2023年2月
February，2023

矿 床 地 质
MINERAL DEPOSITS

第42卷 第1期
42（1）：22~40

文章编号：0258-7106（2023）01-0022-19

Doi: 10. 16111/j. 0258-7106. 2023. 01. 002

中国铝土矿的成矿规律、关键科学问题与研究方法*

徐林刚[1,2]，孙 莉[3**]，孙 凯[1]

（1 中国地质大学（北京）地球科学与资源学院，北京 100083；2 中国地质大学（北京）自然资源部战略性金属矿产找矿理论与技术重点实验室，北京 100083；3 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室，中国地质科学院矿产资源研究所，北京 100037）

摘 要 中国是世界上铝的最主要生产国和消费国，但资源储量和人均占有铝资源量严重不足。中国铝土矿具有成矿时代单一、空间分布广泛但局部相对集中的特点，成因类型以喀斯特型为主，区别于国际上以红土型为主的特点。文章在前人大量研究的基础上，对山西断隆、华北陆块南缘、黔中北-渝南和桂西南-滇东南4个最主要铝土矿成矿带的成矿规律进行了总结。并在成矿规律总结基础上，提出了当前铝土矿研究面临的关键科学问题：① 地层层序与成矿物质的来源与组成问题；② 深时古气候背景下重大地质事件与铝土矿成矿耦合关系问题；③ 铝土矿共生/伴生矿产资源的开发利用以及成矿过程问题。同时，文章还对解决上述科学问题可能采用的技术方法和研究手段予以展望。

关键词 地质学；铝土矿；成矿规律；地层层序；深时古气候；共生-伴生矿产

中图分类号：P618.45 **文献标志码**：A

Metallogenic regularity, key scientific problems and research methods of bauxite in China

XU LinGang[1,2], SUN Li[3] and SUN Kai[1]

(1 School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 MNR Key Laboratory for Exploration Theory & Technology of Critical Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3 MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract

China is the most significant producer and consumer of aluminum in the world. However, the total resources of China and the per capita amount of aluminum are insufficient. Bauxite deposits in China are generally formed from Carboniferous to Permian. Although it is widely distributed in China, bauxite resources are mainly concentrated in a few metallogenic belts. In addition, bauxite in China is primarily karstic type, different from laterite bauxite-dominated worldwide. Based on previous studies, this paper summaries metallogenic regularities of the economically top four bauxite belts, including the Shanxi fault-uplift, the south margin of the North China craton, the central and northern Guizhou-southern Chongqing, and the Southwest Guangxi-Southeast Yunnan metallogenic belts. We further summaries three key scientific questions that need to be paid additional attention in the future research on bauxite, including: ① The stratigraphic sequence of bauxite and its provenance and mineral composition; ② Critical geological events in earth's history and their links with bauxite formation under deep-time paleoclimatological background; ③ Paragenetic or associated minerals with bauxite and their mineralization pro-

http://www.kcdz.ac.cn/

* 本文得到国家自然科学基金项目（编号：41972072、42172080）资助

第一作者简介 徐林刚，男，1981年生，博士，副教授，从事矿床学与同位素地球化学研究。Email: xulingang@cugb.edu.cn

** 通讯作者 孙 莉，女，1981年生，博士，高级工程师，主要从事数学地质学及矿床资源评价研究。Email: sunli@cags.ac.cn

收稿日期 2022-11-02；改回日期 2023-01-11。孟秋熠编辑。

cesses. This paper also prospects the possible techniques to meet the above challenges.

Keywords: geology, bauxite, metallogenic regularity, stratigraphic sequence, deep-time palaeoclimatology, paragenetic and associated minerals

铝在元素周期表中位于第3周期,原子量为13。铝是地壳中含量最丰富的轻金属元素,其质量百分数约为8.2%,在地壳中广泛以铝硅酸盐和含铝氧化物的形式存在,目前自然界中已经发现的含铝矿物多达270种。由于铝与氧具有极强的亲和性,因此自然界不发育自然铝。铝具有密度小、导电性好、抗腐蚀性强、采选冶成本低等多种特征,被广泛应用于航空航天、家用电器、包装、装饰装潢、耐火材料等诸多领域。工业应用的铝主要来自于铝土矿,铝土矿是富含铝、铁、钛等元素的氢氧化物和氧化物,一般通过表生风化和搬运沉积等地质作用形成于温暖潮湿的热带、亚热带地区(Bárdossy, 1982; Bogatyrev et al., 2009; Retallack, 2010)。全球范围内铝土矿资源丰富(550~750亿t),集中分布在几内亚、澳大利亚、巴西、越南、牙买加、印度尼西亚、中国、圭亚那、印度等国家(图1a, USGS Annual Report, 2021)。中国的铝土矿资源分布很不均匀,据统计,截至2015年底,中国累计备案的铝土矿矿区共553个,查明铝土矿总资源量47.1亿t,主要分布在山西、河南、广西、贵州等地,上述4个省区合计超过全国总资源量90%以上(孙莉等,2018,图1b)。中国是铝工业大国,年产量持续超过全球总产量一半以上,例如,2020年中国总计生产金属铝430万t,约占全球总产量的56%(USGS Annual Report, 2021)。中国虽然是世界上最主要的金属铝产出国,但铝土矿资源储备严重不足,总储量为9.8亿t,仅占全球总储量的3.5%(图1a),人均储量更是不足国际平均水平的10%(高兰等,2014; 张海坤等,2021)。

因此,总结中国铝土矿近年来的勘查成果,查明成矿规律、梳理成矿过程研究中的关键科学问题及解决方案,对促进铝土矿成矿理论研究和找矿勘查实践均具有重要意义。经过多年研究,国内外学者在铝土矿的成矿地质背景、矿床地质特征、成矿过程、共生矿产资源、成矿区带划分和资源潜力评价等研究方面取得了诸多重要进展(如刘长玲,1988; Deng et al., 2010; Liu et al., 2010; 黄智龙等,2014; 2021;刘幼平等,2015;刘学飞,2012;2016;2020;曹高社等,2018a;2018b),并逐渐认识到铝土矿的形成与深时古气候密切相关,是全球或区域范围内古气候条件、古水文条件等一系列地质因素综合作用的产物(Yu et al., 2019; Wang et al., 2021)。前人已经对中国铝土矿的资源状况、分布规律,以及全球铝土

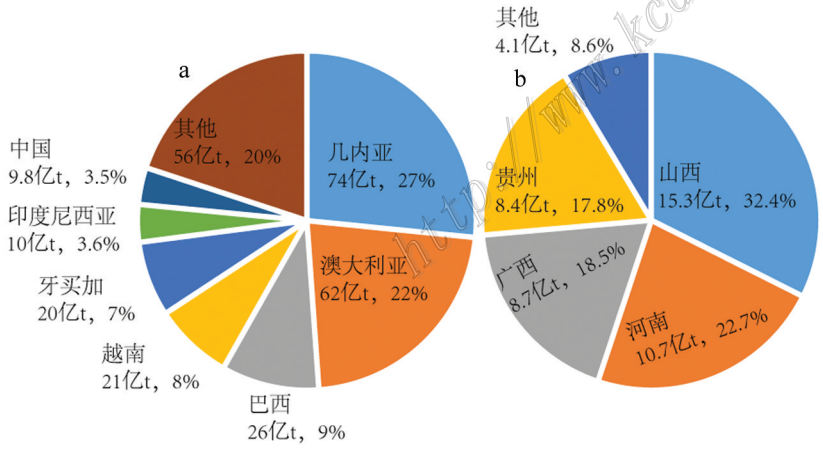

图1　全球及中国铝土矿资源分布情况

a. 世界上主要发育铝土矿国家、探明储量及所占比例(数据来自张海坤等,2021);b. 中国主要铝土矿省区、资源量及其所占比例(数据来自孙莉等,2018)

Fig. 1　Bauxite distribution in major countries worldwide and China

a. Major countries that host bauxite deposits in the world, and their reserves and percentage (data from Zhang et al., 2021); b. Major provinces and regions that host bauxite deposits in China, and their resource volumes and percentages (data from Sun et al., 2018)

http://www.kcdz.ac.cn

矿勘查开发情况进行了综述(如孙莉等,2011;2018;王庆飞等,2012;高兰等,2014;Gao et al., 2015; Sun et al., 2020; 张博坤等,2021)。本文将以前人工作为基础,通过广泛收集资料(包括大、中、小型铝土矿超过900个),并结合近年来最新研究进展,对中国主要铝土矿成矿带的资源情况、成矿特点进行综述,针对目前铝土矿研究面临的关键科学问题和研究方法进行总结,并对研究未来提出展望。

1 铝土矿的成因类型

早在20世纪初,国外学者便认识到铝土矿的下伏岩石具有含硅质岩石和含钙质岩石2种主要类型,随着研究的不断深入,国外学者以基岩类型为基础将铝土矿划分为红土型、喀斯特型和季赫温型铝土矿(Bárdossy, 1982; Bárdossy et al., 1990)。中国的铝土矿成因类型划分与国外略有差异,但综合考虑了基底岩石和铝土矿的物质组成、地质产状和成矿过程等多种因素,基本上可以进行对比。

红土型铝土矿指由下伏硅酸盐岩石经过红土风化作用而形成的残余矿床,此类矿床主要分布在南北纬30°以内的热带和亚热带地区,具有矿床规模大、层位稳定、分布范围广、品位高等特点,矿石中含铝矿物以三水铝石为主,另有少量的一水软铝石,是国际上最主要的铝工业原材料,其储量约占全球铝土矿总储量的86%(高兰等,2014)。全球范围内红土型铝土矿的形成常与全球变暖、大气中CO_2浓度增加、海洋缺氧事件、生物灭绝事件等相关(Retallack, 2010)。

喀斯特型铝土矿的成矿过程与地貌喀斯特化密切相关,指发育在岩溶化的碳酸盐岩之上、经过沉积作用形成的铝土矿矿床,因此也被称为碳酸盐岩岩溶型或沉积型铝土矿,根据产出的大地构造背景,被进一步划分为孤立台地喀斯特型和内陆盆地喀斯特型铝土矿。全球范围内喀斯特型铝土矿主要分布在南欧、加勒比海、亚洲北部等地区,含铝矿物以一水硬铝石和一水软铝石为主,储量约占全球总储量的13%(高兰,2014)。

季赫温型也称为堆积型,指直接覆盖在铝硅酸盐岩石剥蚀面之上的碎屑铝土矿矿床,储量仅占全球总储量的约1%,主要分布在俄罗斯和中国等地。与国外以红土型铝土矿为主所不同,中国铝土矿的成因类型以喀斯特型为主,占中国铝土矿总资源量的85%以上,主要分布在山西、河南、贵州和广西等地(刘学飞,2011)。

