

金中国, 周家喜, 黄智龙, 等. 黔北务一正一道地区典型铝土矿床伴生有益元素锂、镓和钽分布规律[J]. 中国地质, 2015, 42(6): 1910–1918.
Jin Zhongguo, Zhou Jiayi, Huang Zhilong, et al. The distribution of associated elements Li, Sc and Ga in the typical bauxite deposits over the Wuchuan–Zheng’an–Daozhen bauxite ore district, northern Guizhou Province[J]. *Geology in China*, 2015, 42(6): 1910–1918(in Chinese with English abstract).

黔北务一正一道地区典型铝土矿床伴生有益元素 锂、镓和钽分布规律

金中国¹ 周家喜² 黄智龙² 代龙省³ 谢 樨¹ 彭 松³ 谷 静²

(1. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局, 贵州 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, 贵州 贵阳 550002; 3. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要: Li、Ga 和 Sc 是重要的“三稀”矿产资源, 在铝土矿中广泛分布。贵州北部务一正一道铝土矿矿集区现已探明 10 个大型矿床, 其中伴生的 Li、Ga 和 Sc 金属资源量巨大。文章以务川瓦厂坪、道真新民和正安新木—晏溪 3 个大型铝土矿床为研究对象, 通过对含矿岩系及其上覆和下伏岩石中 Li、Ga 和 Sc 分布规律的系统研究, 发现含矿岩系垂向上, Li、Ga 和 Sc 含量表现为矿层中部最高, 下部次之, 上部最低; 矿石类型上, Li 在鲕状、致密块状矿石中的含量高于碎屑状矿石, 土状矿石中 Li 的含量最低, Ga 在土状和鲕状、致密块状矿石中更富集, 而 Sc 则在碎屑状矿石中相对富集; 区域上 Li、Ga 和 Sc 含量总体呈北高南低的态势, 暗示这些有益伴生元素的空间分布可能与源岩岩性、风化作用和沉积分异等有关。由于 Li、Ga 和 Sc 与 Al、Ti 等元素常呈类质同象置换或以离子吸附态形式赋存于金红石、锆石、磷钇矿等矿物的表面, 重视这些重矿物的选矿, 对综合利用 Li、Ga 和 Sc 等伴生有益元素具有重要意义。此外, 通过 Li、Sc 和 Ga 分布特征和富集规律的研究, 进一步佐证了务一正一道地区铝土矿形成于陆相河湖盆地环境。

关键词: “三稀”资源; Li、Sc 和 Ga; 富集规律; 综合利用; 沉积环境; 务一正一道铝土矿矿集区

中图分类号: P618.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-3657(2015)06-1910-09

The distribution of associated elements Li, Sc and Ga in the typical bauxite deposits over the Wuchuan–Zheng’an–Daozhen bauxite ore district, northern Guizhou Province

JIN Zhong-guo¹, ZHOU Jia-xi², HUANG Zhi-long²,
DAI Long-sheng³, XIE Xi¹, PENG Song³, GU Jing²

(1. Guizhou Nonferrous Metal and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau, Guiyang 550005, Guizhou, China; 2. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China; 3. School of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China)

Abstract: Li, Ga and Sc are important rare noble metal resources, which are widely distributed in the bauxite. More than ten large-

收稿日期: 2014-10-21; 改回日期: 2015-01-20

基金项目: 贵州省公益性、基础性研究项目([2007]-172)和国家“十二五”科技支撑项目(2011BAB04B04)联合资助。

通讯作者: 金中国, 男, 1965 生, 研究员, 博士, 长期从事地质找矿与研究工作; E-mail: gzkjygz@sina.com。

sized bauxite deposits have been found in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen bauxite ore district in northern Guizhou Province, and the associated Li, Ga and Sc resources are very abundant. The authors chose the typical Wachangping, Xinmin and Xinmu-Yanxi bauxite deposits in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area as the study case, investigated the distribution regularity of Li, Ga and Sc by analyzing their content in ore-bearing rocks and their overlying and underlying rocks. The results show that the values of Li, Ga and Sc decrease from the central ore-bearing rock series to the bottom and then to the upper part vertically. In addition, the values of Li in massive ores are higher than those in clastic ores, and they are all higher than values in earthy ores; Ga is concentrated in earthy and massive ores, whereas Sc is concentrated in clastic ores. Additionally, the regional distribution of Ga, Li and Sc is higher in the north and lower in the south, suggesting their relationship with lithology, weathering and sedimentary differentiation. Ga, Li and Sc mainly exist on the surface of rutile, zircon and xenotime. Hence these heavy minerals are very important for comprehensive utilization of Li, Ga and Sc. The distribution regularities of Li, Sc and Ga suggest that the bauxite was formed in a continental lacustrine basin environment.

Key words: rare noble resource; Li, Sc and Ga; enrichment regularity; integrated utilization; depositional environment; Wuchuan-Zheng'an-Daozhen bauxite ore district

About the first author: JIN Zhong-guo, male, born in 1965, senior researcher, doctor, long engages in the study of geology and mineral resources exploration; E-mail: gzkyjzg@sina.com.

