

黔北务一正一道地区铝土矿床的矿物学特征

金中国¹⁾, 周家喜²⁾, 黄智龙²⁾, 谢樾¹⁾, 谷静²⁾, 刘玲¹⁾,
向贤礼^{1, 4)}, 邹林³⁾, 韩英³⁾, 代龙省⁵⁾, 郭松⁵⁾

1) 贵州省有色金属和核工业地质勘查局, 贵阳, 550005;

2) 中国科学院地球化学研究所, 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳, 550002;

3) 有色金属矿产地质调查中心, 北京, 100012; 4) 贵州理工学院, 贵阳, 550003;

5) 昆明理工大学, 国土资源工程学院, 昆明, 650093

内容提要:黔北务一正一道铝土矿集区为黔中—渝南铝土矿成矿带的重要组成部分,是贵州省主要的铝土矿成矿区之一。含矿岩系为中二叠统梁山组,矿床成因属古风化壳沉积型。矿石化学成分分析显示,土状、碎屑状铝土矿中 Al_2O_3 含量较高, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 值大,质量好,而豆鲕状、致密块状铝土矿中 Al_2O_3 含量较低, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 值小,质量较差。显微观察、粉晶衍射和电子探针分析表明,铝土矿石中主要矿物为一水硬铝石、勃姆石和粘土矿物,其中一水硬铝石多为短柱、半自形—自形晶体,呈集合体分布,粘土矿物以高岭石为主,呈孤岛、残留环状产出,其次见伊利石、蒙托石、绿泥石等,副矿物有黄铁矿、磁铁矿、长石、石英、金红石、锆石、锐钛矿、方解石和白云石等。铝土岩中主要矿物为粘土矿物,以高岭石为主,其它矿物和铝土矿相似。铝土矿的主要元素 Al_2O_3 、 SiO_2 、 TFe_2O_3 和 TiO_2 含量之和大于 83%,烧失量小于 14%,而铝土岩的 Al_2O_3 、 SiO_2 、 TFe_2O_3 和 TiO_2 含量之和小于 80%,烧失量大于 15%。可见铝土矿和铝土岩在主要矿物组成和主要组分总量上具有明显差异。结合以往研究资料,本文解析铝土矿形成过程为韩家店组砂页岩(成矿母岩)在适宜的气候条件下,经风化、淋滤等作用,形成富集 Al、Ti 等惰性元素的风化残积物和以高岭石为主的粘土矿物,随后被迁移、搬运至河湖盆地环境中,在沉积分异过程中粘土矿物不断脱硅、去铁、富铝,形成铝土岩层,经埋深压实、成岩成矿作用后进一步脱硅、去铁、富铝,最终在中二叠世形成以一水硬铝石为主的铝土矿工业矿体。

关键词: 铝土矿; 矿物学特征; 沉积分异; 成因机理; 黔北务一正一道铝土矿集区

黔北务川—正安—道真(务一正一道)铝土矿集区位于贵州北部与重庆接壤地带,是黔中—渝南铝土矿成矿带的重要组成部分(高兰等, 2014; 黄智龙等, 2014)。经近十年的理论研究和成矿预测,取得找矿重大突破,截止 2014 年底,已探明瓦厂坪、大竹园等 10 余个大型铝土矿床,提交铝土矿资源储量约 $7 \times 10^8 \text{ t}$,成为贵州主要的铝土矿资源地。鉴于黔北务一正一道铝土矿集区丰富的地质和成矿现象,国内众多学者对其区域成矿地质条件与找矿潜力(武国辉等, 2006; 刘平, 2007; 金中国等, 2009a, 2009b; 莫光员等, 2013; 杜远生等, 2013)、成矿规律与找矿预测(武国辉等, 2008; 金中国等, 2011, 2012a, 2012b, 2013a, 2013b; 李沛刚等, 2013)、矿床地球化学(金中国等, 2009a, 2009b; 李

沛刚等, 2012, 2014; 汪小妹等, 2013)、岩相古地理与成矿时代(廖士范, 1989; 刘平等, 2012; 赵远由, 2013; 崔滔等, 2013)和物质来源与成矿模式(翁申富等, 2010; 金中国等, 2012a, 2012b, 2013a, 2013b; Gu et al., 2013a, 2013b; 赵芝等, 2013)等方面开展了全面研究,取得了丰硕成果。上述研究表明,本区铝土矿形成于中二叠世,直接成矿母岩主要为下伏志留系韩家店组(殷科华, 2009; Gu et al., 2013a, 2013b; 金中国等, 2013a, 2013b; 赵芝等, 2013; 汪小妹等, 2013; 黄智龙等, 2014; 李沛刚等, 2014),主要为河湖陆相沉积,属于古风化壳沉积成因(武国辉等, 2008; 翁申富等, 2010; 金中国等, 2013a, 2013b; 谷静, 2013; 赵晓东等, 2013; 黄智龙等, 2014; 李沛刚等, 2014)。

注:本文为贵州省公益性、基础性研究项目(编号:[2007]-172)和国家十二五科技支撑项目(编号:2011BAB04B04)资助的成果。

收稿日期:2014-08-27; 改回日期:2015-03-27; 责任编辑:黄敏。

作者简介:金中国,男,1965年出生。博士,研究员,矿产普查与勘探专业。Email:gzkyjzg@sina.com。

尽管如此,本区铝土矿床系统的矿物学研究还比较薄弱,制约了对铝土矿形成机理的全面认识。本文以瓦厂坪、新民和新木—晏溪大型铝土矿床为例,通过全岩化学和矿物学分析,结合以往研究资料,解析铝土矿床的形成过程,为完善对其矿床成因的认识提供矿物学信息。

1 区域地质概况和矿床地质特征

1.1 区域地质概况

务一正一道铝土矿集区位于上扬子地台黔北抬隆遵义断拱凤冈 NNE 向构造变形区内,出露地层自寒武系至侏罗系,以寒武系、奥陶系、中一下志留统、中—上二叠统和下三叠统沉积厚度大,分布范围广为特征,上志留统、泥盆系和下石炭统缺失,上石炭统及侏罗系零星分布。含矿岩系中二叠统梁山组地表出露长约 700 km,分布面积约 2100 km²,在含矿岩系厚度大于 5m、产出较连续的地段,有利于中大型铝土矿床的形成;含矿岩系厚度小于 3m 地段,一般不能形成规模的工业铝土矿体,或无矿体产出。岩相剖面显示(金中国等, 2013a, 2013b; 刘辰生等, 2014),梁山组形成于陆相河湖沉积环境,自下而上为古风化沉积面→冲积平原、冲积扇相(绿泥石岩、铝土质粘土岩)→浅湖相(铝土矿或铝土岩)→沼泽相(炭质页岩)→局限台地(栖霞组泥灰岩)。上石炭统黄龙组断续分布,厚度 0~15 m,总体呈南薄(或无)北厚特点。寒武系至三叠系下统岩性主要为海相沉积的碳酸盐岩,其中上二叠统吴家坪组为海陆交互相沉积碳酸盐岩和碎屑岩,中二叠统梁山组和下侏罗统为陆相沉积碎屑岩。

区内构造经历了武陵至喜马拉雅数次构造作用,对铝土矿床形成有直接影响的是早古生代加里东晚期广西运动(晚志留世—泥盆纪)的隆升作用和晚古生代海西晚期黔桂运动(石炭纪晚期—二叠纪)的海陆交互相沉积作用(刘巽锋等, 1990; 高兰等, 2014)。广西运动导致黔中—黔北地区早古生代地层整体隆起成陆,使分布范围广、沉积厚度大、位于隆起顶端的志留系韩家店组遭受了近 100 Ma 的风化剥蚀,这为铝土矿床的形成提供了极为丰富的物源;黔桂运动导致在晚石炭世黄龙期有短暂的海侵,在低洼区形成碳酸盐岩沉积,至梁山期地层差异升降运动,黄龙组在隆起区遭受风化剥蚀,梁山组在湖盆、河湖环境沉积,这为铝土矿床的形成提供了部分物源和十分有利的场所。构造主体格架呈 NE 和 NNE 向展布,褶皱和断裂均发育,其中褶皱常以复

式背、向斜形式出现,背斜多呈宽缓状,规模大,延伸长,产状平缓,一般 10°~20°,而向斜多为紧密状,保存较完整,产状相对陡,一般 30°~40°,断裂以逆冲断层为主,多形成于背斜轴部和向斜两翼。除峨眉山玄武岩局部出露外,无其它岩浆岩出露(图 1)。目前,已发现铝土矿床(点)20 余处,均产于向斜内,其中达到大型规模的有 10 处,在向斜扬起端及成矿期后次生改造、淋滤作用较强的地段,往往形成规模大,矿石质量好的矿床。研究区具有代表性的铝土矿床有务川瓦厂坪和大竹园、道真新民、正安新木—晏溪等(黄智龙等, 2014; 李沛刚等, 2014)。

