

云南铝土矿 地质与勘查



崔银亮 豆 松 晏建国 郭远生
严 健 陈书富 梁秋原 程云茂 等 著



科学出版社

云南铝土矿地质与勘查

崔银亮 豆 松 晏建国 郭远生
严 健 陈书富 梁秋原 程云茂 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在区域地质背景研究的基础上,系统地总结云南铝土矿时空分布特点、勘查开发现状,划分矿床类型、成矿区,阐述地质背景及典型矿床地质特征。重点揭示岩相古地理与成矿的内在联系;对典型铝土矿开展岩石学、矿物学、地球化学研究,探讨成矿物质来源、成矿时代、成矿机制及矿床成因;系统总结成矿规律、找矿标志,建立云南铝土矿综合成矿模式。最后,对云南铝土矿资源潜力进行分析,提出铝土矿勘查评价方法技术组合和评价指标体系,并以勘查实例佐证评价方法的合理性和有效性。

本书可供从事矿床学研究和矿产勘查的人员参考使用。

审图号:云S(2018)008号

图书在版编目(CIP)数据

云南铝土矿地质与勘查 / 崔银亮等著. —北京:科学出版社, 2018.3

ISBN 978-7-03-056834-2

I. ①云… II. ①崔… III. ①铝土矿-地质构造-云南 ②铝土矿-地质勘探-云南 IV. ①P578.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 048855 号

责任编辑:罗 莉 / 责任校对:彭 映
责任印制:罗 科 / 封面设计:墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

http://www.sciencep.com

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 3 月第 一 版 开本:890×1240 1/16

2018 年 3 月第一次印刷 印张:18 1/4 插页:5

字数:628 000

定价:198.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《云南铝土矿地质与勘查》作者名单

崔银亮 豆 松 晏建国 郭远生
严 健 陈书富 梁秋原 程云茂
徐 恒 普传杰 王根厚 王训练
陈明伟 姜永果 刘文佳 王 艳

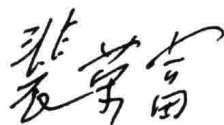
序

云南铝土矿自 20 世纪 80 年代初开展过地质普查后，一直再未做过系统勘查，其工作程度低，研究程度也低。铝土矿是铝工业建设和发展的决定因素，原来云南铝厂所需要的原料均从省外购进或从国外进口。铝土矿资源特别是优质富矿资源的保证程度，对云南矿业经济的发展举足轻重，争取更多的铝土矿自给和储备至关重要。

2009 年云南省有色地质局启动了全省铝土矿找矿行动计划，对全省铝土矿开展了科学研究和调查评价。2010~2013 年云南省实施省 3 年地质找矿行动，云南省有色地质局承担了首批国家整装勘查和云南省整装勘查项目——《云南广南—丘北—砚山地区铝土矿整装勘查》。通过 8 年来产学研创新驱动、理论研究和勘查实践共同攻关，地质找矿取得了重大突破，新发现 2 个大型铝土矿、5 个中型铝土矿，新增 332 + 333 + 334 类铝土矿资源量 2.03 亿 t（其中 333 类以上资源量 1.06 亿 t），为云南文山铝业有限公司已投产的 140 万 t/年氧化铝厂提供了资源保障，改变了云南铝工业原料几乎全部依赖从省外购进、国外进口的局面。同时积累了丰富的找矿技术和勘查经验。提出了以堆积型铝土矿寻找沉积型铝土矿的新认识，在滇东南地区发现了文山天生桥大型沉积型铝土矿，填补了云南缺少大型沉积型铝土矿的空白。

该书在深入分析云南省铝土矿区域成矿背景的基础上，全面地划分了云南铝土矿成矿区带、矿床类型，系统总结了典型铝土矿基本特征、成矿规律及找矿标志。首次运用精确岩相古地理研究方法，构建了滇东南地区含矿岩系的地层时代格架和沉积层序，详细划分了沉积相模式，确定了铝土矿有利成矿环境。通过典型矿床岩石学、矿物学和地球化学特征研究，揭示了铝土矿成因机制。率先建立了云南铝土矿综合成矿模式，指出了云南铝土矿找矿远景及资源潜力。该书列举了云南各类各式典型矿床勘查实例，首次建立了云南铝土矿的综合找矿模型和勘查方法技术组合体系。

该书内容丰富，资料翔实，具有较强的综合性、实用性和创新性，是集体智慧的结晶，它是第一部全面反映云南铝土矿理论研究和找矿实践的力作。该书的出版充实和丰富了铝土矿成矿理论，对铝土矿找矿部署、勘查评价及科学研究具有重要指导作用。我谨对该书的出版致以衷心的祝贺，并期望本书的出版能进一步推动地质找矿工作和矿床学的发展。



2017 年 5 月 25 日

前 言

铝是仅次于铁的第二大工业金属，主要用于电力、电气通信、交通运输、包装、建筑、机械制造业及民用器具等。云南已探明的铝土矿集中分布在滇东南和昆明周边地区，而分布于滇西、滇中和滇东北等地的矿床（点）都没有进行过系统勘查，工作程度低，铝土矿找矿潜力大。当前，云南省的铝厂所需原料均从省外购进或从国外进口，铝土矿资源特别是优质富矿资源的保证程度，对云南矿业经济的发展举足轻重，争取更多的自给和储备至关重要。

2009年初，云南省有色地质局经广泛调研和综合研究，启动了云南省铝土矿找矿行动计划的编制工作，6月初完成了《云南省铝土矿找矿行动计划勘查工作方案》。该方案的主要内容是“在云南省范围内划定4个片区，主攻4种矿床成因类型，提出铝土矿找矿远景区23个，其中规划勘查项目17个，科研专项3个；明确了工作原则和进度安排，拟定了工作思路，并成立了铝土矿找矿项目领导小组”。为了加快项目工作推进，2009年8月17日云南省有色地质局以文件（云色地局字〔2009〕96号）正式向云南省人民政府、云南省国土资源厅上报了关于实施《云南省铝土矿找矿行动计划勘查工作方案》的请示，建议由云南省国土资源厅直接领导，云南省有色地质局承担项目，组织实施全省铝土矿找矿行动计划。其任务是：在野外地质勘查和室内综合研究的基础上，运用新理念、新思维、新方法，在三年内，筹（投）入勘查资金1亿~1.5亿元，开展铝土矿专项找矿工作，力争在地质科研和找矿成果方面取得新突破，新增铝土矿资源量3亿t以上，在云南省建立3~5个铝土矿资源基地；着力搭建地方政府与地勘单位合作勘查开发的新模式、新空间、新平台；努力实现把矿产资源发现权转变为经济发展权。之后，在野外调研的基础上，经前期充分论证和精心选区，提出了《云南广南—丘北—砚山地区铝土矿整装勘查》项目，2010年6月该项目被云南省3年找矿办公室列为云南省3年地质找矿行动计划第一批整装勘查项目，同年10月被国土资源部列为首批全国47个整装勘查项目之一。