1 引言

自2010年国土资源部实施贵州北部务川—正安一道真(务一正一道)铝土矿集区整装勘查以来,务一正一道铝土矿集区找矿取得重大突破,累计探明 Al_2O_3 资源储量超过7亿t,成为中国重要的铝土矿产地^[1]。铝土矿石中伴生的还有镓(Ga)资源储量超过4万t,氧化锂(Li_2O)资源储量大于182万t和钽(Sc)资源储量约1万t^①。Li、Sc和Ga是国家鼓励综合评价、综合开发利用的“三稀”矿产资源^[2-3]。务一正一道地区查明有益伴生元素的资源多,综合利用潜力大,潜在经济价值高,显示铝土矿是重要的稀散(贵)金属载体^[4-5]。前人对铝土矿中Ga的分布规律进行了较多的研究^[6-12],对铝土矿中Sc的地球化学研究也取得了一些新进展^[13-20],但对其中Li的研究程度相对较低^[2,20]。同时铝土矿中“三稀”矿产资源总体综合利用的质量不高,高附加值产品少,采选回收率低^[7,21-23]。尽管务一正一道铝土矿集区的矿床地质和地球化学特征、沉积环境、成矿规律及成矿预测研究取得了丰硕的成果^[24-38],然而对铝土矿中伴生“三稀”(如Li、Sc和Ga等)资源的研究还很薄弱^[2,6-7,10,37],特别是系统的分布特征和富集规律研究缺乏^[2,21]。本文以务一正一道铝土矿集区内

具代表性的3个大型铝土矿床(务川瓦厂坪、道真新民和正安新木—晏溪)为例,系统研究含矿岩系及其上覆、下伏地层岩石中Li、Sc和Ga的分布规律,并探讨其亏损或富集的地质意义,为中、低品位铝土矿资源开发、伴生有益元素综合评价与利用及理解铝土矿巨量聚集机制提供更为丰富的信息。

2 地质概况

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—渝南铝土矿带的重要组成部分^[1]。区域出露寒武系至侏罗系盖层岩石,其中,中—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,中二叠统梁山组是重要的铝土矿含矿岩系。沉积相及层序地层特征显示,本区铝土矿形成于陆相河湖盆地环境,其含矿岩系各岩性段为连续沉积^[1,37]。区内主体构造格架呈NNE向展布,断裂构造以逆冲断层为主,多形成于背斜轴部和向斜两翼,褶皱构造常以复式背、向斜形式出现,背斜多呈宽缓状,而向斜多为紧密状。目前,本区已发现铝土矿床(点)20余处,具有代表性有瓦厂坪、新民、新木—晏溪和大竹园等^[25,30,37]。本文选择瓦厂坪、新民和新木—晏溪3个大型矿床(图1)为研究对象,其地质剖面如图2所示,详细的矿床地质特

①贵州省地质矿产勘查开发局,贵州省有色金属和核工业地质勘查局. 贵州省务正道地区铝土矿整装勘查报告(内部资料). 2013.

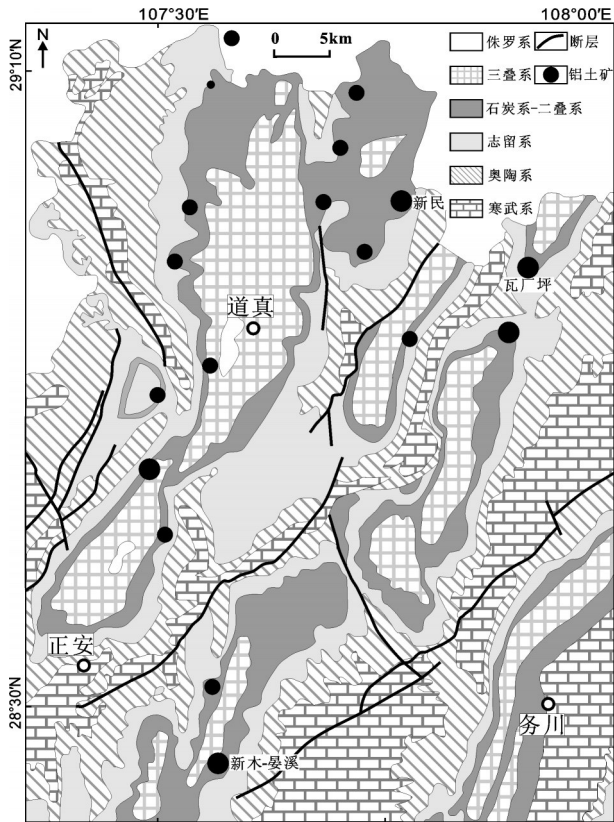


图1 务—正—道铝土矿集区地质略图(据文献[1]略修改)
Fig.1 Sketch geological map of the Wu-Zheng-Dao bauxite ore concentration area, Guizhou Province (modified after reference [1])

征,参阅相关文献^[24-27]。

3 样品及分析方法

样品采自瓦厂坪、新民和新木—晏溪3个矿床梁山组含矿岩系的顶部、中部(铝土矿层)、底部及其上覆和下伏地层,部分样品采样位置如图2所示,岩性特征详见表1。Li、Ga和Sc元素含量的分析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等离子体质谱(ICP-MS)上完成,分析方法和流程同文献[39]所报道,分析精度优于5%。

