

铝土矿地质与成因研究进展

王庆飞¹, 邓 军¹, 刘学飞¹, 张起钻², 李中明³, 康 微¹, 蔡书慧¹, 李 宁¹

(1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;

2. 广西壮族自治区地质矿产勘查开发局, 广西南宁 530023;

3. 河南省地质调查院, 河南郑州 450000)

[摘 要]我国铝土矿产时空分布广,类型多样,铝土矿地质与成因研究对促进铝土矿地质学发展有重要意义。本文从铝土矿矿床分类、铝土矿的矿体形态与内部结构、矿体层序、物质组成、物质来源、成矿环境和成因机制等方面,综述了国内外铝土矿地质学的研究进展,阐释了我国铝土矿的部分特征,提出了近年我国铝土矿研究的部分新方法 with 观点;应用铝土矿中碎屑锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素特征,判识了多个喀斯特型铝土矿集中区的物质来源,提出多数喀斯特型铝土矿多具有异源特征,与区域重大地质事件具有成因联系,是洋陆俯冲、大陆漂移以及集中风化等多因耦合的结果。提出了我国喀斯特型铝土矿迁移机制,认为华北板内铝土矿(山西、河南)成因机制主体为“离子结晶与碎屑沉积”综合成因;而华南铝土矿(贵州、广西)成因机制主体为“离子结晶”成因。

[关键词]中国铝土矿 分类 物质演化 物质来源 成矿环境 成因机制

[中图分类号]P618

[文献标识码]A

[文章编号]0495-5331(2012)03-0430-19

Wang Qing-fei, Deng Jun, Liu Xue-fei, Zhang Qi-zuan, Li Zhong-ming, Kang Wei, Cai Shu-hui, Li Ning. Review on research of bauxite geology and genesis in China[J]. *Geology and Exploration*, 2012, 48(3): 0430-0448.

1 引言

铝土矿是在潮湿的热带-亚热带气候条件下地表风化作用的产物,富含 Al、Fe 和 Ti 的氢氧化物和氧化物(Bárdossy, 1982; Bárdossy and Aleva, 1990; D'Argenio and Mindszenty, 1995; Calagari and Abedini, 2007; Deng *et al.*, 2010)。铝土矿是金属铝的主要原料,其用量占世界铝土矿总产量的 90% 以上,铝土矿还可应用于耐火材料、研磨材料、化学制品及高铝水泥的加工。2008 年世界铝土矿储量为 270 亿 t,几内亚、澳大利亚、越南的储量居世界前 3 位,其中中国铝土矿储量占世界总储量的 3%。2008 年世界铝土矿产量为 2.11 亿 t,生产铝土矿的国家有澳大利亚、几内亚、巴西、中国、印度等国家,其中中国生产的铝土矿占世界总量的 10%。2008 年世界原铝产量为 3926.39 万 t,美国、俄罗斯、加拿

大、中国等国家是原铝生产大国,其中中国原铝产量占世界原铝总产量的 34% (数据来自《Mineral Commodity Summaries》,2008, 2009)。总体而言,中国铝土矿资源储量不多,但是需求量巨大;从而深入认识中国铝土矿成因与分布规律,大力开展铝土矿勘查有重要现实意义。中国铝土矿分布的时空范围较广,成因类型多样,成矿过程复杂,影响因素多;对中国铝土矿成因的深入揭示对于发展铝土矿成矿理论有重要作用。

国际铝土矿研究主体起步于 20 世纪初期,在近百一个世纪研究中,前人从铝土矿矿床地质特征、类型划分、物质组成、物质来源与成因理论等多个方面做了系统探索,深入揭示了铝土矿成矿环境与成矿过程,取得了重大的成果。与国际铝土矿相比,中国铝土矿研究起步相对较晚;经过几代研究者的持续工作,在物质组成、矿床成因等方面的研究都有较大进

[收稿日期]2011-12-10;[修订日期]2012-01-18;[责任编辑]郝情情。

[基金项目]河南省覆盖区铝(粘)土矿资源潜力评价和找矿技术研究项目(项目编号:资[2010]矿评01-12-13号);广西地质矿产勘查开发局地质勘查项目(编号:桂地矿技[2008]02号);豫西铝土矿成矿物质来源研究(项目编号:41102048)和新世纪优秀人才支撑计划(项目编号:NCET-10-0752)资助。

[第一作者]王庆飞(1978年-),男,副教授,现主要从事固体矿产和数学地质等方面研究。E-mail: wqf@cugb.edu.cn。

展;但是由于成矿过程与物质赋存状态复杂,研究难度较大;在物质来源、成矿方式等方面也存在诸多争议。本文综述了国内外铝土矿研究的主要研究方法,与进展,初步提出了中国铝土矿成矿的一些新观点。

2 铝土矿矿床分类

2.1 分类体系

铝土矿的分类经历了长达一个世纪的探索与研究。诸多国内外学者通过铝土矿的物质组成、矿体形态、地质产状、基岩类型、矿床成因以及产出大地构造背景等对铝土矿展开了详细的分类研究。

最早区分不同类型铝土矿的主要依据是矿石的矿物和化学组成(Lapparent, 1930; Schneiderhohn, 1944; Konta, 1958)。但是由于大多数铝土矿都具有不一样的化学和矿物组成特征,因此该分类结果只能将铝土矿地球化学和矿物学方面区分开。Peive(1947)首先认识到矿体所在大地构造位置的重要性,所以根据大地构造背景将铝土矿进行了分类。但构造背景分类也存在不足之处,即大地构造过程只能间接地影响铝土矿矿化过程,不能作为标准区分开各类铝土矿。之后,铝土矿矿体形状和地质产状被列为铝土矿分类的标准(Harder and Greig, 1960; Patterson, 1967; Grubb, 1973; Patterson *et al.*, 1986);该分类模型的优点为其反映了矿体形状和位置的真正差别,然而模糊性仍然存在。此外,一些纯成因分类也被提到(Vikulova, 1946; Bushinsky, 1975; Saposhnikov, 1975; Kirpal, 1977);成因分类的一个共同缺点即一些标准都是演绎和理论化的,野外实际的应用性较差。

目前,应用最广泛的是根据基岩来分类。根据基岩类型,铝土矿主要分为喀斯特型和红土型两类。产于碳酸盐岩古喀斯特面之上的称为喀斯特型铝土矿,产于铝硅酸盐岩之上的称为红土型(Bárdossy and Aleva, 1990; D'Argenio and Mindszenty, 1995)。喀斯特型铝土矿据其产出大地构造背景又可划分为板内喀斯特型铝土矿和造山带型铝土矿;其中,造山带型铝土矿占喀斯特型铝土矿总量约85%(D'Argenio and Mindszenty, 1995)。应用基岩分类的本质观念是基岩或者母岩的组成物质影响着矿体的形态、物质组成与岩石学特征矿体。因此,近年来,根据基岩类型进行的铝土矿分类被广泛应用在世界各地铝土矿研究中(Horbe and Costa, 1999; Mordberg, 2001; Laskou, 2003; Mameli *et al.*, 2007; Deng *et*

al., 2010)。

2.2 中国铝土矿矿床分布与类型

我国铝土矿产于古生界、中生界和新生界各地层之中,以石炭纪和二叠纪铝土矿分布最广;石炭纪铝土矿大量分布于华北准地台上,二叠纪铝土矿则大量分布于扬子和华南准地台上(表1)。

依据基岩类型,我国铝土矿主体可以分为两种类型。第一类为喀斯特型铝土矿,含铝矿物主要为硬水铝石,也称为硬水铝石喀斯特型铝土矿。喀斯特型铝土矿占据我国铝土矿总资源量的85%以上,主体分部在山西、河南、贵州和广西等地区(Wang *et al.*, 2010; 刘学飞, 2011)。第二类为红土型铝土矿,主要分布在桂中、福建漳浦、广东雷州半岛和海南蓬莱等地,主要含铝矿物为三水铝石,也称三水铝石红土型铝土矿。其中,桂中地区红土型铝土矿铁含量较高,也称之为高铁红土型铝土矿。

我国铝土矿的工业类型主要包括高铁型铝土矿、高铁低硫型铝土矿、高硫型铝土矿、低铁低硫型铝土矿和中、高铁型铝土矿,其中以高铁铝土矿和低铁低硫型铝土矿为主导。我国铝土矿发育地层时代、主要分布地区、自然类型、工业类型以及成因类型见表1。

3 矿体结构与共生矿产

含矿岩系层序与矿体内部结构的研究有助于理解铝土矿的形成过程。目前,主要借助沉积学、层序地层学、沉积古地理、矿田构造、地貌地形学、岩溶学和数理统计等多学科综合研究,进行探索铝土矿层序格架和解析矿体内部结构特征(图1)。

3.1 矿体层序

(1) 华北铝土矿:含矿岩系层序组成严格受喀斯特地形控制。以华北G层铝土矿溶斗和溶洼型矿体为例,论述其含矿岩系层序特征。在溶斗内部,自下到上包括铝质粘土、豆鲕状铝土矿、块状铝土矿、铝土质粘土、碳质泥页岩、砂岩/灰岩(顶板);在溶斗周围隆起处,自下而上包括风化壳(铁质粘土)、块状铝土矿、铝土质粘土岩、碳质泥页岩、砂岩/灰岩(顶板);在局部地形更高的区域,层序中缺失了铝土矿层,自下而上包括风化壳(铁质粘土)、铝土质粘土岩、砂岩/灰岩(顶板),或者没有地层记录,直接与顶板接触。在溶洼为主的古地形中,在溶洼内部,层序自下而上包括铝质粘土(含菱铁矿粘土)、豆鲕状铝土矿、粘土质铝土矿/粘土岩/碳质泥

表 1 中国铝土矿时代、分布及其类型

Table 1 Metallogenic epochs, distribution and types of bauxite deposits in China

地层时代	主要矿区	自然类型	工业类型	成因类型
第四纪	桂西平果、那坡、田阳、靖西等	硬水铝石型	高铁型铝土矿	喀斯特型(堆积型)
更新世	桂中的贵港、横县、宾阳、来宾、武鸣等	三水铝石型	高铁型铝土矿	钙红土型
第三纪	福建漳浦,广东雷州半岛,海南蓬莱	三水铝石型	高铁低硫型铝土矿	红土型
晚二叠世	广西田阳、平果,湖南保靖、怀化,陕西西乡	硬水铝石型	高硫型铝土矿	喀斯特型(沉积型)
早二叠世	湖南泸溪、慈利,四川南川,辽宁本溪田师付等	硬水铝石型	低铁低硫型铝土矿	喀斯特型(沉积型)
晚石炭世	贵州开阳、息峰、遵义,河南张瑶院、杜家沟、新安郁山、山西平陆,陕西铜川、白河	硬水铝石型	低铁低硫型铝土矿	喀斯特型(沉积型)
中石炭世	辽宁本溪、复州湾,山东淄博,河北唐山、滦县,陕西府谷,四川昭化等	硬水铝石型	中、高铁型铝土矿	喀斯特型(沉积型)

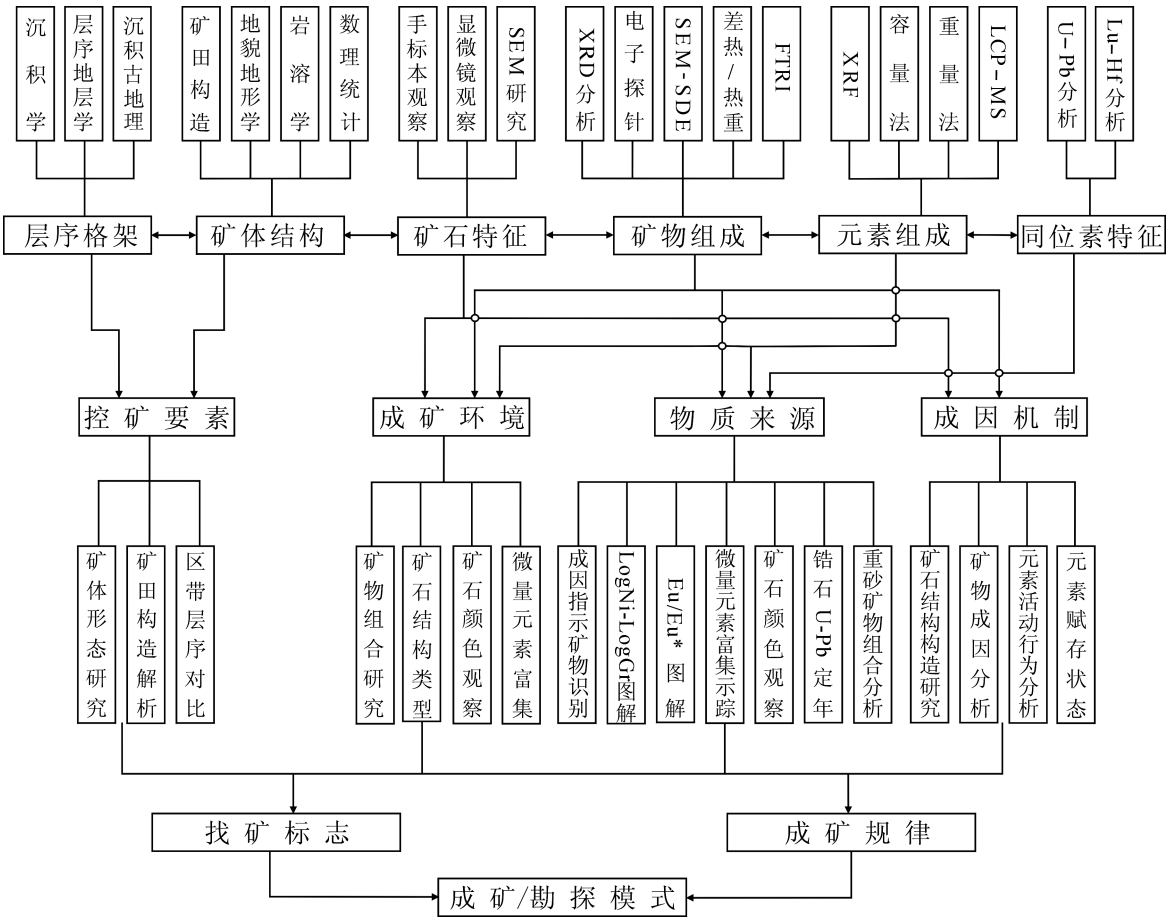


图 1 铝土矿研究框架图

Fig.1 Framework diagram of bauxite study methods

页岩、块状铝土矿、铝质粘土岩、碳质泥页岩、砂岩/灰岩(顶板);向溶洼开口方向延伸层序组成变的简单,自下而上包括铁质粘土、块状铝土矿、铝土质粘土、碳质泥页岩、顶板砂岩/灰岩(图2)。铝土矿体的层序特征反映了不同部位的氧化—还原条件的不同。