2010~2012年，云南省有色地质局和云南冶金集团股份有限公司作为勘查实施主体，完成了《云南广南—丘北—砚山地区铝土矿整装勘查》项目，取得了可喜的找矿成果和经济效益。文山地区堆积型铝土矿找矿取得重大进展、沉积型铝土矿找矿获得重要发现。累计新增332+333+334类铝土矿资源量2.03亿t，其中333类以上铝土矿资源量1.06亿t，新发现了2个大型、5个中型铝土矿，实现了云南省铝土矿找矿的历史性突破，为云南文山铝业有限公司已建成并投产的140万t/年氧化铝厂提供了可靠的资源保证。与此同时，云南省有色地质局在滇西鹤庆地区也全面开展了铝土矿勘查，在滇东北鲁甸—巧家一带进行了铝土矿专项野外调查，均取得了显著成效。

在铝土矿整装勘查期间，云南省有色地质局专门设立了《云南省铝土矿成矿规律与找矿选区研究》课题，与中国地质大学（北京）联合完成了《云南省铝土矿成矿规律与成矿预测研究》《云南省铝土矿主要成矿期岩相古地理和构造环境研究》《滇东南主要铝土矿矿床构造地质和成矿作用研究》和《滇东南主要铝土矿矿区精确岩相古地理和成矿作用研究》4个项目，云南省有色地质局310队与昆明理工大学联合完成了《云南省鹤庆地区铝土矿成矿规律及找矿选区研究》专题报告。以上研究成果提升了云南铝土矿成矿理论和找矿预测等方面的认识。

为了总结云南铝土矿找矿方法和勘查经验，云南省有色地质局决定编写《云南铝土矿地质与勘查》专著。该专著在充分吸收前人勘查和研究成果基础上，侧重对云南铝土矿地质特征、成矿规律、勘查评价方法进行了系统总结和深入研究，并对云南铝土矿资源潜力进行了评价。

研究成果是集体智慧结晶，其特色是理论与实践相结合、生产与科研相结合、典型矿床实例与勘查技术方法相结合。本书填补了云南省铝土矿专著的空白，对铝土矿找矿勘查工作具有重要指导意义。本书由第一章绪论，第二章区域地质背景，第三章铝土矿成矿区基本特征，第四章矿床类型及特征，第五章典型矿床地质特征，第六章岩石学，矿物学及地球化学特征，第七章矿床成因及成矿模式，第八章成矿规律与找矿标志，第九章找矿远景及资源潜力，第十章找矿勘查方法及实例组成。

本书各章编写分工是：第一章，崔银亮；第二章，梁秋原、陈明伟；第三章，陈书富、普传杰、豆松；

第四章，郭远生、程云茂；第五章，豆松、程云茂；第六章，徐恒、王根厚、王训练；第七章，崔银亮、晏建国；第八章，崔银亮、姜永果；第九章，严健、梁秋原；第十章，晏建国、豆松；结语，崔银亮。全书由晏建国、豆松初审，最终由崔银亮统稿、定稿。全书图件由姜永果、刘文佳、王艳等同志编制完成。

此外，参加铝土矿科研的人员还有：云南省有色地质局李光斗、李志群、张道红、杨学善、陈百友、邹云达等，云南省有色地质局勘测设计院李伟中、李伟清、杨宁等，云南省有色地质局 306 队蒙光志、徐自斌、任运华等，云南省有色地质局 310 队陈梁、雷阳艾等，中国地质大学（北京）周洪瑞、王行军、高金汉、焦扬、毛志芳、于蕾、周洁、吴春娇、张文婷、刘加强等，昆明理工大学薛传东、杨海林、董旭光等。参加野外勘查的人员有：陈春、刀俊山、董帅、董学山、董玉国、杜兵盈、段必飞、范良军、高泽培、龚洪波、和巨宾、侯恩刚、靳纪娟、李彬、李小清、李真冲、李智初、廖剑锋、刘文勇、马能、彭红晶、普米仓、戚林坤、邵熠、田茂军、王洪、王列、韦晓、熊磊、徐金祥、杨昌华、杨枝斌、尹超、尹静、张晨、张红英、张玉兰、郑国龙、郑克祥、郑楠、钟桂芬等。

特别感谢云南文山铝业有限公司总经理郝红杰教授级高级工程师、万多稳教授级高级工程师、丁吉林教授级高级工程师、陈纶勇高级工程师等领导和专家在野外工作期间给予的支持和帮助；十分感谢《云南广南一丘北一砚山地区铝土矿整装勘查》项目行政总监、文山州国土资源局副局长李仕标同志在项目执行过程中给予的精心指导和大力协调。

感谢昆明理工大学高建国教授、云南大学谈树成教授、云南省地质调查局施玉北教授级高级工程师对本书提出了宝贵意见。特别感谢年近期颐、德高望重的中国工程院院士裴荣富教授为该书题词作序，这是对作者们无比的关爱和莫大的鞭策和鼓励。

本书中引用了国内外专家、学者及有关单位的文献资料，在此表示衷心感谢。同时，受著者工作能力、研究水平及研究条件制约，书中某些观点可能有失偏颇，不足之处敬请批评指正。