2 中国铝土矿的时空分布规律

对矿床时空分布规律的认识是研究成矿过程和开展找矿预测的基础。前人已对中国铝土矿矿床时空分布规律开展过深入研究(高兰等,2014;孙莉等,2018)。中国铝土矿在成矿时代上分布较单一,喀斯特型铝土矿主要形成于石炭纪和二叠纪,仅极少数发育在中晚三叠世;红土型和堆积型铝土矿分别集中发育在新近纪和第四纪(表1)。晚石炭世是中国喀斯特型铝土矿最重要的成矿期,铝土矿产于上石炭统本溪组中下部的碳质泥岩、粉砂岩、砂岩中,含矿岩系上覆于奥陶系马家沟组碳酸盐岩不整合面之上,是中国重要的G层铝土矿的产出层位,已探明资源量占全国铝土矿总资源量的42%,考虑到华北地区大量铝土矿的成矿时代尚未获得准确约束,这一比例可能会超过50%以上(表1)。

在铝土矿的空间分布方面,高兰等(2014)在全面梳理中国铝土矿资源特点、矿床类型、成矿区带和成矿系列的基础上,划分出15个铝土矿成矿区带,并圈定了7个重要矿集区,该划分方案为全国铝土矿资源潜力评价预测工作提供了重要理论依据。近年来,中国铝土矿找矿勘查工作不断取得突破,仅"十三五"期间,中国新发现铝土矿产地15处并有多个老矿山实现增储,如山西省汾西县吉王沟、秋堰、乡宁县东庄-郭元、灵石县秋牧、孝义市申家庄,河南省渑池县雁岭、新安县石寺-北冶,贵州省务川县大竹园等矿床。结合近年来的找矿新成果,孙莉等

表1 中国不同类型铝土矿成矿时代和资源量

Table 1 Mineralization ages and resources of different types of bauxite in China

矿床类型	成矿时代	资源储量/Mt	占比
喀斯特型	二叠纪	28	0.4%
	晚二叠世	166	2.4%
	中二叠世	406	6.0%
	早二叠世	18	0.3%
	石炭纪	963	14.0%
	晚石炭世	2902	42.0%
	早石炭世	499	7.3%
红土型	新近纪	987	14.4%
堆积型	第四纪	902	13.1%

(2018)将中国铝土矿重新优化划分为18个成矿区带,其中山西断隆成矿带、华北陆块南缘成矿带、黔中北-渝南成矿带、桂西南-滇东南成矿带4个成矿带最为重要(图2),资源量占全国总资源量的73%。从资源总量上看,山西断隆成矿带占主导地位,华北陆块南缘成矿带、黔中北-渝南成矿带和桂西南-滇东南成矿带基本相当;从品位上看,堆积型铝土矿的品位一般低于喀斯特型铝土矿,桂西南-滇东南成矿带中发育大量堆积型铝土矿,导致该成矿带铝土矿的平均品位略低于其他3个成矿带(图3)。本文在孙莉等(2018)分类方案的基础上,将上述4个最具有经济意义的成矿带予以概述。

2.1　山西断隆铝土矿成矿带

山西断隆成矿带包含了山西省全境、陕西省中部-东北部、内蒙古鄂尔多斯地区、河南省北部以及河北省西南部(图2)。该成矿带是中国铝土矿最集中、分布范围最大的成矿带,中大型矿床资源量为24.93亿t,平均品位63%,成因类型为喀斯特型。成矿带内发育包括克俄、瓦房沟、石且河等在内的大型铝土矿矿床30多个(表2)。在大地构造上,山西断隆属于华北陆块的一部分,华北陆块结晶基底由东、西部陆块和中部带组成,中部带是古元古代时期由东、西部陆块碰撞形成(Zhao et al., 2012),山西断隆主体上位于中部带。显生宙盖层由寒武纪到中奥陶世海相沉积岩、石炭纪到二叠纪陆相碎屑岩以及中—新生代河流-湖泊相沉积组成(Zhao et al., 2001),其中,石炭系本溪组不整合上覆于奥陶系碳酸盐岩之上,厚度几十米至数百米不等。本溪组可分为下、

图2　中国铝土矿矿床空间分布规律及4个重点成矿区带(底图据中国测绘协会网站 http://www.csgpc.org/list.php?fid=254)
符号大小代表矿床规模

Fig. 2　Spatial distribution of bauxite deposits in China and four economic significant metallogenic belts (China map is from Chinese Society for Geodesy Photogrammery and Cartography website at http://www.csgpc.org/list.php?fid=254)
The size of symbol denotes the size of deposit

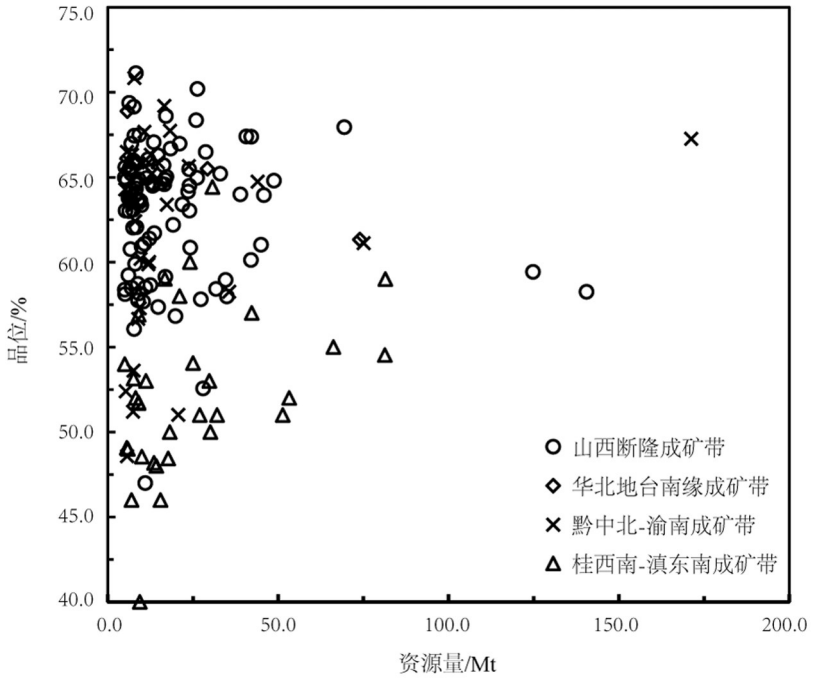

图3 中国4个铝土矿成矿带内大型-中型矿床吨位-品位图

Fig. 3 Tonnage and grade plot of large-medium-size bauxites in economically top four metallogenic belt of China

中、上3个岩性段，下部以紫色页岩为主；中部以黄色砂岩、砂质页岩为主，局部夹薄层煤层；上部以黄色页岩、细砂岩及石灰岩和铝土质页岩为主。本溪组下部是铝土矿的主要赋矿层位，可进一步划分为赤铁矿-褐铁矿层（山西式铁矿）、铁铝岩层、铝土矿层、黏土矿层、黏土质页岩层等。垂向上，本溪组下部具有底部高铁、低硅铝，中部高铝、低硅铁，上部高硅、低铁铝的规律（武爱明等，2019）。铝土矿常呈致密块状构造以及鲕粒状、豆状和碎屑状结构，主要矿物为一水硬铝石和高岭土，另有少量三水铝石、赤铁矿、针铁矿、鲕绿泥石、斜绿泥石、锐钛矿和金红石等（高天祥，2019；周智慧，2020）。

2.2 华北陆块南缘铝土矿成矿带

华北陆块南缘成矿带包括了河南省西部（荥阳、巩义、登封、新安、渑池、陕县）以及山西省南部（平陆县）等地区，在大地构造位置上属于华北陆块南缘。该成矿带在资源量上仅次于山西断隆成矿带，累计探明资源量为8.42亿t，平均品位64.9%（表3）。成矿带内发育大型矿床12个，其中包括巩义市小关、平陆县下坪、渑池县曹窑、仁村铝土矿等。矿床成因类型均为喀斯特型，主要赋矿层位为下石炭统本溪组中下段。区内地层层序与位于华北陆块中部的山西断隆基本一致，本溪组不整合上覆于寒武系和奥陶系碳酸盐岩之上，含矿岩系的空间展布明显受基底地形控制。喀斯特隆起高地部位，底部铁质黏土层中的矿物以伊利石、赤铁矿、针铁矿为主，而低洼处则以伊利石、菱铁矿、黄铁矿为主；铝土矿层则以一水硬铝石、伊利石、黄铁矿和锐钛矿为主；上部铝质黏土层由伊利石、一水硬铝石、锐钛矿和少量高岭石组成（刘学飞，2012；赵利华，2020）。矿石呈块状构造和土状构造，鲕粒状结构和隐晶质结构发育（刘学飞，2011）。成矿物质主要来源于北秦岭造山带，少量来源于下伏马家沟组灰岩（曹高社，2018a；2018b），秦岭古陆风化的富铝物质通过风暴作用搬运，在潮间带-潮下带经过机械分选以及离子、胶体化学沉积，在喀斯特低洼地带形成初始铝质岩，上部泥沼酸性溶液向下渗漏促使铝土岩脱硅去铁，并最终转化为铝土矿（李俊健等，2016）。

2.3 黔中北-渝南铝土矿成矿带

黔中北-渝南成矿带包括了贵州中部、北部以及重庆南部等广大地区（图2），大地构造位置属于扬子陆块的东南缘。该成矿带中的铝土矿均为喀斯特型。黔中地区的矿体整体产于九架炉组中上部，下部也有少量矿体产出，含矿岩系位于下奥陶统古溶

表 2　山西断隆铝土矿成矿带内大-中型矿床统计表

Table 2　Statistics of the large-medium-size bauxite deposits in the Shanxi fault-uplift metallogenic belt

