝土矿成矿环境、成矿条件与成矿规律的分析与研究,对铝土矿资源勘查,加强我国铝土矿资源保障,维护国家资源安全 and 经济安全具有重要的意义。

## 2 矿床类型及其特征

### 2.1 矿床类型划分

目前,国外铝土矿床基本划分为喀斯特型和红土型两类。中国铝土矿成矿地质作用独特,矿床类型划分分歧较大。2002 年制订的《铝土矿、冶镁菱镁矿地质勘查规范》(DZ/T0202-2002)将铝土矿床划分为沉积型、堆积型及红土型 3 类;刘长龄<sup>[3]</sup>将其划分为残余型(红土型)、沉积型(岩溶型)、变质型和其他型 4 种类型;李启津<sup>[4]</sup>将其划分为红土—沉积—红土型、红土—沉积型、钙红土型、岩溶堆积型和红土型 5 大类;廖士范<sup>[5]</sup>将铝土矿床划归为风化矿床,进而分为红土型和古风化壳型(古红土型)2 类 6 个亚型。

### 2.2 矿床类型特征

红土型铝土矿矿石类型主要为三水铝石和一水软铝石,矿石特点是低铝、低硅、高铁、铝硅比较高,一水硬铝石也多是高铁的。发育完善、成熟度高的红土风化壳具有明显的垂直分带,自上而下可分为表层红土、含铝土矿层、密高岭土层或杂色层以及风化或半风化基岩等 4 层。如果基岩为玄武岩、花岗岩、片麻岩等铝硅酸盐岩时,在含铝土矿层之下为高岭土层和风化或半风化基岩,彼此之间过渡关系清楚。若基岩为可溶性的碳酸盐岩时则含矿层之下多为杂色粘土层,通常缺乏风化或半风化基岩层。该矿床类型为国外铝土矿的主要类型,规模多为大型。红土型铝土矿含矿富集带位于风化壳

的中上部,与上、下两带为过渡关系,由红土与块砾状铝土矿组成。

沉积型铝土矿为中国铝土矿的主要类型。矿石成分基本属于一水硬铝石型,矿石特点是高铝、高硅、低铁、低 A/S,大部分属中等品位,高品位富矿较少,常与煤、硫铁矿、耐火粘土、石灰岩共生。沉积型铝土矿床主要以碳酸盐岩为母岩,多产于碳酸盐岩侵蚀面上,储量约占全国总储量的 76 %;少数以硅酸盐岩为母岩,产于砂岩、页岩、玄武岩等的侵蚀面上或由其组成的岩系中,以中、高铁型铝土矿居多,储量约占全国总储量的 10 %<sup>[6]</sup>。

堆积型铝土矿是由原生的沉积铝土矿在适宜的构造条件下暴露地表,后经剥蚀就地残积或搬运、堆积在其附近的岩溶洼地、坡地中,再风化淋滤掉有害组分富 Al 而成的,国外称为岩溶类萨伦托型铝土矿。矿石呈大小不等的块砾及碎屑夹于松散红土(基质)中构成含矿层,基底为碳酸盐岩。矿石中矿物成分以一水硬铝石为主,只在红土和铝土矿块砾的裂隙中有少量三水铝石,高铁型,成矿时代为新近纪。中国桂西相当多的堆积铝土矿是三水铝石(基质)与硬水铝石(砾石)共生的矿床,二者均达到大型规模,且以硬水铝石、三水铝石矿石矿物组合与典型的“萨伦托型”相区别。该类型铝土矿较少见。目前,证实平果等地堆积铝土矿是该类型的大型矿床,其砾石(碎屑)是高品位硬水铝石,基质(或红土)富含三水铝石<sup>[7]</sup>。