目 录

第一章 绪论..... 1

第一节 铝土矿资源概况..... 1

一、世界铝资源..... 1

二、中国铝资源..... 2

第二节 铝土矿研究现状及存在问题..... 4

一、国内外研究进展..... 4

二、云南研究现状及存在问题..... 8

第三节 研究意义及研究内容..... 11

一、研究意义..... 11

二、研究内容..... 11

第四节 主要成果..... 12

一、理论成果..... 12

二、找矿效果..... 13

三、人才成果..... 13

四、经济社会效益..... 13

第二章 区域地质背景..... 14

第一节 构造单元划分及其特征..... 14

一、构造单元划分..... 14

二、构造单元地质特征..... 17

第二节 岩相古地理特征..... 23

一、中二叠世梁山期..... 24

二、晚二叠世龙潭期..... 24

三、晚三叠世卡尼期..... 27

第三节 地球物理特征..... 29

一、重力异常..... 29

二、磁异常..... 30

第四节 地球化学特征..... 33

一、景观地球化学..... 33

二、地球化学场分区..... 35

三、地球化学异常..... 36

第五节 遥感影像特征..... 38

一、区域遥感影像总体特征..... 38

二、云南东部影像域特征..... 39

第六节 区域铝土矿特征..... 41

一、时空分布..... 41

二、成矿区划分..... 61

第三章 铝土矿成矿区基本特征..... 65

第一节 滇东南成矿区..... 66

一、地质背景..... 66

二、成矿特点..... 68

第二节 滇中成矿区..... 75

一、地质背景·····	75
二、成矿特点·····	76
第三节 滇东北成矿区·····	79
一、地质背景·····	79
二、成矿特点·····	79
第四节 滇西成矿区·····	81
一、地质背景·····	81
二、成矿特点·····	82
第四章 矿床类型及特征·····	86
第一节 类型划分·····	86
第二节 类型特征·····	89
一、沉积型铝土矿·····	89
二、堆积型铝土矿·····	99
第五章 典型矿床地质特征·····	104
第一节 沉积型铝土矿·····	104
一、富民老煤山铝土矿·····	104
二、安宁耳目村铝土矿·····	106
三、巧家阿白卡铝土矿·····	109
四、麻栗坡铁厂铝土矿·····	111
五、丘北大铁铝土矿·····	116
六、会泽朱家村铝土矿·····	124
七、鹤庆白水塘铝土矿·····	125
第二节 堆积型铝土矿·····	128
一、西畴卖酒坪铝土矿·····	128
二、丘北飞尺角铝土矿·····	131
第三节 伴生矿产·····	135
一、伴生矿产分布概况·····	135
二、伴生矿产利用概况·····	140
第四节 滇东南与邻区铝土矿特征对比·····	140
第六章 岩石学、矿物学及地球化学特征·····	144
第一节 岩石学和矿物学·····	144
一、滇东南成矿区·····	144
二、滇东北成矿区·····	154
三、滇西成矿区·····	154
第二节 地球化学·····	155
一、滇东南成矿区·····	155
二、滇东北成矿区·····	175
三、滇西成矿区·····	178
第七章 矿床成因及成矿模式·····	182
第一节 滇东南成矿区·····	182
一、成矿物质来源·····	182
二、沉积环境及沉积相模式·····	186
三、成矿作用过程·····	207
四、区域成矿模式·····	211
第二节 滇中成矿区·····	214
一、成矿物质来源·····	214

二、成矿作用过程	214
三、区域成矿模式	215
第三节 滇东北成矿区	215
一、成矿物质来源	215
二、成矿作用过程	216
三、区域成矿模式	216
第四节 滇西成矿区	217
一、成矿物质来源及沉积环境	217
二、成矿作用过程	217
三、区域成矿模式	218
第五节 云南铝土矿综合成矿模式	219
一、成矿物质来源	219
二、综合成矿模式	220
第八章 成矿规律与找矿标志	223
第一节 成矿条件及控制因素	223
一、沉积型铝土矿	223
二、堆积型铝土矿	227
第二节 成矿规律	228
一、成矿地质环境	228
二、时空分布	228
三、铝土矿带有规律地围绕侵蚀古陆分布	229
四、铝土矿厚度与古地貌及含铝岩系厚度关系	229
五、沉积型铝土矿与堆积型铝土矿关系	230
六、铝土矿富集规律	230
第三节 找矿标志	230
一、沉积型铝土矿	230
二、堆积型铝土矿	232
第九章 找矿远景及资源潜力	234
第一节 远景区分类	234
第二节 远景区及资源潜力	235
一、滇东南远景区	235
二、滇中远景区	236
三、滇东北远景区	237
四、滇西远景区	238
五、云南省铝土矿资源潜力	238
第十章 找矿勘查方法及实例	240
第一节 找矿勘查基本途径	240
第二节 新技术与应用	242
第三节 综合找矿模型及方法组合	245
一、找矿模型	245
二、方法组合	246
第四节 勘查评价体系	247
一、指标体系	247
二、技术体系	247
第五节 勘查实例及找矿突破	248
一、综合成矿预测圈定靶区	249

二、靶区验证及成果	254
结语	256
主要参考文献	258
图版说明	265
图版 I	268
图版 II	270
图版 III	272
图版 IV	275
图版 V	278
图版 VI	279

第一章 绪 论

第一节 铝土矿资源概况

铝(Al)元素是 1825 年由丹麦物理学家奥尔斯德使用钾汞齐与氯化铝交互作用获得铝汞齐,后用蒸馏法去除汞,得到金属铝而被发现的(金中国等, 2013a)。铝金属呈银白色,具金属光泽,密度 2.7g/cm^3 ,熔点 660.37°C ,沸点 2467°C 。铝金属质地坚韧而轻,具有良好的导电性、导热性、延展性、反光性和抗蚀性。铝在地壳中的含量仅次于氧和硅,位列第三,是地壳中含量最丰富的金属元素,占 7%以上,主要以铝硅酸盐矿石形式存在。铝常以化合态形式存在于各种岩石或矿石中,如长石、云母、高岭石、铝土矿、明矾石等,常见铝的化合物有 Al_2O_3 、 AlCl_3 、 Al_2S_3 、 NaAlO_2 、 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 等。

铝是一种消费量很大的轻金属,在电力、电气通信、包装、建筑、交通运输、机械制造业及民用器具等工业部门中被广泛应用(徐天仇等, 1999; 申慧, 2003; 周汝国, 2005)。据国际铝业协会(International Aluminum Institute, IAI)统计,西方各国铝的消费结构为:运输业占 30%,建筑业占 17.7%,易拉罐占 12.20%,机械设备制造占 8.40%,电子业占 8.6%,商品包装占 5.3%,耐用品占 5.9%,其他 11.9%。铝及其合金粉末因能迅速燃烧放出强光,而被用作燃烧弹、信号弹、火箭等。因铝和氧的亲合力较大,铝还可用作炼钢的脱氧剂和一些高熔点金属氧化物的还原剂。铝土矿作为提取铝金属的主要原料最早由 Berthier 于 1821 年在法国的阿尔卑斯山的 Les Baux 发现,英文“Bauxite”即由此而来(崔滔, 2013)。铝土矿是指工业上能利用的,以三水铝石、一水软铝石或一水硬铝石为主要矿物所组成的矿石(黄智龙等, 2014),其用途除生产金属铝的主要原料外,在制取高级研磨料、高铝水泥、耐火材料、水泥、陶瓷材料、化工和医药方面也有广泛应用。