省份	矿产地名称	大地构造位置	成矿类型	成矿时代	矿床规模	资源量/Mt	平均品位/%
山西	交口县瓦房沟铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	251.5	
山西	保德县石且河铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	140.5	58.3
山西	汾西县麻姑头铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	138.3	
山西	保德县郭偏梁铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	124.8	59.4
山西	孝义市克俄铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	69.4	67.9
山西	交口县田家山铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	48.8	64.8
山西	交口县石岭后铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	45.8	64.0
山西	吕梁市离石磁窑沟铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	45.0	61.0
山西	孝义市西河底铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	42.1	67.4
山西	孟县白云坡东铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	42.0	60.1
山西	交口县下庄铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	40.6	67.4
山西	兴县贺家圪台铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	38.9	64.0
山西	宁武县马邑所铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	35.0	58.0
山西	孝义市相王铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	34.6	59.0
山西	孝义市杜村铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	33.0	65.2
山西	五台县天和铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	32.0	
山西	宁武县宽草坪铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	31.8	58.4
山西	左权县清河店铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	30.0	
山西	交口县北故乡铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	28.8	66.5
山西	兴县苏家吉铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	28.0	52.6
山西	交口县赵家圪垛铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	27.6	
山西	保德县天桥铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	27.3	57.8
山西	孝义市石公铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	26.8	
山西	吕梁市离石西属巴铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	26.3	70.2
山西	洪洞县道觉铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	26.2	65.0
山西	方山县郭家沟铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	25.9	68.4
山西	孟县贾家脑铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	24.2	60.8
山西	孝义市克俄卜家峪北矿段铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	24.0	64.5
山西	阳泉市白泉铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	23.9	63.0
山西	孝义市柴场铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	23.9	65.5
山西	阳泉市白家庄铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	23.6	64.2
山西	交口县庞家庄铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	23.3	
山西	交口县丁家焉铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	21.9	63.4
山西	交口县沙塢铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	21.3	
山西	交口县上庄铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	21.1	67.0
山西	原平县长梁沟铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	19.9	56.8
山西	昔阳县李家庄铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	19.2	62.2
山西	五台县白家庄铝土矿	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	18.6	
山西	沁源县大峪铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	18.4	66.7
山西	古交市大南峪铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	17.2	65.0

http://www.kcdz.ac.cn/

续表 2-1

Continued Table 2-1

省份	矿产地名称	大地构造位置	成矿类型	成矿时代	矿床规模	资源量/Mt	平均品位/%
山西	交口县桃花铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	17.0	68.6
山西	阳泉市千亩坪铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	16.9	59.1
山西	交口县铁金铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	16.8	64.8
山西	汾阳市菽和铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	16.6	64.6
山西	交口县毕家掌铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	16.4	65.7
山西	孝义市梧风铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	15.5	64.7
山西	保德县焉则村铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	14.8	57.3
山西	中阳县开府铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	14.7	66.3
山西	沁源县南坪—黄段铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	14.5	
山西	兴县范家疃铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	14.1	
山西	盂县小岩沟铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	13.7	
山西	交口县响义铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	13.7	61.7
山西	汾西县王畔庄铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	13.5	67.1
山西	交口县后务城铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	13.4	64.6
山西	灵石县杨家山铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	13.2	64.5
山西	保德县塄则村铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	12.9	
山西	静乐县前文猛铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	12.9	
山西	太原市晋祠铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	12.5	58.7
山西	兴县后发达铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	12.2	61.4
山西	昔阳县三都铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	12.0	
山西	交口县庞子洼铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	11.8	66.1
山西	兴县奥家湾铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	11.7	
山西	盂县斗沟铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	11.4	64.9
山西	保德县郝家塔铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	11.1	58.5
山西	盂县郭村铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	11.0	47.0
山西	古交市河口铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	10.8	61.1
山西	沁源县李城铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	10.4	57.7
山西	交口西崖底铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	10.1	
山西	盂县白土坡铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	9.9	60.9
山西	阳泉市东村铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	9.8	63.3
山西	原平县化滩铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	9.6	63.6
山西	沁源县高家山铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	9.3	67.5
山西	宁武县西红河铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	9.1	58.2
山西	孝义市石公克俄间铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	9.0	
山西	孝义市石克间铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	9.0	64.9
山西	古县金堆铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	8.9	63.7
山西	兴县黄辉头铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	8.9	57.8
山西	兴县杨家沟铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	8.8	58.7
山西	交口县西山铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	8.5	65.8
山西	阳泉市白泉山头南段铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	8.4	62.0

http://www.kcdz.ac.cn/

续表　2-2

Continued Table　2-2

省份	矿产地名称	大地构造位置	成矿类型	成矿时代	矿床规模	资源量/Mt	平均品位/%
山西	阳泉市北泉—东梁庄铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	8.4	
山西	孝义市下堡矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	8.3	64.6
山西	孝义市克卜区岭北段铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	8.3	64.8
山西	孝义市石公铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	8.3	64.8
山西	寿阳县段王铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	8.3	64.3
山西	沁源县上滩铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	8.3	71.1
河南	沁阳市簸箕掌铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	8.2	
山西	孝义柳窟里铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	8.1	
山西	交口县薄依矿区铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	8.1	
山西	兴县车家庄铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	8.1	64.6
河北	武安市暴庄铝土矿	华北陆块	喀斯特型	C	中型	8.0	59.9
山西	灵石县毛家岭铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	7.9	
山西	孝义孙家山铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	7.8	67.4
山西	盂县东庄铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	7.8	56.1
山西	盂县千峰岭铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	7.8	
山西	孝义市桑沟铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	7.7	69.1
山西	灵石县南关铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	7.5	66.0
山西	临县湍水头铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	7.5	63.1
山西	阳泉市霍树头铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	7.4	62.0
山西	原平县角川铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	7.0	58.5
山西	孝义市石公西铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	6.9	67.0
山西	介休市赵家庄铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	6.8	65.2
山西	交口县冯家港铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	6.8	63.6
山西	汾西县诸神沟铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	6.8	
山西	灵石县王家岭铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	6.7	65.4
山西	盂县南流铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	6.7	60.8
山西	交口县南岭上铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	6.4	65.5
山西	娄烦县石槽铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	6.3	69.4
山西	交口县南故乡铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	6.3	63.0
山西	原平县石墙铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	6.0	59.2
山西	阳泉市太湖石铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	6.0	63.8
山西	怀仁县娄子沟铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	5.9	
山西	中阳县苏村铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	5.6	64.8
山西	交口县卜家庄铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	5.2	63.0
河北	井陉县南关铝土矿矿	华北陆块	喀斯特型	C	中型	5.1	65.6
山西	原平东蚕食铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	5.1	58.1
陕西	蒲城县东党铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	5.0	65.0
山西	原平县白鸠川铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	5.0	58.4

http://www.kcdz.ac.cn/

蚀面之上,成矿受到大地构造和基底地形的控制(吕留彦等,2021;刘旭等,2022)。九架炉组形成于早石炭世大塘期早-中期(刘平等,2012),沉积环境为近海湖泊相和平原相并受到海侵的影响,由下部黏土岩段和上部铝质岩段组成(杜远生等,2014;刘平等,2015),其中铝质岩段以杂色厚层块状、碎屑状、半土状、鲕粒状、豆状铝土矿为主,中间夹铝土质黏土岩和铁质黏土岩等,矿石矿物以一水硬铝石为主,代表性矿床包括猫场、仙人、后槽铝土矿等(庄志贤等,2016;刘旭等,2022)。黔北和渝南地区铝土矿的赋矿地层为中二叠统梁山组和下二叠统大竹园组(康桂川等,2020),下伏地层为下志留统韩家店组和上石炭统黄龙组,典型矿床包括重庆武隆县申基坪、南川区大佛岩以及贵州务川瓦厂坪、大竹园、道真新民大型铝土矿矿床等(黄智龙等,2014;刘幼平等,2015;金中国等,2018)。该成矿带铝土矿的成矿物质具有多来源的特点,下伏志留系韩家店组和石炭系黄龙组可能为主要来源(余文超等,2014;赵晓东等,2015),杜远生等(2014)通过黔北务正道地区铝土矿的综合研究,认为准同生和后期含矿岩系的暴露、淋滤,是该成矿带铝土矿形成的主要控制因素。

2.4 桂西南-滇东南铝土矿成矿带

桂西南-滇东南成矿带包括了云南东南部和广西西南部等广大地区(图2),在大地构造位置上处于华夏板块西南缘的华南褶皱带。该成矿带主要发育喀斯特型和堆积型铝土矿,其中堆积型铝土矿在资源量上占主要地位。喀斯特型铝土矿主要分布于桂西南和滇东南,赋矿层位分别为上二叠统合川组和龙潭组,主要由灰岩和碳质页岩组成,中间夹煤层和铝土矿层,其中铝土矿层具有明显的二元沉积结构,下部为厚层铝土矿,上部为韵律状铝土矿层,底部偶见铁质铝土质泥岩(张启连等,2020),原生矿石以块状、角砾状、鲕豆状、碎屑状矿石为主,风化后呈土状。成矿物质可能来源于峨眉山玄武岩以及下伏碳酸盐岩(Deng et al., 2010;张启连等,2020),为海相向海陆过渡相转变的沉积环境中,海水氧化还原状态由弱还原向氧化环境的转变促进了铝土矿的沉淀(李晓峰等,2021;王泽等,2022)。该成矿带内堆积型铝土矿主要发育在第四系更新统的岩溶洼地中或者缓坡之上,下部基岩主要为上泥盆统到中二叠统碳酸盐岩(张起钻,2011;赵俊彩,2013),为原生沉积形成的喀斯特型铝土矿,经过风化剥蚀堆积所形成。因此,该类型铝土矿的空间展布受第四纪地形地貌控制明显,代表性矿床包括广西平果那豆、云南广南板茂铝土矿等。

3 关键科学问题与研究方法

3.1 含矿地层层序、成矿物质来源与组成

铝土矿一般形成于海侵岩系的底部,早在20世纪20年代,日本学者将华北地区石炭系至二叠系中赋存黏土岩和铝土矿的层位从上到下划分了A到G7层。实际上,受局部沉积环境差异的影响,除A层和G层外,其他层位在区域上均难以对比。即便是在区域上分布最广泛的G层铝土矿,由于古喀斯特地貌对成矿的重要影响,使得该层铝土矿的矿体厚度、含矿性和地层层序等在不同地区存在差异,例如,发育在华北地区喀斯特地貌溶斗区域的铝土矿,自下而上形成了铝质黏土岩、鲕状和豆状铝土矿、块状铝土矿、铝土质黏土岩、碳质泥页岩、砂岩或灰岩的层序组合(王庆飞等,2012;刘学飞等,2020),从而在周围隆起地带,虽然层序基本一致,但厚度显著减小甚至消失。因此,对铝土矿地层层序的认识,需要解决两方面的关键问题:① 铝土矿的形成时代问题,例如,华北地区铝土矿虽然整体产于石炭系本溪组,但大量铝土矿的形成时代并未得到准确厘定(表1)。因缺乏有效的定年矿物,为沉积岩定年带来一定难度,近年来,利用碎屑锆石进行U-Pb定年、Rb-Sr同位素定年以及富碳质层的Re-Os同位素定年等技术都获得了长足的发展(王银喜等,2003;李超等,2014;向贤礼等,2015;钟海仁等,2020),此外,利用海相自生沉积矿物,如海绿石、伊利石、方解石等开展Ar-Ar, Rb-Sr等同位素定年,也显示出良好的潜力(韩志宇等,2022)。将传统的生物地层学与同位素地质年代学相结合,可以为解决铝土矿的成矿时代问题提供可能;② 铝土矿的形成环境问题。虽然普遍认为铝土矿含矿层系的形成与海侵过程有关,但铝土矿也可形成于海陆交互相、浅海碳酸盐相等多种沉积环境,尤其是对于矿区尺度沉积亚相的识别,更直接地影响找矿勘查部署。层序地层学研究对沉积型铝土矿的研究具有实践意义,以黔北务正道地区铝土矿为例,在前人沉积相研究的基础上(陶平等,2010;翁申富等,2013),刘辰生等(2015)通过层序地层学分析识别出3个沉积层序,并探讨了每个沉积层序经历的沉积相演变过程,总结出有利于铝土矿形成的沉积亚相。利用层序地层学研究获得的