1.2 典型矿床地质特征

研究区典型铝土矿床出露的主要地层有中一下志留统韩家店组(S₁₋₂hj),中二叠统梁山组(P₂l)、栖霞—茅口组(P₂qm)和上二叠统吴家坪组(P₂w)、长兴组(P₂c),而在新木—晏溪矿床向斜核部还出露下三叠统夜郎组(T₁y)、茅草铺组(T₁m),上石炭统黄龙组(C₂h)零星出露,且厚度小于 5 m(图 2),与其上覆和下伏地层均呈假整合接触,同渝南、川东地区黄龙组的分布特征一致(陈浩如等, 2011)。梁山组是研究区铝土矿的含矿地层,与上覆栖霞组呈整合接触,而与下伏石炭系黄龙组或志留系韩家店组呈假整合接触,厚 0~16 m,一般 5~8 m,可分为三个岩性段(图 2),上部为碳质页岩、钙质页岩及铝土质页岩,厚 1.2~2.8 m;中部为铝土矿层,由铝土矿和铝土岩组成,厚 0.8~10 m;下部为绿泥石岩或含铁绿泥石岩、铝土质页岩,厚 0~4 m。

瓦厂坪矿床及新民矿床北段构造简单,新木—晏溪矿床和新民矿床中南段断层发育,对铝土矿体有破坏作用。铝土矿体呈层状产出,产状与围岩一致,其地表出露轮廓与向斜构造相吻合。瓦厂坪矿床整个矿区为一个矿体,走向长大于 4 km(图 3a),倾向延伸 2.85 km,平均厚约 2.2 m,矿石 Al₂O₃ 平均品位大于 65%,Al/Si 比大于 7;新民矿床由 2 个矿段 5 个矿体组成,主矿体走向长约 6 km(图 3b),倾向延伸 1.5 km,平均厚约 2.3 m,矿石 Al₂O₃ 平均品位大于 66%,Al/Si>6;新木—晏溪矿床由 5 个矿段 9 个矿体组成,主矿体长 2.7 km(图 3c),倾向延伸 1 km,矿体平均厚约 1.8 m,矿石 Al₂O₃ 平均品位大于 56%,Al/Si>5.5。各矿床含矿岩系厚度与矿体厚度、矿石质量成正相关关系,浅表矿石质量较深部好。矿石具有粒屑—泥晶、泥晶—微晶、复粒屑、重结晶结构以及土状、碎屑状、豆状、鲕状和致密块状构造(图 4)。矿石中除 Al、Ti、Si、Fe、Ca、

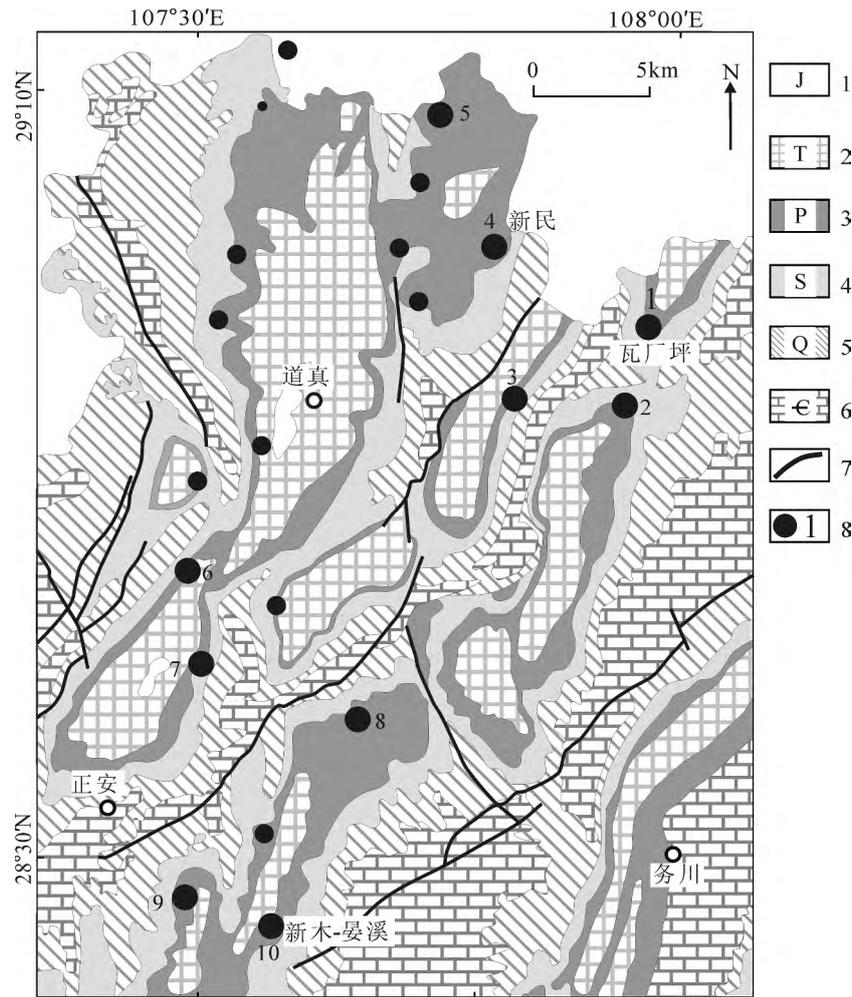


图 1 黔北务—正—道铝土矿集区地质略图

Fig. 1 Sketch geological map of the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen Al metallogenic district, in northern Guizhou province

1—侏罗系; 2—三叠系; 3—二叠系; 4—志留系; 5—奥陶系; 6—寒武系; 7—断层; 8—铝土矿床及编号

1—Jurassic; 2—Triassic; 3—Permian; 4—Silurian; 5—Ordovician; 6—Cambrian; 7—fault; 8—bauxite ore deposits and No.

Mg、K 和 Na 等元素含量较高外,还富集 Li、Sc、Ga 和 REE 等元素(金中国等, 2011, 2013b)。

2 样品采集及实验分析

本次研究选择了 3 个大型铝土矿床(瓦厂坪、新民和新木—晏溪)的 10 个钻孔和 2 条探槽,共采集 16 件铝土矿(岩)样品,其中瓦厂坪 8 件,新民 5 件,新木—晏溪 3 件,采样位置如图 3 所示。这些样品在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室和中南大学测试中心进行了化学成分、X 粉晶衍射(XRD)和电子探针分析。

3 矿石矿物的组成特征

3.1 铝土矿(岩)石的主要化学成分

铝土矿的形成经历了风化、脱硅、去铁等过程,

矿石中碱金属和碱土金属几乎被彻底溶失。因此,铝土矿石的化学成分总体上组成较简单,主要成分为 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 SiO_2 、 TiO_2 和烧失量,它们之和越大,表明铝土矿的成熟度越高。全部铝土矿(岩)样品的化学成分分析结果列于表 1,可见铝土矿石样品中 Al_2O_3 含量和 Al/Si 比均远高于铝土矿石边界品位和最低铝/硅比值的指标要求 ($Al_2O_3 \geq 40\%$, $A/S \geq 1.8$),铝土岩样品的 Al_2O_3 含量和 Al/Si 比略低于指标要求。铝土矿石样品中 Al_2O_3 含量为 46.83%~75.11%(平均 61.54%)、 SiO_2 含量为 3.04%~27.27%(平均 13.17%)、 TFe_2O_3 含量为 1.77%~13.82%(平均 5.69%)、 TiO_2 含量为 2.11%~3.30%(平均 2.68%)、烧失量 13.15%~14.98%(平均 13.95%)、Al/Si 比值为 1.9~24.4 (平均 7.4)、 $(Al_2O_3 + SiO_2 + TFe_2O_3 + TiO_2)$ 含量

地层代号	厚度 (m)	柱状图	岩性描述
P ₂ q-m	138~185		深色灰岩、生物碎屑灰岩
P ₂ l	0~3.5		碳质页岩、钙质页岩
	0~0.5		含硅、碳铝土质页岩
	0.2~1.9		灰白色豆状、碎屑状铝土矿或铝土岩
	0.2~1.9		灰白色铝土质页岩
	0.4~6.3		灰白色土状、半土状、碎屑状致密块状铝土矿
	0.5~1.0		黄褐色铝土质页岩
	0~0.3		碳质页岩 (局部地段缺失)
	0.2~0.5		灰绿色铝土质页岩
	0.5~1.0		灰绿色含铁绿泥石岩
	C ₂ h	0~5	
S ₁₊₂ hj	>400		紫红色、黄绿页岩夹粉砂岩、砂岩