一、世界铝资源

世界铝土矿资源丰富,资源分布相对集中,主要分布于非洲(33%)、大洋洲(24%)、南美洲与加勒比海地区(22%)和亚洲(15%)。据美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)公布的数据显示世界铝土矿总资源量(探明储量+次经济资源+推测资源)约为 550 亿~750 亿 t,基础储量 380 亿 t(高兰等, 2014)。世界铝土矿资源分布相对集中,据 USGS(2015)统计,截至 2014 年底全球探明铝土矿储量为 280 亿 t,排名第一的几内亚铝土矿储量 74 亿 t,占世界总量的 26.4%;排名第二至第七的国家分别是澳大利亚、巴西、越南、牙买加、印度尼西亚和圭亚那,其铝土矿储量分别为 65 亿 t、26 亿 t、21 亿 t、20 亿 t、10 亿 t 和 8.5 亿 t,分别约占世界铝土矿总量 23.2%、9.3%、7.5%、7.1%、3.6%和 3.0%。中国铝土矿储量 8.3 亿 t,仅占世界总量的 3.0%,位居世界第八。

目前,世界上普遍采用 Bárdossy 和 Aleeva(1990)的铝土矿分类方案,按照铝土矿下伏母岩类型的不同,将其划分为红土型、岩溶型(喀斯特型)和沉积型(齐赫文型)三类。

红土型铝土矿,是由下伏铝硅酸盐岩(如玄武岩、花岗岩、粒玄岩、长石砂岩、麻粒岩等),在热带和亚热带气候条件下,经深度化学风化(即红土化)作用而形成的与基岩呈渐变过渡关系的残积矿床(包括就近搬运沉积的铝土矿)。该类型铝土矿约占全球总储量的 86%,主要分布于赤道两侧的热带、亚热带地区,南纬 30° 至北纬 30° 之间(图 1-1),世界上最大的红土型铝土矿就位于几内亚、澳大利亚、巴西和印度等赤道附近的国家(高兰等, 2014; 杨卉芃等, 2016)。

岩溶型铝土矿,是覆盖在灰岩、白云岩等碳酸盐岩凹凸不平岩溶面上的铝土矿。此类铝土矿与基岩呈不整合或假整合关系,其矿体系古红土风化壳被剥蚀、长距离(30~40km)搬运、沉积于岩溶地形中的产物。该类型铝土矿约占全球总储量的 13%,主要分布在南欧和加勒比海地区,北纬 30° 至北纬 60° 间及附近的温带地区,中国大部分铝土矿属于这一类型,分属于东亚成矿带(世界矿产资源年评, 2015)。

沉积型(齐赫文型)铝土矿,是指覆盖在铝硅酸盐岩剥蚀面上的碎屑沉积铝土矿。其与下伏基岩一般呈不整合接触,没有直接成因关系,成矿物质是从远方红土风化壳搬运来的。该类铝土矿仅占全球总储量

的 1%左右，主要分布在温带（图 1-1），典型的沉积型铝土矿产于俄罗斯齐赫文市附近，故由此而得名，常见于俄罗斯地台、乌拉尔山脉，中国、美国也有分布（Bárdossy and Aleva, 1990；黄智龙等，2014；杨卉芃等，2016）。

世界铝土矿床赋存时代，自晚元古代以来的各地史时期都有产出，但主要在晚古生代、中生代和新生代三个成矿期。红土型铝土矿主要产于新生代，多为近代地表红土风化壳矿床；沉积型（齐赫文型）铝土矿，绝大多数为古生代隐伏矿；岩溶型铝土矿，在三个成矿期均有产出，且地表浅部矿约占此类矿床储量的 40%，多半矿体处于隐伏状态（中国产业研究报告网，2014）。