表 3　华北铝矿南缘铝土矿成矿带内大-中型矿床统计表

Table 3　Statistics of the large-medium-size bauxite deposits in the south margin of the North China craton metallogenic belt

省份	矿产地名称	大地构造位置	成矿类型	成矿时代	矿床规模	资源量/Mt	平均品位/%
河南	巩义市小关铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	大型	82.8	
山西	平陆县下坪铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	74.0	61.3
河南	渑池县曹窑铝土矿区(深部)	华北陆块	喀斯特型	C	大型	66.6	
河南	巩义市涉村铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	大型	52.8	
河南	新安县贾沟—张窑院铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	大型	31.1	
河南	新安县竹园—狂口铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	大型	30.6	
山西	平陆县曹川铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	大型	29.2	65.5
河南	新安县马行沟铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	大型	25.8	
河南	渑池县曹窑贯沟铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	大型	24.0	
河南	新安县石寺铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	大型	23.7	
河南	渑池县雷沟铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	大型	22.9	
河南	陕县崖地铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	大型	21.7	
河南	登封市大冶铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	19.6	
河南	新密市平陌铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	18.7	
河南	陕县杨庄铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	18.7	
河南	陕县王古洞铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	17.6	
河南	陕县涧底河铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	15.6	
河南	陕县支建铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	15.1	
河南	登封市郑庄铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	14.4	
河南	新密市刘楼沟铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	13.7	
河南	宝丰县边庄铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	13.7	
河南	登封市庄头铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	13.5	
河南	渑池县水泉洼东铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	12.6	
河南	登封市王堂-新新铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	12.5	
河南	偃师市夹沟铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	12.3	
河南	偃师市焦村铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	11.8	
河南	新密市苟堂西铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	11.8	
河南	渑池县高桥-贺沟铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	11.7	
河南	渑池县白浪铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	11.3	
河南	禹州市方山铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	10.7	
河南	渑池县贾家洼西段铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	10.3	
河南	鲁山县梁洼—段店铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	9.0	
河南	渑池县段村铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	8.7	
河南	登封市告成铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	8.2	
河南	新密市岳村铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	8.2	
河南	渑池县贾家洼东铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	7.4	
河南	禹州市浅井铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	7.4	
河南	登封市岳窑铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	6.8	
山西	平陆县东寨铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	6.2	63.8
河南	渑池县小阳河铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	6.1	
河南	陕县杜家沟铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	6.1	
河南	登封市王村铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	6.0	
河南	荥阳冯庄-白寨铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C	中型	6.0	
山西	平陆县椿头凹铝土矿区	华北陆块	喀斯特型	C2	中型	5.7	68.9

http://www.kcdz.ac.cn/

表4 黔中北-渝南铝土矿成矿带内大-中型矿床统计表

Table 4 Statistics of the large-medium-size bauxite deposits in the central and northern Guizhou-southern Chongqing metallogenic belt

省份	矿产地名称	大地构造位置	成矿类型	成矿时代	矿床规模	资源量/Mt	平均品位/%
贵州	清镇市猫场铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	C1	大型	171.2	67.3
重庆	南川区大佛岩铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	P2	大型	75.1	61.1
贵州	务川县瓦厂坪铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	P2	大型	44.0	64.7
贵州	务川县大竹园铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	P2	大型	35.6	58.3
贵州	遵义市仙人岩铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	C1	大型	23.8	65.7
重庆	武隆县申基坪铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	P2	大型	20.7	51.0
贵州	遵义市后槽铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	C1	中型	19.2	
贵州	修文县小山坝铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	C1	中型	18.2	67.7
贵州	清镇市长冲河铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	C1	中型	17.4	63.4
贵州	清镇市燕垅铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	C1	中型	16.6	69.2
贵州	清镇市麦坝铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	C1	中型	14.7	65.9
贵州	遵义市苟江铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	C1	中型	13.0	65.2
贵州	贵阳市斗篷山铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	C1	中型	12.6	66.3
贵州	正安县新模-晏溪铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	P2	中型	12.1	60.0
重庆	南川区娄家山铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	P2	中型	12.0	65.9
重庆	南川区吴家湾铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	P2	中型	11.9	59.9
贵州	清镇市麦格铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	P2	中型	10.7	67.7
贵州	织金县马桑林铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	C1	中型	10.1	65.8
贵州	清镇市坛罐铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	C1	中型	9.7	60.2
贵州	正安县红光坝铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	P2	中型	9.4	57.3
贵州	修文县大豆厂铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	C1	中型	8.9	56.7
贵州	修文县干坝铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	C1	中型	8.6	63.5
贵州	开阳县石头寨铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	C1	中型	8.5	
贵州	修文县乌栗铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	C1	中型	8.3	63.5
贵州	息烽县赶子铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	C1	中型	8.0	62.4
贵州	修文县长冲铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	C1	中型	7.9	63.4
重庆	南川区菜竹坝铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	P2	中型	7.8	70.8
贵州	道真县子母岩铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	P2	中型	7.7	
四川	宝兴县芦山大河铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	P2	中型	7.6	53.6
重庆	武隆县白岩湾铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	P2	中型	7.4	51.2
贵州	清镇市老黑山铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	C1	中型	7.2	63.3
贵州	清镇市杨家庄铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	C1	中型	7.2	63.7
贵州	清镇市林歹铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	C1	中型	7.1	66.3
贵州	道真县大塘铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	P2	中型	6.6	65.8
重庆	南川区磨子沟铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	P2	中型	6.2	63.7
贵州	遵义市川主庙铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	C1	中型	5.7	
重庆	武隆县长槽铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	P2	中型	5.7	48.6
贵州	修文县天马山铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	C1	中型	5.6	66.5
贵州	开阳县赵家湾铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	C1	中型	5.5	65.8
四川	乐山市新华铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	P2	中型	5.3	52.4
贵州	清镇市岩上铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	C1	中型	5.2	64.3
贵州	遵义市宋家大林铝土矿区	扬子板块	喀斯特型	C1	中型	5.1	

http://www.kcdz.ac.cn/

表 5　桂西南-滇东南铝土矿成矿带内大-中型矿床统计表

Table 5　Statistics of the large-medium-size bauxite deposits in the southwest Guangxi-southeast Yunnan metallogenic belt

省份	矿产地名称	大地构造位置	成矿类型	成矿时代	矿床规模	资源量/Mt	平均品位/%
广西	平果县那豆铝土矿区	华夏板块	堆积型	Q	大型	81.5	59.0
广西	平果县太平铝土矿区	华夏板块	堆积型	Q	大型	81.3	54.5
广西	靖西县新圩铝土矿区(Ⅴ-Ⅶ矿段)	华夏板块	堆积型	Q	大型	66.2	55.0
广西	靖西县南坡铝土矿区	华夏板块	堆积型	Q	大型	53.3	52.0
广西	靖西县三合铝土矿区	华夏板块	堆积型	Q	大型	51.4	51.0
广西	靖西县新圩铝土矿区(Ⅰ-Ⅳ矿段)	华夏板块	堆积型	Q	大型	42.3	57.0
广西	靖西县大品铝土矿区	华夏板块	堆积型	Q	大型	35.6	
广西	那坡县龙合铝土矿区	华夏板块	堆积型	Q	大型	32.1	51.0
广西	平果县教美铝土矿区	华夏板块	喀斯特型	P3	大型	30.7	64.4
广西	德保县隆华铝土矿区	华夏板块	堆积型	Q	大型	30.1	50.0
广西	德保县马隘铝土矿区	华夏板块	堆积型	Q	大型	29.8	53.0
广西	靖西县禄峒铝土矿区(西矿段)	华夏板块	堆积型	Q	大型	27.0	51.0
广西	田阳县古美铝土矿区	华夏板块	堆积型	Q	大型	25.0	54.1
广西	德保县那甲铝土矿区	华夏板块	堆积型	Q	大型	24.8	
广西	德保县巴头铝土矿区	华夏板块	堆积型	Q	大型	24.1	60.0
广西	靖西县渠洋古立铝土矿区	华夏板块	堆积型	Q	大型	24.0	
广西	靖西县大面铝土矿区	华夏板块	堆积型	Q	大型	23.8	
广西	靖西县禄峒铝土矿区(东矿段)	华夏板块	堆积型	Q	大型	21.1	58.0
云南	邱北县飞尺角铝土矿区	华夏板块	堆积型	Q	大型	20.1	
广西	龙州县响水铝土矿区	华夏板块	堆积型	Q	中型	19.6	
广西	德保县东凌铝土矿区	华夏板块	堆积型	Q	中型	18.2	50.0
广西	平果县大隆铝土矿区	华夏板块	堆积型	Q	中型	17.8	48.4
广西	平果县那豆铝土矿区(Ⅰ)	华夏板块	喀斯特型	P3	中型	16.8	59.0
广西	靖西县大道铝土矿区	华夏板块	堆积型	Q	中型	16.7	
广西	扶绥县柳桥—山圩铝土矿区	华夏板块	堆积型	Q	中型	15.5	46.0
广西	平果县那豆铝土矿区(Ⅱ)	华夏板块	喀斯特型	P3	中型	15.2	64.7
云南	文山县杨柳井铝土矿区	华夏板块	堆积型	Q	中型	13.6	48.2
广西	百色市洞靖—巴别铝土矿区	华夏板块	堆积型	Q	中型	11.3	53.0
广西	平果县八秀铝土矿区	华夏板块	喀斯特型	P3	中型	10.0	48.5
广西	都安-马山县拉烈-金钗铝土矿区	华夏板块	喀斯特型	P3	中型	9.4	40.0
云南	西畴县卖酒坪铝土矿区	华夏板块	堆积型	Q	中型	9.1	56.9
广西	平果县果化铝土矿区	华夏板块	堆积型	Q	中型	9.0	51.7
广西	平果县龙律铝土矿区	华夏板块	堆积型	Q	中型	9.0	51.7
云南	文山县大石盆铝土矿区	华夏板块	喀斯特型	P3	中型	8.9	
广西	靖西县大邦铝土矿区	华夏板块	堆积型	Q	中型	8.1	52.0
云南	砚山县红舍克铝土矿区	华夏板块	堆积型	Q	中型	7.6	53.2
广西	田东县大板铝土矿区	华夏板块	堆积型	Q	中型	7.0	46.0
广西	上林县石门乔铝土矿区	华夏板块	喀斯特型	P3	中型	5.9	49.0
云南	麻栗坡县黄家塘铝土矿区	华夏板块	堆积型	Q	中型	5.6	49.1
云南	文山县者五舍铝土矿区	华夏板块	堆积型	Q	中型	5.0	54.0