## 3 勘查新发现

近年来,我国铝土矿找矿不断取得新突破,新类型、隐伏矿及与铝土矿伴生的大型稀有稀土矿床相继被发现,新探明了一批大型—特大型铝土矿床。

广西靖西县新圩特大型岩溶堆积型铝土矿床伴生镓、钛、铌、钽、三水铝石等,具有较高的综合利用价值,是继平果铝土矿之后在百色地区探明的又一特大型铝土矿床<sup>[8]</sup>。河南陕县—新安—济源一带,发现隐伏大一中型铝土矿,伴生镓和锂,在富铝土矿成矿认识上取得了突破,为在中深部寻找隐

伏富品位铝土矿提供了理论依据,扩大了寻找富铝土矿的空间和远景<sup>[9]</sup>。贵州务川县瓦厂坪为大型沉积型铝土矿并伴生镓和锂。该矿床的发现结束了黔北无大型铝土矿的历史,对发展黔北铝工业具有重大意义<sup>[10]</sup>。此外,贵州沿河一带铝土矿的发现,为贵州寻找铝土矿提供了新的信息;桂中地区的贵港、宾阳、横田一带探明一特大型三水铝土矿矿藏<sup>[11]</sup>;安徽淮北芦岭煤矿发现伴生的高品位铝土矿。

研究表明,桂西平果等地堆积型铝土矿床系三水铝石—硬水铝石共生的新的矿床类型,世界罕见。硬水铝石伴生三水铝石的矿床中,伴生的三水铝石和软水铝石一般不超过3%,主要是硬水铝石,如匈牙利涅兹萨、越南谅山铝土矿床。法国阿烈日莱斯卡莱F'铝土矿床也仅在矿层顶部含有三水铝石。国外尚无三水铝石—硬水铝石矿物组合且二者均达到大型矿床规模的报导<sup>[12]</sup>。勘查研究表明,砾石是高品位硬水铝石,所谓“泥巴”或“胶结物”是充填于砾石间的基质。

## 4 研究新进展

### 4.1 成矿物质来源与成矿时间研究

近年来,对铝土矿成矿物质来源的认识,已从单源论发展为多源论<sup>[3]</sup>。成矿物质主要来源于大陆岩石的风化产物,有的来自古陆,有的与基底有关,也有两者兼之,且同一矿区不同矿带可能有不同的物源补给区<sup>[13]</sup>。研究表明,除了超基性岩和纯石英岩外,其他所有的岩石在某种条件下均可成为铝土矿床的成矿母岩,可以是碱性的、基性的、中性的和酸性的。如花岗岩、石灰岩、泥质岩、粘土岩、霞石正长岩、流纹岩、辉长岩、辉绿岩、玄武岩、火山岩、片麻岩和石英砂岩等。我国三水铝石铝土矿源岩岩性较单一,多为玄武岩,铝土矿多产于玄武岩风化壳中,由玄武岩风化淋滤而成。

李景阳<sup>[14]</sup>应用溶蚀—交代由基岩到土体等体积成土作用理论解决了100多年以来争论不休的钙红土成因的铝土矿的物源问题。长期以来,倾向于认为滇东南地区上二叠统吴家坪组(龙潭组)底部

和下部的铝土矿床的成矿物质来源于下伏碳酸盐岩钙红土化的产物。现在认为下伏碳酸盐岩钙红土化不足以作为铝土矿的成矿物质来源。该区铝土矿床类型分原生沉积型和新近系岩溶红土堆积型两类,成矿物质分别来源于峨眉山大火成岩省基性玄武岩的风化、剥蚀和淋漓所形成的含铝土矿碎屑—红土物质,以及邻近的原生沉积型铝土矿的风化残积和残坡积<sup>[15]</sup>。

对桂西铝土矿成矿物质来源存在较大分歧。一种观点认为成矿物质来源于大明山古陆变质岩系;另一种观点认为成矿物质来源于基底茅口灰岩,并可能有火山灰的介入。现研究表明,成矿物质具有多来源的特点,主要来源于基底二叠纪茅口灰岩和古陆岩石风化产物,并可能有少量火山物质的介入。古陆指区域南部的大新古溶蚀平原,不是原认为的古大明山。因为大明山古陆在晚二叠纪成矿期间为巨厚的海相复理石沉积,不太可能为本区铝土矿提供大量的成矿物质<sup>[16]</sup>。