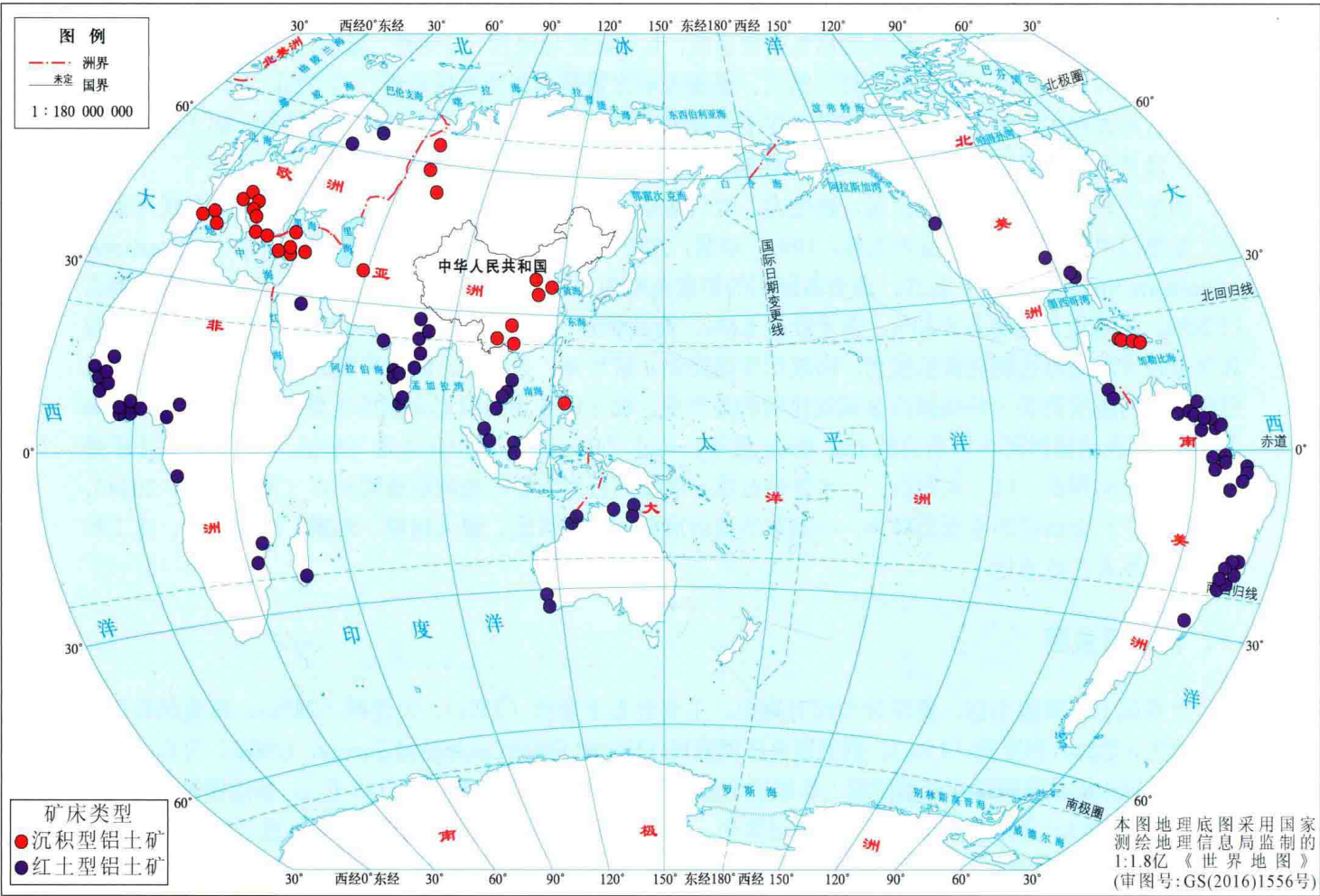


图 1-1 全球重要铝土矿分布略图（据杨卉芃等，2016 修编）

二、中国铝资源

中国铝土矿资源较为丰富，全国 31 个省（自治区、直辖市）中有 19 个省（自治区、直辖市）探明有铝土矿资源（图 1-2）。根据全国矿产资源储量通报公布的数据（2014 年），截至 2013 年底，全国保有铝土矿矿区 487 处，保有资源储量 40.23 亿 t，基础储量 9.83 亿 t（其中储量 4.84 亿 t），资源量 30.40 亿 t（高兰等，2015）。中国铝土矿资源分布依然相对集中，与世界铝土矿资源分布特点类似。我国华北陆块和扬子陆块的铝土矿成矿地质条件最好，铝土矿资源也最丰富，其中山西、广西、贵州和河南 4 省区铝土矿资源储量和矿区数均位居全国前列，排名依次为山西、广西、贵州和河南四省区铝土矿保有资源储量合计超过全国保有资源量的 90%，其中山西约占 37%，是中国第一铝土矿资源大省，广西、贵州和河南分别以 20%、18%和 17%比例位居第二、第三和第四位。此外，云南、重庆、山东等省市也探明有一定的铝土矿储量，但矿区数量和资源储量均不占重要地位（高兰等，2014，2015）。中国铝土矿资源虽然丰富，但人均占有储量较低，约为 460kg，是国外人均储量的 1/11。尽管全球铝土矿资源保障程度很高，可采储量静态保障年限在 100 年以上，但在我国优质铝土矿总体尚属紧缺资源（高兰等，2014）。

中国铝土矿矿床主要类型为古风化壳沉积型，其广泛分布于除海南外的全国有铝土矿分布的区域，矿床规模较大，分布广，以一水硬铝石为主，中低铝硅比，探明资源储量约占全国铝土矿资源储量的 78%；堆积型铝土矿主要分布于广西和云南，矿床规模大，以高铁型一水硬铝石和一水软铝石的混合矿为主，易采易选，中高铝硅比，探明资源储量约占全国铝土矿资源储量的 21%；红土型铝土矿主要分布于海南、广西和广东，分布比较局限，以高铁型三水铝石为主，含有少量的一水软铝石，高铝硅比，探明资源储量不足全国铝土矿资源储量的 1%（高兰等，2014）。