4 结果与讨论

4.1 Li、Sc和Ga的分布特征

分析结果列于表1,统计显示含矿岩系顶部炭质页岩中Li含量 $5.16 \times 10^{-6} \sim 24.17 \times 10^{-6}$ (平均 10.50×10^{-6})、Sc含量 $2.34 \times 10^{-6} \sim 4.52 \times 10^{-6}$ (平均 2.86×10^{-6})和

Ga含量 $2.32 \times 10^{-6} \sim 5.59 \times 10^{-6}$ (平均 3.80×10^{-6})。铝土矿石(铝土岩)中Li含量 $5.17 \times 10^{-6} \sim 2725.03 \times 10^{-6}$ (平均 725×10^{-6})、Sc含量 $14.3 \times 10^{-6} \sim 48.4 \times 10^{-6}$ (平均 25.1×10^{-6})、Ga含量 $25.1 \times 10^{-6} \sim 131 \times 10^{-6}$ (平均 85.6×10^{-6})。含矿岩系底部铝土质黏土岩、绿泥石岩中Li含量 $23.12 \times 10^{-6} \sim 910.88 \times 10^{-6}$,平均 428.69×10^{-6} ,Sc含量 $1.36 \times 10^{-6} \sim 45.11 \times 10^{-6}$,平均 23.48×10^{-6} ,Ga含量 $0.12 \times 10^{-6} \sim 77.20 \times 10^{-6}$,平均 36.16×10^{-6} 。上覆栖霞组泥灰岩中Li、Sc和Ga含量分别为 $2.45 \times 10^{-6} \sim 18.55 \times 10^{-6}$ 、 $1.55 \times 10^{-6} \sim 2.00 \times 10^{-6}$ 和 $0.17 \times 10^{-6} \sim 5.28 \times 10^{-6}$ 。下伏黄龙组灰岩中Li、Sc和Ga平均含量分别为 6.93×10^{-6} 、 2.47×10^{-6} 和 0.94×10^{-6} 。下伏韩家店组泥岩、页岩中Li、Sc和Ga平均含量分别为 32.5×10^{-6} 、 14.4×10^{-6} 和 20.0×10^{-6} 。

根据上述分析结果,不难发现含矿岩系垂向上,Li、Sc和Ga在含矿岩系的中部和下部富集明显(图3)。岩石类型上,Li、Sc和Ga表现出亲铝土矿石和黏土岩,而疏泥页岩和灰岩的特征,即铝土矿石中三者平均含量最高,铝土岩、铝土质黏土岩次之,绿泥石岩、炭质页岩和灰岩最低。矿石类型上,Li在鲕状、致密块状矿石中的平均含量高于碎屑状矿石,土状矿石Li平均含量最低;Sc在碎屑状矿石中的平均含量高于土状矿石,鲕状、致密块状矿石中Sc的平均含量最低;Ga在土状和鲕状、致密块状矿石中的平均含量相近,但均高于碎屑状矿石。

最近有学者对黔北大竹园铝土矿中Li、Sc和Ga含量和分布特征等进行了研究^[37],显示致密状铝土矿含Li₂O最高(达0.582%),但Li并不随Al的富集而富集;Sc含量的最大值虽然出现在铝土矿石中,但黏土岩中Sc的平均值反而高于铝土矿石;Ga虽主要富集在铝土矿石中,却更偏爱致密状铝土矿石。渝南申基坪铝土矿Sc分布规律研究显示,其主要分布在含矿层位的中下部,主要富集岩石类型为黏土岩和铝土岩^[38]。渝南吴家湾矿床Sc主要分布在含矿岩系底部的普通黏土岩和高岭石黏土岩中^[13]。可见,渝南铝土矿床中Sc和Ga的分布特征和富集规律与黔北铝土矿床大同小异。叶霖等^[9]对修文小山坝铝土矿床中镓等伴生元素分布规律研究,也得到基本相似的认识。

