

文章编号: 1000-4734(2021)04-0377-05

含铝岩系中的关键金属资源：代序

黄智龙^{*}, 范宏鹏

(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 550081)

关键金属是指现今社会发展所必需、安全供应存在高风险的稀有金属、稀土金属、分散金属和部分其他金属, 其具有其他元素无法替代的重要经济特性, 对保障国民经济、国家安全和科技发展具有重要战略意义^[1]。近年来, 由于核工业、航空航天和新能源等战略性新兴产业的发展而有巨大的关键金属资源需求, 供需矛盾日益突出, 欧盟和美国等发达经济体已陆续制定关键金属资源发展战略。我国是世界上最大的关键金属资源消费国之一, 但紧缺种类多, 对外依存度高。因此, 保障关键金属矿产资源安全, 也是我国的重大战略, 亟需加强针对各类新发现的不同成因及工业类型关键金属矿产的成矿机制及绿色利用的研究。

铝土矿在成矿过程中通常会导致矿区含铝岩系富集一些关键金属元素, 如 REE、Li、Ga、V、Sc、Ti、Nb 和 Ta 等, 使得铝土矿矿床逐渐成为这些关键金属的重要来源之一^[2-5]。欧盟早在 2014 年就已将铝土矿中伴生的 REE 和 Nb 等金属元素列入关键原材料目录, 使得铝土矿的价值随着这些伴生金属元素的富集而不断升高^[2]。我国铝土矿资源丰富, 已探明的铝土矿资源量超过 3×10^9 t, 居全球第 6 位, 其中晋中—晋东北、豫西、黔中—黔北和桂西等地的铝土矿含矿岩系均具有关键金属元素的超常富集的特征, 有可能成为我国关键金属资源开发利用的一个新的重要发展方向^[6-8]。本专辑刊出 18 篇论文, 重点展示了贵州含铝岩系中关键金属资源分布规律、富集机制、赋存状态以及综合利用等方面的最新研究进展。

1 主要科学问题

业已证实铝土矿矿区的含铝岩系均存在 REE、Li、Ga 和 Sc 等关键金属元素的超常富集现象, 且这些元素的含量均超过可综合利用的边界品位^[6-8]。但前人尚未针对其中的关键金属元素的赋存状态开展系统研究工作, 严重制约了关键金属富集机理的深入探讨, 同时也影响了该区铝土矿中关键金属的综合利用。针对含铝岩系中关键金属的薄弱研究现状, 本专辑主要聚焦以下科学问题。

1) 关键金属富集特征及分布规律。铝土矿、铝土岩和黏土岩等含铝岩系中富集的关键金属元素较多(如 REE、Li、Ga 和 Sc), 具有较高的综合利用价值。但现阶段, 研究人员仅仅了解到其中一小部分关键金属元素表现出富集现象, 对于是否还伴生其他关键金属元素以及这些元素在剖面 and 不同类型岩石(铝土矿、铝土岩、含铝黏土岩)和铝土矿矿石(土状-半土状、碎屑状、豆鲕状和块状)中的空间分布特征和规律等问题都还没有明确的结论, 急需开展系统的研究工作。

2) 关键金属富集机理。前人的相关研究主要根据含铝岩系中关键金属与其他元素含量的相关性以及剖面上物理化学条件的变化来推定伴生的关键金属元素的地球化学行为的制约因素, 导致不确定性因素较大, 且这元素的富集过程、条件等问题都还不得而知。此外, 不同关键金属元素具有不同地球化学行为, 铝土矿不同成矿阶段富集何种关键金属元素、其分异富集机理与控制因素以及对成矿的指示意义, 前人的研究很少涉及, 值得深入研究。

收稿日期: 2021-07-28

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2021.41.116

^{*} 通讯作者, E-mail: huangzhilong@vip.gyig.ac.cn

3) **关键金属赋存状态。**查明含铝岩系中关键金属的赋存状态是其综合利用的关键,但目前针对性研究极少,仅有的一些初步研究认为含铝岩系中的关键金属元素可能有三种赋存形式,即吸附态、类质同象和独立矿物,但这一认识也是在研究其它科学问题过程中“顺带”推测而来,存在很大的不确定性。因此,需要进一步研究不同元素被何种矿物吸附、吸附机理与影响因素、类质同象替代元素与替代方式、独立矿物种类及分布等。