(2) 桂西铝土矿: 桂西喀斯特型铝土矿包括二

叠系沉积型和第四系堆积型两种类型的铝土矿。二叠系沉积型铝土矿赋存于二叠系三合组底部,茅口组古喀斯特面之上。铝土矿含矿层序受古喀斯特地形地貌控制(图3)。含矿岩系主体由下部的铁质粘土岩/铁帽和上部的含铝岩系组成;含铝岩系中铝土矿层数受古喀斯特地貌的控制,在以喀斯特洼地中,

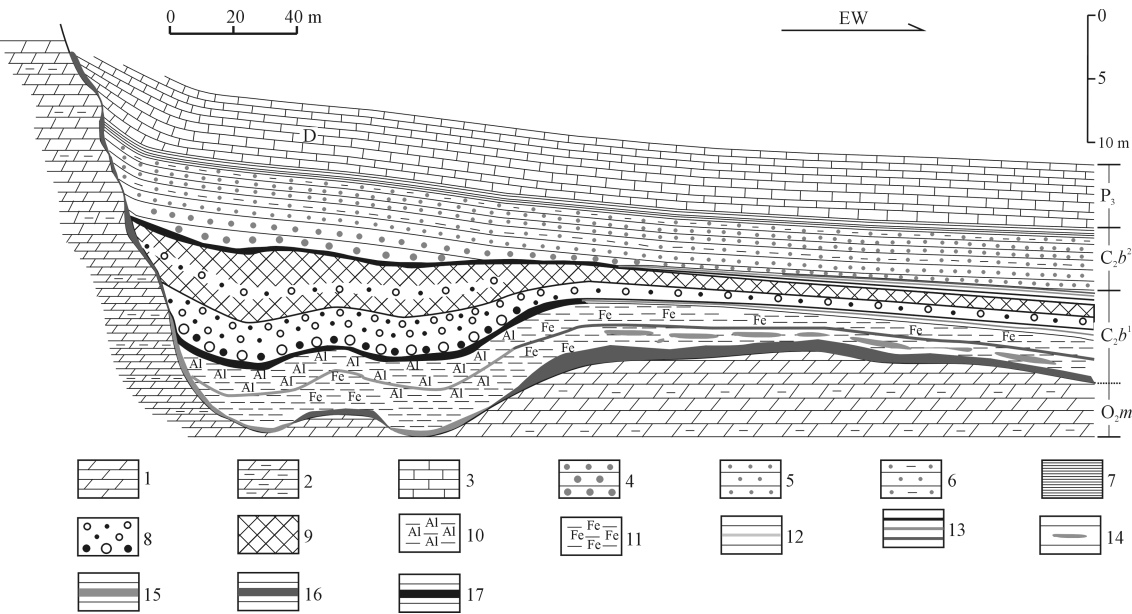


图2 华北溶洼型铝土矿层序组成示意图

Fig. 2 Sketch illustrating bauxite horizons in the karstic depression in North China

1-白云岩;2-泥质白云岩;3-灰岩;4-粗砂岩;5-砂岩;6-泥砂岩;7-泥页岩;8-豆鲕粒铝土矿;9-块状铝土矿;
10-铝质粘土;11-铁质粘土;12-碳质泥岩;13-杂色泥页岩;14-铁锰质团块;15-铝质泥岩;16-铁质风化壳;17-煤层
1-dolostone;2-muddy dolostone;3-limestone;4-gritstone;5-sandstone;6-siltstone;7-clay-shale; 8-beansoolitic
bauxite;9-massive bauxite;10-aluminum clay;11-irony rock;12-carbonaceous mudstone;13-variegated clay shale;
14-mass of iron and manganese;15-aluminum mudstone; 16-irony weathering;17-coal seam

经常包含两个铝土矿-碳质泥岩/粘土岩旋回;局部地区也包含三个铝土矿-碳质泥岩/粘土岩旋回;在岩溶高地处,通常只包含一个铝土矿-碳质泥岩/粘土岩旋回。堆积铝土矿矿体赋存于岩溶洼地内第四系更新统岩溶堆积红土层中(图4)。含矿层序从底向上包括红土层、堆积型铝土矿和上部粘土层;反映了第四纪红土化过程与矿石堆积过程的共同发展。

(3) 贵州铝土矿: 贵州铝土矿主体赋存于晚石炭世九架炉组中, 主要包括两种剖面类型(刘平, 1995)。第一类型为铁质岩-铝质岩类型。该类型剖面下部主要为铁质粘土岩、绿泥石粘土岩、绿泥石岩, 常夹块状、豆鲕状的赤铁矿、绿泥石铁矿、菱铁矿及褐铁矿透镜体和结核, 局部构成铁矿体, 并时与黄铁矿体共生。剖面的中上部为铝质岩, 包括各种类型的铝土矿和铝土岩, 常夹粘土岩, 偶尔有炭质粘土岩和劣质煤。第二类型为粘土岩-铝质岩类型。下部主要为伊利石粘土岩, 常含星点状、结核状、致密块状黄铁矿, 局部构成工业矿体; 中上部有各种铝质岩夹粘土岩, 偶尔夹炭质粘土岩和劣质煤; 该此类剖面结构在全区范围内普遍发育。

(4) 桂中铝土矿: 铝土矿和高岭土矿共生。桂

中红土型铝土矿主要分布在泥盆系、石炭系碳酸岩溶准平原内低丘、矮岭和台地的第四系红土层中, 具有明显的垂向分带性。自下向上依次为: 灰岩、粘土层、铝土矿层、表土层。但由于第四纪的水动力条件, 使得各地的铝土矿有明显差异, 主要体现在垂直分带的差异。剖面类型主要包括如下几种: ① 底板灰岩之上为表层土, 此种剖面类型的矿点含矿石较少, 无开发价值; ② 底板灰岩之上为铝土矿层, 铝土矿含矿率较高, 通常达到中等含矿强度; ③ 底板灰岩之上为粘土层、铝土矿层; ④ 自下而上为粘土层、铝土矿层、表层土或没有表层土; ⑤ 单一的铝土矿层; ⑥ 高岭土层、表层土。

3.2 品位-吨位曲线

含铝岩系中多存在几种矿石类型: 粘土岩、铁矿、粘土质铁矿、粘土质铝土矿、铝土矿; 很多情况下, 各种类型矿石存在过渡层位; 并且根据铝土矿的质量不同, 有多种不同的工业用途; 从而建立矿体的品位-吨位模型可以为矿区矿石开采提供基础依据。在此, 介绍一个简便的计算方法; 公式(1)为基于个数-规模模型的矿石储量估算分形模型(FMRE-NS)(Wang et al, 2010a):

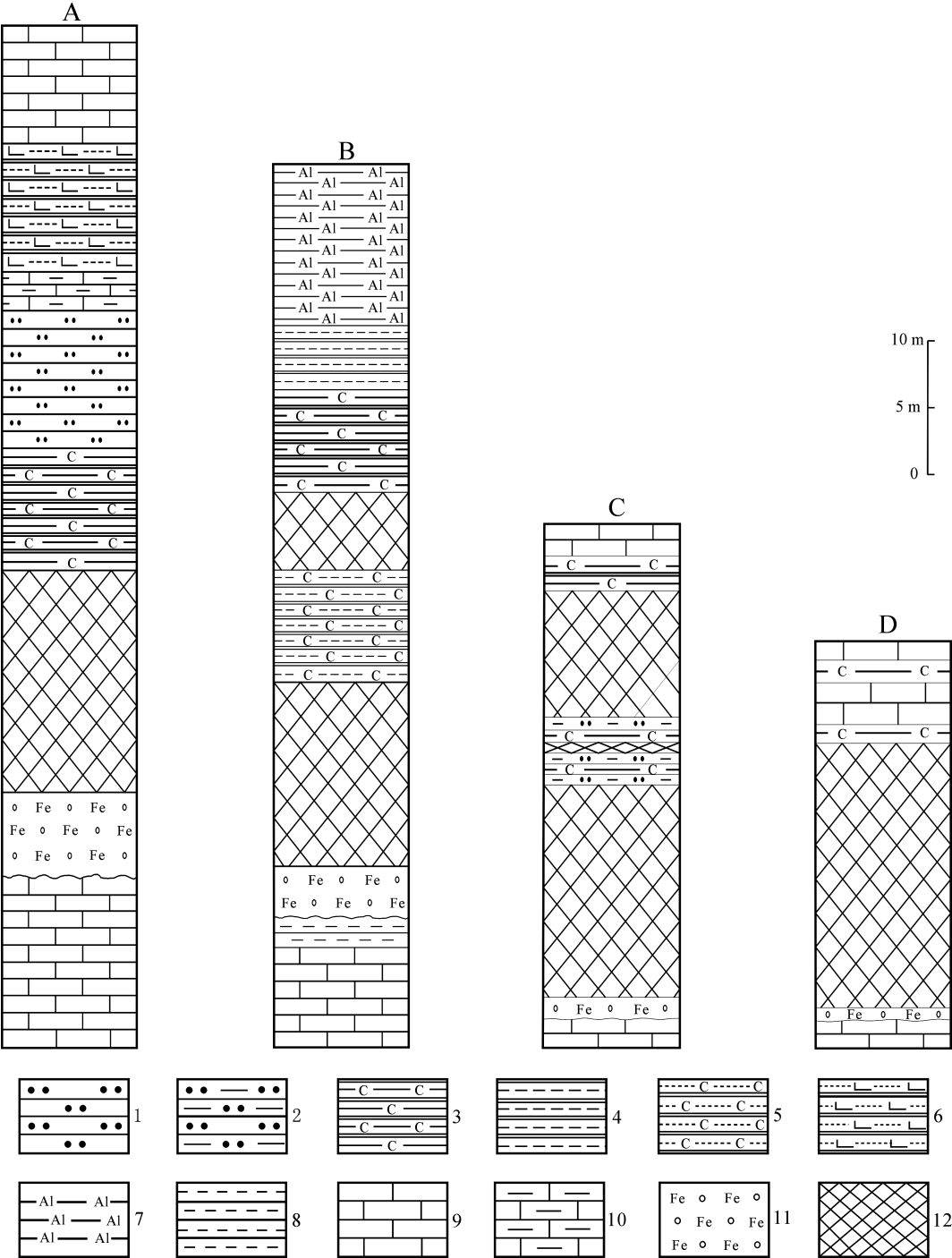


图 3 桂西二叠系铝土矿含矿岩系层序组成特征

Fig. 3 Columns showing the stratigraphic sequence of Permian bauxite horizons in the karstic depression in western Guangxi Province

A-平果高基铝土矿; B-平果太平 11 号矿体; C、D-平果那沙 37 号铝土矿体;

1-粉砂岩; 2-粉砂质泥岩; 3-炭质页岩; 4-泥页岩; 5-炭质泥页岩; 6-钙质泥页岩; 7-铝土岩; 8-粘土岩; 9-灰岩; 10-泥质灰岩; 11-铁帽; 12-铝土矿

A-Gaoji bauxite deposit in Pingguo County; B-No. 11 orebody in Taiping bauxite deposit in Pingguo County; C, D-No. 37 orebody of Nasha bauxite deposit in Pingguo County;

1-aleuvite; 2-silty mudstones; 3-carbonaceous shale; 4-clay-shale; 5-carbonaceous clay-shale; 6-calcium clay-shale; 7-bauxite; 8-claystone; 9-limestone; 10-argillaceous limestone; 11-gossan; 12-bauxite

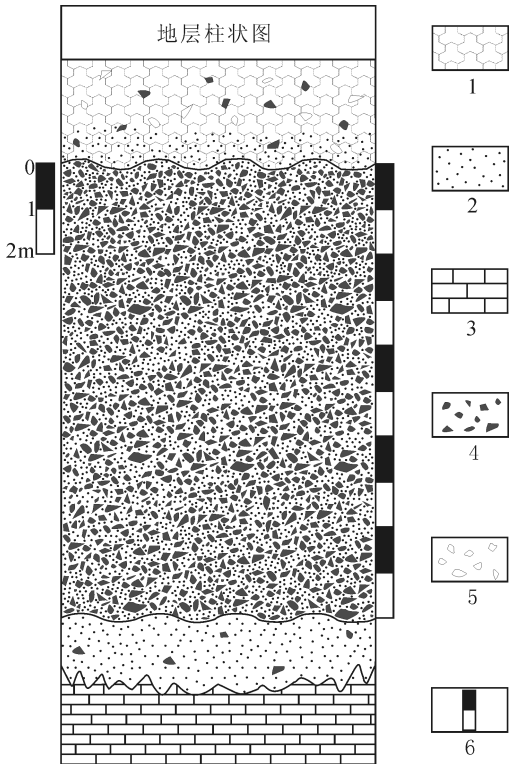


图 4 桂西堆积型铝土矿层序特征

Fig. 4 Stratigraphic column showing sequence of the Quaternary bauxite in the bauxite deposit of western Guangxi Province