综上,学者对这种分布特征和富集规律解释为与研究区铝土矿成矿母岩主要为下伏志留系韩家

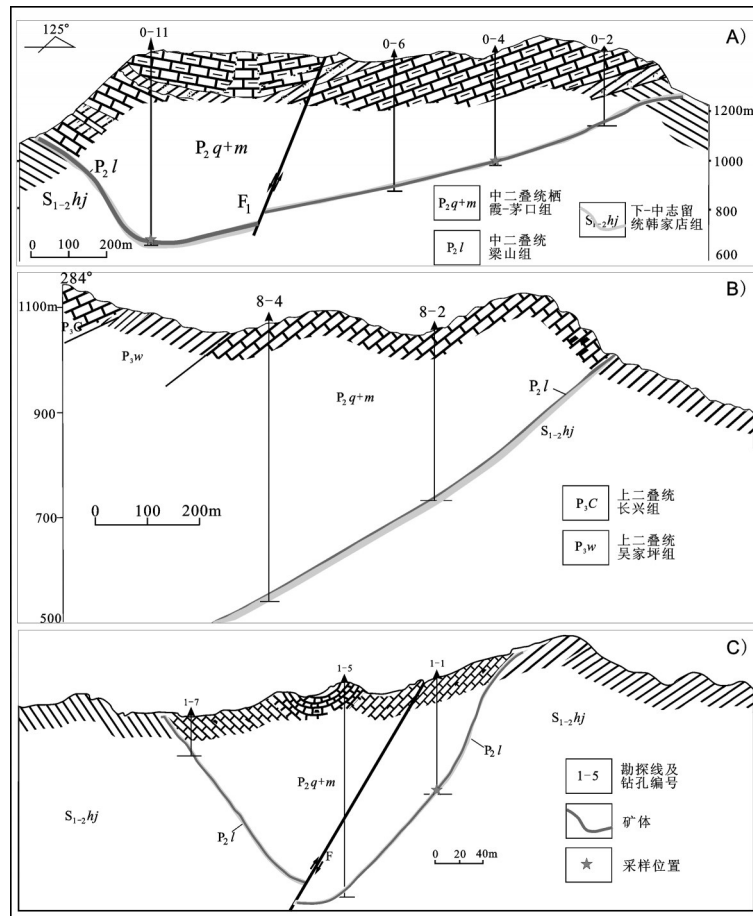


图2 瓦厂坪0号线(A), 新民8号线(B)和新木—晏溪1号线(C) 勘探线剖面略图(采样位置)

Fig.2 Geological sections (sampling locations) along the Wachangping No. 0 exploration line (A), Xinmin No. 8 exploration line (B) and Xinmu-Yanxi No. 1 exploration line (C)

店组富铝页岩密切相关^[11, 24, 28, 34-38]。由于富铝页岩在遭受风化剥蚀产生的残积物中易形成大量粘土矿物, 一些元素(如稀土、Li、Sc和Ga等)易被粘土矿物所吸附^[1, 9, 37, 40], 并在搬运、迁移和沉积成岩成矿过程中与Al共迁移、同富集。成岩成矿后, 由于地壳抬升, 矿层在表生风化、氧化作用下, 部分Li、Sc等相对活泼元素从粘土矿物晶格中析出流失, 由于矿石发生脱硅、去铁、富铝作用, 形成质量较好的土状、半土状铝土矿石, 使其Li、Sc含量相对鲕状、致密块状矿石偏低。综合本文结果和大竹园、渝南铝土矿床等研究成果, 发现区域上, Li、Ga和Sc含量总体呈北高南低的态势。刘平和廖友常^[41-42]报道道真及务川北部一带的铝土矿中Li含量很多都在 1000×10^{-6} 以上以及高铁铝土矿与高铁铝土矿的分带性, 支持上述北高南低的趋势。本文认为这可能与古地理特征有关, 即铝土矿形成时的古地貌为东、南和西

三面环山, 地势南高北低, 而北部位于沉积盆地中心, 物源丰富, 沉积分异好, 细粒的黏土矿物表面积大, 更易吸附Li、Ga和Sc。因此, 预测北部(道真及务川北部和渝南地区)铝土矿床中伴生稀贵金属含量更高, 资源量更大, 潜在经济价值更高。

4.2 Li、Sc和Ga赋存状态

Li^{3+} (0.68 Å)、 Sc^{3+} (0.73 Å)和 Ga^{3+} (0.62 Å)与 Al^{3+} (0.51 Å)、 Fe^{3+} (0.64 Å)、 Mg^{2+} (0.66 Å)和 Ti^{4+} (0.68 Å)等元素的离子半径相近, 在硅酸盐矿物中常以类质同象形式存在^[4]。在沉积型铝土矿床中, Ga还可能以吸附态的形式存在^[4]。Ga在表生条件下与Al的地球化学行为相似^[4], 表生风化解离出的Ga即会随Al同转移到含铝及含铁、铝的含氧盐与氧化物组分中, 使Ga避免流失而沉积于黏土层和泥质层中。沉积成岩期Ga会从含铝物质中经脱水重结晶, 以类质同象替代Al的形式赋存于高岭石、勃姆铝石中, 表

表1 瓦厂坪、新民和新木—晏溪矿床Li、Sc和Ga含量
Table 1 Li, Sc and Ga values in the Wachangping, Xinmin and Xinmu—Yanxi bauxite deposits