4) **关键金属综合利用。**对于含铝岩系特别是铝土矿中关键金属元素的综合利用,已有的研究结果强调有“综合利用前景”^[6-10],但只根据铝土矿中的关键金属资源的含量评估了是否均达到综合利用指标,并未对各种矿石中关键金属资源的综合回收利用的可能性做相关研究,而对于高效清洁利用途径的研究更是极少涉及。查明该问题不仅对丰富和完善关键金属资源次生富集成矿理论、提高该区铝土矿的综合利用水平具有重要意义,还可能将铝土矿矿山的“尾矿堆”变废为宝,成为另一种新型的资源类型。这将为治理铝土矿矿山环境污染及缓解我国关键金属资源短缺状况做出贡献。

2 主要研究进展

2.1 富集特征及分布规律

本专辑报道的针对黔北黔中多个典型铝土矿区内含铝岩系开展的系统元素地球化学的研究工作证实其中富集的关键金属主要有 Li、Ga、Sc、V、Ti、Ag、Zr、Hf、Nb、Ta 和 REE 等。

已有的研究表明, Li 在含铝岩系中含量变化很大,且分布极其不均,不同地层层位及岩(矿)石类型中 Li 的含量差别极大。范宏鹏等^[11]指出在黔北三清庙铝土矿矿床中, Li 在顶底板围岩,铝土岩和铝土矿中的含量差别很大,铝土岩和黏土岩中的 Li 含量明显高于铝土矿矿体,顶底板的铝土岩或黏土岩以及 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 小于 60% 的矿石中的 Li 含量均明显高于高品位的铝土矿矿石,且随着铝土矿成熟度的逐渐增高和风化程度的加强, Li 含量呈逐渐降低的趋势,另外,致密块状和碎屑状铝土矿矿石中的 Li 含量明显高于豆鲕状和土状-半土状矿石。范宏鹏等^[11]统计前人的数据发现,在黔北务川—正安一道真地区铝土矿(岩)中,当 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 在 50% 左右时, Li 的含量相对最高,且当 $w(\text{Al}_2\text{O}_3) < 50\%$ ($A/S < 2$) 时 Li 含量与 A/S 比值呈正相关,而当 $w(\text{Al}_2\text{O}_3) > 50\%$ ($A/S > 2$) 时 Li 含量与 A/S 比值呈负相关, Li 与 Al_2O_3 含量及 A/S 比值的这种相关关系显示品位较低的样品反而含有更多的 Li,而 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 达到 80% 的矿石中 $w(\text{Li})$ 接近于 0,但 Li 与 Si、Fe、Mg 和 Zr 等元素均没有明显的相关性。

苏之良等^[12]以黔北新民矿床含铝岩系为剖析对象,对其中 Li、Ga、Sc 和 REE 等关键金属进行研究,结果表明,研究区含铝岩系各类岩(矿)石中均不同程度地富集这些元素,且具有上部富 Li、中部富 Ga、下部富 REE,而 Sc 含量变化较小的特征;在岩(矿)石类型上, Li、Ga 和 REE 分别主要富集于铝土岩、铝土矿和绿泥石泥岩中, Li 主要富集在致密状铝土矿中, Ga 在土状铝土矿、碎屑状铝土矿、豆鲕状铝土矿中相对富集, REE 在致密状铝土矿和土状铝土矿中相对富集,而 Sc 在不同类型岩(矿)石中的含量变化不大; Li 与 SiO_2 正相关, Ga、Sc 与 Al_2O_3 、 TiO_2 正相关,而 REE 与 Fe_2O_3 正相关, Li、Ga、Sc、REE 之间不存在相关关系。

李海兰等^[13]在研究黔北旦坪铝土矿床时发现,矿区含矿岩系富集多种关键金属元素,不同位置铝土岩和不同类型矿石中富集元素的种类及富集程度存在较明显差异,其与铝土矿化过程出现的矿物组合及含量密切相关, Li 主要富集于含矿岩系中上部,而 Sc 和 Ga 富集于含矿岩系中下部。

陈建等^[14]通过对大田铝土矿矿床钻孔岩芯样品进行地球化学分析,发现含矿岩系中 Li、Ga 等元素有一定的富集特征,其中 Li 主要聚集在铝含量相对较少的黏土矿物中, Ga 在 Al 含量较高的土状铝土矿中未发生富集,但在剖面上与 Al 具有一定的相关性特征,并主要富集于含碎屑块状铝土岩下部。