图 2 黔北铝土矿床地层柱状示意图

Fig. 2 Stratigraphic column for typical bauxite deposits in northern Guizhou province

为 81.33%~84.82% (平均 83.08%)。可见,铝土矿石样品中 Al₂O₃、SiO₂和 TFe₂O₃含量变化范围较宽,但(Al₂O₃+SiO₂+TFe₂O₃+TiO₂)含量之和较为稳定。此外,在矿石类型上土状、碎屑状矿石中 Al₂O₃含量较高(一般>60%),SiO₂含量较低,Al/Si>4.5,成熟度较高;而豆鲕状、致密块状矿石中 Al₂O₃含量较低,SiO₂含量较高,Al/Si 比值小,成熟度较低。铝土岩样品中除 Al₂O₃含量低、SiO₂含量高、Al/Si 比值小外,(Al₂O₃+SiO₂+TFe₂O₃+TiO₂)含量之和也小于 80%,但烧失量却大于 15%,这些均与铝土矿石具有明显差异。笔者此前的研究发现,务一正一道地区铝土矿石中 Al₂O₃含量与 TiO₂含量呈正相关关系,而 Al₂O₃和 TiO₂含量与 SiO₂含量呈负相关关系、与 TFe₂O₃含量呈弱负相关趋势(金中国,2009b),表明铝土矿的形成过程中 Al 和 Ti 共迁移、同富集,而 Si 和 Fe 不同程度

流失,这与黔东南凯里—黄平地区铝土矿的形成过程具有相似性(张正伟等,2012)。

3.2 铝土矿(岩)石的矿物组成

X 衍射结果显示(表 2),铝土矿石中铝独立矿物主要为一水硬铝石(α-Al₂O₃·H₂O)和软铝石(勃姆石 γ-Al₂O₃·H₂O),占矿物总量的 40.94%~96.90%,偶见三水铝石(γ-Al₂O₃·3H₂O),并富粘土矿物,包括高岭石、伊利石、蒙托石、绿泥石和叶腊石等,占矿物总量的 3.20%~54.06%,其它矿物,如铁矿物(针铁矿、黄铁矿和磁铁矿)、硅酸盐矿物(长石、石英和角闪石)、重矿物(锐钛矿、金红石和锆石)、碳酸盐矿物(方解石和白云石)和硫酸盐矿物(石膏)等,约占矿物总量的 0~7.32%。铝土岩中铝独立矿物一水硬铝石和勃姆石的总含量小于 8.68%,低于铝土矿石一个数量级,主要含铝矿物以高岭石为主,占矿物总量的 17.84%~91.22%,富

粘土矿物,如伊利石、蒙托石、绿泥石和叶腊石等,占矿物总量的 5.09%~39.78%。本区铝土矿石的矿物组成与相邻重庆大佛岩铝土矿床非常相似(李军

敏等,2012)。

电子探测观察显示,铝土矿石中一水硬铝石多为短柱、半自形—自形晶体,呈集合体分布,粒径一

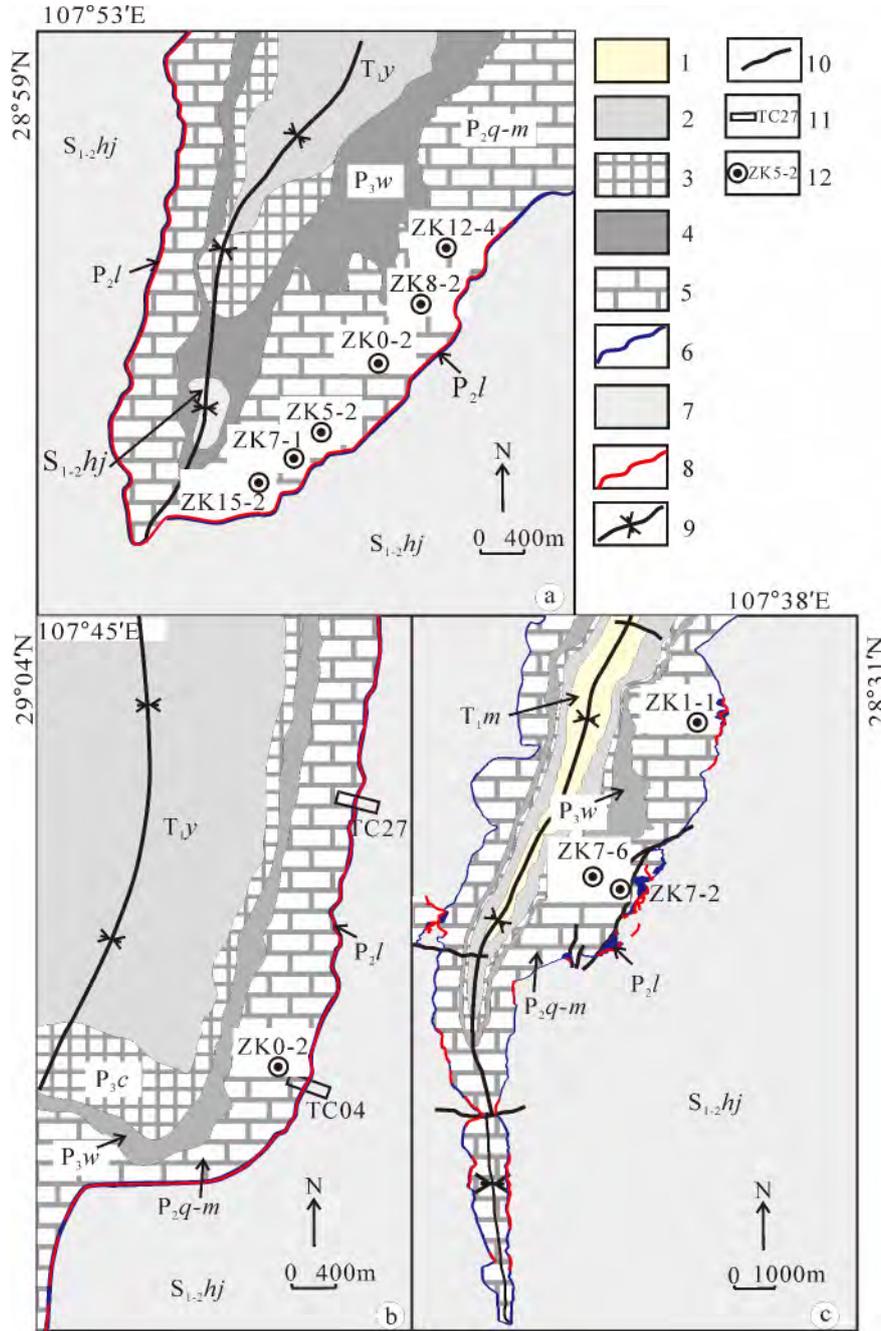


图3 黔北铝土矿典型矿床地质略图(a—瓦厂坪;b—新民;c—新木—晏溪)

Fig 3 Geological map of the typical bauxite deposits in northern Guizhou province

(a—Wachangping; b—Xinmin; c—Xinmu—Yanxi)

- 1—下三叠统茅草铺组; 2—下三叠统夜郎组; 3—上二叠统长兴组; 4—上二叠统吴家坪组; 5—中二叠统栖霞—茅口组;
- 6—中二叠统梁山组; 7—中—下志留统韩家店组; 8—铝土矿露头; 9—向斜轴; 10—断层; 11—探槽工程及编号; 12—钻探工程及编号
- 1—Lower Triassic Maocaopu Formation (Fm.); 2—Lower Triassic Yelang Fm.; 3—Uppert Permian Changxing Fm.;
- 4—Upprt Permian Wujiaping Fm.; 5—Middle Permian Qixia—Maokou Fm.; 6—Middle Permian Liangshan Fm.;
- 7—Lower—Middle Silurian Hanjiadian Fm.; 8—Outcrop of bauxite; 9—synclinal axis;
- 10—fault; 11—trenching engineering and No.; 12—drilling engineering and No.