铝土矿形成的物质搬运过程向多态性机械碎屑和胶体等发展,形成环境向多相性如滨海、泻湖、滨海—沼泽、湖泊—沼泽、河流、残积和坡积等发展<sup>[3]</sup>。广西铝土矿微量元素地球化学研究指示出明显的淡水沉积物特征,沉积环境陆相特征明显,局部存在残积作用,沉积后受到明显的海水改造作用,从而解决了广西铝土矿成矿作用和成矿环境的“海相”和“陆相”沉积的争议<sup>[17]</sup>。

成矿时间研究是矿床成因研究的重要方面。红土型铝土矿矿化的时间约数百万年至数十百万年<sup>[18-19]</sup>,长者自古近纪、短者自新近纪开始矿化即可形成相当规模的矿床。国外红土型铝土矿床成矿期多在始新世。我国南方地处较高纬度,信风洋流和暖流难以到达,有利于红土化作用的气候出现较晚,成矿时代基本在晚古近纪—新近纪<sup>[20-21]</sup>。

目前,Rb-Sr、<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar、碎屑锆石U-Pb、Hf等放射性同位素及氢、氧稳定同位素测量等已被广泛用于铝土矿的成矿时代、物质来源追索、矿床成因研究等方面。赵社生等<sup>[22]</sup>采用Rb-Sr全岩同位素年龄测年及<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar快中子定年成功地解决了山西地块G层铝土矿由于下伏、上覆地层间隔时间这个长期未解决的地质时代问题。通过研究铝土矿石

中碎屑锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素特征,提出新的物源判识图解,对桂西铝土矿物质来源进行了判定,建立了桂西铝土矿成矿模式。红土型铝土矿的形成受二氧化碳温室气体效应和伴随的土壤的碳酸化影响,如陨击、火山喷发事件等,可采用事件地层学法确定其形成时代<sup>[19]</sup>。对堆积型铝土矿可采用裂变径迹法测定含矿红土层中分布的玻璃陨石年龄作为成矿年龄<sup>[23]</sup>。此外,对沉积型铝土矿床可用古地磁法确定其形成时代。

## 4.2 矿床成因研究

国内外许多学者从不同方面探讨了铝土矿的成因。20 世纪 30—40 年代,许多学者认为铝土矿是水体中一般的沉积矿床。20 世纪 50 年代,国内外大多数学者认为铝土矿为胶体化学沉积,氧化铝以胶体溶液形式搬运至海湖盆地边缘沉积。从 20 世纪 60 年代开始,许多学者主张碎屑沉积,提出红土化成矿的观点。如前苏联学者 Г. И. 布申斯基<sup>[24]</sup>“红土沉积粗粒碎屑岩型学说”。现在,随着新矿床、新类型的不断发现和深入研究,逐渐认识到铝土矿的形成多阶段、多环境和多因素的产物。

廖士范<sup>[5]</sup>提出了 3 阶段成矿模式:1) 红土风化作用阶段,形成含铝土矿物、粘土矿物、铁和钛的氧化物等风化壳铝土物质;2) 迁移就位阶段,风化壳铝土物质经成岩期逐渐深埋地下,产生“复硅化”(硅质加多),含铝品位降低,形成原始铝土矿层—致密铝土岩;3) 表生富集阶段,原始铝土矿层随地壳抬升到地表浅部,在氧化或还原改造带,硅质溶解迁移,铝质富集,品质低的原始铝土矿层变为有工业价值的铝土矿。许多学者认为,铝土矿在早期成岩阶段已达到成熟,成岩期能叠加的成矿作用极其微弱,不可能使已经形成的铝土矿再转化成“致密铝土岩”,后生表生期,剥蚀淋滤作用使铝土矿优质化,形态进一步复杂而已<sup>[25]</sup>。