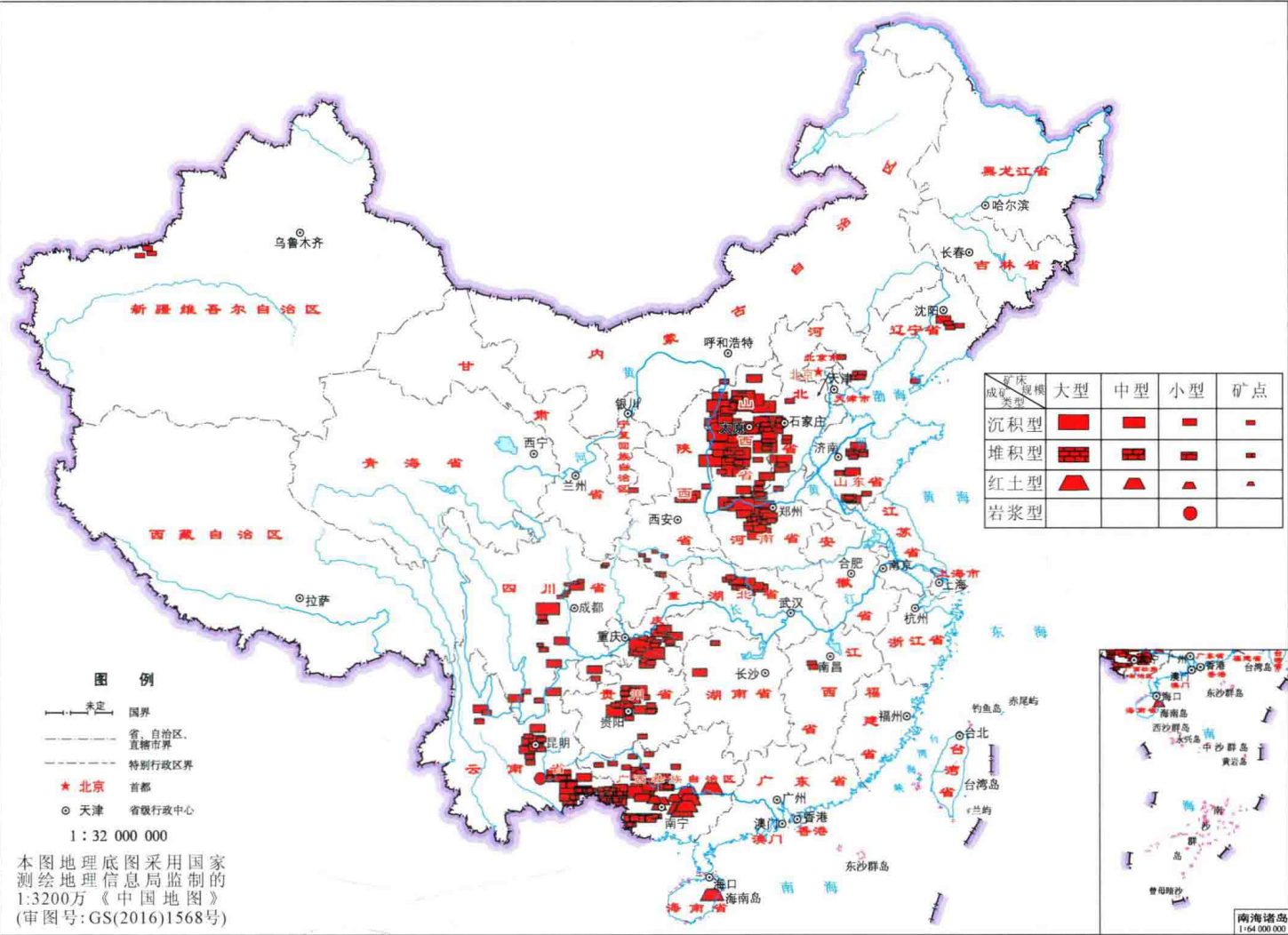


图 1-2 中国铝土矿分布图（高兰等，2015）

国外铝土矿以红土型矿床和三水铝石为主，覆盖层薄，适于露采，矿石质量较好。中国铝土矿资源则以古风化壳沉积型一水硬铝石为主，适于露采比例小，加工难度大，能耗高的一水硬铝石资源储量占比高达 90%以上，缺少易采易选的红土型三水软铝石。统计表明，截至 2009 年底，中国铝土矿矿石平均品位 Al_2O_3 以 40%~60%为主，平均铝硅比 (A/S) 为 4~6，其中铝硅比大于 7 的铝土矿资源储量占全国比例不足 30%，铝硅比 4~7 的铝土矿资源储量占比超过 60%，因此，中国铝土矿矿石多属中低硅铝比，开采用成本较高，资源禀赋不佳。因此，与世界铝土矿资源大国相比，我国铝土矿资源不仅储量较少，类型品质也不具优势（高兰等，2015）。

中国铝土矿矿床主要形成于晚古生代，华北地台和扬子地台石炭纪铝土矿储量居全国之冠，占全国铝土矿查明资源储量的 77%以上，是中国和世界的重要石炭纪铝土矿成矿带。从矿床类型上讲，中国古风化壳沉积型铝土矿主要形成于晚古生代的石炭纪—二叠纪，部分出现于中生代的中晚三叠世；红土型铝土矿主要发育于古近纪—新近纪，堆积型铝土矿形成于第四纪。统计显示我国铝土矿矿床集中分布在 7 个主成矿期，最重要的是石炭纪，其次是二叠纪。我国古风化壳沉积型铝土矿中，石炭纪约占 64%，二叠纪约占 14%（高兰等，2014）。

第二节 铝土矿研究现状及存在问题

一、国内外研究进展

国外铝土矿以欧洲、苏联研究起步较早，始于 20 世纪初期，在近一个世纪的研究中，各国专家学者从地质特征、成因类型、物质组成、物质来源与成因理论等多个方面对铝土矿床进行了全面系统研究，深入揭示了铝土矿成矿环境与成矿过程，成果丰硕，其中较具有代表性的专著有布中斯基 1975 年出版的《铝土矿地质学》和巴多西 1982 与 1990 年分别出版的《岩溶型铝土矿》与《红土型铝土矿》(崔滔, 2013)。与国外相比，我国铝土矿研究起步相对较晚，但经过几代研究者的持续工作，在上述各方面依然取得较大进展。

(一) 矿床类型

目前，铝土矿尚未有统一的分类标准和命名方案，国内外专家学者从物质组成、矿体形态、地质产状、基岩类型、矿床成因及大地构造位置等方面进行过分类(黄智龙等, 2014)。

国外铝土矿以三水铝石与软水铝石为主，针对其特点不同学者提出了不同划分方案。主要有：①化学成分法：以铁含量和 Al/Si 比值(铝硅比)的大小作为划分依据，该方法已弃用，而 Al/Si 作为高品位与低品位铝土矿划分标准依然被广泛使用(Lapparent et al., 1930)；②矿物划分法：将铝土矿分为硬水铝石铝土矿、软水铝石铝土矿和三水铝石铝土矿；③三角图解分类法：以氧化铝矿物、铁矿物、黏土矿物作为三个顶点对铝土矿进行分类(Konta, 1958)；④高程分类法：按新形成的矿床或未遭受垂直构造运动影响矿床的高程，分为高海拔型与低海拔型(Grubb, 1973)；⑤大地构造位置分类法：按照铝土矿床所处的构造位置分为地槽区矿床与地台区矿床(Peive, 1947；殷子明和陈国达, 1989)；⑥母岩类型划分法：按照母岩类型不同将铝土矿分为红土型铝土矿、岩溶型铝土矿、沉积型铝土矿(齐赫文型)，红土型铝土矿为下伏铝硅酸盐岩风化形成的残余矿床，岩溶型铝土矿指覆盖在碳酸盐岩表面的铝土矿，沉积型铝土矿指红土型铝土矿经剥蚀搬运较长距离后堆积形成的铝土矿(Fox, 1932；Weisse, 1932, 1963, 1976；Hardee, 1952；Bushinsky, 1971；Valeton, 1972；Bárdossy and Aleva, 1990；Laskou, 2003；Horbe and Costa, 1999；Mameli et al., 2007；D'Argenio and Mindszenty, 1995；刘中凡, 2001)。上述铝土矿矿床类型划分方法众多，经实践检验或多或少存在局限与不确定性(崔滔, 2013)，唯有以母岩类型基础的划分方法被世界广泛接受。