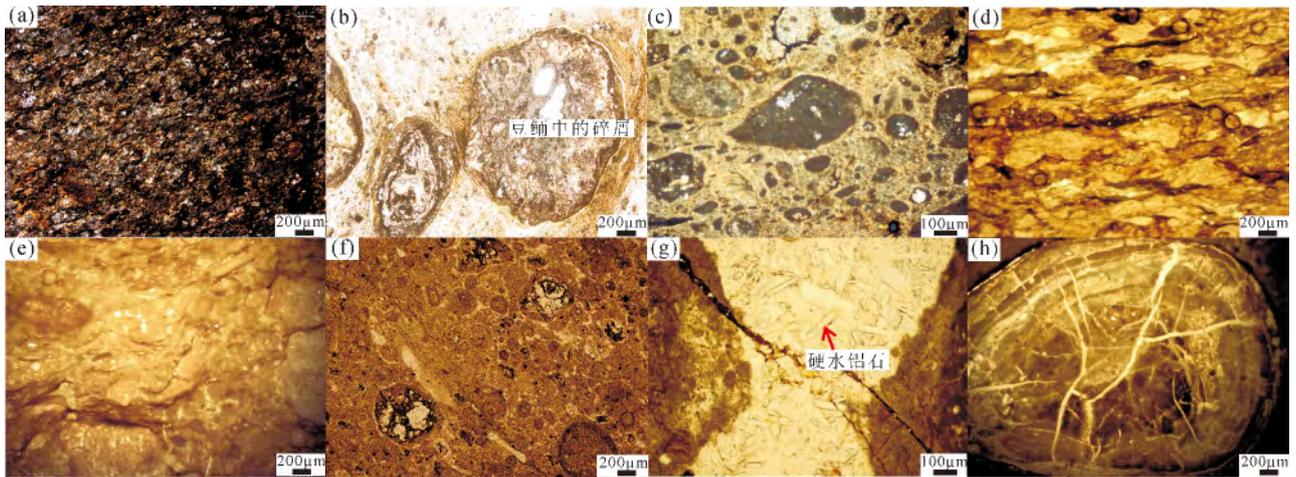


图 4 黔北铝土矿典型矿石结构、构造显微照片

Fig. 4 Typical microphotographs of bauxite ores under plane-polarized light in northern Guizhou province

- (a)—致密块状构造、泥晶—微晶结构; (b)—鲕状构造、复粒屑结构; (c)—碎屑状构造、泥晶粒屑结构; (d)—土状构造、泥晶粒屑结构; (e)—豆状构造、泥晶粒屑结构; (f)—碎屑状构造、复粒屑结构; (g)—自形、半自形—水硬铝石; (h)—单独鲕粒
- (a)—Compacting and blocky structure, texture of argillaceous and particle crystals; (b)—oolitic structure, compound grain texture; (c)—clastic structure, texture of argillaceous and grain; (d)—earthy structure, texture of argillaceous and grain; (e)—pincerlike structure, texture of argillaceous and grain; (f)—clastic structure, compound grain texture; (g)—euhedral-hypidiomorphic diaspore; (h)—the fractures within individual ooids

表 1 黔北代表性矿床中铝土矿(岩)主要化学成分的分析结果表(%)

Table 1 Contents of the major chemical components in bauxite ores/rocks (%) from the typical bauxite deposits in northern Guizhou province

样号编号	位置	样品性质	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TFe ₂ O ₃	TiO ₂	前 4 项之和	烧失量	Al/Si
wZK5-2-4	236m 处	鲕状铝土矿	57.34	18.50	4.02	2.94	82.80	14.23	3.1
wZK15-2-6	237m 处	块状铝土矿	46.83	21.48	11.93	3.30	83.54	14.24	2.2
wZK7-1-4	132m 处	碎屑状铝土矿	59.20	10.72	12.79	2.11	84.82	13.67	5.2
wZK8-2-2	379m 处	块状色铝土矿	59.46	14.81	4.56	2.84	81.67	13.72	4.0
wZK12-4-4	535m 处	块状铝土矿	52.19	27.27	1.77	2.73	83.96	14.31	1.9
xZK0-2-3	316m 处	碎屑铝土矿	61.05	15.90	3.12	2.50	82.57	13.51	3.8
xZK0-2-5	317m 处	碎屑铝土矿	74.26	3.04	3.64	3.00	83.94	14.36	24.4
xD7	Tex04	碎屑状铝土矿	75.11	4.41	1.87	2.85	84.24	14.98	17.0
xky5-1	Tex04	土状铝土矿	71.12	5.77	1.99	2.45	81.33	13.59	12.3
xky-2	Tex27	碎屑状铝土矿	66.66	11.87	1.87	2.20	82.60	13.15	5.6
yZK1-1-4	245m 处	块状铝土岩	40.61	26.83	7.67	3.24	78.35	15.40	1.5
yZK7-2-5	145m 处	碎屑铝土矿	54.45	11.36	13.82	2.81	82.44	13.74	4.8
yZK7-6-6	216m 处	碎屑铝土矿	60.81	12.95	6.88	2.42	83.06	13.91	4.7

注:样品编号中第一字母 w、x 和 y 分别代表瓦厂坪、新民和新木—晏溪矿床名称; xky2-2 和 xky5-1 由中南大学测试中心分析,其余由中科院地化所分析; 以下同。

般 < 2 μm。电子探针波谱分析表明(表 3),一水硬铝石的 Al₂O₃ 含量在 71.70%~90.61% 之间,且新民—水硬铝石的 Al₂O₃ 含量较瓦厂坪和新木—晏溪矿床高。此外,波谱分析显示,3 个矿床中一水硬铝石的 SiO₂、FeO 和 TiO₂ 含量均较低,分别为 0.08%~7.45%、0.07%~4.05% 和 0.06%~3.01%。相关性分析发现,一水硬铝石中 Al₂O₃ 含量与 SiO₂ 和 FeO 含量之间呈明显的负相关关系,暗示铝—水硬铝石的形成过程中存在明显的脱硅、去

铁作用,而其 Al₂O₃ 含量与 TiO₂ 和 Cr₂O₃ 含量间呈正相关趋势,则进一步表明成矿过程中 Al 与 Ti 和 Cr 共迁移、同富集。

3.2.1 独立铝矿物

瓦厂坪、新民和新木—晏溪铝土矿床有用独立铝矿物均为一水硬铝石和勃姆石,三水铝石少见,但一水硬铝石和勃姆石含量在不同矿床中变化很大,如新民矿石中勃姆石含量最高,而瓦厂坪和新木—晏溪矿中主要为一水硬铝石,反演出 3 个矿床之间

表2 黔北铝土矿(岩)X粉晶衍射矿物成分表(%)

Table 2 X ray diffraction analysis results of bauxite (rock) in northern Guizhou province (%)

样号	wZK5-2-4	wZK7-2-3	wZK8-2-2	wZK12-4-4	wZK5-2-6	xZK0-2-3	xZK0-2-5	xky5-1	xky2-2	yZK1-1-4	yZK7-2-5
岩性	铝土矿	铝土岩	铝土岩	铝土岩	铝土矿	铝土矿	铝土矿	铝土矿	铝土矿	铝土矿	铝土矿
硬水铝石	24.26	Y		Y	40.94	1.78	0.9	71.72	57.56	7.44	48.35
勃姆石	25.7	1.81	2.42			60.64	96	5.23	3.81	1.24	
高岭石	30.85	62.9	17.84	91.22	50.81	30.78	3.2	6.54	7.85	39.33	38.68
蒙脱石	3.88	2.71	2.91		3.25					6.2	2.44
伊利石	5.45	12.63	33.95		1.84	2.08		3.09	3.44	13.03	3.18
绿泥石	2.51		2.91			3.57		2.54	14.95	9.43	3.6
铁矿物	2.63	13.65	13.58	2.14	2.2	Y		2.39	0.86		
石英	1.25	1.5	5.82	1.53		1.78		0.15	0.1	3.72	
角闪石	1.5	1.8			0.94					4.47	1.74
长石	Y	3	16.97	2.55						7.69	
白云石	0.94		3.59					0.1	0.59		
方解石	1		Y								
叶蜡石		Y				Y	Y			7.44	2.45
三水铝石								1.05	1.03		

注:1)高岭石实为高岭石与迪开石的混合物;2)Y代表有,未参与相对百分含量计算。

表3 黔北铝土矿一水硬铝石电子探针分析结果(%)

Table 3 EPMA analysis results of diaspore form typical bauxite deposits in northern Guizhou province (%)