HÜSEYİNÖZTÜRK<sup>[26]</sup>将喀斯特型铝土矿的成矿作用划分为 3 个阶段:成矿元素的溶解淋滤阶段,Al、Fe、Mn 和 Ti 在强酸性条件下从高度风化的富铝母岩中溶解迁移出来,随着水中 pH 的增加,在灰岩表面富集成矿;元素迁移至有利地带富集阶

段,早期形成的铝土矿中的 Al、Fe 和 Ti 氧化物以及粘土矿物,呈细碎屑态被搬运至断层控制的凹坑和洼地中富集;反复脱硅富集成矿阶段。成矿物质通过反复脱硅作用进一步富集,Si 和 Mn 通过发育的喀斯特排水系统迁移到海洋中。

刘长龄<sup>[1]</sup>提出铝土矿主体是碎屑胶体混合沉积成因,认为我国硬水铝石岩溶铝土矿为生物有机质成矿作用的沉积型铝土矿,并将我国岩溶铝土矿或沉积铝土矿的成矿模式概括为“多阶段、多因素、不同程度的连续成矿”。考虑到铝土矿多形成于古赤道附近的热带、亚热带地区,气候非常湿热,雨水充沛,生物繁盛,使经红土化的古风化壳岩石除遭受一般物理风化、化学风化外,同时受到生物物理作用和生物化学作用,导致铝土矿中存在生物化石及各种生物成因的矿物。最近几年,不断有人强调生物和有机质在铝土矿成矿中的作用,认为腐殖酸可大大加速成矿母岩和风化母岩脱硅、脱铁,加速促进铝土矿的富集成矿,其贯穿整个沉积成矿过程的各个阶段,对铝土矿形成具有重要意义<sup>[1,27-31]</sup>。李莎<sup>[32]</sup>提出微生物是矿物风化的最重要的因素之一。目前对生物成矿作用方面的研究较少,铝土物质在腐殖酸护胶作用下是否能长距离搬运等尚需进一步研究。

我国桂西三水铝石—硬水铝石共生铝土矿床的发现,在堆积型铝土矿成因理论领域取得了突破性进展,丰富了铝土矿成矿理论。其矿床成因独特,是正处于退化中的铝土矿<sup>[33]</sup>。三水铝石主要有 3 种存在形式<sup>[33]</sup>:赋存于硬水铝石砾石裂隙、空洞中或交代鲕粒的一部分,或呈浸染状交代硬水铝石<sup>[34]</sup>;以微晶集合体形式产出;呈细粒分散状存在于红土中。三水铝石来源主要有 2 种:粘土矿物在较强的酸性条件下脱硅形成(酸来源于原生硬水铝石铝土矿中黄铁矿),即三水铝石的硫酸成因理论<sup>[35]</sup>;硬水铝石水解作用形成<sup>[7,12,34,36]</sup>。在一个矿床中,有可能两种来源都有。三水铝石的形成受  $\text{Al}^{+3}$ 、 $[\text{SiO}_4]^{-2}$  浓度及 pH 值等多种因素的制约,经历了硬水铝石的水解、 $\text{Al}(\text{OH})_3$  的沉淀、老化、脱玻化和结晶几个阶段。

李中明<sup>[37]</sup>通过对豫西新发现的郁山隐伏铝土矿床的研究,提出郁山铝土矿床含铝岩系形成于滨

海泻湖潮坪环境，铝土矿主要赋存于豆鲕状（含砂砾屑）铝土矿微相中，为局限潮下带上部环境；认为郁山矿床含铝岩系经历了3期规模不断增大的突发海侵到缓慢海退的沉积环境演化旋回，并形成矿床的3个铝土矿层，最后一次大规模海侵—海退事件形成了区内最连续的铝土矿层（体），丰富完善了华北地台本溪组铝土矿成矿理论。