国内铝土矿类型划分依据与国外大致相同。如：刘长龄(1988)将中国铝土矿分为地槽区、地台区 11 种类型，18 个亚类，29 个准类型。廖士范和梁同荣(1991)将中国铝土矿划分为古风化壳型铝土矿和红土型铝土矿两大类，古风化壳型铝土矿又细分为 4 个亚类，即贵州修文式、贵州遵义式、广西平果式和河南新安式，红土型主要为福建漳浦式。高兰等(2014)将中国铝土矿矿床类型划分为古风化壳沉积型、(近代风化壳)堆积型和红土型 3 个类型 5 个亚类，对应修文式、王村式、平果式、贵港式和蓬莱式 5 个矿床式。章柏盛(1984)将我国铝土矿分为沉积型、堆积型、古风化壳型、红土型。刘长龄(1991)将我国铝土矿为残余型(红土型)、沉积型(岩溶型)、其他类型。李启津(1987)将我国铝土矿分为红土—沉积—红土型、红土—沉积型、钙红土型、岩溶堆积型与红土型五大类。陈旺(2009)认为我国铝土矿主要为岩溶型铝土矿，其可进一步分为沉积型铝土矿与堆积型铝土矿。国土资源部 2003 年发布实施的《铝土矿、冶镁菱镁矿地质勘资规范》(DZ/T 0202—2003)以规范形式将我国铝土矿划分为沉积型、堆积型、红土型三类。其中沉积型又分为产于碳酸盐岩侵蚀面上的一水硬铝石铝土矿矿床和产于砂岩、页岩、泥灰岩、玄武岩侵蚀面或由这些岩石组成的岩系中的一水硬铝石铝土矿矿床两个亚类；堆积型铝土矿由原生沉积铝土矿在适宜的构造条件下经风化淋滤，就地残积或在岩溶洼地(或坡地)中重新堆积而成的铝土矿；红土型铝土矿(即风化残余型或玄武岩风化壳型)产于玄武岩风化壳中，由玄武岩风化淋滤而形成的铝土矿。目前该规范划分方案为我国铝土矿矿床类型划分的主要依据和准则。

综上所述，国内外铝土矿分类命名略有差异，基本可以进行对比，部分互为包含关系(表 1-1)。国外红土型指由下伏铝硅酸盐岩石演变而成的(红土风化)残余矿床，只相当于我国红土型铝土矿的一个亚类；岩溶型指覆盖在碳酸盐岩的岩溶侵蚀表面上(钙红土或岩溶堆积)铝土矿；涵盖了我国铝土矿 3 大类型或

其中一个亚类：沉积型（齐赫文型）是产于铝硅酸盐岩中或侵蚀面上的碎屑（沉积）铝土矿，只相当于中国古风化壳沉积型的一个亚类（高兰等，2015）。

表 1-1 国内外铝土矿矿床类型对比

我国划分方案		占比/%	国外划分方案	占比/%
古风化壳沉积型	以硅酸岩为基底	5	沉积型（齐赫文型）	1
	以碳酸盐岩为基底	74		
堆积型	以沉积型铝土矿或碳酸盐岩为基底	20	岩溶型	13
红土型	以碳酸盐岩为基底	<1		
	以硅酸岩为基底	<1	红土型	86

注：据黄智龙等，2014；高兰等，2015。

（二）成矿物质来源

揭示成矿物质来源真谛对全面深入认识铝土矿成矿作用过程具有重要实际意义。Bárdossy（1983）通过对铝土矿母岩类型与铝土矿储量之间关系的研究认为花岗岩、粒玄岩、玄武岩、麻粒岩、页岩、板岩、高岭石砂质黏土岩、长石砂岩、碳酸盐岩为铝土矿最重要的母岩；最常见的铝土矿母岩，是地表大规模出露且渗透性较高的岩石，这些易风化的岩石形成的铝土矿较多且质量较好。通常红土型铝土矿成矿物质来源相对较为简单，可根据铝土矿物质组成和矿石结构揭示与潜在母岩间的关系（Bárdossy，1982；Bárdossy and Aleva，1990；Horbe and Costa，1999；黄智龙等，2014）；岩溶型铝土矿母岩识别较红土型铝土矿困难，多认为岩溶型铝土矿的母岩为下伏的碳酸盐岩（崔滔，2013）。沉积型铝土矿母岩因具“多源性”特征而最难确定。

目前，国外对铝土矿成矿物源的追踪方法主要有：重矿物分析、微量元素和稀土元素示踪等，并且取得了良好的应用效果（Haberfelner，1951；Jurkovic and Sakac，1963；Nemecz and Varju，1967；Boldizsar，1981）。重矿物分析示踪主要是运用比对铝土矿与可能母岩的重矿物特征方法来确定二者的亲缘关系（Bárdossy，1982）。微量元素物源示踪在铝土矿研究中被广泛使用，主要包括微量元素蛛网图、Zr-Cr-Ga 三角图解（Ozlu et al.，2002）、Cr-Ni（Schroll and Sauer，1968；Kurtz et al.，2000）及高场强元素比值（Zr/Hf 和 Nb/Ta 比值等）等（Kurtz et al.，2000；Panahi et al.，2000；Valeton et al.，1987；Calagari and Abedinif，2007），主要是利用微量元素的曲线趋势、铝土矿样品分布区域和元素比值特征与地层相关特征来进行比对以示踪其亲缘性。

国内铝土矿成矿物质来源的整体研究水平与国外相差不大，重矿物分析、微量元素蛛网图与富集系数、Cr-Ni 图解、稳定元素比率、Zr-Cr-Ga 三角图解、稀土元素配分模式等各种物源研究的方法都被广泛用于国内铝土矿的研究（崔滔，2013）。国内铝土矿成矿物质来源主要有下伏碳酸盐岩物源（李启津，1987；范法明，1989；贺淑琴等，2007）、下伏或研究区周边铝硅酸盐岩物（姬荅生，1987；徐丽杰等，1987；刘平，1993；）和多种岩石混合物源（陈平和刘凯，1992；Liu，1988；王绍龙，1992）三种观点。我国学者通过对华北地台石炭系铝土矿的成矿物质来源研究主要存有以下三种观点，即：下伏碳酸盐岩（范法明，1989；吴国炎，1997；赵运发和柴东浩，2002；孟祥化等，1987；丰凯，1992；郭连红等，2003）；成矿区边缘铝硅酸盐岩（刘长龄，1985；徐丽杰等，1987；卢静文等，1997；崔滔，2013）；碳酸盐岩+硅酸盐岩（孟祥化等，1987；刘长龄，1988，1992；范忠仁，1989；施和生等，1989；王绍龙，1992；杜大年，1995；吴国炎，1997；温同想，1996；刘长龄和覃志安，1999）。前人对桂西喀斯特型铝土矿物质来源的长期探索，也存有三种观点：①基底来源（范法明，1989；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）。部分学者以铝土矿微量元素和铁镁质岩石中微量元素比值类似为依据，认为二叠系中的铁镁质岩为成矿提供了部分成矿物质；③古陆来源（李启津等，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。孙思磊（2011）运用 Eu/Eu*-TiO₂ 图解、稳定元素比值、微量稀土元素配分模式等分析指示山西宁武先宽草坪村铝土矿成矿物质主要来源于上地壳，下伏碳酸盐岩是重要物源。对广西铝土矿运用高场强元素比率（Nb、Ta、Zr、Hf）、Cr-Ni 图解稀土元素配分模式、锆石年龄等方法分析，研究结果显示成矿物质来源既有下伏的碳酸盐，亦有与峨眉山玄武岩喷发