测点号	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	FeO	Ga ₂ O ₃	ZrO	总量	均值
wZK7-1-4-01	84.32	0.53	0.14	0.22	1.25	0.05	0.08	86.59	87.65
wZK7-1-4-02	88.95	0.51	0.52	0.10	1.42		0.08	91.58	
wZK7-1-4-03	85.46	0.35	0.12	0.19	1.16	0.01		87.29	
wZK7-1-4-04	83.41	0.42	0.13	0.23	0.92	0.02		85.13	
wZK15-2-2-01	82.87	0.32	1.98	0.04	0.65			85.86	80.95
wZK15-2-2-02	78.14	0.36	1.65	0.06	0.69	0.05	0.08	81.03	
wZK15-2-2-03	73.37	1.25	3.01	0.07	1.39		0.08	79.17	
wZK15-2-2-04	71.70	2.98	1.49	0.07	1.41	0.02	0.07	77.74	
xD7-01	90.39	0.08	0.06	0.05	0.07	0.04		90.69	90.50
xD7-02	87.36	0.51	1.74	0.10	0.40	0.01		90.12	
xD7-03	88.21	0.47	0.88	0.15	0.92	0.02	0.05	90.69	
xD7-04	86.92	0.84	0.10	0.12	0.36	0.04	0.06	88.44	
xD7-05	90.61	0.42	0.97	0.20	0.30		0.04	92.54	
yZK7-6-6-01	86.75	0.58	0.12	0.20	1.51			89.16	86.90
yZK7-6-6-02	78.93	2.81	2.11	0.25	1.90	0.03	0.03	86.06	
yZK7-6-6-03	78.33	1.63	2.62	0.16	1.81		0.12	84.67	
yZK7-6-6-04	74.33	7.45	1.60	0.24	4.05	0.04		87.71	

成矿过程的差异,即新民较瓦厂坪和新木—晏溪风化作用更彻底,成矿作用也更强烈。以往研究表明,一水硬铝石主要有原生和变质两种成因(Chen Q et al., 1995; Temur et al., 2006; Liu X et al., 2010)。研究区典型铝土矿床中铝矿独立矿物的粒度较细,多呈集合体产出,与粒度较粗的三水铝石差异较大。此外显微观察和探针背散射下均未见明显的矿物转型痕迹,推测研究区一水硬铝石属原生成因为主,与此前的认识一致(刘翼锋, 1990; 于蕾等, 2012)。此外,三水铝石变质脱水可形成一水硬铝石,但本区的成矿条件不利于三水铝石的形成(刘学飞等, 2012),导致矿石中三水铝石含量低,由其

形成大量一水硬铝石的可能性小。

3.2.2 粘土矿物

铝土矿(岩)中粘土矿物以为高岭石为主,其次有蒙脱石、伊利石和绿泥石等,粒径一般 $<2\mu\text{m}$,多为鳞片状集合体、孤岛状、残留环状与一水铝石集合体共生(图5a, 5b),少数为重结晶针状产出。鳞片状集合体产出的高岭石是铝硅酸盐经风化淋滤在古风化壳发育阶段产物,而孤岛状、残留环状粘土矿为古风化壳中晚期形成产物(盛章琪, 1989)。瓦厂坪、新民和新木—晏溪矿石中粘土矿物含量分别为55.90%~91.22%、3.20%~36.43%和50.35%~75.43%,可见新民铝土矿石粘土矿物含量较低,表

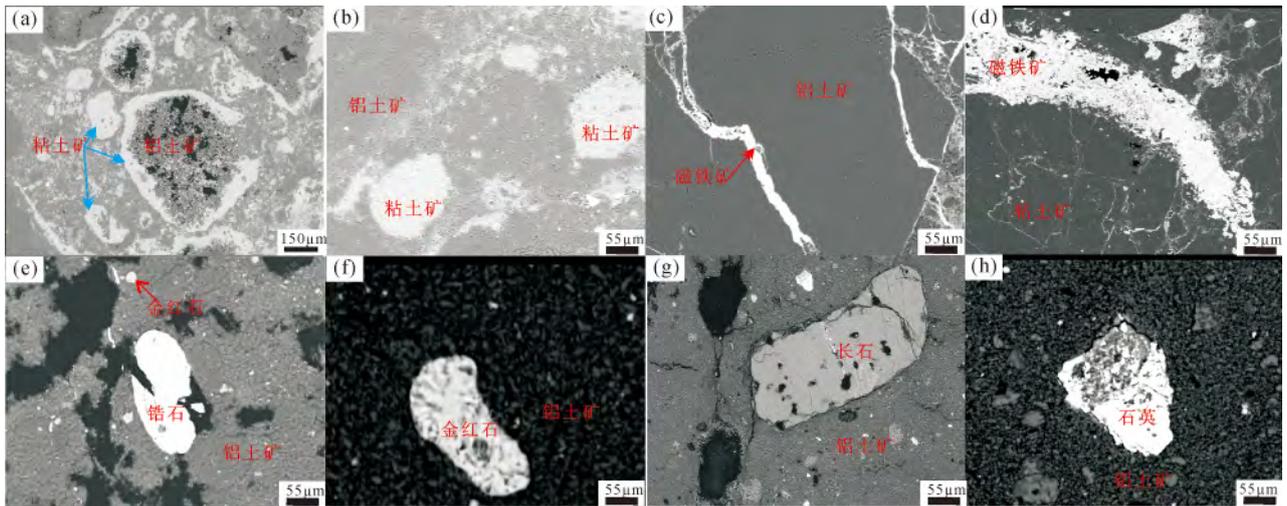


图 5 黔北铝土矿电子探针背散射图像

Fig. 5 Backscatter electron (BSE) micrographs of the ores from bauxite deposits in northern Guizhou province

明其形成时的风化作用较强,与上述铝独立矿物的认识吻合。上述表明,在适宜的环境和条件下,铝硅酸盐可通过风化、淋滤作用直接分解形成以高岭石为主的粘土矿物,粘土矿物不断脱硅、去铁、富铝,最终形成铝土矿(盛章琪, 1989)。

3.2.3 铁矿物

铝土矿石中铁矿物相对发育,主要见针铁矿、赤铁矿、黄铁矿和磁铁矿等,含量占矿物总量的 0~13.58%。黄铁矿主要呈细粒、半自形—他形晶形分

布,粒径大于 5µm,在一水硬铝石和高岭石组成的基质中多以脉状形式穿插,说明大部分黄铁矿形成晚于一水硬铝石;磁铁矿在新民 D-7 样品中最多,含量近 5%,常呈脉状和网脉状充填在铝土矿(图 5c, 5d),应是含铁陆源物质经氧化形成,说明 Fe 在铝土矿形成后的氧化条件下进行了重新分布(Calagari et al., 2007)。针铁矿主体以粒状或球粒状集合体产出,说明针铁矿形成于成矿前或成矿期。Zhou Y F 等(2006)在黔中猫场铝土矿区铝土矿层和黄铁矿

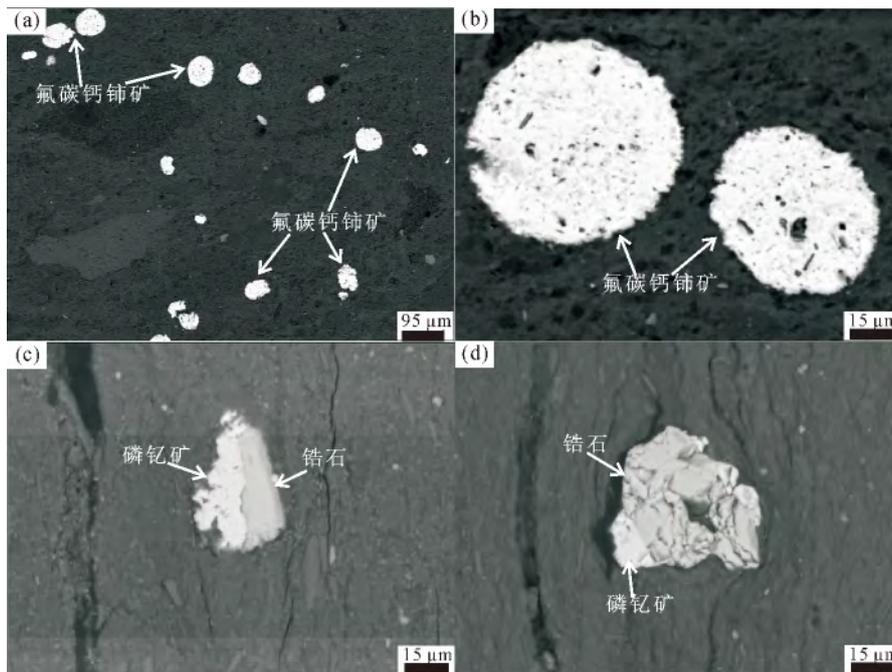


图 6 黔北瓦厂坪矿床铝土矿样品中稀土矿物的电子探针背散射图像

Fig. 6 Backscatter electron (BSE) micrographs of rare earth minerals in bauxite ores from the Wachangping deposit in northern Guizhou province