http://www.kcdz.ac.cn/

铝土矿层序格架，可以很好地为预测铝土矿分布规律和找矿勘查提供理论支撑。

铝土矿矿床的形成，除了有利的沉积环境外，丰富的物源供给以及有效的成矿物质分异也是必备条件，因此，对铝土矿成矿物质来源和物质组成的研究也极为重要。作为沉积岩中良好的物源指示矿物，碎屑锆石为铝土矿的成矿物质来源分析提供了可能（余文超等，2020）。碎屑锆石U-Pb年龄、Hf同位素和微量元素研究表明，中国不同铝土矿成矿带的成矿物质来源存在显著差异，山西断隆和华北地块南缘成矿带的成矿物质主要来自于南北两侧的造山带，黔中北-渝南成矿带的成矿物质可能与华南地块南部的黔中、雪峰隆起以及扬子地块西部的康滇古陆有关，而桂西南-滇东南成矿带则主要由峨眉山玄武岩提供（Deng et al., 2010; 曹高社等，2018；王天顺等，2021）。碎屑锆石年代学已成为铝土矿物质来源研究的重要手段，但需要注意的是，碎屑锆石研究虽然为铝土矿物源研究提供了重要约束，但仍然需要结合大地构造学、地球化学、微观矿物学（形貌、物质组成）等多学科交叉研究，以获得更全面可靠的物质来源信息。随着测试技术的不断提高，对铝土矿矿物组成的研究也逐渐从传统的矿物类型和形貌观察，向微区、原位元素分析转变（如，刘学飞等，2020；张永清等，2022；赵浩男等，2022）。高精度的分析技术为从微观尺度精细刻画矿物组成、元素赋存状态、矿物晶体结构，以及成矿过程中元素的迁移富集过程提供了可能。

3.2 深时古气候与大规模铝土矿的形成

重大地质事件对大规模风化、沉积成矿作用具有重要意义（杜远生等，2020a）。大规模铝土矿的形成受到气候、构造、地形、水文、植被等多种因素的综合影响（Bogatyrev et al., 2009；崔滔等，2013；Wang et al., 2018; Yu et al., 2019）。近年来，随着深时沉积学的发展，对铝土矿的研究逐渐由单一的矿床学研究拓展到了重大地质事件背景下多圈层耦合关系的研究，利用铝土矿沉积记录反演地质历史时期表层环境演化过程，成为当前研究的热点。中国铝土矿的成矿时代集中在石炭纪及二叠纪，而该时期世界上其他地区铝土矿成矿作用减弱或停止，反映了此时位于东特提斯低纬度地区的华南、华北板块与西特提斯迥异的古地理环境（Yu et al., 2019）。杜远生等（2020b）认为地球上持续时间最长的晚古生代冰期在时间上与中国铝土矿的成矿时代相吻合，黔中北-渝南早石炭世、华北晚石炭世、黔北务正道地区早二叠世以及桂西南晚二叠世铝土矿成矿期分别对应了晚古生代冰期的启动和3个主冰期。受冰室-温室气候交替的影响，位于古特提斯洋东部的华北、华南地区海平面发生高频次大幅升降，古大陆的交替性暴露地表，为铝土矿的形成提供了物质基础和成矿空间。在热带辐合带湿热气候条件下，气候的波动进一步导致了降雨量、地下水水位的周期性变化，多种因素的影响最终导致大规模铝土矿的形成（图4）。这种成矿模型综合考虑了深时古气候背景下多种地质因素对大规模铝土矿形成的控制作用，对深入认识重大地质事件与铝土矿形成之间的关系具有重要意义。

然而，需要指出的是，目前对于重大地质事件与大规模铝土矿成矿作用耦合关系的研究尚处于起步阶段，很多科学问题尚未得到圆满的阐释，例如，地质历史时期曾发生过多次超大陆聚合以及极端气候环境，为什么仅在显生宙形成了大规模铝土矿？晚古生代冰期是全球性的，为什么仅在中国的华北和华南地区形成了石炭纪—二叠纪大规模铝土矿，而世界上其他地区铝土矿的形成则处于停滞状态？要解决这些问题，需要开展沉积学、成矿学、大地构造学、元素和同位素地球化学等多学科交叉研究，从超大陆演化、海洋环境演化、极端气候等多个角度开展研究。

3.3 共生/伴生成矿及其控制因素

多年的找矿勘探工作发现，华北地区铝土矿之下的奥陶系古侵蚀面之上发育一层铁矿，该铁矿层

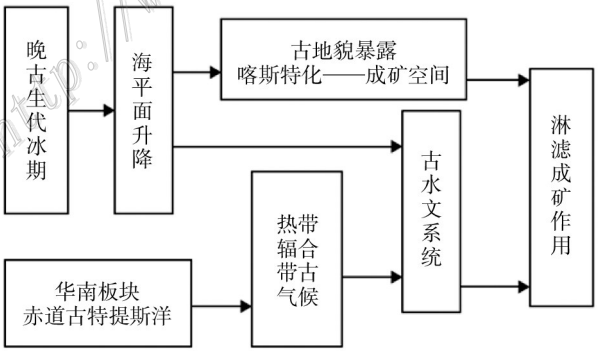

图4 重大地质事件与中国石炭纪—二叠纪大规模铝土矿形成的关系（据杜远生等，2020b）

Fig. 4 Coupling relationship between critical geological events and voluminous bauxite deposition during Carboniferous to Permian in China(after Du et al., 2020b)

以赤铁矿和褐铁矿为主,称为“山西式铁矿”。这类铁矿具有分布广泛、层位稳定、矿石品位较高、容易冶炼等优点,但通常规模较小不能独立开采,因此未受到足够重视。此外,在山西断隆以及华北地台南缘成矿带普遍发育“煤下铝”组合,即煤层下部发育铝土矿层(胡盛等,2021),然而受到采矿权设置的影响,煤矿和铝土矿的勘探和开采往往单独进行。长期以来,这种铁-铝-煤的地层层序组合未受到足够重视,在找矿勘探工作中,未将其作为一个成矿系统,从而导致勘查资料相互独立,大大影响了勘查效率。在科学研究方面,铁-铝-煤组合反映了沉积环境由滨浅海到海陆交互相再到陆相沉积的演化过程,但对沉积环境演化的精细过程的认识还不够全面,例如,传统观点认为,“山西式”铁矿的形成与加里东运动有关,基底地层经受长期的物质风化,为铁矿形成提供了丰富的成矿物质基础,海西运动后,受海侵作用的影响,风化壳中的含铁物质形成胶体并发生迁移,在相对开阔的氧化环境下沉淀成矿,然而,研究发现山西式铁矿同一层位还发育硫铁矿矿层(樊水利,2017),反映了古海洋氧化还原沉积环境存在差异,但造成这种差异的控制因素尚不明确。因此,通过岩相古地理恢复,结合地球化学研究成果,探讨古地理环境及其演化过程对铁-铝-煤成矿的控制作用,是当前找矿勘查和成矿学研究亟待解决的关键科学问题。

关键金属是近年来矿床学研究的热点(胡瑞忠等,2020)。铝土矿常富集 REE、Li、V、Ga、Sc、W、Ti、U、Nb 和 Ta 等关键金属元素,因此是这些关键金属元素的重要潜在来源之一(Yang et al., 2019; 龙永珍等,2019;钟海仁等,2019;黄智龙等,2021;Mongelli et al., 2021; 龙珍等,2021;杜蔺等,2022)。然而,由于铝土矿中的关键金属元素近年来才逐渐受到重视,诸多科学问题尚待解决。首先,中国铝土矿广泛分布于山西、河南、贵州和广西等多个省区,但铝土矿中关键金属的分布极不均匀,不同层位及岩石类型中关键金属的富集差异也很大,例如,黔北三清庙铝土矿床中关键金属 Li 主要赋存在铝土岩和黏土岩中,但铝土矿矿石中 Li 的含量很低,而且矿石类型对 Li 的富集程度也不同,致密块状和碎屑状矿石中 Li 的品位显著高于鲕粒状、豆状和土状-半土状矿石(范宏鹏等,2021);以上研究表明,关键金属在铝土矿中的时空分布规律需要进一步查明,这是开展成矿机理研究的基础。其次,尽管前人研究已表明含铝岩系中关键金属的赋存状态包括了吸附态、类质同象以及独立矿物 3 种类型(叶彤等,2021),但不同关键金属元素的赋存状态可能并不相同,例如,Li 以吸附态为主(范宏鹏等,2021),Co 以类质同象为主(王宇非等,2021),而稀土元素则可以以吸附态、类质同象和独立矿物等多种形式产出(叶彤等,2021)。元素富集状态的研究依赖于显微测试技术的进步,以传统的显微镜观察为基础,结合电子探针、SEM-TIMA 矿物分析系统以及高精度高分辨率显微测试技术,目前可实现原子尺度的矿物学观察,为铝土矿中关键金属的赋存状态研究提供了可能。再次,含铝岩系中的关键金属富集成矿涉及成矿物质来源、元素迁移和分异,以及沉淀富集等多个环节,这些地质过程中古构造、古气候、古地理背景,以及沉积环境的酸碱度、氧化还原环境等在关键金属富集过程中所扮演的角色尚不清楚,例如,铝土矿的形成是活性强的碱金属元素被迁出、化学活性相对稳定的元素发生相对富集的结果,而 Li 是化学活性较强的碱金属元素,其在相对惰性的含铝岩系中的富集机制有待深入刻画。

4　结论与展望

中国铝土矿具有成矿时代单一、空间分布广泛但局部相对集中的特点。在成矿时代上以石炭纪和二叠纪为主,在空间分布上主要集中在山西断隆、华北陆块南缘、黔中北-渝南以及桂西南-滇东南 4 个成矿带。在矿床类型上,中国铝土矿以喀斯特型为主。针对当前铝土矿的研究现状和面临的问题,需要有重点地开展 3 个方面的研究:① 加强铝土矿地层层序的研究,深化对成矿物质来源和有用矿物组成的认识;② 将铝土矿的成矿过程作为地球表生环境演化的特殊事件,开展重大地质事件与铝土矿成矿多因耦合研究;③ 加强含铝岩系中关键金属时空分布规律、赋存状态和富集机制研究。

http://www.kcdz.ac.cn/

References

Bárdossy G. 1982. Karst bauxites: bauxite deposits on carbonate rocks[J]. Developments in Economic Geology, 14: 1-441.