二叠系峨眉山玄武岩顶部与上覆宣威组/龙潭组的不整合面上发育一套由富 Sc、Nb 和 REE 等关键金属的 Fe-Al 岩系。苏之良等^[15]研究发现, Sc、Nb 和 REE 在宣威组与玄武岩不整合面中的 Fe-Al 岩系中分布较均匀,其中, Sc 富集于下部, Nb 富集于上部, REE 富集于岩系中下部,赋存岩性分别为含

凝灰质铁质粘土岩、豆鲕状铝土质粘土岩和铝质粘土岩; 在龙潭组与玄武岩不整合面的 Fe-Al 岩系中, Sc 富集于下部, Nb 和 REE 则富集于岩系上部及上覆煤系地层的底部, 主要赋存岩性分别为凝灰质粘土岩、植物屑粘土岩和炭质粘土岩。袁民汕等^[16]也发现在龙潭组与玄武岩不整合面的岩石中, Sc、Nb 和 REE 具有较明显的“分异”和“分层”富集特征, 其中, Sc 主要富集于中下部含铁质粘土岩中, 而 Nb、REE 则主要富集于上部铝质、炭质粘土岩中。

2.1 富集机理

铝土矿成矿的实质是活动性强的碱性和碱土元素 (K、Ca、Na 等) 的迁出和化学性质相对稳定的元素 (REE、Al、Li、Ti、Ga 和 Sc 等) 的富集过程, 从而形成铝土矿并伴生一些关键金属元素富集于铝土矿矿石、铝土岩和含铝黏土岩中。因此, 铝土矿的成矿过程也就是这些关键金属的富集过程。

范宏鹏等^[11]指出铝土矿(岩)中 Li 的富集与铝土矿的成矿过程关系密切, 铝土矿的成矿物质来自地层岩石的风化-沉积作用, 因此原岩的 Li 含量可能为铝土矿(岩)中 Li 提供物质来源, 但并非影响铝土矿(岩)中 Li 含量高低的决定性因素, 而沉积环境, 甚至沉积古地理、气候、和矿物的分化及新矿物的形成和沉积都可能是控制 Li 活化、迁移和再富集的主要因素, 但目前研究还十分薄弱, 各种认识依然存在较大的争议。王天顺等^[17]也认为原岩在搬运、沉积和成岩过程中不同的古气候、古地理、古构造、古地形地貌以及物理、化学作用所形成的沉积物具有不同的元素组成特征, 其中的关键金属含量也就具有较大的差别。

谷静等^[18]通过对黔北务-正道地区新木-宴溪铝土矿岩矿石主量以及 REE 的系统分析, 探讨了黔北铝土矿稀土元素富集特征以及底部层位中 REE 的富集机制。其研究表明: 1) 介质 pH 值以及剖面上铝土矿化程度是 REE 富集的关键影响因素; 2) 铝土矿底部的更高含量的粘土矿物是造成铝土含矿岩系底部稀 REE 富集的重要因素; 3) 针铁矿对 REE 尤其是 LREE 发挥了重要的吸附作用; 4) REE 富集还与氧化还原环境有关。

王洪等^[19]对黔北务正道地区新民铝土矿矿床中 REE 异常富集进行了研究, 发现 REE 的异常富集发生在含铝岩系沉积前的古风化壳阶段但厚度较薄, 而含铝岩系的再风化阶段稀土元素发生一定量的迁移, 但不具稀土矿化意义; 铝土矿化过程中, 从 LREE 到 HREE, 元素活动性逐渐减弱; 古风化壳阶段富铁绿泥石在弱碱性、弱还原环境下沉淀, 下伏碳酸盐岩地层促进了 REE 在富铁绿泥石层中的富集, 而含铝岩系的沉积和再风化阶段均为酸性、氧化环境。

吴林等^[20]根据黔中猫场铝土矿矿床岩石 w(Th)值及 Sr/Ba 值推测该矿区铝土矿形成于海陆交互的沉积环境, 且以陆相沉积为主, 而 Th/U 值指示铝土矿成矿过程为氧化还原交替的成矿环境, 这些条件可能影响了含矿岩系中 Li、V、Ga、Sc、Nb、Ta、Th、Hf、Zr、Y 和 REE 等微量元素的富集。

陈建等^[21]发现黔东南铁厂沟铝土矿形成环境具一定的陆相沉积特征, 并以海陆交互为主, 含矿岩系中 δCe 异常总体为弱负异常, 表明其沉积环境总体以弱还原环境为主, 但由于地壳抬升后, 酸性流体的风化淋滤作用使得上部铝土岩体现出弱氧化的特征, 并造成上层铝土岩轻稀土元素的分馏及总稀土元素含量下降, 最终改变了上、下层铝土岩的稀土分布。