1-第四纪覆盖物;2-红土;3-石灰岩;4-铝土矿;
5-石灰岩碎片;6-取样
1-Quaternary covers;2-halloysit;3-limestone;4-bauxite;
5-limestone fragments; 6-sampling

$$O_a = \rho A U_1^{D_1} \left[\frac{D_1 (U_2^{1-D_1} - U_1^{1-D_1})}{(1 - D_1)} + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{D_i \prod_{j=2}^{i-1} U_j^{D_j - D_{j-1}}}{(1 - D_i)} (U_{i+1}^{1-D_i} - U_i^{1-D_i}) \right] \quad (1)$$

式中 O_a 为矿化带质量, ρ 为矿石密度, A 为矿体面积, U_i 为分形模型中第 i 段矿化厚度的分界值, D_i 为相应的分维值。

平均品位-边界品位模型公式为 (Wang *et al*, 2010b) :

$$G_m = \frac{\frac{C_i D_i}{1 - D_i} (G_{i+1}^{1-D_i} - G_c^{1-D_i}) + \sum_{j=i+1}^n \frac{C_j D_j}{1 - D_j} (G_{j+1}^{1-D_j} - G_j^{1-D_j})}{C_i G_c^{-D_i} - C_n G_{\max}^{-D_n}} \quad (2)$$

式中 G_m 为矿石的平均品位, G_c 为矿石的边界品位, G_i 为模型中第 i 段的分界品位, $G_{\max}$ 为矿石中元素最大含量, C_i 为第 i 段个数-规模 (N-S) 分形模型的

常数。
吨位-边界品位模型公式 (Wang *et al*, 2010b) :

$$O = \frac{O_a G_c^{-D_i}}{G_a^{-D_1}} \prod_{j=2}^i G_j^{D_j - D_{j-1}} \quad (3)$$

式中 O 为矿石量, G_c 为边界品位, G_a 最小非零品位。

以山西某铝土矿为例,研究了矿体的品位-吨位模型,进一步揭示了矿体结构的特征 (图 7)。矿区共收集 135 个钻孔数据,厚度范围为 0.50 ~ 7.78 m, Al_2O_3 含量范围为 43.24% ~ 74.11%, A/S 范围为 2.66% ~ 37.86%。矿体厚度的个数-规模模型如图 5 所示,可用 4 段直线进行拟合。已知研究区矿体的面积为 10000 m^2 ,矿石密度为 3.8 g/cm^3 ,根据公式 (1) 计算可得矿石吨位为 84950.03 t。在 A/S 的 N-S 分形模型中,可用 4 段直线进行拟合。通过公式 (2) 获得 A/S 的平均品位与边界品位之间的关系。根据公式 (3) 得到 A/S 的矿石吨位与边界品位之间的关系曲线,如图 6 所示。矿区的品位-吨位曲线揭示随着矿石品位 (A/S) 的升高,矿石量急剧下降。

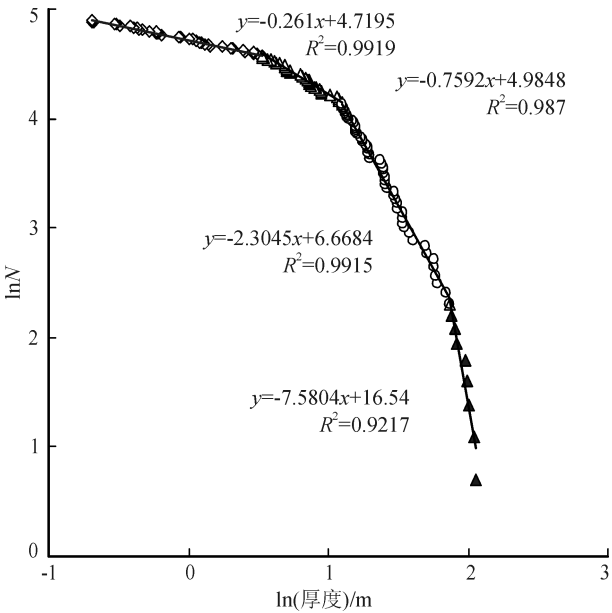


图 5 宽草坪铝土矿厚度 N-S 分形图 (原始数据来自山西省第三地质工程勘察院, 2002)

Fig. 5 Number-size model for orebody thickness in the Kuancaoping bauxite deposit (The original data are from the Third Institute of Geological Engineering Exploration of Shanxi Province, 2002)

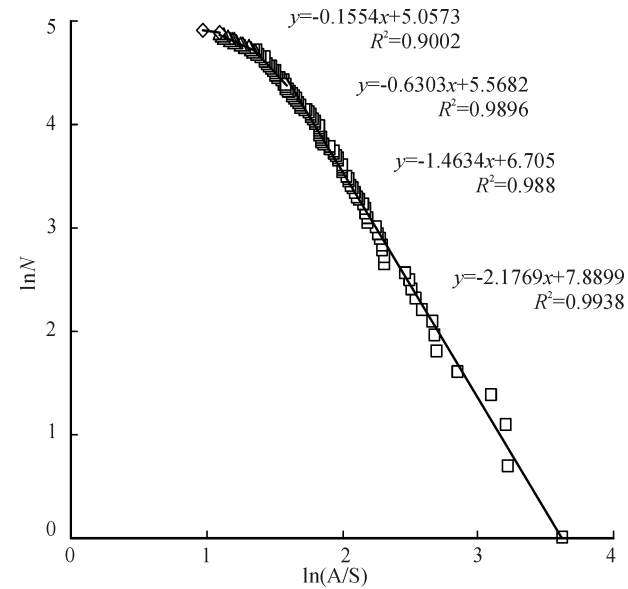


图6 宽草坪铝土矿 A/S 的 N-S 分形图(数据来自山西省第三地质工程勘察院,2002)

Fig. 6 Number-size model for A/S in the Kuancaoping bauxite deposit
(The original data are from the Third Institute of Geological Engineering Exploration of Shanxi Province, 2002)

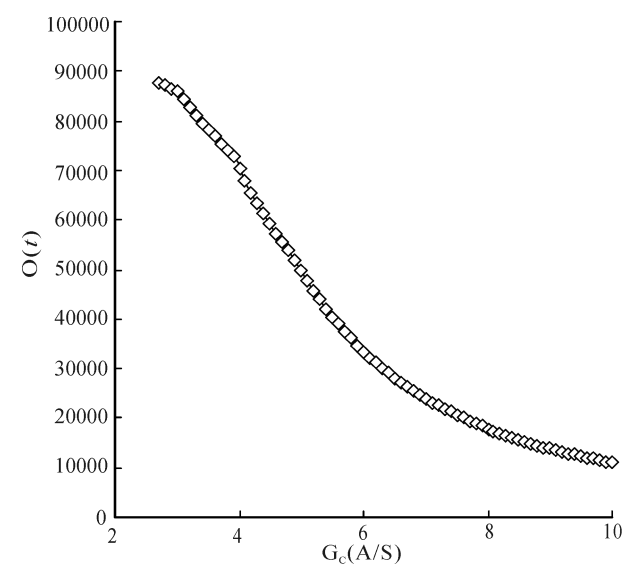


图7 宽草坪铝土矿 $G_c(A/S)$ 与 $O(t)$ 关系图
(数据来自山西省第三地质工程勘察院,2002)

Fig. 7 Relationship between ore tonnage and cutoff of A/S in the Kuancaoping bauxite deposit
(The original data are from the Third Institute of Geological Engineering Exploration of Shanxi Province, 2002)

3.3 共生矿产

不同类型的铝土矿床由于成矿条件不同,其共生矿产种类也不一样。我国喀斯特型(沉积型)铝土矿共生矿产种类最多,其上覆地层中常产有煤、熔剂灰岩、油页岩等;在含铝岩系中共生有耐火粘土、铁矾土、铁矿、硫铁矿等,其中以耐火粘土和铁矾土为主;高铁、低硫高品级的铝土矿其本身也就是高铝耐火粘土矿。我国喀斯特型(堆积型)铝土矿共生矿产主要为低品位三水铝石矿。红土型中通常共生有高岭土和钴土矿。

(1) 耐火粘土矿:耐火粘土矿是喀斯特型(沉积型)铝土矿中重要的共生矿产,通常和铝土矿是同层位相变或者互相夹层的关系。我国耐火粘土主要分布在山西、河南、河北、山东和内蒙古省区的喀斯特型铝土矿中,约占总数的 85%,次有贵州、辽宁、四川和云南等(马兴,1987)。耐火粘土矿的工业价值大小视铝土矿床的规模而定;若矿床以铝土矿为主,则耐火粘土为次要矿产,若铝土矿规模小,则矿床以耐火粘土为主。高铁低硫型高级铝土矿也是高铝耐火粘土矿,经济价值更大。另外,我国独特的桂中高铁红土型铝土矿层顶部共生一层硬质粘土矿值得关注;其主要矿物为高岭石。

(2) 铁矿:通常赋存于喀斯特型(沉积型)铝(粘)土矿之下,底板碳酸盐风化面之上。在华北地台之上称为“山西式铁矿”,在贵州称为“清镇式铁矿”。矿体延伸长度可达数十米到数百米不等;厚度一般为 1~2m。该类型铁矿资源量巨大,但目前综合利用程度较低。

(3) 硫铁矿:硫铁矿产出情况有两种,一种是产于喀斯特型(沉积型)铝土矿顶底部粘土岩中,呈星点状、团块状;矿石矿物由黄铁矿和粘土矿物组成;该类型硫铁矿广泛分布于我国喀斯特型(沉积型)铝土矿中。我国喀斯特型铝土矿中共生硫铁矿综合利用程度不高。

(4) 铁矾土:铁矾土与铝土矿或粘土矿通常共生在一起,主要分布于华北地区的山西、河南、内蒙古、河北等省区。矿体赋存于上石炭统本溪组下部含矿岩系中,在高岭粘土层之下。

(5) 低品位三水铝石矿:该类型低品位共生矿产主要分布在我国桂西第四系喀斯特型(堆积型)铝土矿中。堆积型铝土矿赋存于第四红土层中;在红土层中存在大量三水铝石;其中约 33% 的含矿岩系达到边界品位;其最低溶出率达到 96%(龙宝林和刘云华,2005)。该三水铝石矿具有溶出性能好、

冶炼成本低,经济价值高等优点。桂西是我国重要的三水铝石资源产地,具有良好的综合利用前景。

(6) 石灰岩:石灰岩通常为喀斯特型铝土矿的重要共生矿产之一。在我国与喀斯特型铝土矿共生的石灰岩分布比较广泛,储量相当丰富。在贵州和广西有黄龙灰岩、栖霞灰岩和长兴灰岩等;在华北地台之上有寒武-奥陶系灰岩、石炭系本溪组二段中灰岩。更重要的是我国桂中红土型铝土矿中底板也共生有大规模的石灰岩矿产。

(7) 钴土矿:我国海南岛-福建沿海一带分布的红土型铝土矿床中普遍共生有淋滤残坡积钴土矿。

(8) 油页岩:主要分布在华北地台之上,产出层位为太原组和山西组。矿层层数3~6层。最下面的油页岩距铝土矿层仅数米或十余米,含油率为3~7%。

(9) 煤:煤是我国喀斯特型(沉积型)铝土矿的重要共生矿产之一;其主要出现于含铝岩系顶部。煤系的分布规律严格受古喀斯特地形的控制;煤系通常出现在喀斯特洼地地形中的铝土矿顶部;在全国喀斯特型(沉积型)铝土矿中均有分布。

(10) 锰铁矿(或含锰菱铁矿)。主要分布在华北地区二叠系地层中的下石盒子顶部或上石盒子底部,含矿层4~6层,矿体呈似层状、透镜状。延长一般数十米至数百米,最长3000余米。厚度0.2~5.71m,一般0.5~1m。浅部由含锰的褐铁矿、赤铁矿组成,深部为菱铁矿。

4 矿物组成与演化序列

矿物组成及其形成演化过程的研究主要是通过显微镜观察、X衍射分析(XRD)、扫描电镜-能谱分析(SEM-EDS)、电子探针分析(EPMA)、差热/热重分析(DTA/TG)、红外光谱分析(FTIR)和重砂矿物挑选多种手段综合分析探索(图1)。研究发现,不同铝土矿集中区的矿石矿物组成存在较大差异。

目前为止,从华北铝土矿矿石中识别出矿物类型有30余种。吴国炎(1996)将豫西铝土矿中矿物归纳为五大类型:Ⅰ-铝矿物,包括硬水铝石、勃姆石和三水铝石;Ⅱ-粘土矿物,包括伊利石、高岭石、蒙脱石、绿泥石、叶蜡石、地开石、埃洛石;Ⅲ-铁矿物,包括赤铁矿、针铁矿、菱铁矿、黄铁矿、磁铁矿、钽铁矿;Ⅳ-钛矿物,包括金红石、锐钛矿和板钛矿;Ⅴ-其他微量矿物,锆石、电气石、硫磷铝锆矿、明矾石、方解石、石英、长石等。华北铝土矿总体上是以

硅铝钛矿物为主,但是不同地区有不同的矿物组合反映不同的成矿特征(温同想,1996;吴国炎,1996)。矿物形成阶段大概可以划分为四个阶段:陆源期、同生期、成矿期、成矿后期和表生期。