Bárdossy G and Aleva G J J. 1990. Lateritic bauxites: Development in Economic Geology[J]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publication, 1-624.

Bogatyrev B A, Zhukov V V and Tsekhovsky Y G. 2009. Formation

conditions and regularities of the distribution of large and super-large bauxite deposits[J]. Lithology and Mineral Resources, 44 (2): 135-151.

Cao G S, Liu L Z, Xing Z, Sun F Y, Yu S J, Fang B B, Du X, Zhou H C and Chen Y C. 2018a. Material sources analysis of Karatic bauxite of Benxi Formation in Gongyi area, Henan Province: Evidences from LA-ICP-MS U-Pb dating of detrital zircon[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 37(6): 55-65(in Chinese with English abstract).

Cao G S, Xing Z, Bi J H, Sun F Y, Liu L Z, Du X, Zhou H C and Chen Y C. 2018b. Material sources analysis of the Benxi Formation bauxite in the Yanshi-Longmen area, western Henan[J]. Acta Geologica Sinica, 92(7): 1507-1323(in Chinese with English abstract).

Cui T, Jiao Y Q, Du Y S and Yu W C. 2013. Analysis on paleosalinity of sedimentary environment of bauxite in Wuzhengdao area, northern Guizhou Province[J]. Geological Science and Technology Information, 32(1): 46-51(in Chinese with English abstract).

Deng J, Wang Q F, Yang S J, Liu X F, Zhang Q Z, Yang L Q and Yang Y H. 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: 412-426.

Du L, Tang Y Y, Zhang S F, Li Y, Gong X, Xiang M K and Wen Y Y. 2022. Critical metal enrichments in the aluminiferous rock series in the bauxite deposits of Guizhou Province, and their resource potential[J]. Acta Sedimentologica Sinica, doi:10.14027/j.issn.1000-0550.2022.006.

Du Y S, Zhou Q, Jin Z G, Ling W L, Wang X M, Yu W C, Cui T, Lei Z Y, Weng S F, Wu B, Qin Y J, Cao J Z, Peng X H, Zhang Z and Deng H. 2014. Mineralization model for the Early Permian bauxite deposits in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou Province[J]. Journal of Palaeogeography, 16(1): 1-8(in Chinese with English abstract).

Du Y S. 2015. Sedimentary geology of the Permian bauxite deposit in the Wuchuan-Zhengan-Daozhen area, northern Guizhou Province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press. 1-173 (in Chinese).

Du Y S, Zhou Q, Zhang L C and Yu W C. 2020a. Critical geological events and large-scale mineralization by sedimentary processes[J]. Journal of Palaeogeography, 22(5): 807-811(in Chinese).

Du Y S, Yu W C and Zhang Y G. 2020b. Ore sedimentology: A developing interdisciplinary research direction of sedimentology[J]. Journal of Palaeogeography, 101: 468-480(in Chinese with English abstract).

Fan H P, Ye L and Huang Z L. 2021. The associated lithium resource in bauxite (bauxite-bearing rock)[J]. Acta Mineralogica Sinica, 41(4/5): 382-390(in Chinese with English abstract).

Fan S L. 2017. Characteristics and distribution of Carboniferous Fe- and Al-bearing sequences and associated mineral resources in Shanxi Province[J]. Huabei Land and Resources, 72(2): 50-52(in Chinese).

Gao L, Wang D H, Xiong X Y and Yi C W. 2014. Summary on aluminum ore deposits minerogenetic regulation in China[J]. Acta Geologica Sinica, 88(12): 2284-2295(in Chinese with English abstract).

Gao L, Li J H, Wang D H, Xiong X Y, Yi C W and Han M Z. 2015. Outline of metallogenic regularity of bauxite deposits in China[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 89(6): 2072-2084.

Gao T X. 2019. Genesis of bauxite deposit in Ningwu region, northern Shanxi Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). 1-65(in Chinese with English abstract).

Han Z Y, Wang F and Shi W B. 2022. Dating and application for sedimentary rocks: Problems and prospects[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 40(2): 360-379(in Chinese with English abstract).

Hu R Z, Wen H J, Ye L, Chen W, Xia Y, Fan H F, Huang Y, Zhuang J J and Fu S L. 2020. Metallogeny of critical metals in the southwestern Yangtze Block[J]. Science Bulletin, 65(33): 3700-3714(in Chinese with English abstract).

Hu S, Li K H, Yang C H and Cai L. 2021. Study on genesis and prospecting method of aluminum deposit under coal in Henan Province[J]. Coal Geology of China, 33(10): 85-88(in Chinese with English abstract).

Huang Z L and Han H P. 2021. Critical metal resources in Al-bearing rock series: Preface[J]. Acta Mineralogica Sinica, 41(4/5): 377-381.

Huang Z L, Jin Z G, and Xiang X L, Gu J, Wu G H, Chen X L, Su Z L, Zhao Y Y, Ye L and Zou L. 2014. Metallogenic theory and mineral resource prospecting of bauxite deposits in Wuchuan-Zhengan-Daozhen area, northern Guizhou[M]. Beijing: Science Publishing House. 1-254(in Chinese).

Jin Z G, Zou L, Zhang L, Zheng M H, Han Y, Gu J, Xie X, Chen X L and Wang H. 2018. Metallogenic and prospecting models of bauxite in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, Guizhou Province[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 36(5): 914-926(in Chinese with English abstract).

Kang G C, He Z W, Tang J and Wu X Y. 2020. Characteristics of ore-bearing rock series and metallogenic regularity of bauxite of Liangshan Formation in Middle Permian Dejiang area, northern Guizhou Province[J]. Mineral Deposits, 39(5): 893-904(in Chinese with English abstract).

Li C, Qu W J, Wang D H, Zhou L M, Du A D, Fu Y and Pei H X. 2014. The progress of applying Re-Os isotope to dating of organic-rich sedimentary rocks and reconstruction of palaeoenvironment[J]. Acta Geosicentica Sinia, 35(4): 405-414(in Chinese with English abstract).

Li J J, He L Y, Fu C, Zhang Y Q, Peng J, Cui L Y, Zhao Z L, Dang Z C, Zeng X Y, Wang J Z, Li Z M, Chen S A, Yang J Q and Li L. 2016. Metallogenic characteristics and potential analysis of the Yuxi Au-Mo-W-Pb-Zn-Ag-Fe-bauxite-graphite metallogenic belt in western Henan[J]. Acta Geologica Sinica, 90(7): 1504-1524(in Chinese with English abstract).

Li X F, Li H, Wu Q H, Zhu R Q and Xi X S. 2021. Geological and geo-

http://www.kcdz.ac.cn/

chemical characteristics of primary sedimentary bauxite in Pingguo ore concentration area in Guangxi and its metallogenic environment[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, doi: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42248(in Chinese with English abstract).

Liao S F and Liang T R. 1991. Bauxite geology of China[M]. Guiyang: Guishou Technology Press. 1-277(in Chinese).

Liu C L. 1988. Geological features and genesis of Carboniferous bauxite deposits in China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 6(3): 1-10 (in Chinese).

Liu C S, Jin Z G and Guo J H. 2015. Sequence stratigraphy of bauxite deposition in Wuzhengdao area in Qianbei, North Guizhou[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 25(1): 179-189(in Chinese with English abstract).

Liu P and Liao Y C. 2012. A tentative discussion on the age of bauxite-bearing rock series in central Guizhou-southern Chongqing area[J]. Geology of China, 39(3): 661-682(in Chinese with English abstract).

Liu P, Liu Y C and Zhang Y J. 2015. Characteristics of marine deposits of the bauxite-bearing rock series in central Guizhou-southern Chongqing area[J]. Geology in China, 42(2): 641-654(in Chinese with English abstract).

Liu X F, Wang Q F, Deng J, Zhang Q Z, Sun S L and Meng J Y. 2010. Mineralogical and geochemical investigations of the Dajia Salento-type bauxite deposits, western Guangxi, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 105: 137-152.

Liu X F, Wang Q F, Li, Z M, Feng Y W, Cai S H, Kang W, Li J Q and Jiang L L. 2012. Mineral genesis and evolutionary sequence of the bauxite deposits in Henan Province[J]. Geology and Exploration, 48(3): 449-459.

Liu X F. 2016. Material composition and ore-forming process of bauxite (clay) deposits in western Henan, China[D]. Beijng: China University of Geosciences (Beijing). 1-165(in Chinese with English abstract).

Liu X F, Wang Q F, Ma Y, Li Z M, Zhao L H, Zhou Z H, Liu B S and Ma X L. 2020. Provenance of iron, bauxite and clay deposits of the Carboniferous Benxi Formation in southern margin of the North China Craton: An example from Da`an bauxite and clay deposit of Sanmenxia area, Henan Province[J]. Journal of Palaeogeography, 22(5): 965-976(in Chinese with English abstract).

Liu X, Ji S Y, Weng S F and Zhao S. 2022. Significance of paleo-karst geomorphology control on ore in Houcao bauxite mine in Guizhou Province[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 37(1): 27-37(in Chinese with English abstract).

Liu Y P, Cheng G F, Cui T, Zhou W L, Long H S and He Y. 2015. Metallogenic regularity of bauxite deposits in Guizhou Province[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press. 1-224(in Chinese).

Long Y Z, Chi G X, Gu X P and Dai T G. 2019. Discovery of uranium minerals in Yunfeng bauxite deposit, Guizhou Province[J]. Mineral Deposits, 38(1): 170-180(in Chinese with English abstract).

Long Z, Fu Y, He W, Tang B, Long K S, Liu Y and Wang T S. 2021. Geochemical characteristics and enrichment mechanism of Li in Xinmin bauxite deposit, Guizhou[J]. Mineral Deposits, 40(4): 873-890(in Chinese with English abstract).