层位	样品特征			Al ₂ O ₃ /%	SiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /SiO ₂	Li /10 ⁻⁶	Sc /10 ⁻⁶	Ga /10 ⁻⁶	
	工程编号*	取样位置/m	岩性							
栖霞组(P ₂ q)	wZK0-1	163	灰黑色薄层泥灰岩	0.25	1.98	0.13	5.10	1.61	0.19	
	wZK0-11	756	灰色厚层细晶灰岩	0.23	1.38	0.17	11.51	1.99	5.28	
	wZK7-4	422.5	灰黑色薄层泥灰岩	0.21	7.60	0.03	16.52	1.55	0.33	
	wZK15-1	154.2	灰黑色薄层泥灰岩	0.31	3.24	0.09	2.87	1.81	0.17	
	wZK8-2	375	灰黑色薄层泥灰岩	0.30	3.28	0.09	8.00	2.00	1.78	
	yZK7-6	213	灰黑色薄层泥灰岩	0.66	16.55	0.04	2.45	1.59	0.70	
	yZK1-1	233.8	灰黑色薄层泥灰岩	0.33	2.33	0.14	18.55	1.59	0.30	
	均值			0.33	5.19	0.06	9.29	1.73	1.25	
	矿层顶部	wZK15-2	210	灰黑色薄层炭质页岩	2.80	60.07	0.05	24.17	2.34	2.32
		wZK7-2	171	灰黑色薄层炭质页岩	1.71	3.22	0.53	5.16	2.50	4.94
yZk7-6		214	灰黑色薄层炭质页岩	7.86	49.76	0.16	7.13	4.52	5.59	
yZK1-1		238	灰黑色薄层炭质页岩	1.81	40.29	0.04	5.52	2.08	2.34	
均值				3.55	38.34	0.09	10.50	2.86	3.80	
铝土矿层	wZK0-1	171.6	灰色致密块状铝土矿	40.00	21.82	1.83	12.64	14.33	56.11	
	wZK0-4	431.3	灰白色致密状铝土矿	48.56	30.86	1.47	1124.84	15.54	62.90	
	wZK5-2	234	浅灰色鲕状铝土矿	49.82	27.04	1.84	1271.02	18.16	84.17	
	wZK7-4	428.6	灰绿色鲕状铝土矿	47.41	27.07	1.75	1785.04	25.12	126.92	
	wZK7-4	429	深灰色致密状铝土矿	53.34	22.57	2.36	1152.60	23.91	69.81	
	wZK0-11	764.7	深灰色致密状铝土矿	48.17	23.10	2.08	1108.30	29.77	101.51	
	wZK15-1	170	灰白色致密状铝土矿	47.82	30.75	1.55	2725.03	15.85	116.91	
	wZK12-4	534	灰白色致密状铝土矿	53.63	24.86	2.15	2004.65	16.88	109.06	
	wZK12-4	532	褐色含黄铁矿鲕状铝土矿	35.40	40.42	0.88	641.44	23.81	41.58	
	均值			47.13	27.61	1.77	1313.95	20.37	85.44	
	wZK7-1	131.6	深灰色碎屑状铝土矿	59.20	10.72	5.52	302.38	47.42	85.39	
	xZK0-2	316.55	深灰色碎屑状铝土矿	72.48	7.33	9.88	723.69	22.57	25.12	
	xTC22	D7(矿层中部)	灰白色碎屑状铝土矿	75.11	4.41	17.03	5.27	40.04	68.51	
	yZK7-6	316.55	灰色碎屑状铝土矿	60.81	12.95	4.70	128.39	20.96	95.00	
	yZK7-2	142	灰色碎屑状铝土矿	44.75	21.42	2.09	197.94	20.39	79.52	
	均值			62.47	11.37	7.84	271.53	30.28	70.71	
	wZK7-2	173.44	灰白色土状铝土矿	70.23	6.69	10.49	9.17	48.40	131.34	
	wZK7-4	429.5	灰白色土状铝土矿	65.68	10.79	6.09	480.55	33.04	76.77	
	wZK15-2	213.5	灰白色土状铝土矿	58.32	20.92	2.78	36.16	21.13	65.71	
	wZK17-1	213.5	灰白色土状铝土矿	72.72	6.64	10.95	7.14	20.91	110.51	
xTC22	D2(矿层中部)	灰白色土状铝土矿	66.52	9.41	7.06	62.65	18.60	119.74		
均值			66.69	10.89	7.47	119.13	28.42	100.81		
矿层均值			56.31	18.94	4.87	725.21	25.09	85.61		
矿层底部	wZK7-4	431	灰绿色铝土质黏土岩	38.39	43.44	0.88	910.88	45.11	47.40	
	wZK0-4	433.6	灰绿色铝土质泥岩	35.25	42.66	0.83	342.48	40.52	30.17	
	wZK5-2	242.46	灰色铝土质泥岩	37.16	35.49	1.05	544.02	35.15	37.95	
	wZK15-2	215 m	浅灰色铝土质泥岩	31.77	37.39	0.85	281.59	31.75	36.07	
	xTC22	D6(矿层下部)	灰色铝土质泥岩	49.65	29.06	1.71	640.95	18.36	77.20	
	xTC22	D9(矿层下部)	灰色铝土质黏土岩	45.31	36.29	1.25	803.61	21.21	43.96	
	yZK1-1	246.5	灰绿色铝土质黏土岩	29.56	13.42	2.20	83.33	7.24	55.95	
	均值			38.16	33.96	1.25	515.27	28.48	46.96	
	wZK0-11	771	灰绿色含铁绿泥石岩	30.82	42.88	0.72	23.12	1.36	0.12	
	wZK8-2	380	灰绿色含铁绿泥石岩	36.39	40.06	0.91	677.84	34.65	25.12	
	wZK12-4	538.7	灰绿色含铁绿泥石岩	25.03	24.79	1.01	225.55	13.38	32.20	
	xZK0-2	319	灰白色含铁绿泥石岩	34.47	47.37	0.73	587.36	21.65	36.02	
	yZK7-6	224.8	灰绿色含铁绿泥石岩	8.90	44.77	0.20	23.54	11.42	11.83	
	均值			27.12	39.97	0.71	307.48	16.49	21.06	
黄龙组(C ₂ h)	wZK0-11	773.5	灰色中厚层粗晶灰岩	0.23	0.78	0.29		2.23	0.08	
	wZK0-4	437	灰色中厚层粗晶灰岩	0.12	0.65	0.18	0.59	1.35	0.62	
	wZK8-2	383.8	灰色中厚层粗晶灰岩	0.34	4.87	0.07	5.51	7.99	1.21	
	wZK12-4	539	灰色中厚层粗晶灰岩	1.88	2.7	0.70	19.38	2.11	3.35	
	wZK15-1	174.6	灰色中厚层粗晶灰岩	0.12	0.27	0.44		2.36	0.15	
	xTC22	D4(下伏地层)	灰色中厚层粗晶灰岩	0.61	1.37	0.44	2.25	2.30	0.94	
	yZK7-2	152	灰色中厚层粗晶灰岩	0.10	0.24	0.42		2.46	0.23	
均值			0.49	1.55	0.36	6.93	2.97	0.94		
韩家店组(S ₁₋₂ hf)	wZK0-1	184.7	紫红色薄层页岩	15.34	65.75	0.23	23.27	12.45	19.97	
	wZK0-11	775	紫红色薄层页岩	14.14	66.16	0.21	19.65	12.54	19.60	
	wZK7-1	144.8	紫红色薄层页岩	19.26	58.58	0.33	26.07	14.38	22.00	
	wZK7-4	437.27	褐色薄层页岩	19.89	59.02	0.33	38.59	14.41	21.55	
	wZK8-2	387.41	紫红色薄层页岩	17.02	62.86	0.27	36.75	11.84	18.17	
	xTC22	D11(东部)	灰绿色薄层页岩、泥岩	19.07	59.31	0.32	46.83	17.54	25.68	
	yZK7-2	155.5	灰绿色薄层页岩	16.31	61.98	0.26	41.41	15.36	22.45	
	yZK7-2	159	紫红色薄层页岩	15.16	63.42	0.24	28.17	14.98	21.49	
	yM1	晏溪公路旁	紫红色薄层页岩	16.49	60.73	0.27	31.79	15.76	22.74	
	均值			16.96	61.98	0.27	32.50	14.36	19.97	
	地壳克拉克值(据文献[4])						25	22	15	