### 4.3 元素地球化学应用

越来越多的学者开始关注铝土矿中的稀有、稀土元素并对其地球化学特征进行研究，利用元素地球化学、同位素地球化学等手段，阐述矿床成矿物质来源、形成环境及成因。如利用Zr-Ga-Cr三角图解<sup>[38-39]</sup>，Cr、Ni、Zr、Ga等痕量元素的富集系数 $R^{[39]}$ ，稳定元素比值<sup>[40]</sup>， $\text{Eu}/\text{Eu}^* - \text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 图解，碎屑锆石U-Pb定年和原位Hf同位素研究<sup>[41]</sup>等地球化学手段。需要注意的是，微量元素地球化学标志在鉴别沉积环境时具有多解性和区域上的局限性，应用时应结合其他标志进行对比。

Lukas<sup>[42]</sup>利用 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 研究铝土矿成因，认为 $w(\text{Th})/w(\text{U}) > 7$ ，铝土矿为强烈红土化作用形成； $w(\text{Th})/w(\text{U}) < 2$ ，铝土矿为还原环境下的沉积产物； $w(\text{Th})/w(\text{U}) = 2 \sim 7$ ，可能为风化作用不彻底或沉积混杂所致。利用非活泼性微量元素与 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 之间的比值可以探讨成岩、成矿过程中的物质来源及地质环境等<sup>[10]</sup>。铝土矿中的粘土矿物及部分重矿物，如锆石对铝土矿的生成环境和物质来源探讨具有重要的意义。Zr、Hf、Nb和Ta等元素地球化学性质较稳定，其氧化物在表生条件下具有十分稳定和难溶解的特性，可作为残余的重砂矿物堆积下来，在成矿物源相同的各类岩、矿石中，它们与 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的比值一般都很接近。Ti、Hf、Zr、Th、Nb、Cr等稳定元素的比值与原岩相似，如Ti/Zr，能代表原岩，可用来指示不同来源的原岩<sup>[40,43-44]</sup>。

钛与铝在表生条件下具有十分稳定和难于溶解的特性，可作为残余物质堆积下来<sup>[45]</sup>。铝土矿的钛率（ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ）是其成因机理的一个重要地球化学标志，成矿物源相同的各类矿（岩）石的钛

率，一般都很接近。据铝土矿与下伏基岩（或古陆）的Al/Ti值是否相近，两者痕量元素分布和富集系数是否基本一致，重砂矿物的种类和特征是否具有明显的继承性等来判断成矿物质的来源。刘长龄<sup>[45]</sup>发现华北太古界火山岩由酸性、中性、基性到超基性，其 $w(\text{Al})/w(\text{Ti})$ 由大到小依次递减（42.46，25.84，21.22，16.10，12.55，12.50，12.31），可以作为铝土矿物质来源对比。

近年来，利用稀土元素，特别是轻、重稀土元素比值、钪族与钇族稀土元素比值等参数来研究铝土矿成因与物质来源得到了广泛应用。铝土矿硫化物的硫同位素组成有一定的差异，可用来判断形成环境。明显地富集重硫，说明形成于较封闭环境，海水硫酸盐供给不充分，属于滨海泻湖相沉积。

氢氧同位素测定表明，沉积型铝土矿中的硬水铝石，是由红土型铝土矿中的三水铝石变质而成<sup>[13]</sup>。华北和黔中铝土矿大多属红土型，主要根据是一水硬铝石的氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 为10‰左右，与红土型三水铝石的氧同位素值相近。国外具红土性质的铝土矿同位素组成，三水铝石 $\delta^{18}\text{O}$ 为10.2‰、一水硬铝石 $\delta^{18}\text{O}$ 为9.9‰、勃姆石 $\delta^{18}\text{O}$ 为5.8‰、一水硬铝石+勃姆石 $\delta^{18}\text{O}$ 为11.4‰<sup>[46]</sup>。

### 4.4 铝土矿中稀有、稀土元素

铝土矿中常伴（共）生钛、镓、铈、钪、锂、铷、钒等稀有元素及稀土元素。近年来，不断有与铝土矿有关的稀有稀土元素矿床被发现，如河南省首次发现与铝土矿密切共生的稀土矿床<sup>[47]</sup>。