Lü L Y, Chen R, Yu N, Tian M J, Qiao W T, Hu X R, Yue L and Zhou W. 2021. Constraints of the Early Carboniferous Datangian lithogacies paleogeography on the bauxite mineralization in the Kaiyang area, Central Guizhou, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 41(4/5): 509-519(in Chinese with English abstract).

Mongelli G, Maneli P, Sinisi R, Buccione R and Oggiano G. 2021. REEs and other critical raw materials in Cretaceous Mediterranean-type bauxite: The case of the Sardinian ore (Italy)[J]. Ore Geology Reviews, 139: 104559.

Retallack G J. 2010. Lateritization and bauxitization events[J]. Econ. Geol., 105: 655-667.

Sun L, Xiao K Y, Wang Q M and Lou D B. 2011. The analysis on the present situation and potential of bauxite resources in China[J]. Geological Bulletin of China, 30(5): 722-728(in Chinese with English abstract).

Sun L, Xiao K Y and Lou D B. 2018. Mineral prospectivity of bauxite resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 25(3): 82-94(in Chinese with English abstract).

Sun L, Zhang S, Zhang S H, Liu J N and Xiao K Y. 2020. Geologic characteristics and potential of bauxite in China[J]. Ore Geology Reviews, 120: 103278. https://doi. org / 10.1016 / j. oregeorev. 2019.103278.

Tao P, Xu Q S and Liu K. 2010. The prediction methods and its influencing factors of the sedimentary bauxite resource, taking bauxite resource of Guizhou Province, China as an example[J]. Geological Bulletin of China, 29(10): 1533-1539(in Chinese with English abstract).

USGS Annual Report. 2021. Mineral Commodity Summaries[R]. U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.3133/mcs2021.

Wang Q F, Deng J, Liu X F, Zhang Q Z, Li Z M, Kang W, Cai S H and Li N. 2012. Review on research of bauxite geology and genesis in China[J]. Geology and Exploration, 48(3): 430-448(in Chinese with English abstract).

Wang R X, Wang Q F, Huang Y X, Yang S J, Liu X F and Zhou Q. 2018. Combined tectonic and paleogeographic controls on the genesis of bauxite in the Early Carboniferous to Permian central Yangtze Island[J]. Ore Geology Reviews, 101: 468-480.

Wang R X, Wang Q F, Uysal, I T, Ramanaidou E, Deng J, Todd A, Verrall M and Liu X F. 2021. Mesozoic hydrothermal overprint on carboniferous bauxite in China[J]. Econ. Geol., 116(3): 787-800.

Wamg T S, Fu Y, He W, Long Z, Liu Y and Long K S. 2021. Detrital zircon records and material source analysis of bauxite deposits in China: A review[J]. Acta Mineralogica Sinica, 41(4-5): 558-569 (in Chinese with English abstract).

Wang Y F, Wang Z L, Lu A H, Wu L, Xu D R, Wu T, Long Y Z, Huang Z L, Fan H P and Peng E K. 2021. Discovery of cobalt-rich pyrite in the Yangjiadong ore block of the Maochang bauxite deposit, Guizhou Province and its significance[J]. 41(4/5): 460-474(in

http://www.kcdz.ac.cn/

Chinese with English abstract).

Wang Y X, Li H M, Gu L X, Wu C Z, Chai D H, Chen P, Wang S S and Zhang J J. 2003. Rb-Sr isotope dating of bauxite deposits in Shanxi Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 24(6): 589-592(in Chinese with English abstract).

Wang Z, Li X S, Lu G H, Xu H P, Yao S Q, Yin B C, Li J L and Zhou Y Q. 2022. Ore-forming material source and sedimentary environment of sedimentary bauxite deposits in Pingguo, Guangxi: Constraints of REE geochemistry[J]. Journal of Sichuan Geology, 42 (1): 109-116(in Chinese with English abstract).

Weng S F, Lei Z Y, Chen Q and Xiong X. 2013. A correlation of sedimentary facies and bauxite ore grade of Wuzhengdao area, northern Guizhou Province[J]. Geological Science and Technology Information, 32(1): 19-22(in Chinese).

Wu A M, Kong L Y, Wu Y B and Li Y X. 2019. Mineral composition and regularities of Ke'e bauxite deposit in Shanxi Province[J]. Geological Exploration, 68-73(in Chinese with English abstract).

Xiang X L, Jin Z G, Huang Z L, Zhou J X and Gu J. 2015. Origin of ore-forming materials for bauxite deposits in northern Guizhou Province, China: Evidence from detrital zircon U-Pb dating[J]. Acta Mineralogica Sinica, 35(4): 463-472(in Chinese with English abstract).

Yang S J, Wang Q F, Deng J, Wang Y Z, Kang W, Liu X F and Li Z M. 2019. Genesis of karst bauxite-bearing sequences in Baofeng, Henan (China), and the distribution of critical metals[J]. Ore Geology Reviews, 115: 103161.

Ye T, Gu J, Wang G L and Huang Z L. 2021. Research progress on the associated rare earth, rare metal, and rare dispersed elements in the bauxite deposit[J]. Acta Mineralogica Sinica, 41(4/5): 391-399 (in Chinese with English abstract).

Yu W C, Du Y S, Zhou Q, Jin Z G, Wang X M, Qin Y J and Cui T. 2014. Provenance of bauxite beds of the Lower Permian in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou Province[J]. Journal of Palaeogeography, 16(1): 19-29(in Chinese with English abstract).

Yu W C, Algeo T J, Yan J X, Yang J H, Du Y S, Huang X and Weng S F. 2019. Climatic and hydrologic controls on Upper Paleozoic bauxite deposits in South China[J]. Earth-Science Reviews, 189: 159-176.

Yu W C, Du Y S, Xiong G L, Zhou J T, Pang D W, Deng X S, Weng S F and Li P G. 2020. Detrital zircon records in bauxite deposits of China: Implication for the provenance model and ore deposits classification of bauxite[J]. Journal of Palaeogeography, 22(5): 947-964(in Chinese with English abstract).

Zhang H K, Hu P, Jiang J S, Cheng X, Wang J X, Liu J T and Xiang P. 2021. Distribution, genetic types and current situation of exploration and development of bauxite resources[J]. Geology in China, 48(1): 68-81.

Zhang Q L, Zhao X J, Li Y K, Li C M and Wei F. 2020. Geochemical characteristics and sedimentary model of Permian bauxite deposit in western Guangxi[J]. Geological Review, 66(4): 1043-1059(in Chinese with English abstract).

Zhang Q Z. 2011. Metallogenic model and exploration techniques of the bauxite, western Guangxi, China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). 1-143(in Chinese with English abstract).

Zhang S Q, Liu X F, Zhao F H, Liu D N, Zou Y, Zhang W X, Liu X L, Li L and Zhao L H. 2021. Geological and geochemical characteristics of karst bauxite-bearing sequences in Xiabu area, Central Shanxi Province, North China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 230: 106849.

Zhang Y Q, Zhou H Y, Geng J Z, Xiao Z B, Tu J R, Zhang R and Ye L J. 2022. Identification of the TiO_2 polymorphs of the bauxite deposit in central Guangxi by laser raman spectroscopy[J]. Rock and Mineral Analysis, https://doi. org / 10.15898 / j. cnki. 11-2131 / td. 202112070196.

Zhao G, Wilde S A, Cawood P A, Sun M, Cruden A R and Easton R M. 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton, lithological geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution[J]. Precambrian Research, 107: 45-73.

Zhao G and Gawood P A. 2012. Precambrian geology of China[J]. Precambrian Research, 222: 13-54.

Zhao H N, Xing L C, He H T, Du S J, Ling K Y and Wen H J. 2022. The mode of occurrence of niobium in bauxite of the upper Permian Heshan Formation in the Pingguo area, Guangxi Autonomous Region, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 42(2): 453-460 (in Chinese with English abstract).

Zhao J C. 2013. Quaternary karst landform and accumulative bauxite distribution rule in western Guangxi[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). 1-105(in Chinese with English abstract).

Zhao L H. 2020. Genesis of the Late Carboniferous karstic bauxite deposits in western Henan, Southern North China Craton: Taking the Rencun bauxite deposit in Mianchi mine area as an example[D]. Beijing: China University of Geosciences. 1-69(in Chinese with English abstract).

Zhao X D, Hu C S, Ling X M and Li J M. 2015. REE characteristics and its geological significance of the bauxite deposits in Nanchuan-Wulong area, Chongqing[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 45(6): 1691-1701(in Chinese with English abstract).

Zhong H R, Sun Y, Yang Y Q, Wang D H, Huang F and Zhao Z. 2019. Bauxite (aluminum)-type lithium resources and analysis of its development and utilization potential[J]. Mineral Deposits, 38(4): 898-916(in Chinese with English abstract).

Zhong H R, Sun Y, Zhao Z and Wang C H. 2020. Provenance of bauxite deposits in the Nanchuan district, Chongqing: Evidence from U-Pb dating, Hf isotopes and trace elemtns in detrital zircons[J]. Acta Geologica Sinica, 94(5): 1505-1524(in Chinese with English abstract).

Zhou Z H. 2020. Study on the genesis of Carboniferous Karst-type

http://www.kcdz.ac.cn/

bauxite in northern Shanxi: A case study of Xingxian bauxite[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). 1-65(in Chinese with English abstract).

Zhuang Z X, Tao Y C and Zhou A L. 2016. Genesis discussion of Maochang super-large bauxite deposit[J]. Guizhou Geology, 33(4): 272-277(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

曹高社，刘凌之，邢舟，孙凤余，余爽杰，方磅磅，杜欣，周红春，陈永才. 2018a. 河南省巩义地区本溪组铝土矿成矿物质来源—来自碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄的证据[J]. 河南理工大学学报（自然科学版），37(6): 55-65.

曹高社，邢舟，毕景豪，孙凤余，刘凌之，杜欣，周红春，陈永才. 2018b. 豫西偃龙地区本溪组铝土矿成矿物质来源分析[J]. 地质学报，92(7): 1507-1523.

崔滔，焦养泉，杜远生，余文超. 2013. 黔北务正道地区铝土矿形成环境的古盐度识别[J]. 地质科技情报，32(1): 46-51.