注: *wZK0-1—瓦厂坪0号勘探线1号钻孔; xTC22—新民22号探槽; yZK7-2—新木—晏溪7号勘探线2号钻孔。

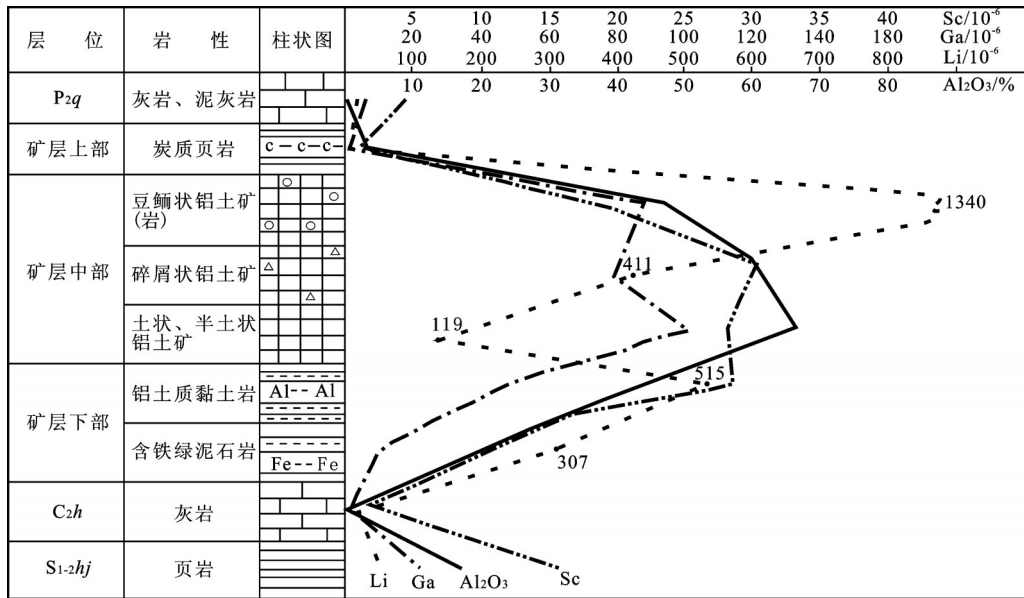


图3 Li、Ga和Sc在含矿岩系及上覆、下伏地层中的含量变化图
Fig.3 Variations of Li, Ga and Sc values in ore-bearing rock and its overlying and underlying rocks