层间的过渡层中发现主要为针铁矿的微米级铁质微球粒,认为微生物可能参与了铝土矿床的形成。本文不排除这一推测,但微生物所起到的作用需要进一步研究。

3.2.4 重矿物

铝土矿石重矿物主要见金红石、锆石和锐钛矿等(图 5e, 5f),含量占矿物总量的 1%~2%。金红石多为半自形、自形粒状,粒径 2~10 μm 之间,在一水铝石和粘土矿物集合体内部及边缘均有产出,一水硬铝石集合体中见金红石呈点状分布;锆石在一水铝石集合体、粘土矿物集合体内部和边缘以及块状磁铁矿内部都有产出,粒径主要在 2~20 μm 之间,最大超过 50 μm ,大颗粒锆石有很好的磨圆度,小颗粒锆石多为半自形—自形粒状。从铝土矿中锆石粒径大小、形态、分布特征看,主要应为碎屑锆石,其面扫描结果显示, Ga、Nb、Ta、Hf 和 Th 等微量元素相对富集,推测这些元素部分以类质同像赋存在其中,部分赋存于其颗粒凹陷及裂隙中(李军敏等, 2012)。

3.2.5 其它矿物

其它矿物主要见石英和长石(图 5g, 5h),其次为白云石、方解石、角闪石和石膏等,含量占矿物总量的 0.25%~26.38%。瓦厂坪矿石中其它矿物含量较高,约 0.94%~26.38%,其次为新木—晏溪,约 1.74%~15.88%,新民含量较低,约 0~1.78%。石英分布普遍,含量一般小于 2%,形态不规则,主要分布在一水铝石和粘土矿物集合体内部及边缘,能谱分析石英中均含有少量 Al_2O_3 、 FeO 和 K_2O ,应为铝矿物形成后表生氧化条件下局部“复硅”作用形成的。长石含量变化大,主要以“捕虏晶”形式产出,颗粒具有较好磨圆度,高岭石化明显。白云石、方解石和角闪石的出现,反演出铝土矿成矿物源的多源性,可能与碳酸盐岩、中酸性岩浆岩有关,而石膏的出现反映成矿曾经历过高温干旱的河湖沉积环境。此外,在瓦厂坪含矿层底部的富稀土层中,还发现了氟碳钙铈矿 [$\text{CaCe}_{1.1}\text{La}_{0.9}(\text{CO}_3)_3\text{F}_2$] 和磷钇矿 [$\text{Y}(\text{PO})_4$] 两种独立的稀土矿物(谷静, 2013),氟碳钙铈矿呈点状分布在铝土矿中(图 6a, 6b);磷钇矿颗粒较小,多数与锆石颗粒共生(图 6c, 6d)。据研究,磷钇矿形成于 pH 值为 0.5~3.0 的酸性条件下(Hukuo et al., 1979),而氟碳钙铈矿则形成于碱性环境中(Jonannesson et al., 1995; Mongelli, 1997),这两种独立稀土矿物的出现,暗示本区铝土矿床的形成过程中,可能出现变化的酸、碱性环境。

4 讨论

4.1 粘土矿物

众所周知,任何含铝岩石在适宜的气候和保存条件下,经风化作用都可以形成铝土岩或铝土矿。研究区在中二叠世梁山期处于赤道附近低纬度的炎热湿润、植被发育的气候环境(廖士范, 1989; 陈涛等, 2005)有利于化学及生物风化作用。被风化剥蚀的含铝质母岩,其中的碱金属和碱土金属元素的大量溶出,形成碱性环境,随后植被腐烂分解大量腐殖酸,地表水逐渐演变为弱酸性、酸性介质,有较强的溶蚀作用(盛章琪, 1989; Bogatyrev et al., 2009; 赵晓东等, 2013; 高兰等, 2014),或在风化前锋带形成强烈的酸性淋溶(刘巽锋, 1990),使风化带的含铝矿物易发生水解作用,导致大部分硅质被地表水或地下水溶解成 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 而被淋失,难溶性 Al、Ti 等元素残留原地或近距离搬运,发生初步脱硅、富铝作用,并形成以高岭石为主的粘土矿物(Millot, 1970; 汤艳杰等, 2002; 洪汉烈, 2010),游离的稀土元素则主要呈离子吸附形式附着在粘土矿物颗粒表面,高含量地段形成磷钇矿等稀土矿物。由于磷钇矿易遭受风化(Kolitsch et al., 2004; Lottermoser, 1990),大多数磷钇矿在迁移搬运、沉积分异和成岩成矿以及后生改造过程中分解流失,只有少数保存下来,导致矿石中稀土矿物含量低,不易被肉眼和粉晶衍射所发现。上述粘土矿物的形成,部分反应式为: $2\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ (钾长石) + $2\text{H}_2\text{CO}_3$ + $9\text{H}_2\text{O}$ \rightarrow $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (高岭石) + 2K^+ + $4\text{H}_4\text{SiO}_4$ + 2HCO_3^- 或 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (钙长石) + $3\text{H}_2\text{O}$ + 2CO_2 \rightarrow $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (高岭石) + $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 。

4.2 铝土矿(岩)

含铝成矿母岩在酸性介质、氧化环境的风化作用,形成以高岭石、蒙脱石等粘土矿物为主的风化残积物,经地表水径流作用,迁移、搬运至低洼的河湖盆地环境沉积,在其迁移过程中由于高岭石、蒙脱石等粘土矿物较其它矿物抗酸性弱,极易继续发生水解作用,进一步脱硅、去铁、富铝。从风化残积物搬运迁移 \rightarrow 沉积分异、初始的铝土岩或铝土矿层形成 \rightarrow 再经成岩成矿阶段,沉积环境逐步由酸性、氧化 \rightarrow 弱酸性、弱氧化 \rightarrow 弱酸—弱碱性、还原条件。以往研究发现,在还原条件下,粘土矿物脱硅、富铝作用增强(图 5a, 5b)(高道德, 1996; Temur et al., 2006)。研究区铝土矿层中常见保存较完整植物化

石,团块状黄铁矿发育,矿石中常见针铁矿,底部多见还原条件下形成的鲕绿泥石,也证明沉积分异、沉积成岩成矿的环境为还原环境。形成铝矿物主要为一水硬铝石,其次为三水铝石。反应方程式: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (高岭石) + $3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (一水硬铝石) + $2\text{H}_4\text{SiO}_4$ 和 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (高岭石) + $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (三水铝石) + 2SiO_2 (胶体)

4.3 铝土矿(岩)的次生改造成矿

沉积成岩成矿形成的铝土矿(岩)在构造作用的影响下,在潜水面之上再进行次生改造作用,这是铝土矿成矿形成工业矿体的重要阶段。铝土矿(岩)次生改造是雨水、土壤水、孔隙水、裂隙水、潜水等介质在不同酸、碱性条件,氧化、还原环境中脱/复硅、脱硫、去铁、富铝作用的结果(罗声奇, 1990)。而实验研究发现,铁铝岩在 $\text{pH}=8$ 、铝土岩在 $\text{pH}=5\sim 8$ 条件下,前者脱铁、富铝作用显著,后者铁、铝分异明显(陈履安, 1991)。研究区地表或浅部,特别是断层构造发育部位,能形成地表水渗滤较好的区段,由于氧化作用强,大量黄铁矿被氧化形成酸性较强的介质水($4\text{FeS}_2 + 15\text{O}_2 + 10\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{FeO} + 8\text{H}_2\text{SO}_4$),导致铝土矿(岩)较强的脱硅、脱硫,富铝作用,同时形成部分含铁氧化物穿插于铝土矿物中(图 5c),主要形成土状、半土状,碎屑状的矿石。在矿区深部,即矿层底部,由于地下水活动性减弱以及黄龙组碳酸盐岩分布的影响, pH 条件转为碱性,稀土元素中 Ce 与其它元素发生分异(Johannesson et al., 1995; Mongelli, 1997),推测是氟碳钙铈矿形成的主要阶段。而在新民矿区深部(大于 400m),常见深色、致密状铝土矿石,且发育团块状黄铁矿,属于酸、碱性和氧化、还原变化环境中复硅作用的结果。

4.4 矿物脱硅富铝演化机理

铝土矿的形成过程十分复杂,是揭示矿床成因、成矿规律的重要依据。前已述及富铝硅酸盐在气候炎热湿润,植被发育,低纬度的酸性介质、氧化环境下,通过风化淋滤作用可直接分解转化形成粘土矿物,粘土矿物在搬运、迁移、沉积分异过程中不断脱硅、去铁、富铝,形成铝土矿(岩),即铝硅酸盐经风化淋滤→迁移搬运→沉积分异→成岩成矿的演化过程。依据含矿岩系下伏韩家店组砂页岩,含矿层中、下部铝土质粘土岩和含矿层中部致密块状、豆鲕状、碎屑状、土状—半土状矿石的 Al_2O_3 、 SiO_2 和 FeO 含量(图 7),发现从志留系中下统韩家店组砂页岩(成矿母岩)→二叠系中统梁山中下部铝土质岩、粘