多种方法综合分析了桂西喀斯特型铝土矿中矿物组成。分析结果显示组成二叠系喀斯特型(沉积型)铝土矿矿石的矿物包括硬水铝石、鲕绿泥石、锐钛矿、赤铁矿、(铝)针铁矿、高岭石、黄铁矿、金红石、伊利石、石英、锆石、钛铁矿、磁铁矿、磷灰石、白钛石、方铅矿、褐铁矿、黄铜矿、白云母;第四系喀斯特型(堆积型)铝土矿矿石的矿物包括硬水铝石、赤铁矿、高岭石、锐钛矿、(铝)针铁矿、鲕绿泥石、伊利石、叶腊石、三水铝石、石英、伊蒙混层、金红石、锆石、白钛石、方铅矿、磷灰石、钛铁矿、磁铁矿、褐铁矿、黄铜矿、白云母和少量固溶体系列。从沉积型铝土矿向堆积型铝土矿转化过程中,矿石中鲕绿泥石大量溶解,高岭石、赤铁矿、(铝)针铁矿、伊利石、叶腊石、三水铝石大量结晶形成。综合矿物组合特征和成因阐释,将桂西喀斯特型铝土矿中矿物的形成演化划分为物质准备期、初次表生期、同生期和二次表生期。

贵州喀斯特型铝土矿的矿石矿物主要是硬水铝石;此外,还有少量的勃姆石。自生矿物主要有高岭石、伊利石和锐钛矿,次有鲕绿泥石、黄铁矿、菱铁矿、赤铁矿、针铁矿、重晶石和石膏。伴生的陆源碎屑矿物主要包括高岭石、蒙脱石、伊利石、白云母、长石及锆石、电气石、磷灰石等重矿物。矿物生成阶段主要包括陆源碎屑、早期成岩、晚期成岩及表生成岩等四个阶段(孙建宏和陈其英,1992)。

桂中、海南以及福建等地铝土矿均为三水铝石红土型铝土矿,主要组成矿物包括三水铝石、高岭石、针铁矿、赤铁矿和锐钛矿等(陈世益等,1992)。

喀斯特型铝土矿中矿物组合特征可以揭示其成矿环境和成因机制(D'Argenio and Mindszenty, 1995; Mongelli and Acquafredda, 1999; Mongelli, 2002; Temur and Kansun, 2006)。中国华北(山西、河南等)喀斯特型铝土矿和华南(桂西、贵州等)喀斯特型铝土矿矿物组成的差异指示了区域铝土矿形成环境和机制的差异(张起钻,2011;刘学飞,2011)。铝土矿演化的多阶段更是造就了矿物组成的复杂性;例如,桂西第四系喀斯特型铝土矿为二叠系喀斯特型铝土矿经过再一次风化作用而形成;矿石中出现了二价铁矿物(鲕绿泥石)和三价铁矿物(赤铁矿)共生的现象(Liu *et al.*, 2010)。

5 元素特征与伴生矿产

铝土矿研究中主要利用压片法-X 射线荧光光谱(XRF)、等离子体质谱法(ICP-MS)、容量法和重量法等多种方法对矿石中常量-微量-稀土元素进行分析(图1)。借助统计分析、相关性分析和聚类分析等方法对矿石中元素协同变化规律进行解析,并且结合电子探针分析等确定铝土矿中微量元素分布规律和赋存状态。

5.1 元素组成与空间变化

国外学者对铝土矿元素组成与化学行为研究的主要目的是查明元素组成和变化规律、探索成矿过程中元素迁移行为、确定惰性元素组成、探讨成矿期氧化-还原环境(Horbe and Costa, 1999; Mordberg, 2001; Öztürk and Hein, 2002; Emmerich and Smykatzkloss, 2002; Laskou *et al.*, 2005; Garcia - Guinea *et al.*, 2005; Cornell and Schwertmann, 2006; Mameli and Oggiano, 2007)。铝土矿中元素富集状态主要特征可以初步总结为:

(1) 矿石的主量元素组成与变化特征受矿石矿物组成的制约,由于赋存状态和元素地球化学行为属性的不同,多种元素空间分布呈现出多样性,同一元素分布具有空间性变化(图8)。如河南省郁山喀斯特型铝土矿 ZK1910 钻孔, Al_2O_3 与 H_2O^+ 在底板灰岩、铝质粘土岩、含铝菱铁矿、豆鲕铝土矿和块状铝土矿中呈现了一致的变化规律;在顶部铝质粘土岩中则完全变化相反。 SiO_2 与 K_2O 在底板灰岩、铝质粘土岩、含铝菱铁矿、豆鲕状铝土矿和块状铝土矿中具有相似的变化规律,在以伊利石为主的粘土质铝土矿中变化较大,而在顶部铝质粘土岩(成分复杂,包括伊利石、高岭石、绿泥石等)中基本互为消长变化。 FeO 、 MgO 、 MnO 共存于菱铁矿中,具有一致性。微量元素 Li、Rb、Cs 整体上具有一致的变化规律;碱土元素 Ba、Be 具有一致的变化规律。B 变化比较独立,在局部粘土矿物含量较高的层中中与 Bi、Ba 等元素具有类似的变化规律。亲硫元素 Cu、Zn、Ga 和 Bi 变化各不相同;Zn 在局部层中与 Ni 有一致的变化规律;酸土元素 Zr、Hf、Nb、Ta、W 以及放射性元素 U、Th 在整个剖面中均具有一致的变化规律。对于豆鲕状铝土矿(B 层)和块状铝土矿而言(D 层)而言,多种元素的含量和空间变化不同(REE、Sr 等)均不相同,反映了铝土矿来源存在差异。

(2) 不同地区的喀斯特型铝土矿地球化学元素

的空间分布特征互有差异:Mameli 等(2007)研究了意大利撒丁岛 Nurra 铝土矿床,其矿石矿物包括高岭石、勃姆石、赤铁矿和锐钛矿等,并且发现铝土化过程都是从表层向下的,同时伴随 Al_2O_3 和 TiO_2 的富集以及 SiO_2 和 Fe_2O_3 的缺失。Calagari 和 Abedini (2007)研究了伊朗二叠-三叠系 Kanisheeteh 铝土矿床地球化学特征,研究显示 Fe_2O_3 和 SiO_2 浓度变化最大,而 Al_2O_3 在风化剖面中上部比较富集。

(3) 惰性元素的确定一直是地球化学研究的重点,但是不同地区的铝土矿中确定的惰性元素基本类似。Calagari and Abedini (2007)研究了伊朗 Azarbaiddjan 西部、布坎东部的 Kanisheeteh 铝土矿的地球化学异常,得出 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 SiO_2 含量变动范围较大,而元素 Zr、Hf、Ti、V 在矿化过程中保持稳定。我国喀斯特型铝土矿近期研究显示 Zr、Hf、Nb 和 Ta 为铝土矿化过程中最稳定元素组合(刘学飞, 2011)。

(4) 虽然铝土矿层自下而上是一个逐次沉积形成的,但是利用地球化学的垂向分布来反演成矿过程是一个很难的途径;Wang *et al.* (2011)提出喀斯特型铝土矿元素垂向分布受到的成矿前古氧化还原条件和喀斯特演化过程的联合制约,而不是成矿期成矿条件。

5.2 伴生矿产与赋存状态

铝土矿是 REE、Ga、Sc、Ti、Li 等金属矿产的主要来源之一(Bárdossy, 1982; Laskou, 1991; Combes *et al.*, 1993; Evans, 1993; Calagari and Abedini, 2007; Liu *et al.*, 2010)。这些元素主要为铝土矿中伴生矿产资源。我国铝土矿中伴生矿产资源丰富,目前研究成果显示铝土矿中伴生元素主要包括 Ti、Ga、V、Li、Sc、Nb、Ta 和 REE。富集元素的空间分布比较复杂,尚需进一步查清;如富集的微量元素在含铝岩系的不同层位含量不同;在山西铝土矿集中区,元素 Ga 在上部粘土岩中的含量高于下部铝土矿,而稀土元素则正好相反。

伴生组分在铝土矿中赋存状态有待进一步查清;综合利用开采的伴生矿产只有 Ga,其余伴生矿产均没有进行工业化的综合利用。以稀土元素为例,国内外对铝土矿中稀土元素的特征及其赋存和分布状态做了长期探索(Bardossy *et al.*, 1976; Mordberg, 1996; Mongelli, 1999)。国外研究者普遍认为铝土矿石中的 REE 主要以独立矿物存在。Mongelli (1997)研究意大利西部阿普利亚区的喀斯特型铝土矿时,发现了富含稀土元素的钙-钕氟碳酸盐矿

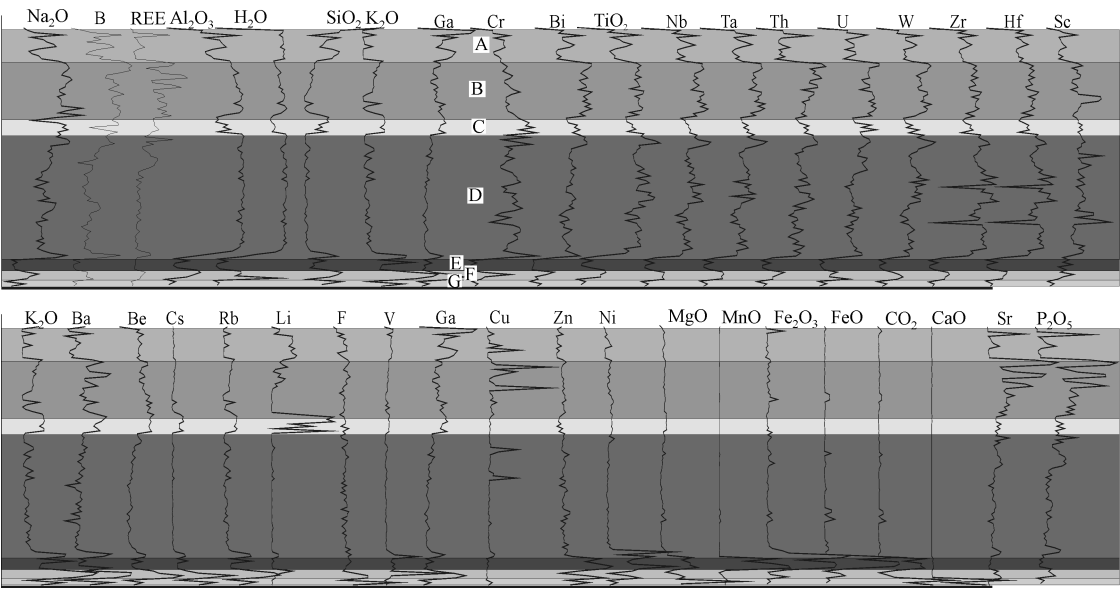


图 8 豫西郁山钻孔 1910 含矿岩系剖面中常-微量、稀土元素垂向变化图谱

Fig. 8 Vertical variation spectra of major, trace and rare earth elements of the bauxitic profile from drill hole 1910 in Yushan bauxite mining area in western Henan

A-粘土岩;B-块状铝土矿;C-粘土质铝土矿;D-豆鲕状铝土矿;E-含菱铁矿粘土;F-铝质粘土;G-底板灰岩
A-clay rock; B-massive bauxite; C-clayey bauxite; D-pisolitic bauxite; E-siderite-bearing clay;
F-bauxitic clay; G-underlying limestone

物,这些钙质-碳氟化合物主要包括:氟菱钙铈矿 $[REE_2Ca(CO_3)_3F_2]$ 、氟维钙铈矿 $[REE_3Ca_2(CO)_5F_3]$ 、直氟碳钙稀土矿 $[REECa_3(CO_3)_2]$ 、方铈矿 $[CeO_2]$ 等。Mordberg(1999)研究俄罗斯 Timan 中部的铝土矿风化剖面时,发现其中伴生大量稀土矿物,分别是纤磷钙铝矿 $[CaAl_3(PO_4)_2(OH, H_2O)_6]$ 、磷铝锶石 $[SrAl_3(PO_4)_2(OH, H_2O)_6]$ 和菱磷铝锶石-磷钙铝石 $[(Sr, Ca)Al_3(OH)_6(SO_4)(PO_4)]$ 。Horbe(1999)以巴西亚马孙州 Pitinga 地区的一个红土剖面为例,研究了 Sn-Zr-Th-Nb-Y-REE 等元素的地球化学演化过程,发现了部分稀土矿物,包括磷铈矿 $[YPO_4]$ 、钍矿 $[ThSiO_4]$ 、氟碳铈矿 $[(Ce, La)(CO_3)F]$ 、氟铈矿 $[(Ce, La)F_3]$ 和针磷铈铈矿 $[YPO_4 \cdot nH_2O]$ 。Mordberg(2000)研究了俄国刁曼岛 Schugorsk 铝土矿,发现矿石中稀土矿物主要包括菱磷铝锶石 $[SrAl_3(PO_4)(SO_4)(OH)_6]$ 、磷铝锶石 $[SrAl_3(PO_4)_2(OH, H_2O)_6]$ 、水磷铝铅矿 $[PbAl_3(PO_4)_2(OH, H_2O)_6]$ 、磷铝铅矾 $[PbAl_3(PO_4)(SO_4)(OH)_6]$ 、磷铝铈矿 $[CeAl_3(PO_4)_2(OH, H_2O)_6]$ 、氟菱铈矿 $[Ca(Ce, La)(CO_3)_2F]$ 、羟碳铈矿 $[Ca(Ce, La)(CO_3)_2F]$ 、氟碳铈矿 $[(Ce, La)(CO_3)F]$ 、氟碳镧矿 $[(La, Ce)(CO_3)F]$ 、氟碳铈矿 $[(Y, Ce)(CO_3)F]$ 、方铈石 $[CeO_2]$ 等。Laskou(2003)研究希