钪（Sc）等稀有金属元素主要从铝土矿和磷矿等矿产中提取。世界铝土矿中的钪含量占58.3%，中国占24.5%，是重要的沉积型伴生钪矿床类型之一<sup>[48]</sup>。

全球尚未发现镓元素的独立矿床，镓主要伴生于铝土矿中。许多学者对铝土矿中的镓进行了研究。刘长龄等<sup>[49]</sup>统计的中国和世界铝土矿镓平均含量分别为 $74.0 \times 10^{-6}$ 和 $71.4 \times 10^{-6}$ 。镓主要赋存在硬水铝石中，此外可能在金红石和锆石等重矿物中富集<sup>[50]</sup>，且硬水铝石结晶程度越差，镓含量越高。铝土矿中镓含量高低，可能与其基底地层岩

石中镓含量高低关系密切<sup>[51]</sup>。内蒙古准格尔发现一世界上独特的、与煤伴生的超大型镓矿床，矿床内镓主要源于物源区本溪组铝土矿，而后在泥炭沼泽的弱还原环境中进一步富集。其主要载体是煤中超常富集的一水软铝石，极为罕见。

关于铝土矿中稀有、稀土元素的赋存状态尚存在争议。杨军臣等<sup>[52]</sup>认为铝土矿中稀有、稀土元素主要呈分散状态存在于一水硬铝石和高岭石等矿物中，独立矿物相和离子吸附态相的很少。刘平<sup>[38]</sup>则认为铝土矿中的稀土可能主要是以矿物的形式，而不是以离子吸附的形式赋存。铝土矿成矿过程中，原岩受到长期的风化淋滤作用，稀土元素因较稳定而相对富集。不同类型岩石稀土含量和组成不同，不同时代铝土矿稀有、稀土元素有明显差别，可能与成矿母岩不同及成矿过程中所处环境的物理化学条件不同有关。

Leonid 等<sup>[53]</sup>总结了铝土矿中稀土元素的形成、迁移、富集的影响因素：1) 成矿母岩成分。如超基性岩上的富铁质铝土矿富含 Cr、Ni、Co、Cu、V、Zn、Sc 等与铁、镁相关的元素；碱性岩上的铝土矿富含 Th、Nb、Zr 等元素。2) 铝土矿形成过程中的物理化学条件。3) 成矿母岩中矿物元素赋存状态。4) 元素的化学特性。如可溶性、pH 值、络合物形成的难易程度、元素间的相互影响（如 P 的存在导致 Sr 变得不易迁移）等。5) 铝土矿各个成矿阶段元素的重新迁移、转化与分配。6) 基底碳酸盐岩作为一种地球化学障，对某些元素的迁移富集有着重要影响。

5 结论

近年来，我国铝土矿勘查取得了许多新的进展，大型和超大型新类型、隐伏矿、与铝土矿伴生的稀有稀土矿床相继被发现，新的勘查地区不断出现，展示了我国铝土矿勘查的广阔前景，为铝土矿提供了新的找矿方向。在加强已知重点勘查区深部及外围找矿工作的同时，应不断加强新区的普查找矿工作，主攻沉积型和堆积型铝土矿。不断应用新方法、新手段加强铝土矿成矿环境、成矿条件、成矿规律及成矿理论的分析与研究，指导地质勘查找

矿工作。

铝土矿伴生的稀有稀土资源丰富，应加强铝土矿中伴生的稀有稀土元素的分布及赋存状态、富集影响因素、在特殊地质地球化学环境中超常富集机制等方面的研究，提高资源利用率，加强稀有、稀土资源综合回收利用。