土岩、绿泥石岩的过程中发生了明显的高岭土化和脱硅、去铁、富铝作用,从粘土矿→铝土矿(岩)的脱硅、去铁、富铝更加显著,并形成不同类型的铝土矿石。如风化淋滤作用强,排水条件好,搬运迁移的物源丰富,沉积环境有利,沉积分异时间长,多形成厚度大、质量好的矿体,反之则形成厚度小、质量差的矿体;在沉积分异过程中,河湖盆地边缘地带,由于处于低能动荡环境,多形成鲕粒状、豆鲕状铝土矿(岩)(刘辰生等, 2014)。成岩成矿后,由于构造运动影响,导致部分地区含矿层抬升暴露地表,遭受次生淋滤作用,或因断层形成导水性较好的水文地质淋滤系统,对含矿岩层进行不断的淋滤改造作用,而多形成质量较好的土状、碎屑状矿石;反之次生改造作用弱或未改造,多形成质量较差的致密块状矿石;鲕粒状、豆状铝土矿(岩)在次生改造过程中,由于鲕粒、豆粒同心层状构造发育,抗淋滤、次生改造作用相对较强(图 4h),因此,多形成鲕粒、豆粒密集、品位低的矿石。上述表明铝土矿床的形成,经历了成矿母岩风化剥蚀、搬运沉积及分异、成岩成矿及次生或表生改造的过程。

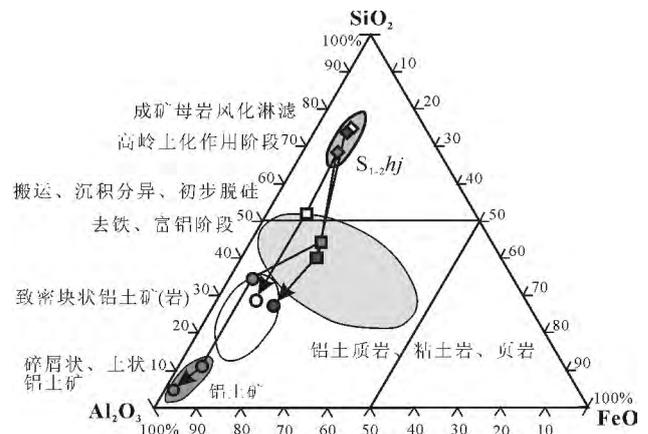


图 7 黔北瓦厂坪矿石 Al_2O_3 - SiO_2 -FeO 三角图

(底图据 Schellmann, 1982)

Fig. 7 Triangular diagram of Al_2O_3 - SiO_2 -FeO of bauxite ores from the Wachuangping deposit in northern Guizhou province (After Schellmann, 1982)

5 结论

(1) 务一正一道地区铝土矿石中铝独立矿物主要以一水硬铝石和勃姆石为主,其中一水硬铝石为原生成因,偶见三水铝石,并发育粘土矿物(如高岭石、蒙脱石、伊利石、绿泥石和叶腊石等)、铁矿物(黄铁矿、针铁矿、磁铁矿和赤铁矿等)、硅酸盐矿物(长石、石英和角闪石等)、重矿物(锐钛矿、金红石和锆

石等)、碳酸盐矿物(方解石和白云石等)及硫酸盐矿物(石膏等)等。此外,含矿层底部的富稀土层中还发现氟碳钙铈矿和磷钇矿等稀土元素独立矿物。

(2)富铝硅酸盐矿物在适宜的环境条件下,经风化、淋滤等作用可分解形成粘土矿物,并在后期的搬运、迁移和沉积分异过程中不断脱硅、去铁、富铝,形成铝矿物,即从韩家店砂页岩→粘土岩→铝土岩→铝土矿是一个由风化淋滤作用→搬运迁移→沉积分异→成岩成矿的演化过程。

致谢:成文过程中匿名评审专家和编辑部黄敏老师对论文提出了宝贵修改意见,在此表示诚挚的谢意!

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. 地质论评, 37(5): 418~428.

陈浩如, 郑荣才, 文华国, 李伟, 陈方敏, 张海杰, 王炯. 2011. 川东地区黄龙组层序—岩相古地理特征. 地质学报, 85(2): 246~255.

陈涛, 王河锦, 张祖青, 王欢. 2005. 浅谈利用黏土矿物重建古气候. 北京大学学报(自然科学版), 41(2): 309~316.

崔滔, 焦养泉, 杜远生, 汪小妹, 雷志远, 翁申富, 金中国. 2013. 黔北务正道地区铝土矿沉积特征及分布规律. 地质科技情报, 32(1): 46~51.

杜远生, 周琦, 金中国, 凌文黎, 张雄华, 喻建新, 汪小妹, 余文超, 黄兴, 崔滔, 雷志远, 翁申富, 吴波, 覃永军, 曹建州, 彭先红, 张震, 邓虎. 2013. 黔北铝土矿基础地质与成矿作用研究进展. 地质科技情报, 32(1): 1~6.

高道德. 1996. 黔中沉积型铝土矿成矿模式. 贵州地质, 13(2): 166~171.

高兰, 王登红, 熊晓云, 易承伟. 2014. 中国铝土矿成矿规律概要. 地质学报, 88(12): 2284~2295.

谷静. 2013. 黔北铝土矿地球化学特征及成因研究. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 51~126.

洪汉烈. 2010. 黏土矿物古气候意义研究的现状与展望. 地质科技情报, 29(1): 1~8.

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与预测. 北京: 科学出版社, 75~153.

金中国, 武国辉, 赵远由, 苏之良. 2009a. 贵州务川瓦厂坪铝土矿床地质特征. 矿产与地质, 23(2): 137~14.

金中国, 武国辉, 黄智龙, 鲍森, 周家喜. 2009b. 贵州务川瓦厂坪铝土矿床地球化学特征. 矿物学报, 29(4): 258~46.

金中国, 刘玲, 黄智龙, 向贤礼, 谢樵. 2012a. 贵州务正道地区风化作用与铝土矿形成机理探讨. 矿产地质, 26(2): 469~475.

金中国, 刘玲, 黄智龙, 向贤礼, 鲍森. 2012b. 贵州务正道地区铝土矿床稀土组成及其地质意义. 地质与勘探, 48(6): 1067~1076.

金中国, 向贤礼, 黄智龙, 刘玲. 2011. 黔北务川瓦厂坪铝土矿床元素迁移规律研究. 地质与勘探, 47(6): 957~966.

金中国, 周家喜, 黄智龙, 谷静, 刘玲, 代龙省. 2013a. 贵州务一正一道地区铝土矿碎屑锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地学前缘, 20(6): 226~239.

金中国, 黄志龙, 刘玲, 陈兴龙, 鲍森. 2013b. 黔北务正道地区铝土矿成矿规律研究. 北京: 地质出版社, 2013: 1~152.

李军敏, 陈莉, 徐金沙, 闫武, 吕涛, 杨波, 陈阳. 2012. 渝南大佛岩矿区铝土矿碎屑锆石中铀的赋存形式研究. 沉积学报, 31(4): 630~638.

李沛刚, 王登红, 雷志远, 翁申富, 高兰. 2012. 贵州大竹园大型铝土矿稀土元素地球化学特征及其意义. 地球科学与环境学报, 34(2): 31~40.

李沛刚, 赵芝, 刘新星, 顾文鳌, 翁申富, 雷志远. 2013. 贵州务正道铝土矿区域成矿规律及其对整装勘查的意义. 岩矿测试, 32(5): 832~839.

李沛刚, 王登红, 赵芝, 雷志远, 翁申富, 杜方应, 叶德书, 顾文鳌, 高兰, 熊星. 2014. 贵州大竹园铝土矿床地质、地球化学与成矿规律. 北京: 科学出版社, 111~186.

廖士范. 1989. 黔川湘鄂早石炭世古风化壳铝土矿床的古地理与成矿条件的研究. 地质学报, 63(2): 143~157.

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

刘平. 2007. 黔北务一正一道地区铝土矿地质概要. 地质与勘探, 43(5): 29~33.

刘辰生, 金中国, 于汪. 2014. 黔北地区铝土矿床沉积相研究. 矿物岩石, 34(3): 81~88.

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. 地质与勘探, 48(3): 449~459.

刘巽锋, 王庆生, 陈有能. 1990. 黔北铝土矿成矿地质特征及成矿规律. 贵阳: 贵州人民出版社, 12~34.

刘巽锋. 1990. 论黔北铝土矿的古喀斯特—红土型成因. 地质学报, 64(3): 238~247.

罗声奇. 1990. 沉积铝土矿床的次生改造初探. 山西地质, 5(3): 267~274.

莫光员, 金中国, 龚和强, 吴启美. 2013. 黔北道真新民铝土矿床地质特征及控矿因素探讨. 地质科技情报, 32(1): 40~45.