腊 Parnassos-Ghiona 铝土矿中稀土元素特征时,发现了以下稀土矿物:磷镧镨矿 $[(Y, REE)PO_4 \cdot H_2O]$ 、磷铝铈矿 $[CeAl_3(PO_4)_2(OH)_6]$ 、针磷铈铈矿 $[(Y, REE)PO_4 \cdot 2H_2O]$ 、磷铈矿 $[(Y, REE)PO_4]$ 。Mameli(2007)研究意大利撒丁岛一些铝土矿的地质、地球化学以及矿物学特征时,发现铝土矿中稀土矿物为氟碳铈矿族矿物。

国内研究者一般认为 REE 主要以两种形式存在:以离子状态吸附在硬水铝石、三水铝石、高岭石等粘土矿物表面和以类质同象代换存在于硬水铝石、三水铝石等主要矿物中,以独立矿物存在比较少见。陈代演等(1997)对贵州若干铝土矿中(林歹、长冲河、小山坝及苟江等)的稀土元素研究表明,整个黔中成矿带铝土矿含矿岩系中稀土元素主要呈离子状态吸附在一些主要矿物表面。王银喜等(2000)对山西中部、西部和东部约 20 个铝土矿床进行了观察和研究,发现了华北古风化壳型稀有稀土矿床,REE 以离子状态吸附在铝土和粘土矿物的表面。柴东浩等(2001)研究山西某铝土矿中稀有稀土元素时,提出了山西铝土矿为稀有稀土(或含稀有稀土)型铝土矿床,也就是古风化壳吸附型稀有稀土(或含稀有稀土)型铝土矿。王银喜等(2003)在山西沁源大峪、平陆曹川、宁武、阳泉、五

台白家庄等铝土矿区发现了山西古风化壳型稀土金属矿床,属风化壳离子吸附型,REE 不是以单矿物形式存在,而是以离子状态吸附在铝土和粘土矿物表面。李中明等(2007)在河南郁山矿区首次发现了河南省古风化壳型稀土矿层,该稀土矿层(体)与铝土矿密切共生,初步认为该矿层属古风化壳吸附型轻稀土矿床。叶霖等(2007)研究贵州修文小山坝铝土矿,认为矿石中 REE 富集与 Al 含量密切相关,REE 是在风化成矿过程被铝矿物(硬水铝石等)、粘土矿物等吸附。李宏建等(2002)研究认为山西铝土矿中的稀有、稀土元素呈分散状态分布在硬水铝石、高岭石等铝硅矿物中,矿床属于风化壳型铝土矿和古风化壳稀有、稀土元素矿床。庾必阳等(2007)研究认为在矿石中稀土元素呈分散状态被吸附在硬水铝石、高岭石等粘土矿物的周际或之间。杨军臣等(2004)对山西铝土矿及庾必阳等(2007)对贵州铝土矿中硬水铝石、高岭石等矿物进行 X 射线能谱分析,检测出部分矿物中含微量的 La、Ce、Yb、Nd 等元素,但含量很低(含量在仪器灵敏度 0.1% 以下),难于进行定量分析;X 射线能谱定性分析时,大多数矿物中含微量的稀土元素,并且分布较均匀,认为矿石中伴生的稀土元素以独立矿物形式存在的可能性很小;另外,铝土矿中伴生的稀土元素用化学方法处理,浸出率都很低。Wang *et al.* (2010)研究桂西二叠系喀斯特型铝土矿过程中,发现了氟菱钙铈矿和针磷铈铒矿两种独立的稀土矿物;证实局部地区的部分稀土矿物会以独立稀土矿物存在。可见,目前国内铝土矿中稀土元素的赋存状态一直以来仍难以给出确定回答,选矿试验的结论证实稀土元素以吸附态存在的可能性不大,同时以独立稀土矿物存在的量有限,以类质同像替换的可能性最大。

6 成矿物质来源

铝土矿物质来源的研究是铝土矿理论研究中的难点部分。对红土型铝土矿而言,可以直接根据红土型铝土矿的物质组成和矿石结构得知它们与潜在的母岩间的关系(Bardossy and Alewa, 1990; Horbe and Costa, 1999);但是对于喀斯特型铝土矿则不然,因为喀斯特型铝土矿的形成过程比较复杂。国外许多学者通过对喀斯特型铝土矿开展地质学、岩相学、矿物学和地球化学综合研究进行追踪成矿母岩(Mordberg, 2001; Öztürk and Hein, 2002; Laskou, 2003; Laskou *et al.*, 2005; Mameli *et al.*, 2007)。近年来诸多地球化学手段被提出并应用于喀斯特型

铝土矿的物源探索研究中(表 2),比如,元素 Ni-Cr 对数双变量图解(Schroll and Sauer, 1968)、元素 Ga-Zr-Cr 三角图解(Özlü, 1983)、微量元素富集系数(R)(Özlü, 1983)、Eu/Eu* - TiO₂/Al₂O₃ - Ti/Cr 图解(Mongelli, 1993; Mameli *et al.*, 2007)和稳定元素的比率(MacLean and Kranidiotis, 1987; MacLean, 1990; MacLean and Barrett, 1993; Kurtz *et al.*, 2000; Calagari and Abedini, 2007)等。通过大量研究,提出可能为喀斯特型铝土矿提供成矿物质的岩石类型包括:碳酸盐岩(MacLean *et al.*, 1997; Wang *et al.*, 2008)、基岩岩屑(Bardossy, 1982)、火山灰(Lyew-Ayee, 1986; Morelli *et al.*, 2000)、风搬运物质(Pye, 1988; Brimhall *et al.*, 1988)以及铁镁质岩石(Calagari and Abedini, 2007; Mameli *et al.*, 2007)。

由于铝土矿化作用过程中,元素的活动行为受母岩成分、元素在母岩中赋存形式、元素化学性质、成矿物理化学条件、成岩和后期改造等诸多因素的影响(Mordberg, 1996);因而,仅仅利用元素地球化学图解判识铝土矿物质来源具有一定不确定性。另外,不同地区铝土矿中微量元素组成和变化规律不一致,根据局部地区铝土矿地球化学特征所建立的地球化学图解来判识其它地区铝土矿物质来源也具有一定不可靠性。从而,喀斯特型铝土矿的物源探索需要新的研究手段。

锆石广泛存在于各类岩石中,并具有富含 U 和 Th、低普通 Pb、以及非常高的封闭温度和矿物稳定性这些特性,使其成为研究岩石成因和地质事件形成时代的重要矿物(郑永飞等, 2003)。随着近年来同位素年代学向微区高精度方向发展,锆石的离子探针(SHRIMP)与激光探针(LA-ICP-MS)等成为目前 U-Pb 同位素定年的重要手段;再配合锆石背散射电子图像(BSE)或阴极发光图像(CL)、氧同位素、微量元素成分等方面的资料;锆石研究已经在示踪变质效应、岩浆混合、岩石成因、地壳形成和沉积源区等方面取得了突出进展(Ross 1992; Pell *et al.*, 1997; Sircombe and Freeman 1999; Xu *et al.*, 2001; Cawood *et al.*, 2002; Gao *et al.*, 2004; Hawkesworth and Kemp 2006)。

基于矿石矿物和地球化学特征进行详细研究,基于锆石 SHRIMP U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素特征,加上成因矿物学与地球化学约束,综合探讨不同矿带铝土矿成矿物质的来源范围,合理推断多种源岩对铝土矿成矿物质的贡献作用,是铝土矿物质来源研究的有效手段(图 1)。

表 2 喀斯特型铝土矿矿床地质特征和物源示踪方法表

Table 2 Geological features and denoting methods for parent rocks of karstic bauxite deposits							
矿床名称	所在国家	所在地区	赋矿层位	矿物类型	物源类型	判别方法	参考文献
Dogankuzu and Mortas	土耳其	Taurides	上白垩系灰岩	一水软铝石型	铝硅酸岩		Öztürk <i>et al.</i> (2002)
Kanisheeteh	伊朗	East of Bukan, West-Azarbaidjan	二叠系-三叠系地层	硬水铝石型	辉绿片岩	LogCr-LogNi 图解、Cr、Zr、Ga 三角图解、微量元素的浓集系数和稳定元素的比值	Calagari <i>et al.</i> (2007)
Schugorsk	俄罗斯	Timan 中部	泥盆系-石炭系地层	一水软铝石型	碱性长石交代岩		Mordberg <i>et al.</i> (1996)
Nurra	意大利	撒丁岛西北部	晚侏罗统地层	一水软铝石型	铁镁质岩石	锆异常 (δEu) 和稳定元素 TiO ₂ /Al ₂ O ₃ 和 Ti/Cr 的比值	Mameli <i>et al.</i> (2007)
Zagros Mountain	伊朗	扎格罗斯山脉	白垩系 Ilam 组地层	一水软铝石型	碳酸盐岩	鲕粒状-豆状构造和一水软铝土石的外形	Zarasvandi <i>et al.</i> (2008)
Mortas	土耳其	土耳其南部, Tauride 中心西南部	上白垩统灰岩地层	一水软铝石型	千枚岩和石灰岩	稀土配分模式和稀土参数 (δEu)	Karadağ <i>et al.</i> (2009)
Parnassos-Ghiona	希腊		白垩系石灰岩地层	一水软铝石和硬水铝石			Laskou <i>et al.</i> (2007)

对国内喀斯特型铝土矿物质来源前人做过大量研究,取得一定认识;但是观点较多,结论不统一。华北喀斯特型铝土矿的物质来源存在以下三种观点:(1)成矿物质来源于底板碳酸盐岩(范法明,1989;吴国炎,1997;郭连红,2003;袁跃清,2005;丰恺,1992;贺淑琴,2007)。该观点认为碳酸盐岩虽然铝含量低,但风化剥(溶)蚀的厚度大,可以提供足够物源。(2)成矿物质来源于古陆。研究者提出在华北喀斯特型铝土矿带周缘曾存在多个小型古陆,如箕山古岛、嵩山古岛、五台山古岛等,该观点认为所有铝土矿床均围绕古陆分布,古陆上各种铝硅酸盐岩的铝含量高,可以提供足够物源(刘长龄,1985;卢静文,1997)。(3)成矿物质为混合来源(范忠仁,1989;施和生,1989;刘长龄,1988,1992;王绍龙,1992;杜大年,1995;孟祥化等,1987;吴国炎,1996;温同想,1996)。该观点认为华北喀斯特型铝土矿的成矿物质来自底板碳酸盐岩和矿集区内部古陆岩石两个部分。

桂西喀斯特型铝土矿物质来源经历了长时间的探索(韦国深,1999;戴塔根等,2003;王力等,2004)。但是,二叠系沉积型铝土矿的母岩类型一直备受争议,桂西铝土矿的物质来源有三种观点:(1)基底来源(Cao,1982;张起钻,1999;王力等,2004)。多数学者通过对比铝土矿与下部碳酸盐岩中的稳定元素比值得出矿体下部的碳酸盐岩是主要的成矿母岩。(2)铁镁质岩来源(罗强,1989;陈其

英和兰文波,1991)。部分学者认为二叠系中的铁镁质岩为成矿提供了部分成矿物质;理论依据是铝土矿矿石中微量元素和铁镁质岩石中微量元素比值类似。(3)古陆来源(Li and Yang,1996),少部分学者认为古陆中的变质岩系列是成矿母岩,理论依据是铝土矿围绕古陆分布。

贵州喀斯特型铝土矿物质来源同样经历了长时间的研究探索。综合前人对贵州铝土矿物质来源研究成果,可归纳为以下两点:基底来源(刘平,1987;汪生杰和杨文会,1987;廖示范,1989;陈履安,1991;冯学岚,1997;刘平,2001;程鹏林,2004;叶霖等,2007)。该观点的主要内容为黔中隆起后的碳酸盐岩和页岩基底,经过长期溶蚀作用在溶坑洼中初步富集成零星分散的铝土矿。但是由于不同矿带的基底碳酸盐岩以及碎屑岩的种类不同,所以不同矿区中铝土矿的物质来源虽然均来自基底,但岩石类型有差异。玄武岩来源(梁同荣和廖示范,1989),位于川南南川、东山上二叠统玄武岩风化的铝土矿、古红土型铝土矿最为典型,该处由铝土矿向下逐渐过渡为玄武岩,是原地残积的铝土矿。

国内铝土矿最新研究进展是创建了喀斯特型铝土矿物质来源研究方法体系,首次应用铝土矿中碎屑锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素特征,提出 LogZr/Hf-LogNb/Ta 双变量物源判识图解,综合评价风化源岩类型及其对成矿的贡献。提出了铝土矿的物质来源与大型构造—岩浆活动有密切关系,是异源搬运

的观点(Deng *et al.* , 2010;Liu *et al.* , 2010)。对河南、山西两省八个铝土矿碎屑锆石年龄进行了测定,碎屑锆石年龄主体集中分布在新元古代(812 ~ 956Ma)和古生代(414 ~ 455Ma)两个阶段;源岩主体来自于分布在北秦岭造山带内部的岩浆岩。

7 成矿古地理与成矿环境

7.1 成矿期古地理

成矿古地理条件是影响成矿环境的重要因素。以往学者通过沉积层序、沉积构造、化石面貌、微量元素、同位素等特征对重点矿集区铝土矿沉积环境进行划分研究。吴国炎(1996)对豫西喀斯特型铝土矿沉积环境进行了全面的归纳总结分析;根据岩性组合、沉积构造以及微量元素等特征将全区中石炭统(下段)分为3大相组,4个相和10个微相。部分研究者也通过区域层序组成对比研究构建了成矿期岩相古地理图(吴国炎,1996;温同想,1996)。前人研究证实研究区存在秦岭古陆、中条山古陆与嵩箕古陆等,它们对岩溶洼地的发育有重要控制作用。成矿期研究区的地形整体西南高、东北低,这种古地