吕留彦等^[22]针对黔中早石炭世铝土矿成矿带上的九架炉组开展探槽和剖面测量, 并进行地球化学研究, 认为碳酸盐岩基底为早石炭世九架炉组含铝岩系提供了物质来源, 含铝岩系形成于还原的陆相沉积环境中且风化不彻底成分复杂, 而该区古喀斯特地貌控制了含铝岩系的发育程度、规模和沉积环境, 同时早石炭世封闭、还原的湖泊沉积环境及炎热干燥的古气候条件制约了铝土矿成矿, 从而可能影响关键金属的富集过程。

2.2 赋存状态

范宏鹏等^[11]指出 Li 在铝土矿矿床含铝岩系中可能的赋存形式有: 1) 以离子吸附的形式赋存在黏土矿物和铁锰氧化物表面, 其中蒙脱石是最有可能的载体矿物, 因为作为层状含水铝硅酸盐矿物, 其 TOT 晶体结构单元中间为铝氧八面体, 上下两层为硅氧四面体, 在单元层间通常含有一些交换阳离子,

有较高的阳离子交换容量, Li^+ 就常被发现存在于该层间离子交换层中, 且得益于较高的负电荷量和比表面, 蒙脱石具有强于其他黏土矿物如伊利石和高岭石吸附阳离子的能力; 2) 以类质同象的形式替代镁铁硅酸岩矿物、黏土矿物及铁锰矿物晶格中与 Li^+ 的离子半径的相近的 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 。铝土矿(岩)中是否存在 Li 的独立矿物, 如类似黏土岩中的锂绿泥石, 还缺少实际证据。

叶彤等^[23]总结了于铝土矿中伴生关键金属元素的赋存形式, 发现这些元素通常以类质同象的形式进入矿物晶格和离子态吸附于矿物表面两种形式产出, 但在很多铝土矿中均发现有少量稀土独立矿物的存在。其中, REE 可能以类质同象的形式进入锆石等矿物中, 也可能吸附在粘土矿物、磷酸盐矿物、锆石、锐钛矿、金红石以及铁锰氧化物等矿物表面; Nb 则更多地赋存在钛金云母, 锐钛矿、金红石及粘土矿物中; Ga^{3+} 会主要以类质同相的形式取代 Al^{3+} 而存在于铝土矿中。Nb、Ta、Zr、Hf、V、Th、Ti 等作为铝土矿矿化过程中的不活动性元素, 极易吸附在粘土矿物表面, 但 V 在缺氧/贫氧环境下, 会通过替代铝和铁在八面体的位置富集于伊利石和绿泥石中。此外, Zr、Hf 和 Th 也常以类质同象的形式进入锆石中。

谷静等^[18]通过对黔北务-正道地区新木-宴溪铝土矿岩矿石主量以及稀土元素的系统分析, 发现铝土矿含矿岩系中的 REE 分布主要受铁矿物(如针铁矿)、含钙矿物(如磷灰石、方解石、白云石)以及粘土矿物(如高岭石、蒙脱石、伊利石)的控制。REE 极易吸附到蒙脱石和高岭石等粘土矿物的表面, 而铝土矿底部的粘土矿物含量较顶部和中部更高, 这就可能造成稀土元素富集到铝土矿含矿岩系的底部。高军波等^[24]在研究贵州镇远煌斑岩风化壳中稀土元素赋存状态时也发现 REE 可能以离子吸附形式赋存于粘土矿物中。

黄苑龄等^[25]通过化学物相分析, 包括水溶相、离子相、胶态沉积相和矿物相 4 个相态进行逐级分离, 以及碳酸盐类、有机质、铁矿物类、石英及硅酸盐类进行逐级分离等, 研究了黔北务正道铝土矿中 REE 的赋存状态, 发现该区铝土矿中 REE 主要是以矿物相和离子相为主, 水溶相稀土和胶态沉积相 REE 极少, 且矿物相 REE 主要赋存于硅酸盐类矿物中; 结合该区铝土矿矿物组成特征, 认为粘土矿物是其中 REE 主要的载体矿物, REE 主要呈类质同象形式赋存于粘土矿物(如高岭石和绿泥石等)中, 部分 REE 呈分散状态被铝矿物(如一水硬铝石、软水铝石、三水铝石等)以及粘土矿物吸附。