盛章琪. 1989. 中国红土型及古风化壳型铝土矿床中粘土矿物的演化特征. 贵州地质, 6(4): 303~312.

汤艳杰, 贾建业, 谢先德. 2002. 粘土矿物的环境意义. 地学前缘, 9(2): 337~344.

汪小妹, 焦养泉, 杜远生, 周琦, 崔滔, 计波, 雷志远, 翁申富, 金中国, 熊星. 2013. 黔北务正道地区铝土矿稀土元素地球化学特征. 地质科技情报, 32(1): 27~33.

翁申富, 赵爽. 2010. 黔北务正道铝土矿床特征及成矿模式—以务川大竹园铝土矿床为例. 贵州地质, 27(3): 185~192.

武国辉, 刘幼平, 张应文. 2006. 黔北务一正一道地区铝土矿成矿地质特征及资源潜力分析. 地质与勘探, 42(2): 39~43.

武国辉, 金中国, 鲍森, 毛佐林. 2008. 黔北务正道铝土矿成矿规律探讨. 地质与勘探, 44(6): 31~35.

殷科华. 2009. 黔北务正道铝土矿的成矿作用及成矿模式. 沉积学报, 27(3): 452~457.

于蕾, 王训练, 周洪瑞, 王玲, 崔银亮, 张道红, 邱俊挺. 2012. 滇

- 东南丘北地区大铁铝土矿工艺矿物学特征. 地质通报, 31(5): 815~823.
- 张正伟, 李玉娇, 周灵洁, 吴承泉. 2012. 黔东南铝土矿含矿岩系“煤—铝—铁”结构及地球化学特征. 地质学报, 86(7): 1119~1131.
- 赵晓东, 李军敏, 陈莉, 贾德龙, 李再会, 吕涛. 2013. 重庆银矿垭口铝土矿床地球化学特征及成矿环境研究. 沉积学报, 31(6): 1022~1030.
- 赵远由. 2013. 渝南—黔北铝土矿矿物特征及沉积环境浅析. 矿产勘查, 4(2): 202~206.
- 赵芝, 王登红, 李沛刚, 雷志远. 2013. 黔北大竹园组碎屑铝石年代学及成矿指示意义. 岩矿测试, 32(1): 166~17.
- Bogatyrev B A, Zhukov V V, Tsekhovskiy Y G. 2009. Formation conditions and regularities of the distribution of large and super large bauxite deposits. Lithology and Mineral Resources, 44(2): 135~151.
- Calagari A A, Abedini A. 2007. Geochemical investigations on Permo-Triassic bauxite horizon at Kanisheeteh, east of Bukan, West-Azarbaidjan, Iran. Journal of Geochemical Exploration, 94(1-3): 1~18.
- Chen Q, Zeng W, Chen X, Gu S, Yang G, Zhou H and Yin Z. 1995. Investigation of the thermodynamic properties of γ - Al_2O_3 . Thermochimica Acta, 253: 33~39.
- Gu J, Huang Z L, Fan H P, Jin Z G, Yan Z F, Zhang J W. 2013a. Mineralogy, geochemistry, and genesis of lateritic bauxite deposits in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou province, China. Journal of Geochemical Exploration, 130: 44~59.
- Gu J, Huang Z L, Fan H P, Ye L, Jin Z G. 2013b. Provenance of lateritic bauxite deposits in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou province, China: LA-ICP-MS and SIMS U-Pb dating of detrital zircons. Journal of Asian Earth Sciences, 70-71: 265~282.
- Hukuo K, Hikichi Y. 1979. Syntheses of rare earth orthophosphates ($RPO_4 \cdot nH_2O$, $R=La-Yb$, $n=0-2$). Bulletin of Nagoya Institute of Technology, 31: 175~182.
- Johannesson K H, Stetzenbach K J, Hodge V F. 1995. Speciation of the rare earth element neodymium in groundwaters of the Nevada Test Site and Yucca Mountain and implications for actinide solubility. Applied Geochemistry, 10(5): 565~572.
- Kolitsch U, Holtstam D. 2004. Crystal chemistry of REEXO₄ compounds (X = P, As, V). II. Review of REEXO₄ compounds and their stability fields. European Journal of Mineralogy, 16(1): 117~126.
- Liu X, Wang Q, Deng J, Sun S, Meng J. 2010. Mineralogical and geochemical investigations of the Dajia Salento-type bauxite deposits, western Guangxi, China. Journal of Geochemical Exploration, 105(3): 137~152.
- Lottermoser B G. 1990. Rare-earth element mineralisation within the Mt. Weld carbonatite laterite, Western Australia. Lithos, 24(2): 151~167.
- Millot G. 1970. Geology of clays: Weathering, sedimentology, geochemistry. New York: Springer-Verlag, 1~429.
- Mongelli G. 1997. Ce-anomalies in the textural components of Upper Cretaceous karst bauxites from the Apulian carbonate platform (southern Italy). Chemical Geology, 14(140): 69~79.
- Schellmann W. 1982. Eine neue lateritdefinition. Geologisches Jahrbuch, Reihe, D(58): 31~47.
- Temur S, Kansun G. 2006. Geology and petrography of the Masatdagi diasporic bauxites, Alanya, Antalya, Turkey. Journal of Asian Earth Sciences, 27(4): 512~522.
- Zhou Y F, Wang R C, Lu J J, Li Y L. 2006. Ferruginous Micro spherules in Bauxite at Maochang, Guizhou Province, China: Products of Microbe-Pyrite Interaction? Acta Geological Sinica, 80(4): 604~609.

Mineralogic Characteristics of the Bauxite Deposit in the Wuchuan-Zheng'an- Daozhen Area, Northern Guizhou Province, China

JIN Zhongguo¹⁾, ZHOU Jiayi²⁾, HUANG Zhilong²⁾, XIE Xi¹⁾, GU Jing²⁾, LIU Ling¹⁾,
XIANG Xianli^{1, 4)}, ZOU Lin³⁾, HAN Ying³⁾, DAI Longsheng⁵⁾, GUO Song⁵⁾

- 1) *Guizhou Nonferrous Metal and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau, Guiyang, 550005;*
2) *State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy Sciences, Guiyang, 550002;* 3) *China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing, 100012;*
4) *Guizhou College of Science and Technology, Guiyang, 550003;* 5) *Faculty of Land Resource and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan, 650093*

Abstract

The Wuchuan-Zhen'an-Daozhen Al metallogenic district, northern Guizhou province, located in southern Chongqing-central Guizhou bauxite metallogenic belt, is one of the major bauxite regions in Guizhou province. The bauxite-bearing rock series is the Middle Permian Liangshan Formation and the ore genesis of the bauxite belongs to paleo-weathering crust sedimentary type. The results of the chemical compositions analysis show that the Al_2O_3 contents and Al/Si ratios of the earthy, clastic bauxite is higher than those of the oolitic, dense massive bauxite. Based on the microscopic observation, powder diffraction and electron microprobe analysis, the major minerals of bauxite ores are the diaspore, boehmite, and clay minerals, of which the diaspore is aggregated distribution and shows a short column, subhedral-euhedral crystal form, the clay mineral is mainly kaolinite and shows present island and residual cyclic occurrences, the other clay minerals include illite, montmorillonite and chlorite. Other minerals consist of pyrite minerals, magnetite, feldspar, quartz, rutile, zircon, anatase, calcite and dolomite. The main minerals in bauxite rocks are clay minerals, which are mainly kaolinite, and other minerals are similar with the bauxite. The content of Al_2O_3 , SiO_2 , TiFe_2O_3 and TiO_2 in bauxite ores is higher than 83% and the content of the loss on ignition is less than 14%, while the content of Al_2O_3 , SiO_2 , TiFe_2O_3 and TiO_2 in bauxite rocks less than 80% and the content of loss on ignition greater than 15%. This indicates that the bauxite ores is significantly different from bauxite rocks. Combined with previous studies, this paper suggests the formation process of bauxite ores is that under the suitable climatic conditions, the sandshale of the Lower-Middle Silurian Hanjiadian Formation (the ore-forming mother rocks) was weathering and leaching, then formed weathering residues and clay minerals (mainly kaolinite) which enriched in Al, Ti and other inert elements. After migrating to lakes basin environment, the clay minerals continually lost silicon and iron, enriched in aluminum and formed bauxite rocks. Finally, under the processes of deep buried compaction, diagenesis and mineralization, these clay minerals further lost silicon and iron, enriched in aluminum, the industrial bauxite ores formed in the Middle Permian.

Key words: bauxite; mineralogic characteristics; sedimentary differentiation; formation mechanism; Wuchuan-Zheng'an-Daozhen Al metallogenic district; Northern Guizhou province