参考文献

[1] 刘长龄. 论高岭石粘土和铝土矿研究的新进展[J]. 沉积学报, 2005, 23(3): 467-474

[2] 鄢艳. 我国铝土矿资源现状[J]. 有色矿冶, 2009, 25(5): 58-60

[3] 刘平. 六论贵州之铝土矿[J]. 贵州地质, 1996, 13(1): 45-60

[4] 李启津, 杨国高, 侯正洪. 铝土矿床成矿理论研究中的几个问题[J]. 矿产与地质, 1996, 10(1): 22-26

[5] 廖士范. 中国铝土矿地质学[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 1991

[6] 刘中凡, 杜雅君. 我国铝土矿资源综合分析[J]. 轻金属, 2000(12): 8-12

[7] 湛建国, 刘云华. 铝土矿新类型桂西三水铝石硬水铝石矿床[J]. 广西地质, 1997, 10(1): 37-44

[8] 黎谊锴. 广西又探明一特大型铝土矿床[J]. 广西地质, 2001(14): 78

[9] 周强, 姚维利. 河南省地调院在陕县一带找到三处大中型铝土矿[J]. 资源导刊, 2008(8): 43

[10] 金中国, 武国辉, 黄智龙, 等. 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

[11] 王祝堂. 桂中地区探明特大型铝土矿[J]. 轻金属, 2008(9): 52

[12] 湛建国, 刘云华. 堆积铝土矿中三水铝石成因探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1996, 15(3): 191-194