理格局控制了铝土矿和粘土矿的分带性。

尽管已经存在丰富的研究资料,但是沉积期岩相古地理特征还远没有揭示。根据最新研究成果来看,根据矿体结构,可以将与成矿有关的古环境与古地理大致分为三期。一是成矿前的岩溶喀斯特地貌;二是成矿过程有可能不是一个持续的过程,中间存在间隔期,间隔期的古地理框架与成矿前的喀斯特地貌有关;三是成矿后(末)期的沉积地貌格架。三个沉积阶段的古地理特征需要进一步阐释。由于现今豫西地区底板碳酸盐岩地层基本水平,其可以代表晚石炭纪的地形基本轮廓。因此,本文对河南边庄矿区成矿前的岩溶喀斯特地貌进行了初步的研究,在矿区内共测量40个控制点和剖面11条,来查清矿区尺度内洼地、高地层序和矿体的空间展布规律。成矿前地貌总体具有多阶梯式隆凹相间结构。边庄矿区主体为溶洼和溶沟地貌控矿。根据底板高程的差异,将矿区分为三阶;每一阶分高地、半高地和洼地三种古地貌,第一阶的高地与第二阶的洼地的高程相似,第二阶的高地与第三阶的洼地的高程相似(图9)。

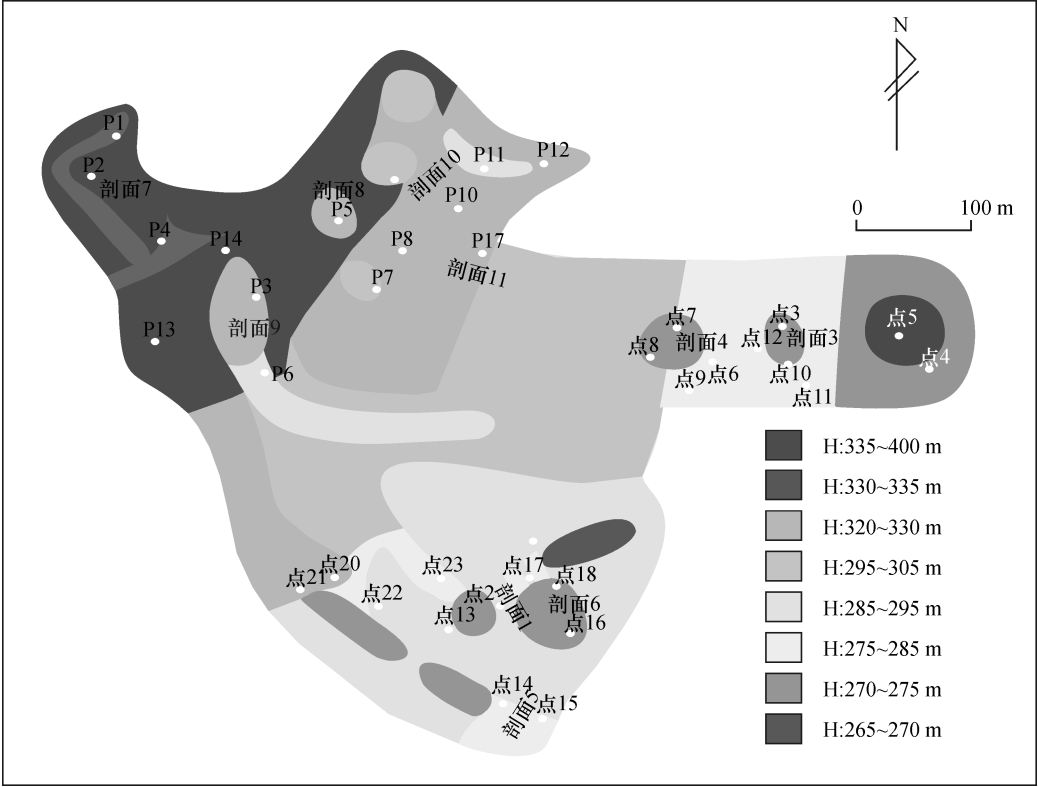


图9 河南边庄铝土矿矿区古地貌格架图

Fig.9 Map showing paleo-terrain framework of the Bianzhuang bauxite district in Henan Province

7.2 成矿环境

铝土矿中矿物类型、地球化学特征以及矿石结构构造等对成矿环境有重要的制约(图1)。目前,喀斯特型铝土矿的形成环境主要包括“氧化渗流型”和“还原潜水型”两种类型。“渗流型”环境中的铝土矿主要矿物类型以三水铝石/一水软铝石、高岭石、针铁矿和赤铁矿为主;矿石中可能富集微量元素V、Co、Ni、Cr、Zr和REE;矿石一般呈红色和红褐色;矿石结构以环带状鲕粒结构为主,鲕粒与基质为逐渐过渡。“潜水型”环境中铝土矿主要矿物类型以硬水铝石/一水软铝石、鲕绿泥石、菱铁矿、黄铁矿为主,部分矿石中含有少量的针铁矿;矿石一般呈白色或者灰白色;矿石结构以环带状鲕粒结构、豆粒结构、复鲕粒结构和碎屑结构为主,豆鲕粒和碎屑单元通常与基质之间为突变接触。

通常情况下,多数喀斯特型铝土矿并不包含与上述两种环境中铝土矿非常一致的矿石、矿物和元素组成特征。通过矿石颜色、结构构造、矿物类型和元素组成特征等反映的铝土矿沉积/成矿环境非常复杂;多为两种成矿环境间的过渡带环境。对于造山带环境中的喀斯特型铝土矿,由于造山作用导致地形高俊,高差较大,铝土矿的形成环境主体为“渗流型”,或者靠近“渗流型”;而板内环境中的喀斯特型铝土矿,通常以“潜水型”,或者靠近“潜水型”环境为主。但是,如果板内碳酸盐岩台地受到造山作用的影响而引起隆升,也会出现“渗流型”型铝土矿。我国铝土矿成矿环境复杂,除桂西第四系堆积

型铝土矿外,主体均为板块内部“潜水型”环境;桂西第四系堆积型铝土矿为“渗流型”环境(图10)。

8 成矿机制

严格意义上的成矿机制包括母岩的风化机制、物质搬运过程以及同生期等多个阶段的矿石结构与物质演化过程。成矿母岩与矿物风化的具体机制、速率与控制因素已被诸多学者讨论,达到基本共识(Millot,1970;Lasaga and Kirkpatrick, 1981);这里只强调搬运或者同生期的过程。

目前,喀斯特型铝土矿形成机制主要包括三种类型:(1) 红土化作用形成含铝物质,之后含铝物质被搬运到碳酸盐岩表面沉积形成铝土矿;(2) 风化壳中含铝溶液以化学形式搬运到喀斯特洼地中结晶形成铝土矿;(3) 碳酸盐岩表面或者内部铝硅酸盐岩铝土矿化(红土化)后原地堆积形成铝土矿。在部分情况下,喀斯特型铝土矿的形成是三种机制的共同作用或者以任何方式结合的产物。目前国外三种成因机制的铝土矿均有报道,但是主体以第一种成因机制为主。并将该成因机制划分为三个成矿阶段(Öztürk *et al.*, 2002; Muzaffer – Karadağ *et al.*, 2009):(1) 物质准备阶段,该阶段为母岩中矿物经过风化作用和红土化作用使岩石中矿物分解释放出各种离子,碱性碱土元素随着风化作用的进行逐渐流失,留下来的离子原地结晶形成氧化物和氢氧化物以及部分粘土矿物,这些矿物组成了铝土矿的原始物质。(2) 物质迁移阶段,已形成的铝土矿物质

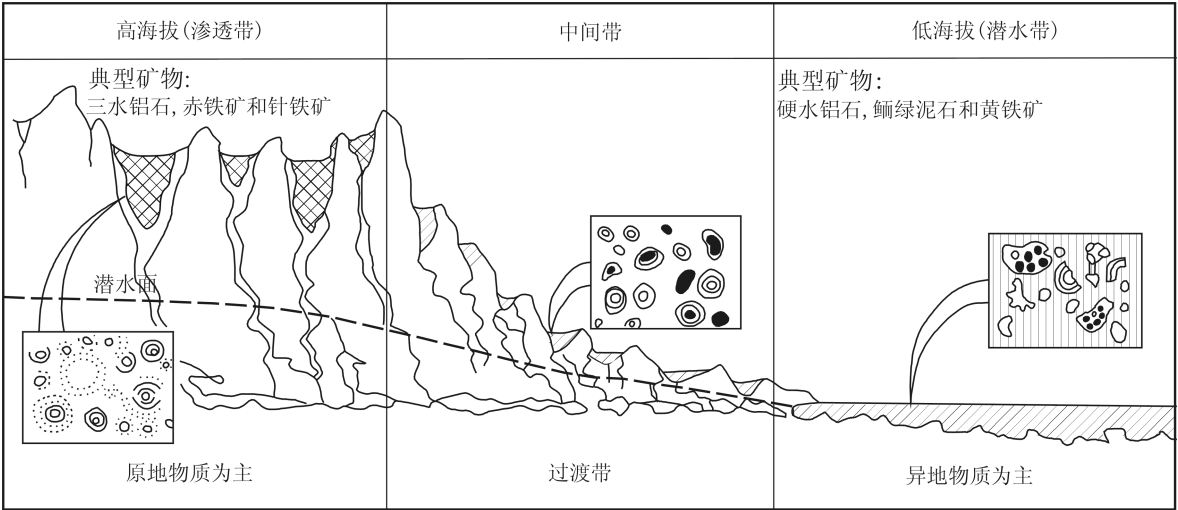


图10 喀斯特型铝土矿成矿环境示意图(据 D' Argenio & mindszenty, 1995)

Fig. 10 Sketch showing ore-forming environment of the karstic bauxite deposit (after D' Argenio & mindszenty, 1995)

经过短距离的搬运在喀斯特洼地中沉积形成铝土矿层。(3) 后期改造阶段,该阶段是后成岩作用,变质作用以及表生风化淋滤作用过程,铝土矿在这个阶段是逐渐富集和优化的阶段(Bárdossy, 1982; D'Argenio and Mindszenty, 1995; Mordberg, 2001; Laskou *et al.*, 2005; Temur and Kansun, 2006; Mameli *et al.*, 2007; Bogatyrev and Zhukov, 2009; Bogatyrev *et al.*, 2009)。

前人对中国喀斯特型铝土矿的形成机制做过大量的探索研究,并且提出了多种成因理论。成因理论包括红土或钙红土残坡积(王恩孚, 1985; 范法明, 1989; 马既民, 1988, 1991)、胶体化学沉积(张源有, 1982)、红土沉积(张源有, 1982; 李启津, 1985; 陈廷臻, 1985; 刘长龄, 1985, 1988; 吴国炎, 1996; 陈平, 1997)和红土-残坡积沉积等理论(丰恺, 1992)。

目前,喀斯特型铝土矿成因机制探索一般为基于区域地质演化、岩相古地理特征等,通过矿石结构构造研究、矿物成因分析、元素活动行为探讨和元素赋存状态的探索进行综合讨论探索(图1)。最新研究进展显示我国喀斯特型铝土矿成因机制比较复杂,均与重大地质事件密切相关。华北喀斯特型铝土矿的形成是洋陆俯冲、大陆漂移和集中风化的产物:中奥陶世(~450Ma)时期,古特提斯秦岭洋向北俯冲与华北板块碰撞,使得北秦岭造山带抬高,华北板块形成南高北低的古地理格局;之后秦岭造山带经历了缓慢的抬升过程;在晚志留世到早泥盆世期间,华北板块漂移至赤道附近,使得北秦岭造山带中出露的岩浆岩的高程有限,在有效的气候下,得到集中的风化;为后期铝土矿形成准备了丰富的富铝物质;早石炭世晚期,海平面上升,将分布于北秦岭造山带之上以及华北各古陆之上的富铝物质搬运至华北板块内部喀斯特洼地中形成铝土矿。

地质学、岩相学、地球化学和矿物学多学科综合研究揭示了我国喀斯特型铝土矿成因机制。华北板块之上喀斯特型铝土矿(山西、河南)中主要铝矿物-硬水铝石为简单成岩结晶成因;而主要粘土矿物伊利石为风化成因,为碎屑矿物(刘学飞, 2011);故铝土矿成因机制主体为“离子结晶与碎屑沉积”综合成因。而华南铝土矿(贵州、广西)中主要铝矿物-硬水铝石也为简单成岩结晶成因;主要粘土矿物鲕绿泥石与硬水铝石密切共生(Liu *et al.*, 2010);因此其铝土矿成因机制主体为“离子结晶”成因。

9 结语

铝土矿地质与成因研究需要沉积学、表生地球

化学、同位素地质学、古气候学多学科的综合研究,也需要应用多项现代测试手段。本论文系统综述了国内外铝土矿研究方法与进展,总结了铝土矿研究方法体系,并阐述了我国铝土矿研究一些新认识,主要结论包括:

(1) 我国铝土矿主体包括喀斯特型和红土型两种类型的铝土矿,其中以喀斯特型铝土矿为主;红土型铝土矿剖面类型与形成环境条件密切相关。喀斯特型铝土矿整体为硬水铝石型,形成环境为碱性还原的“潜水型”环境中;矿体受到岩溶喀斯特微地形的控制,含矿岩系层序变化复杂,主体分为局部高地与局部洼地两种类型;局部洼地产出的铝土矿矿体较厚,部分剖面包括多个铝土矿-粘土岩的沉积旋回。