黔中猫场铝土矿是我国最大的隐伏铝土矿矿床, 已发现伴生有 Ga、Sc 和 Li 等关键矿产资源, 然而对硫铁矿中可能伴生的关键金属尚未引起足够的重视。王宇非等^[26]通过系统开展猫场杨家洞矿段中不同类型含矿岩系及矿石中黄铁矿的精细矿物学工作, 发现 Co 主要以类质同象的方式赋存于黄铁矿晶格内。猫场铝土矿中富钴黄铁矿的发现为猫场矿区硫铁矿的综合回收利用乃至黔中地区铝土矿中伴生关键金属类型找矿提供了新的方向。

2.3 综合利用

含铝岩系中的伴生的关键金属资源潜力巨大, Li、Ga、Sc、V、Ti、Ag、Zr、Hf、Nb、Ta 和 REE 大多接近或超过了工业综合利用标准, 其中铝土矿中伴生的关键金属的潜在经济价值可能超过铝土矿主产品氧化铝的价值, 例如, 苏之良等^[12]发现新民铝土矿床含铝岩系中, 关键金属 Li、Ga、Sc、REE 的资源潜力和潜在经济价值巨大, 预测 Li、Ga、Sc 和 REE 的远景资源储量分别达到大型矿床规模的 3.2 倍、3.8 倍、669 倍和 2.1 倍。但目前铝土矿含铝岩系中的绝大部分关键金属尚未投入工业利用。其中, 利用最广泛是 Ga, 世界上 90% 的 Ga 来自炼铝(铝土矿)工业, 主要用石灰乳法、萃取法和汞齐电解法等较为成熟的提取技术从生产铝土矿的循环母液中回收。其他伴生的关键金属主要残留在铝土矿生产氧化铝过程中产生的固体废弃物(赤泥)中。目前, 从赤泥中有效地回收这些关键金属的工艺还较少。叶彤等^[22]指出工业生产通常选用湿法冶金和火法-湿法冶金法从赤泥中提取 Sc, 而一些特殊的选择性吸附剂, 例如疏水离子液体双(三氟甲基磺酰基)酰亚胺铍(HbetTf2N)、树脂 D201 以及 D2EHPA 和 TBP 组成的有机体系在 Sc 的提取中起着重要作用, 但成本较高难以工业化。氧化铝生产过程导致矿石中几乎所有的 REE 都富集到赤泥的各个矿物相中, 包括铝土矿保留下来的矿物相或新形成的矿物相, 含 Fe 或 Ti 的矿物是其主要载体矿物, 硅酸盐矿物相或新形成的矿物相也是 REE 潜

在载体矿物, 另外也存在少量的 REE 独立矿物。李海兰等^[27]指出赤泥中 REE 的回收技术时多处于实验室研究阶段, 包括直接酸浸、焙烧浸出和生物浸出等方法, 其中, 直接酸浸和焙烧浸出是有效的赤泥回收 REE 的方法, 但难点是如何增加浸出的选择性, 及简化工艺流程, 而生物浸出则更绿色环保, 可能成为未来最具前景的回收 REE 的方法。另外, 李海兰等^[27]还指出在回收 REE 的过程中, 设计和发展多元素回收工艺, 将 Fe、Al、Na、Ti 和 REE 等元素均纳入提取回收流程, 并将有用金属回收后所产生的残渣作为制备建筑装饰、催化支撑材料、吸附剂等的原材料, 有可能成为铝土矿综合利用的发展方向。

参 考 文 献:

- [1] 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 等. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题[J]. 中国科学基金, 2019, 33(2): 106-111.
- [2] Vidal O, Goffé B, Arndt N. Metals for a low-carbon society[J]. Nat Geosci, 2013, 6, 894-896.
- [3] MONGELLI G, BUCCIONE R, GUEGUEN E, et al. Geochemistry of the apulian allochthonous karst bauxite, Southern Italy: Distribution of critical elements and constraints on Late Cretaceous Peri-Tethyan palaeogeography[J]. Ore Geol Rev, 2016, 77: 246-259.
- [4] Khosravi M, Abedini A, Alipour S, et al. The Darzi-Vali bauxite deposit, West-Azarbaijan Province, Iran: critical metals distribution and parental affinities[J]. J Afr Earth Sci, 2017, 129: 960-972.
- [5] Ling K Y, Tang H S, Zhang Z W, et al. Host minerals of Li-Ga-V-rare earth elements in Carboniferous karstic bauxites in southwest China[J]. Ore Geol Rev, 2020, 119: 103325.
- [6] 王瑞江, 王登红, 李健康, 等. 稀有稀土稀散矿产资源及其开发利用[M].北京: 地质出版社, 2015: 1-37.
- [7] 温汉捷, 罗重光, 杜胜江, 等. 碳酸盐黏土型锂资源的发现及意义[J]. 科学通报, 2020, 65(1): 53-59.
- [8] 黄智龙, 金中国, 向贤礼, 等. 黔北铝土矿成矿理论及预测[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 1-245
- [9] 王登红, 李沛刚, 屈文俊, 等. 贵州大竹园铝土矿中钨和锂的发现与综合评价[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 44-51.
- [10] 金中国, 周家喜, 黄智龙, 等. 黔北务-正-道地区典型铝土矿床伴生有益元素锂、铍和铀分布规律[J]. 中国地质, 2015, 42(6): 1910-1918..
- [11] 范宏鹏, 叶霖, 黄智龙. 铝土矿(岩)中伴生的锂资源[J/OL]. 矿物学报, 2021. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2021.41.090>.
- [12] 苏之良, 杜嵩, 巩鑫, 等. 黔北道真新民铝土矿含铝岩系中关键金属富集特征与资源潜力[J/OL]. 矿物学报, 2021. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2021.41.088>.
- [13] 李海兰, 范宏鹏, 张杰, 等. 黔北旦坪铝土矿床含矿岩系伴生元素富集规律[J/OL]. 矿物学报, 2021. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2021.41.052>.
- [14] 陈健, 向震中, 万斌, 等. 黔东大田铝土矿(岩)伴生元素分布特征[J/OL]. 矿物学报, 2021. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2021.41.099>.
- [15] 苏之良, 薛洪富, 金中国, 等. 黔西北峨眉山玄武岩顶部 Fe-Al 岩系铀、铍、稀土分布特征及其富集规律[J/OL]. 矿物学报, 2021. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2021.41.111>.
- [16] 袁民汕, 蔡国盛, 曾道国, 等. 贵州西部二叠系峨眉山玄武岩顶部古风化壳铀-铍-稀土矿化富集层的发现与意义[J/OL]. 矿物学报, 2021. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2021.41.089>.
- [17] 王天顺, 付勇, 何伟, 等. 中国铝土矿碎屑锆石记录与物质来源分析[J/OL]. 矿物学报, 2021. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2021.41.100>
- [18] 谷静, 黄智龙, 金中国. 黔北务-正-道地区新木-宴溪铝土矿含矿岩系底部稀土元素富集机制[J/OL]. 矿物学报, 2021. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2021.41.107>.
- [19] 王洪, 谷静, 黄智龙, 等. 黔北务正道地区新民铝土矿形成过程中的 REE 迁移与富集[J/OL]. 矿物学报, 2021. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2021.41.114>.
- [20] 吴林, 黄智龙, 王智琳, 等. 黔中猫场铝土矿地球化学研究[J/OL]. 矿物学报, 2021. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2021.41.103>.
- [21] 陈健, 向震中, 严琦, 等. 黔东南铁厂沟铝土矿含矿岩系地球化学研究[J/OL]. 矿物学报, 2021. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2021.41.109>.
- [22] 吕留彦, 陈仁, 于宁, 等. 黔中开阳地区早石炭世大塘期岩相古地理对铝土矿成矿的制约[J/OL]. 矿物学报, 2021. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2021.41.072>.
- [23] 叶彤, 谷静, 王甘露, 等. 铝土矿中伴生三稀元素研究进展[J/OL]. 矿物学报, 2021. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2021.41.065>.
- [24] 高军波, 杨光海, 汪龙波, 等. 贵州镇远煌斑岩风化壳中稀土-铍的富集特征与赋存状态[J/OL]. 矿物学报, 2021. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2021.41.102>.
- [25] 黄苑龄, 谷静, 张杰, 等. 黔北务-正-道铝土矿中稀土元素赋存状态初探[J/OL]. 矿物学报, 2021. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2021.41.073>.
- [26] 王宇非, 王智琳, 鲁安怀, 等. 黔中猫场杨家洞矿段铝土矿中富钴黄铁矿的发现与意义[J/OL]. 矿物学报, 2021. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2021.41.087>.
- [27] 李海兰, 张杰, 吴林, 等. 赤泥中的稀土资源: 分布、赋存和提取[J/OL]. 矿物学报, 2021. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2021.41.110>.