[13] 刘平. 八论贵州之铝土矿: 黔中-渝南铝土矿成矿背景及成因探讨[J]. 贵州地质, 2001, 18(4): 238-243

[14] 李景阳. 论碳酸盐岩现代风化壳和古风化壳[J]. 中国岩溶, 2004, 23(1): 56-62

[15] 冯晓宏, 王臣兴, 崔子良, 等. 滇东南铝土矿成矿物质来源探讨[J]. 云南地质, 2009, 28(3): 233-242

[16] 王力, 龙永珍, 彭省临. 桂西铝土矿成矿物质来源的地质地球化学分析[J]. 桂林工学院学报, 2004, 24(1): 1-6

[17] 俞锴, 李普涛, 于航波. 靖西三合铝土矿铝矿物特征及成因机制分析[J]. 东华理工大学学报: 自然科学版, 2009, 32(4): 344-349

[18] 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

- [19] Retallack G J. Lateritization and bauxitization events [J]. *Economic Geology*, 2010, 105: 655-667
- [20] 李启津, 杨国高, 侯正洪. 中国三水型铝土矿成矿地质条件探讨[J]. *矿产与地质*, 1994, 8(39): 19-24
- [21] 陈世益, 周芳, 何学锋. 中国南方新生代主要岩类的红土化进程[J]. *中国有色金属学报*, 1994, 4(3): 1-5
- [22] 赵社生, 柴车浩, 李国良. 山西地块G层铝土矿同位素年龄及其地质意义[J]. *轻金属*, 2001(8): 5-9
- [23] 林最近. 平果岩溶堆积铝土矿空间分布特征及成因探讨: 以教美矿区为例[J]. *科技情报开发与经济*, 2007, 17(23): 156-158
- [24] Г И 布申斯基. 铝土矿地质学[M]. 王恩孚, 译. 北京: 地质出版社, 1984
- [25] 何立贤. 关于“中国铝土矿的成矿机理及矿层贫化深度问题”的讨论[J]. *华北地质矿产*, 1996, 11(1): 111-115
- [26] HÜ SEYİN ÖZTÜRK. Genesis of the Dogankuzu and Mortas, Bauxite Deposits, Taurides, Turkey: separation of Al, Fe, and Mn and implications for passive margin metallogeny [J]. *Economic Geology*, 2002, 97: 1063-1077
- [27] 叶连俊. 生物成矿作用研究[M]. 北京: 海洋出版社, 1993: 1-5, 176-182
- [28] 陈履安. 腐殖酸在铝土矿形成中的作用的实验研究[J]. *沉积学报*, 1996, 14(4): 117-123
- [29] 雷怀彦, 师育新. 铝硅酸盐矿物溶解作用铝活性研究[J]. *沉积学报*, 1996, 14(2): 151-154
- [30] 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
- [31] Laskou M, Economou-Eliopoulos M. The role of microorganisms on the mineralogical and geochemical characteristics of the Parnassos-Ghiona bauxite deposits, Greece [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2007, 93(2): 67-77
- [32] 李莎, 李福春, 程良娟. 生物风化作用研究进展[J]. *矿产与地质*, 2006, 20(6): 577-582
- [33] 刘云华. 桂西堆积型铝土矿中三水铝石的成矿机理[J]. *地球科学与环境学报*, 2004, 26(2): 27-31
- [34] Bardossy G. Karst bauxite: bauxite deposits on carbonate rocks [M]. Budapest: Akademiai Kiado, 1982
- [35] 刘长龄. 次生岩溶坠积再生铝土矿床新类型的物质成分与成因[J]. *矿床地质*, 1988, 7(2): 84-91
- [36] 湛建国, 刘云华. 广西两种三水铝石铝土矿成矿的差异性[J]. *地质学前沿*, 1999, 6(增刊): 251-256
- [37] 李中明, 赵建敏, 王庆飞, 等. 豫西郁山铝土矿床沉积环境分析[J]. *现代地质*, 2009, 23(3): 482-489
- [38] 刘平. 黔中-川南石炭纪铝土矿的地球化学特征[J]. *中国区域地质*, 1999, 18(2): 210-217
- [39] Üzli N. Trace element contents of karst bauxites and their parent rocks in the Mediterranean belt [J]. *Mineralium Deposita*, 1983, 18: 469-476
- [40] Calagari A A, Abedini A. Geochemical investigations on Permian-Triassic bauxite horizon at Kanisheeh, east of Bukan, West-Azerbaijan, Iran [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2007, 94: 1-18
- [41] Deng J. Genetic relationship between the emeishan plume and the bauxite deposits in western Guangxi, China: Constraints from U - Pb and Lu - Hf isotopes of the detrital zircons in bauxite ores [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 37: 412-424
- [42] Lukas T C, Loughnan F C and Eades J L. Origin of bauxite at Eufaula, Alabama, USA [J]. *Clay Minerals*, 1983, 18: 127-138
- [43] MacLean W H, Bonavia F F and 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: 607-616
- [44] Panahi A, Grant M and Young R H. Rainbird Behavior of major and trace elements (including REE) during Paleoproterozoic pedogenesis and diagenetic alteration of an Archean granite near Ville Marie, Québec, Canada [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(13): 2199-2220
- [45] 刘长龄. 山西、河南高铝粘土铝土矿床矿物学研究[J]. *沉积学报*, 1985, 3(2): 18-38
- [46] 鲍尔谢夫斯基. 根据氧同位素数据讨论沉积铝土矿的红土性质 [M]. 北京: 科学出版社, 1976: 203-211
- [47] 李中明, 赵建敏, 冯辉, 等. 河南省郁山古风化壳型稀土矿层的首次发现及意义[J]. *矿产与地质*, 2007, 21(2): 177-180
- [48] 张玉学, 何其光, 邵树勋, 等. 铝土矿的地球化学特征[J]. *地质地球化学*, 1999, 27(2): 55-62
- [49] 刘长龄, 覃志安. 我国铝土矿中微量元素的地球化学特征[J]. *沉积学报*, 1991, 9(2): 25-33
- [50] 鲁方康. 黔北务-正-道地区铝土矿微量元素特征与赋存状态初探[J]. *矿物学报*, 2009, 29(3): 373-379
- [51] 刘平. 贵州铝土矿伴生稼的分布特征及综合利用前景: 九论贵州之铝土矿[J]. *贵州地质*, 2007, 24(2): 90-96
- [52] 杨军臣, 王凤玲, 李德胜, 等. 铝土矿中伴生稀有稀土元素赋存状态及走向查定[J]. *矿冶*, 2004, 13(2): 89-92
- [53] Leonid E M. Geochemistry of trace elements in paleozoic bauxite profiles in northern Russia [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1996, 57: 187-199