(2) 喀斯特型铝土矿的成矿物质普遍经历多个演化阶段,造成了矿石矿物组成的复杂性和区域间的差异性;喀斯特型铝土矿物质来源呈多源性特征,整体物质以异源搬运的;物质迁移机制存在区域性差异;华北喀斯特型铝土矿主体为碎屑沉积+离子结晶成因;而华南铝土矿则主体为离子结晶为主。

(3) 重要铝土矿富集区都与重大地质事件有关;中国喀斯特型铝土矿主体为洋陆俯冲、大陆漂移和集中风化的结果。

本论文阐述了部分国内铝土矿研究一些新进展,但是在物质组成、成矿过程与找矿标志方面仍然需要进一步深入讨论研究:(1) 层序组成与矿石矿物组成的区带性变化及其成因;(2) 伴生元素的赋存状态与综合利用;(3) 具体的成矿过程需要进一步阐释。此外,对于铝土矿的找矿与勘探,地球化学、地球物理(重磁)与遥感信息对矿体存在及其富集度的指示性十分有限,有效的找矿标志仍需进一步探索。

[References]

- Bárdossy G., Pantó G., Várhegyi G. 1976. Rare metals of Hungarian bauxites and conditions of their utilizations[J]. Travaux, ICSOBA, (13): 221-231
- Bárdossy G. 1982. Karst bauxites; bauxite deposits on carbonate rocks [J]. Developments in Economic Geology, 14: 1-441
- Bárdossy G., Aleva G. J. J. 1990. Lateritic bauxites; Developments in Economic Geology[J]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publication: 1-624
- Bogatyrev B. A., Zhukov V. V., Tsekhovskiy Y. G. 2009. Formation conditions and regularities of the distribution of large and superlarge bauxite deposits[J]. Lithology and Mineral Resources, 244: 135-151
- Bogatyrev B. A., Zhukov V. V. 2009. Bauxite Provinces of the World[J]. Geology of Ore Deposits, 51(5): 339-355

- Brimhall G H, Lewis C J, Ague J J, Dietrich W E, Hampel J, Teague T, Rix P. 1988. Metal enrichment in bauxites by deposition of chemically mature Aeolian dust[J]. *Nature*, 333: 819–824
- Cao X Y. 1982. Discussion on the types and genesis of the bauxite deposits in Western Guangxi[J]. *Geological technology of Guangxi*, 12(1): 38–46 (in Chinese)
- Calagari A A, Abedini A. 2007. Geochemical investigations on Permian–Triassic bauxite horizon at Kanisheeteh, east of Bukan, West–Azarbadjan, Iran[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 94: 1–18
- Chai Dong-hao, Qu Zhi-ming, Chen Han-cheng, Chai Feng. 2001. New discovery and industrial significance of rare and rare-earth elements in Shanxi bauxite[J]. *Light Metals*, (06): 6–11 (in Chinese with English abstract)
- Chen Lü-an. 1991. The experimental study of bauxite mineralization in Guizhou and analysis on their origin[J]. *Geology Review*, (5): 418–428 (in Chinese with English abstract)
- Chen Qi-ying, Lan Wen-bo. 1991. A study on the genesis of the Permian bauxite deposit at Pingguo, Guangxi[J]. *Geology of Guangxi*, 4(4): 43–49 (in Chinese with English abstract)
- Chen Shi-yi, Zhou Fang, Luo De-xuan, Wu Zhao-qing, Lu Biao, Li Jing-guang. 1992. The features and studies on utilizations of the ores of the gibbsite-type bauxite deposits in Guigang, Guangxi[J]. *Nanfang Land & Resources*, 5(4): 9–16 (in Chinese with English abstract)
- Chen Yan-zhen. 1985. The study on the mineral composition and the commercial type of the bauxite deposit in Henan[J]. *Henan Land & Resources*, (4): 23–33 (in Chinese with English abstract)
- Cheng Peng-lin, Li Shou-neng, Chen Qun, Wu Xiao-hong. 2004. Comparison analysis from the ore-controlling factors of the Maochang bauxite deposit to the bauxite deposit in Central Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, (4): 215–222 (in Chinese with English abstract)
- Combes P J, Oggiano G, Temussi I. 1993. Géodynamique des bauxites sardes, typologie, génèse et contrôle paléotectonique[J]. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Série II*, 316: 403–409
- Cornell R M, Schwertmann U. 2006. The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses[J]. Berlin: Wiley-VCH, 1–703
- D'Argenio B, Mindszenty A. 1995. Bauxites and related paleokarst: Tectonic and climatic event markers at regional unconformities[J]. *Eclogae geologicae Helveticae*, 88: 453–499
- Dai Ta-gen, Long Yong-zhen, Zhang Qi-zuan, Hu Bing. 2003. REE geochemistry of some bauxite deposits in the western Guangxi district[J]. *Geology and Exploration*, 39(4): 1–5 (in Chinese with English abstract)
- Deng Jun, Wang Qing-fei, Yang Shu-juan, Liu Xue-fei, Zhang Qi-zuan, Yang Li-qiang, Yang Yue-heng. 2010. 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*, (37): 412–424
- Deng Jun. 2006. The geological characteristics and the ore control factors of the gibbsite-type bauxite deposits in Central Guangxi[J]. *Nanfang Land & Resources*, (3): 21–23 (in Chinese)
- Emmerich K, Smykatz-kloss W. 2002. Exothermic effects in soils during thermal analysis[J]. *Clay Minerals*, 37: 575–582
- Evans A M. 1993. Ore Geology and Industrial Minerals—An Introduction[J]. Blackwell, London, 389
- Fan Fa-ming. 1989. The study of the genesis of the bauxite deposit in West Guizhou from deposit characteristics in Guixian[J]. *Light Metals*, (3): 1–3 (in Chinese with English abstract)
- Feng Kai. 1992. The study on bauxite genesis in Hennan[J]. *Light Metals*, (7): 1–8 (in Chinese with English abstract)
- Feng Xue-lan, You Jun-zhong. 1997. A genetic Model for the Maochang bauxite deposit in Central Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, (4): 285–298 (in Chinese with English abstract)
- García-Guinea J, Correcher V, Rubiö J. 2005. Effects of preheating on diasporic structure and light emission Modifications in colour centres[J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 66: 1220–1227
- Guo Lian-hong, Jin Xin-guang, Xiong Dai-bang. 2003. The geological characteristics and the development and utilization of the bauxite in Changzhi[J]. *Coal*, 12(4): 57–58, 68 (in Chinese with English abstract)
- Horbe A, Costa M. 1999. Geochemical evolution of a lateritic Sn–Zr–Th–Nb–Y–REE-bearing ore body derived from apogranite: the case of Pitinga, Amazonas–Brazil[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 66: 339–351
- Kurtz A C, Derry L A, Chadwick O A, Alfano M J. 2000. Refractory element mobility in volcanic soils[J]. *Geology*, 28: 683–686
- Laskou M. 1991. Concentrations of rare earths in Greek bauxite[J]. *Acta Geologica Hungarica*, 34(4): 195–404
- Laskou M, Andreou G. 2003. Rare earth elements distribution and REE–minerals from the Parnassos–Ghiona bauxite deposits, Greece[J]. In Eliopoulos D. The 7th Biennial SGA Meeting, Athens, Greece, Mineral Exploration and Sustainable Development, 1–2: 89–92
- Laskou M, Margomenou–Leonidopoulou G, Balek V. 2005. Thermal characterization of bauxite samples[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 82: 1–5
- Li Qi-jin. 1985. The study on ore composition of the bauxite deposit in Xiaoyi, Shanxi[J]. *Journal of Institute of Geology for Mineral Resources*, (1): 26–34 (in Chinese with English abstract)
- Li Qi-jin, Yang Guo-gao, Hou Zheng-hong. 1996. Discussion on several problems of metallogenic theory of bauxite[J]. *Mineral Resources and Geology*, 10(1): 22–26 (in Chinese with English abstract)
- Li Zhong-ming, Zhao Jian-min, Feng Hui, Li Wei, Jiao Zan-chao, Yue Guo-li. 2007. First discovery of palaeo-weathering crust type REE deposit in Yushan area of Henan province and its significance[J]. *Mineral Resources and Geology*, (2): 177–180 (in Chinese with English abstract)
- Liang Tong-rong, Liao Shi-fan. 1989. Mineralization geological conditions and mechanism problems of bauxite deposits of the North part of Guizhou Province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, (4): 57–67 (in Chinese with English abstract)

- Liao Shi-fan, Liang Tong-rong, Zhang Yue-heng. 1989. Discussion on the problems of bauxite deposits and their lateritic residuum as mechanism for the minerogenetic of bauxite china[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 7(1): 1-10 (in Chinese with English abstract)
- Liu Chang-ling, Shi Zi-zhen. 1985. Mineralogy of high alumina clay-bauxite deposits in Shanxi and Henan Provinces[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, (2): 18-36 (in Chinese with English abstract)
- Liu Chang-ling. 1988. Geological features and genesis of carboniferous bauxite in China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 6(3): 1-10 (in Chinese with English abstract)
- Liu Chang-ling. 1992. On The Theory of Bauxite Genesis[J]. *Journal of Hebei college of geology*, (2): 195-204 (in Chinese with English abstract)
- Liu Ping. 1987. An initial discussion on Guizhou bauxites[J]. *Guizhou Geology*, (1): 1-12 (in Chinese with English abstract)
- Liu Ping. 1995. On the Ban-cite in Guizhou Province-V: The Bauxite-bearing Rock Series in Central Guizhou-Southern Sichuan Ore-forming Zone[J]. *Guizhou Geology*, 12(3): 185-203 (in Chinese with English abstract)
- Liu Ping. 2001. Discussion on the Metallogenic Setting of the Qianzhong2Yu'nan Bauxite in Guizhou and Its Genesis [J]. *Guizhou Geology*, 18(4): 238-243 (in Chinese with English abstract)
- Liu Xue-fei. 2011. Material composition and ore-forming process of bauxite (clay) deposits in Western Henan, China[D]. Beijing: China university of geoscience(Beijing), 1-165 (in Chinese with English abstract)
- Liu Xue-fei, Wang Qing-fei, Deng Jun, Zhang Qi-zuan, Sun Si-lei, Meng Jian-yin. 2010. Mineralogical and geochemical investigations of the Dajia Salento-type bauxite deposits, western Guangxi, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 105: 137-152
- Long Bao-lin, Liu Yun-hua. 2005. Prospects for comprehensive utilization of gibbsite from accumulated bauxite in Western Guangxi Province[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, (3): 33-37 (in Chinese with English abstract)
- Lu Jing-wen, Peng Xiao-lei, Xu Li-jie. 1997. Source of ore-forming materials for bauxite deposits in Shanxi Province [J]. *Journal of Changchun university of earth sciences*, 27(2): 147-151 (in Chinese with English abstract)
- Luo Qiang. 1989. Relationship between Sedimentary Facies and Genesis of the Bauxite Deposits in Pingguo, Guangxi[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, (2): 11-18 (in Chinese with English abstract)
- Lyew-Ayee P A. 1986. A case for the volcanic origin of Jamaican bauxites[J]. In *Proceedings of the VI Bauxite Symposium 1986*. *Journal of Geological Society*, 1: 9-39
- Ma Ji-min. 1988. The study on the Carboniferous bauxite and the karst in Henan[J]. *Carsologica Sinica*, (S2): 82-85 (in Chinese with English abstract)
- Ma Ji-min. 1991. The ore-forming process of the karst type bauxite in Henan[J]. *Henan Geology*, 9(3): 15-20 (in Chinese with English abstract)
- MacLean W H, Kranidiotis P. 1987. Immobile elements as monitors of mass transfer in hydrothermal alteration: Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec[J]. *Economical Geology*, 82(4): 951-962
- MacLean W H. 1990. Mass change calculations in altered rock series [J]. *Mineralium Deposita*, 25: 44-49
- MacLean W H, Barrett T J. 1993. Lithogeochemical techniques using immobile elements[J]. *Geochemical Exploration*, 48: 109-133
- MacLean W H, Bonavia F F, Sanna G. 1997. Argillite debris converted to bauxite during karst weathering: evidence from immobile element geochemistry at the Olmedo Deposit, Sardinia[J]. *Mineralium Deposita*, 32: 607-616
- Mameli P, Mongelli G, Oggiano E D. 2007. 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 Science (Geological Rundsch)*, 96: 887-902.
- Millot, Georges. 1970. *Geology of clays: weathering, sedimentology, geochemistry*[M]. Springer-Verlag: 1-429
- Mongelli G. 1993. REE and other trace elements in a granitic weathering profile from "Serre", southern Italy[J]. *Chemical Geology*, 103: 17-25
- Mongelli, G. 1997. Ce-anomalies in the textural components of Upper Cretaceous karst bauxites from the Apulian carbonate platform (Southern Italy) [J]. *Chemical Geology*, (140): 69-79
- Mongelli G, Acquafredda P. 1999. Ferruginous concretions in a late Cretaceous karst bauxite: composition and conditions of formation[J]. *Chemical Geology*, (158): 315-320
- Mordberg L E. 1996. Geochemistry of trace elements in Paleozoic bauxite profiles in northern Russia[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, (57): 187-199
- Mordberg L E. 2001. Mineralogy and geochemistry of trace elements in bauxites: the Devonian Schugorsk deposit, Russia[J]. *Mineralogical Magazine*, 65(1): 81-101
- Morelli F, Cullers R, Laviano R, Mongelli G. 2000. Geochemistry and palaeoenvironmental significance of Upper Cretaceous clay-rich beds from the Peri-adriatic Apulia carbonate platform, southern Italy[J]. *Periodico di Mineralogia*, 69(2): 165-183
- Muzaffer-Karadağ M, Küpeli S, Aryk F, Ayhan A. 2009. Rare earth element (REE) geochemistry and genetic implications of the Mortas bauxite deposit (Seydis-ehir/Konya-Southern Turkey) [J]. *Chemie der Erde*, 69: 143-159
- Özlü N. 1983. Trace element contents of karst bauxites and their parent rocks in the Mediterranean belt[J]. *Mineralium Deposita*, 18: 469-476
- Öztürk H, Hein J, Haniçli N. 2002. Genesis of the Doğanakuzu and Mortaş Bauxite Deposits, Taurides, Turkey: Separation of Al, Fe, and Mn and Implications for Passive Margin Metallogeny[J]. *Economic Geology*, 97: 1063-1077
- Pye K. 1988. Bauxites gathering dust[J]. *Nature*, 333(6176): 300-301
- Schroll E, Sauer D. 1968. Beitrag zur Geochemie von Titan, Chrom,

Nikel, Cobalt, Vanadium undMolibdan in Bauxitischen gester-
menund problem der stofflichen herkunft des Aluminiums[J]. Tra-
vaux du ICSOBA, 5: 83-96

Stanjek H. 2002. XRD peak migration and apparent shift of cell-edge
lengths of nano-sized hematite, goethite and lepidocrocite[J]. Clay
Minerals, 37: 629-638.