现出在粘土矿、铝土矿层形成过程中, Ga和Al同步增加^[4, 42]。矿物学研究表明, 黔北铝土矿中广泛发育碎屑锆石、金红石、磷钇矿等, 这些矿物与稀贵金属密切相关^[1, 10, 24-27]。同时, 铝土矿中还有独立Ga矿物(Ga₂O₃)的报道^[9-10]。大量的研究表明, REE、Li、Sc和Ga等元素主要呈分散状态赋存于一水硬铝石、高岭石等粘土矿物中^[43-46], 但没有证据显示它们呈“离子”状态被吸附^[37, 40]。相关分析显示, 铝土矿石中Li、Sc和Ga等元素的含量与Zr元素含量具有明显的正相关关系^[1, 10], 电子探针面扫描显示Sc主要分布于碎屑锆石的表面, 且分布十分不均匀^[18-19]。最近大竹园铝土矿床Sc的研究, 认为其可能主要赋存于含铁矿物中, 并在铝土矿的形成过程中随着铁矿物的分解而流失掉^[37]。综上, 目前还没有足够的证据来揭示铝土矿中Li、Sc和Ga全面的赋存形式, 但已有的资料表明包括瓦厂坪、新民和新木—晏溪铝土矿在内的铝土矿床中Li、Sc和Ga主要以类质同象或吸附态形式赋存于重矿物(如锆石、金红石、磷钇矿等)的表面, 独立矿物是极少量的。鉴于此, 加强重矿物的回收, 对Li、Sc和Ga的综合利用具有重要意义, 但如何高效清洁利用这些宝贵Li、Sc和Ga资源, 尚需更多的研究。

4.3 地质意义

在热带气候条件下, 化学风化与淋滤作用强

烈, 常形成大量的高岭石、蒙脱石等粘土矿物^[47-48]。黔北铝土矿床发育大量粘土矿物, 且主要为高岭石^[1]和少量的蒙脱石、伊利石。铝土矿层中还含有大量植物化石和土状铝土矿^[1, 37], 并存在稀土矿物磷钇矿^[40]以及铝土矿石具有正Ce异常($\delta Ce=1.19\sim 1.75$)^[19, 27, 48-49]。含矿岩系及相邻层位岩相剖面测量及铝土矿石中Sr/Ba、V/Zr和Th/U比值特征, 均暗示铝土矿成矿前的风化阶段为气候炎热潮湿、植被发育的大陆环境, 沉积分异阶段为弱酸性氧化的淡水环境, 成矿阶段为陆相的河湖盆地沉积环境^[1, 27, 37, 49]。刘英俊等^[4]认为淡水或近海环境更有利于Li、Ga和Sc等的富集。因此, 3个典型矿床中Li、Ga和Sc异常富集, 进一步佐证黔北铝土矿形成于陆相河湖盆地沉积环境。

5 结论

含矿岩系垂向上, Li、Sc和Ga在含矿岩系中下部富集明显; 岩石类型上, Li、Sc和Ga表现出亲铝土矿石和黏土岩, 而疏泥页岩和灰岩的特征; 矿石类型上, Li富集在鲕状、致密块状矿石中, Sc集中于碎屑状矿石中, Ga在土状和鲕状、致密块状矿石中更富集; 区域上, Li、Ga和Sc含量总体呈北高南低的态势, 暗示与铝土矿沉积成矿时古地理有关。典型矿床中Li、Sc和Ga的富集规律进一步佐证务—

正一道地区铝土矿形成于陆相河湖相环境。

致谢: 成文过程与中国科学院地球化学研究所叶霖研究员进行了有益的讨论, 匿名评审专家和编辑部杨艳女士对论文提出了宝贵修改意见, 在此一并致以诚挚的谢意!

参考文献(References):