作用有关的铁镁质岩贡献(张起钻, 1999; 邓军, 2006; Deng et al., 2009, 2010)。对黔北务正道地区铝土矿床运用 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-TFeO}$ 图解、Cr-Ni 图解、主微量元素相关关系分析、微量元素配分模式等分析方法研究其成矿物质来源, 显示该区铝土矿成矿物质直接来源为基底层韩家店组砂页岩, 最终来源为上地壳硅酸盐岩类物质(金中国等, 2013a; 黄智龙等, 2014; 韩英等, 2016; 韩忠华等, 2016)。除上述方法外, 国内外学者也尝试运用氧同位素方法对铝土矿进行研究, 如鲍尔谢夫斯基(1976)研究认为全球红土型铝土矿床的铝矿物的 $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ 值为 $+8.2\sim +13$, 平均为 $+10.8$; 廖士范和梁同荣(1991)对中国贵州、广西、福建、四川、湖南、河南、山西、山东、辽宁等地 64 件铝土矿矿物氢氧同位素组成研究, 认为我国红土型铝土矿物(三水铝石) $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ 值平均是 $+13.3$, 古风化壳 5 种亚类的总平均值是 $+10.58$, 与全球红土型铝土矿床的铝土矿物的 $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ 值基本相同, 都是红土化作用形成的; 殷子明和陈国达(1989)对黔中、豫西等地铝土矿的氢氧同位素地球化学研究结果表明, 古生代铝土矿的高岭石多数是出自古风化壳的陆源碎屑, $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值的含 Ti、Fe 泥微晶硬铝石基本继承了初始矿物形成时的古大气降水的同位素组成; 刘平(2001)对黔中—渝南沉积型铝土矿中 19 件硬水铝石氢氧同位素测定, $\delta^{18}\text{O}$ 为 $+11.9\text{‰}\sim +13.6\text{‰}$ (SMOW) 与规模巨大的几内亚红土型铝土矿中三水铝石的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均为 12.6‰ 对比, 认为沉积铝土矿是基底岩石经风化作用先形成红土风化壳, 再经短距离搬运, 就近沉积—堆积在附近的洼地中。

综上可见, 随着对铝土矿床研究的深入, 对铝土矿成矿物质来源的认识已从“单源论”转向“多源论”, 并为广大专家学者所接受。

(三) 成矿环境

近年, 国外对铝土矿的研究主要集中在地球化学特征、成矿过程、成矿规律等方面, 成矿环境的研究未有明显进展。国外大多矿床因缺乏沉积构造和古生物化石直接证据, 成矿环境认识争议较大。但普遍认为铝土矿形成于陆地环境(原地风化、湖泊或沼泽)与海陆过渡环境中的这一观点, 在一定范围已有共识(崔滔, 2013)。部分铝土矿因具有特殊标志而能明确其沉积环境。如: 希腊埃利孔山凯法涅德斯矿床由潟湖相石灰岩基岩向上连续发育, 反映铝土矿形成于微咸水的潟湖环境(Bárdossy, 1982); 甘特铝土矿中因找到的 *Osmundacea* 种的包子囊和在奥利茨法附近的含铝土矿黏土中发现的鳄鱼牙齿碎片, 指示淡水沼泽环境(Bárdossy, 1982)等。国外对铝土矿成矿环境研究主要采用地球化学方法。如: 利用变价元素 Ce 对氧化—还原环境反应敏感特性(Braun et al., 1990; Mongelli, 1997)和高场强元素 Th、U、Ba、Sr 在沉积作用过程中的稳定地球化学行为特征计算出的 Th/U 和 Sr/Ba 比值(Laukas, 1983)等。

与国外相比, 国内对铝土矿成矿环境的研究较全面, 传统沉积学方法与地球化学分析、岩石矿物学特征分析相结合, 已达到国际先进水平, 部分地区的研究高于国际水平。虽然铝土矿中缺乏沉积构造与古生物化石, 但传统沉积学方法依然是铝土矿沉积环境研究不可或缺的手段(崔滔, 2013)。如运用沉积相研究方法通过沉积相的研究, 认为黔中铝土矿形成于湾湖或海湾环境(章柏盛, 1984), 认为山西与河南西部石炭系铝土矿形成于湾湖—海湾与滨岸沼泽环境(甄秉钱和柴东浩, 1986)。国内对铝土矿成矿环境的研究方法大致与国外相同, 主要也采用地球化学方法, 如同位素方法与微量元素的古盐度意义等。同位素方法主要运用不同环境的 $^{32}\text{S}/^{34}\text{S}$ 值的差异进行判别, 重硫富集指示海相环境, 轻硫富集指示陆相环境。古盐度指示意义主要运用 B、Sr、Sr/Ba、Ga、V/Zr 等微量元素来判别(崔滔, 2013)。如金中国等(2013a)和黄智龙等(2014)运用 Sr/Ba、V/Zr、 $^{32}\text{S}/^{34}\text{S}$ 分析方法综合判定黔北务正道地区铝土矿形成于内陆河湖沼泽环境。李海光(1998)运用 B、Sr/Ba、Ga 等判别指标, 对比铝土矿与海水硫酸盐 $^{32}\text{S}/^{34}\text{S}$, 得到山西孝义—霍州一带石炭系铝土矿形成于潟湖或海湾环境。俞缙等(2009)通过分析 B、Sr、Ba、Ga 特征认为靖西三合铝土矿为陆相沉积环境。李中明等(2009)利用 B 及 B-Ga-Rb 图解判定豫西郁山铝土矿形成于海相环境。范忠仁(1989)通过 Sr/Ba、V/Zr、B/Ga 分析认为河南中西部铝土矿主要为海相沉积, 局部地段可能有淡水作用。

(四) 成矿时代

成矿时代研究是矿床成因研究的重要方面。红土型铝土矿矿化的时间约数百万年至数十百万年(洪金益, 1994; Retallack, 2010), 远则自古近纪、近则自新近纪开始矿化即可形成相当规模的矿床(于蕾等,