杜蔺，唐永永，张世帆，李阳，巩鑫，向明坤，文愿运. 2022. 贵州铝土矿含铝岩系中关键金属富集特征及资源潜力[J]. 沉积学报，doi: 10.14027/j.issn.1000-0550.2022.006

杜远生，周琦，金中国，凌文黎，汪小妹，余文超，崔滔，雷志远，翁申富，吴波，覃永军，曹建州，彭先红，张震，邓虎. 2014. 黔北务正道地区早二叠世铝土矿成矿模式[J]. 古地理学报，16(1): 1-8.

杜远生.2015. 黔北务正道地区二叠系铝土矿沉积地质学研究[M]. 武汉：中国地质大学出版社. 1-173.

杜远生，周琦，张连昌，余文超. 2020a. 重大地质事件与大规模沉积成矿作用[J]. 古地理学报，22(5): 807-811.

杜远生，余文超，张亚冠. 2020b. 矿产沉积学：一个新的交叉学科方向[J]. 古地理学报，22(4): 601-619.

范宏鹏，叶霖，黄智龙. 2021. 铝土矿（岩）中伴生的锂资源[J]. 矿物学报，41(4/5): 382-390.

樊水利. 2017. 山西石炭纪含铁铝岩系矿产及伴生、共生矿产的特征与分布[J]. 华北国土资源，77(2): 50-52.

高兰，王登红，熊晓云，易承伟. 2014. 中国铝矿成矿规律概要[J]. 地质学报，88(12): 2284-2295.

高天祥. 2019. 山西北部宁武县铝土矿成因研究[D]. 北京：中国地质大学（北京）. 1-65.

韩志宇，王非，师文贝. 2022. 沉积岩定年及应用：问题与展望[J]. 沉积学报，40(2): 360-379.

胡瑞忠，温汉捷，叶霖，陈伟，夏勇，樊海峰，黄勇，朱经经，付山岭. 2020. 扬子地块西南部关键金属元素成矿作用[J]. 科学通报，65(33): 3700-3714.

胡盛，李科花，杨持恒，蔡露. 2021. 河南省“煤下铝”矿床成因及找矿方法研究[J]. 中国煤炭地质，33(10): 85-88.

黄智龙，金中国，向贤礼，谷静，武国辉，陈兴龙，苏之良，赵远由，叶霖，邹林. 2014. 黔北务正道铝土矿成矿理论及预测[M]. 北京：科学出版社. 1-254.

黄智龙，范宏鹏. 2021. 含铝岩系中的关键金属资源：代序[J]. 矿物学报，41(4/5): 377-381.

金中国，邹林，张力，郑明泓，韩英，谷静，谢樨，陈兴龙，王洪. 2018. 贵州务—正—道地区铝土矿成矿模式与找矿模型[J]. 沉积学报，36(5): 914-926.

康桂川，何政伟，汤健，伍晓艺. 2020. 黔北德江地区中二叠世早期梁山组铝土矿含矿岩系特征及成矿规律[J]. 矿床地质，39(5): 893-904.

李超，屈文俊，王登红，周利敏，杜安道，付勇，裴浩翔. 2014. Re-Os 同位素在沉积地层精确定年及古环境反演中的应用进展[J]. 地球学报，35(4): 405-414.

李俊健，何玉良，付超，张彦启，彭冀，崔来运，赵泽霖，党智财，曾宪友，王纪中，李中明，陈安蜀，杨俊泉，李磊. 2016. 豫西 Au-Mo-W-Pb-Zn-Ag-Fe-铝土矿-石墨成矿带主要地质成矿特征及潜力分析[J]. 地质学报，90(7): 1504-1524.

李晓峰，李欢，吴堑虹，祝瑞勤，奚小双. 2021. 广西平果原生铝土矿地质地球化学特征与成矿环境[J]. 中国有色金属学报，doi: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42248.

廖士范，梁同荣. 1991. 中国铝土矿地质学[M]. 贵阳：贵州科技出版社. 1-277.

刘辰生，金中国，郭建华. 2015. 黔北务正道地区沉积型铝土矿床层序地层学[J]. 中国有色金属学报，25(1): 179-189.

刘平，廖友常，张雅静. 2015. 黔中—渝南石炭纪铝土矿含矿岩系中的海相沉积特征[J]. 中国地质，42(2): 641-654.

刘平，廖友常. 2012. 黔中-渝南铝土矿含矿岩系时代探讨[J]. 中国地质，39(3): 661-682.

刘旭，姬胜源，翁申富，赵爽. 2022. 贵州后槽铝土矿古岩溶地貌控矿作用及找矿意义[J]. 地质找矿论丛，37(1): 27-37.

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

刘学飞，王庆飞，李中明，冯跃文，蔡书慧，康微，王佳奇，江露露. 2012. 河南铝土矿矿物成因及其演化序列[J]. 地质与勘探，48(3): 449-459.

刘学飞，王庆飞，马遥，李中明，赵利华，周智慧，刘百顺，马欣莉. 2020. 华北克拉通南缘石炭系本溪组铁-铝黏土矿物质来源：以河南三门峡大安铝黏土矿床为例[J]. 古地理学报，22(5): 965-976.

刘幼平，程国繁，崔滔，周文龙，龙汉生，何英. 2015. 贵州铝土矿成矿规律[M]. 北京：冶金工业出版社. 1-224.

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，6(3): 1-10.

龙永珍，池国祥，古湘平，戴塔根. 2019. 贵州云峰铝土矿中铀矿物的发现[J]. 矿床地质，38(1): 170-180.

龙珍，付勇，何伟，唐波，龙克树，刘阳，王天顺. 2021. 贵州新民铝土矿矿床 Li 的地球化学特征与富集机制研究[J]. 矿床地质，40(4): 873-890.

吕留彦，陈仁，于宁，田茂军，乔卫涛，胡歆睿，岳龙，周武. 2021. 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]. 矿物学报，41(4/5): 509-519.

孙莉，肖克炎，王全明，娄德波，阴江宁. 2011. 中国铝土矿资源现状和潜力分析[J]. 地质通报，30(5): 722-728.

http://www.kcdz.ac.cn/

孙莉,肖克炎,娄德波. 2018. 中国铝土矿资源潜力预测评价[J]. 地学前缘,25(3): 82-94.

陶平,许启松,刘坤. 2010. 沉积型铝土矿预测方法及其影响因素—以贵州省铝土矿为例[J]. 地质通报,29(10): 1533-1539.

王庆飞,邓军,刘学飞,张起钻,李中明,康微,蔡书慧,李宁. 2012. 铝土矿地质与成因研究进展[J]. 地质与勘探,48(3): 430-448.

王天顺,付勇,何伟,龙珍,刘阳,龙克树. 2021. 中国铝土矿碎屑锆石记录与物质来源分析[J]. 矿物学报,41(4-5): 558-569.

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,24(6): 589-592.

王宇非,王智琳,鲁安怀,吴林,许德如,吴涛,龙永珍,黄智龙,范宏鹏,彭尔柯. 2021. 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]. 矿物学报,41(4/5): 460-474.

王泽,李学森,卢光辉,徐海棚,姚双秋,尹本纯,黎家龙,周业泉. 2022. 广西平果沉积型铝土矿成矿物质来源及沉积环境:稀土元素地球化学制约[J]. 四川地质学报,42(1): 109-116.

翁申富,雷志远,陈强,熊星. 2013. 黔北务正道地区铝土矿沉积相与矿石品质的关系[J]. 地质科技情报,32(1): 19-22.

武爱明,孔令玉,武彦彪,李亚先. 2019. 山西省克俄铝土矿矿物成分特征及变化规律[J]. 地质与勘探,68-73.

向贤礼,金中国,黄智龙,周家喜,谷静. 2015. 黔北北部铝土矿床成矿物质来源锆石U-Pb年代学证据[J]. 矿物学报,35(4): 463-472.

叶彤,谷静,王甘露,黄智龙. 2021. 铝土矿中伴生三稀元素研究进展[J]. 矿物学报,41(4/5): 391-399.

余文超,杜远生,周琦,金中国,汪小妹,覃永军,崔滔. 2014. 黔北务正道地区下二叠统铝土矿层物源研究:来自碎屑锆石年代学的证据[J]. 古地理学报,16(1): 19-29.

余文超,杜远生,熊国林,周锦涛,庞大卫,邓旭升,翁申富,李沛刚. 2020. 中国铝土矿沉积中的碎屑锆石记录:对铝土矿物源模式与矿床分类的启示[J]. 古地理学报,22(5): 947-964.

张海坤,胡鹏,姜军胜,程湘,王建雄,刘江涛,向鹏. 2021. 铝土矿分布特点、主要类型与勘查开发现状[J]. 中国地质,48(1): 68-81.

张启连,赵辛金,李玉坤,李昌明,韦访. 2020. 桂西二叠系铝土矿地球化学特征与沉积模式[J]. 地质论评,66(4): 1043-1059.

张起钻. 2011. 桂西铝土矿成矿模式与勘查技术[D]. 北京:中国地质大学(北京). 1-143.

张永清,周红英,耿建珍,肖志斌,涂家润,张然,叶丽娟. 2022. 应用激光拉曼光谱鉴别桂中铝土矿 TiO_2同质异象矿物[J]. 岩矿测试,https://doi.org/10.15898/j.cnki.11-2131/td.202112070196.

赵浩男,邢乐才,何洪涛,杜胜江,凌坤跃,温汉捷. 2022. 广西平果上二叠统合山组铝土矿中铌的赋存状态[J]. 矿物学报,42(2): 453-460.

赵俊彩. 2013. 桂西第四纪喀斯特地貌与堆积型铝土矿分布规律[D]. 北京:中国地质大学(北京). 1-105.

赵利华. 2020. 豫西晚石炭世喀斯特型铝土矿成因—以浑池仁村铝土矿为例[D]. 北京:中国地质大学(北京). 1-69.

赵晓东,胡昌松,凌小明,李军敏. 2015. 重庆南川-武隆铝土矿含矿岩系稀土元素特征及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版),45(6): 1691-1701.

钟海仁,孙艳,杨岳清,王登红,黄凡,赵芝. 2019. 铝土矿(岩)型锂资源及其开发利用潜力[J]. 矿床地质,38(4): 898-916.

钟海仁,孙艳,赵芝,王成辉. 2020. 重庆南川铝土矿物源分析、碎屑锆石U-Pb定年、Hf同位素和锆石微量元素示踪[J]. 地质学报,94(5): 1505-1524.

周智慧. 2020. 山西北部石炭纪喀斯特型铝土矿成因研究—以兴县铝土矿为例[D]. 北京:中国地质大学(北京). 1-65.

庄志贤,陶永昌,周安乐. 2016. 贵州猫场超大型铝土矿矿床成因浅析[J]. 贵州地质,33(4): 272-277.

http://www.kcdz.ac.cn/