Sun Jian-hong, Chen Qi-ying. 1992. Mineral composition of bauxite in
central Guizhou Province[J]. Scientia Geglogica Sinica, (S1):226
-239(in Chinese with English abstract)

Temur S, Kansun G. 2006. Geology and petrography of the Masatdagi di-
asporicbauxites, Alanya, Turkey[J]. Journal of Asian Earth Sci-
ences, 27: 512-522

Wang En-fu. 1985. Geological Characteristics and Genesis of the bauxite
in Yunnan[J]. Light Medals, (5):1-5 (in Chinese with English
abstract)

Wang Li, Li Yong-zhen, Peng Sheng-lin. 2004. Geologic and geochemi-
cal study on material derivation of bauxite deposits in Western Guan-
gxi[J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 24:1-6 (in Chi-
nese with English abstract)

Wang Qing-fei, Deng Jun, Wan Li, Zhao Jie, Gong Qing-jie, Yang Li
-qiang, Zhou Lei, Zhang Zhi-jun. 2008. Multifractal analysis of
the element distribution in skarn-type deposits in Shizishan Orefield
in Tongling area, Anhui province, China[J]. Acta Geologica Sini-
ca, 82(4): 896-905

Wang Qing-fei, Deng Jun, Liu Xue-fei, Zhang Qi-zuan, Sun Si-lei,
Jiang Cheng-zhu, Zhou Fang. 2010. Discovery of the REE minerals
and its geological signi? cance in the Quyang bauxite deposit, West
Guangxi, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences,39: 701-712

Wang Sheng-jie, Yang Wen-hui. 1987. Ore Deposit Features of Chua-
nzhumiao s Alumyte in Zunyi County, Guizhou Province [J].
Guizhou Geology, (1):13-24(in Chinese with English abstract)

Wang Yin-xi, Li Hui-min, Gu Lian-xing, Wu Chang-zhi, Chai Dong-
hao, Chen Ping, Wang Sui-sheng, Zhang Jing-jun. 2003. Rb-Sr I-
sotope Dating of Bauxite Deposits in Shanxi Pvince[J]. Acta Ge-
oscientia Sinica, (6):589-592(in Chinese with English abstract)

Wang Yin-xi, Li Hui-min, Yang Jie-dong, Qiu Li-wen, Chai Dong-hao,
Chen Ping. 2000. Discovery of Palaeoweathering Type Rare an Tare
Earth Element Deposits in Nouthern Chian an Its Significance[J].
Geological Journal of China Universitiesf, (4):605-606 (in Chi-
nese with English abstract)

Wang Zhu -tang. 2008. The giant bauxite deposit proved in Central
Guangxi[J]. Light Metals, (9): 52 (in Chinese with English ab-
stract)

Wei Guo-shen. 1999. Geology and ore-controlling factors of the accu-
mulated bauxite deposit in West Guangxi[J]. Geological Explora-
tion For Non-ferrous Metals, (6):459-461 (in Chinese with Eng-
lish abstract)

Wen Tong-xiang. 1996. The Geological Characteristics of Carboniferous
Bauxite in Henan[J]. Jour Geol & Min Res North China,11(4):
491-579(in Chinese with English abstract)

Wu Guo-yan. 1996. Bauxite deposits in Henan Province[D]. Beijing:
Metallurgical Industry Press;12 (in Chinese with English abstract)

Wu Guo-yan. 1997. A discussion on material source and metallogenic
model of bauxite deposits in North China[J]. Henan Geology, 15
(3):161-166(in Chinese with English abstract)

Yang Jun-chen, Wang Feng-ling, Li De-sheng, Fei Yong-chu, Wang
Ling. 2004. Investigation on occurrence and trend of Rare-earth el-
ements associated in bauxite[J]. Mining and Metallurgy, (2):89-
92 (in Chinese with English abstract)

Ye Lin, Cheng Zeng-tao, Guizhou Pan Zi-ping. 2007. The REE Geo-
chemical Characteristics of the Xiaoshanba Bauxite Deposit [J].
Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, (3):228-233
(in Chinese with English abstract)

Zhang Nai-xian, Ji Su-rong. 1985. Petrographic and mineralogical char-
acteristics of bauxite and series of ore-bearing in Gongxian county ,
Hennan Province[J]. Chinese Journal of Geology, (2):170-179
(in Chinese with English abstract)

Zhang Qi-zuan. 1999. Geology and origin of the Karst-accumulation-
type bauxite deposits in West Guangxi[J]. Geological Exploration
for Non-ferrous Metals, (6):486-489(in Chinese with English ab-
stract)

Zhang Yuan-you. 1982. The material source and the chemical deposition
differentiation of the bauxite deposit in Wesht Henan[J]. Geology
and Prospecting, 10:1-8(in Chinese with English abstract)

[附中文参考文献]

陈履安. 1991. 贵州铝土矿成矿作用的实验研究及其成因分析[J].
地质论评, (5): 418-428

陈其英, 兰文波. 1991. 二叠纪平果铝土矿成矿物源问题[J]. 广西
地质, 4(4): 43-49

陈世益, 周 芳, 罗德宣, 吴肇清, 卢 彪, 林景光. 1992. 广西贵港三水型
铝土矿矿石特征及应用研究[J]. 南方国土资源, 5(3): 9-16

陈廷臻. 1985. 河南省铝土矿矿物组成及矿石工业类型[J]. 河南国
土资源, (4): 23-33

程鹏林, 李守能, 陈 群, 吴晓红. 2004. 从清镇猫场矿区高铁铝土
矿的产出特征再探讨黔中铝土矿矿床成因[J]. 贵州地质,
(4): 215-222

戴塔根, 龙永珍, 张起钻, 胡 斌. 2003. 桂西某些铝土矿床稀土元
素地球化学研究[J]. 地质与勘探, 39(4): 1-5

邓 军. 2006. 桂中三水铝土矿地质特征及控矿因素浅析[J]. 南方
国土资源, (3): 21-23

范法明. 1989. 从贵县铝土矿的特征看豫西铝土矿的成因[J]. 轻金
属, (3): 1-3

丰 恺. 1992. 河南铝土矿成因的一点认识[J]. 轻金属, (7): 1-8

冯学岚, 尤俊忠. 1997. 贵州猫场铝土矿地质特征及成矿模式[J].
贵州地质, (4): 285-298

郭连红, 金鑫光, 熊代榜. 2003. 长治市铝土矿地质特征及开发利用
[J]. 煤, 12(4): 57-58, 68

李启津. 1985. 山西孝义铝土矿矿石物质成分研究[J]. 矿产地质研
究院学报, (1): 26-34

李中明, 赵建敏, 冯 辉, 李 伟, 焦赞超, 岳国利. 2007. 河南省郁
山古风化壳型稀土土层的首次发现及意义[J]. 矿产与地质,
(2): 177-180

梁同荣, 廖士范. 1989. 贵州北部铝土矿床成矿地质条件、机制问题

[J]. 沉积学报, (4): 57-67

廖士范,梁同荣,张月恒. 1989. 论我国铝土矿床类型及其红土化风化壳形成机制问题[J]. 沉积学报, 7(1):1-10

刘长龄,时子祯. 1985. 山西、河南高铝粘土铝土矿矿床矿物学研究[J]. 沉积学报, (2): 18-36

刘长龄. 1988. 中国石炭纪铝土矿的地质特征与成因[J]. 沉积学报, (3): 1-10

刘平. 1995. 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, 12(3): 185-203

刘平. 2001. 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, 18(4): 238-243

刘平. 1987. 初论贵州之铝土矿[J]. 贵州地质, (1): 1-12

刘学飞. 2011. 豫西铝(粘)土矿物物质组成与成矿过程[D]. 北京: 中国地质大学(北京): 1-165

龙宝林,刘云华. 2005. 桂西堆积型三水铝石综合利用前景[J]. 综合矿产利用, (3): 33-37

卢静文,彭晓蕾,徐丽杰. 1997. 山西铝土矿床成矿物质来源[J]. 长春地质学院学报, 27(2): 147-151

罗强. 1989. 论广西平果铝土矿成因与沉积相的关系[J]. 沉积与特提斯地质, (2): 11-18

马既民. 1988. 河南石炭纪铝土矿与岩溶[J]. 中国岩溶, (S2):82-85

马既民. 1991. 河南岩溶型铝土矿床的成矿过程[J]. 河南地质, 9(3):15-20

孙建宏,陈其英. 1992. 黔中铝土矿的矿物组成[J]. 地质科学, (S1): 226-239

汪生杰,杨文会. 1987. 贵州省遵义县川主庙铝土矿矿床特征[J]. 贵州地质, (1): 13-24

王恩孚. 1985. 云南某地区铝土矿地质特征及其成因[J]. 轻金属, (5): 1-5

王力,龙永珍,彭省临. 2004. 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, 24: 1-6

王银喜,李惠民,顾连兴,吴昌志,柴东浩,陈平,王随生,张京俊. 2003. 山西铝土矿 Rb-Sr 同位素定年[J]. 地球学报, (6): 589-592

王银喜,李惠民,杨杰东,裘丽雯,柴东浩,陈平. 2000. 华北古风化壳型稀有稀土矿床的发现及意义[J]. 高校地质学报, (4): 605-606

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

韦国深. 1999. 桂西堆积型铝土矿床地质特征和控矿因素[J]. 有色金属矿产与勘查, (6): 459-461

温同想. 1996. 河南石炭纪铝土矿地质特征[J]. 华北地质矿产杂志, 11(4):491-579

吴国炎. 1996. 河南铝土矿床[M]. 北京:冶金工业出版社: 12

吴国炎. 1997. 华北铝土矿的物质来源及成矿模式探讨[J]. 河南地质, 15(3): 161-166

杨军臣,王凤玲,李德胜,费涌初,王玲. 2004. 铝土矿中伴生稀有稀土元素赋存状态及走向查定[J]. 矿冶, (2):89-92

叶霖,程曾涛,潘自平. 2007. 贵州修文小山坝铝土矿中稀土元素地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, (3): 228-233

张乃嫻,姬素荣. 1985. 河南巩县铝土矿及其含矿岩系的岩石矿物学特点[J]. 地质科学, (2): 170-179

张起钻. 1999. 桂西岩溶堆积型铝土矿床地质特征及成因[J]. 有色金属矿产与勘查, (6): 486-489

张源有. 1982. 豫西铝土矿物质来源和化学沉积分异作用[J]. 地质与勘探, 10:1-8

Review on Research of Bauxite Geology and Genesis in China

WANG Qing-fei¹, DENG Jun¹, LIU Xue-fei¹, ZHANG Qi-zuan², LI Zhong-ming³, KANG Wei¹, CAI Shu-hui¹, LI Ning¹

- (1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083;
2. Guangxi Bureau of Geology and Mineral Resources, Nanning, Guangxi 530023)
3. Henan Institute of Geological Survey, Henan Provincial Key Laboratory for Geological Process Mineralizing and Resource Utilization in Metal Mineral, Zhengzhou, Henan 450007)

Abstract: Bauxite deposits in China are characterized by widespread temporal-spatial distribution and a broad spectrum of types with various genetic mechanisms. Researches of their geological features and genesis are of considerable significance for bauxite geology. In this paper, we reviewed research of bauxite geology from the aspects of deposit classification, orebody morphology and structures, mineral composition, source rocks, ore-forming environments and mechanisms. Some features of the bauxite deposits in China are also illustrated, and new research methods and opinions obtained in recent years are further presented. The source rocks of karstic bauxite areas can be distinguished by utilizing the U-Pb and Lu-Hf isotopes of the detrital zircons in the bauxite ores. Most source materials of the China's karstic bauxites are allochthonous, and their formation has an intimate genetic relationship with regional geological events. The formation of the bauxite in China was resulted from the a serial of ocean-continent subduction, continental drift, source rock weathering and weathered remnants transportation. The transportation mechanism of the karstic bauxites in China is regionally varied. In the North China Block, the Carboniferous ores were formed via both ion crystallization and elastic deposition, while the Permian karstic bauxite in the South China Block was dominated by ion crystallization in generation.

Key words: bauxite in China, classification, source rock, ore-forming environment, ore-forming mechanism