- [1] 金中国, 周家喜, 黄智龙, 等. 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[J]. 地学前缘, 2013, 20(6): 226-239.
Jin Zhongguo, Zhou Jiayi, Huang Zhilong, et al. Detrital zircon U-Pb dating and its geological signification for the bauxite in Wuchuan-Zheng'an- Daozhen Al metallogenic area, Guizhou Province[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(6): 226-239(in Chinese with English abstract).
- [2] 王登红, 李沛刚, 屈文俊, 等. 贵州大竹园铝土矿中钨和锂的发现与综合评价[J]. 中国科学(D辑), 2013, 43(1): 44-51.
Wang Denghong, Li Peigang, Qu Wenjun, et al. Discovery and preliminary study of the high tungsten and lithium contents in the Dazhuyuan bauxite deposit Guizhou, China[J]. Science in China (Series D), 2013, 43(1): 44-51(in Chinese).
- [3] 周家喜, 黄智龙, 周国富, 等. 贵州天桥铅锌矿床分散元素赋存状态及规律[J]. 矿物学报, 2009, 29(4): 471-480.
Zhou Jiayi, Huang Zhilong, Zhou Guofu, et al. The occurrence states and regularities elements in Tianqiao Pb-Zn Ore deposit, Guizhou Province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2009, 29(4): 471-480(in Chinese with English abstract).
- [4] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 125-387.
Liu Yingjun, Cao Liming, Li Zhaolin, et al. Geochemistry of the Elements[M]. Beijing: Science Press, 1984: 125-387(in Chinese).
- [5] 涂光炽, 高振敏, 胡瑞忠, 等. 分散元素地球化学及成矿机制[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 368-380.
Tu Guangchi, Gao Zhenmin, Hu Ruizhong, et al. The Geochemistry and Ore-forming Mechanism of the Dispersed Element[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003: 368-380 (in Chinese).
- [6] 刘平. 四论贵州之铝土矿——黔中—川南成矿带铝土矿的稀散、稀土组分特征[J]. 贵州地质, 1994, 11(3): 179-187.
Liu Ping. Discussion on the bauxite in Guizhou province- IV patterns of rare elements and rare earth elements bauxite in mineralization belts from the central Guizhou to the Southern Sichuan[J]. Guizhou Geology, 1994, 11(3): 179-187(in Chinese with English abstract).
- [7] 刘平. 贵州铝土矿伴生镓的分布特征及综合利用前景——九论贵州之铝土矿[J]. 贵州地质, 2007, 24(2): 90-96.
Liu Ping. Characteristics of associate gallium distributed in the bauxite in Guizhou and its prospects for comprehensive utilization: Nine treatments of bauxite ore[J]. Guizhou Geology, 2007, 24(2): 90-96(in Chinese with English abstract).
- [8] 汤艳杰, 贾建业, 刘建朝. 豫西地区铝土矿中镓的分布规律研究[J]. 矿物岩石, 2002, 22(1): 15-20.
Tang Yanjie, Jia Jianye, Liu Jianchao. Study on distribution regularities of gallium in bauxite deposits in the western area of Henan Province[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2002, 22(1): 15-20(in Chinese with English abstract).
- [9] 叶霖, 潘自平, 程增涛. 贵州修文小山坝铝土矿中镓等伴生元素分布规律研究[J]. 矿物学报, 2008, 28(2): 105-111.
Ye Lin, Pan Ziping, Chen Zengtao. The regularities of distribution of associated elements in Xiaoshanba bauxite deposit, Guizhou[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2008, 28(2): 105-111(in Chinese with English abstract).
- [10] 鲁方康, 黄智龙, 金中国, 等. 黔北务一正一道地区铝土矿镓含量特征与赋存状态初探[J]. 矿物学报, 2009, 29(3): 373-379.
Lu Fangkang, Huang Zhilong, Jin Zhongguo, et al. A primary study on the content features and occurrence states of gallium in bauxite from the Wuchuan-Zheng'an- Daozhen Area, northern Guizhou Province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2009, 29(3): 373-379(in Chinese with English abstract).
- [11] 赵晓东, 李军敏, 陈莉, 等. 重庆银矿垭口铝土矿床镓地球化学特征及成矿环境研究[J]. 沉积学报, 2013, 31(6): 1022-1030.
Zhao Xiaodong, Li Junmin, Chen Li, et al. Analysis on gallium geochemical characteristics and ore-forming environment of bauxite mine in Yinkuangyakou of Chongqing[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(6): 1022-1030(in Chinese with English abstract).
- [12] 陈阳, 程军, 任世聪, 等. 渝南大佛岩铝土矿伴生镓的分布规律研究[J]. 稀有金属, 2013, 37(1): 140-148.
Chen Yang, Cheng Jun, Ren Shicong, et al. Distribution of Ga in Dafoyan bauxite mining area, southern Chongqing[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2013, 37(1): 140-148(in Chinese with English abstract).
- [13] 陈莉, 李军敏, 杨波, 等. 渝南吴家湾铝土矿含矿岩系中钪的分布规律研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32(4): 468-474.
Chen Li, Li Junmin, Yang Bo, et al. Distribution of Sc in the Wujiawan bauxite ore-bearing rock series, southern Chongqing[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2013, 32(4): 468-474(in Chinese with English abstract).
- [14] 肖金凯, 雷剑泉, 夏祥. 黔中铝土矿及其赤泥中钪的某些特征[J]. 矿物学报, 1994, 14(4): 388-393.
Xiao Jinkai, Lei Jianquan, Xia Xiang. Some characteristics of scandium in bauxite from central Guizhou as well as in red mud[J]. Acta Mineralogical Sinica, 1994, 14(4): 388-393(in Chinese with English abstract).
- [15] 肖金凯, 雷剑泉. 贵州铝厂赤泥中钪和稀土[J]. 科学通报, 1994, 39(13): 1248.
Xiao Jinkai, Lei Jianquan. REE and scandium in red mud of Guizhou Al industrial area[J]. Chinese Science Bulletin, 1994, 39(13): 1248(in Chinese).
- [16] 张玉学. 分散元素钪的矿床类型与研究前景[J]. 地质地球化学,

- 1997, 25(4): 93–97.
Zhang Yuxue. Types of Sc deposits and research prospect[J]. *Geology and Geochemistry*, 1997, 25(4): 93–97(in Chinese with English abstract).
- [17] 张玉学, 何其光, 邵树勋, 等. 铝土矿钪的地球化学特征[J]. *地质地球化学*, 1999, 27(2): 55–62.
Zhang Yuxue, He Qiguang, Shao Shuxun, et al. Geochemical characteristics of Sc in bauxite[J]. *Geology Geochemistry*, 1999, 27(2): 55–62(in Chinese with English abstract).
- [18] 李军敏, 丁俊, 尹福光, 等. 渝南申基坪铝土矿矿区钪的分布规律及地球化学特征研究[J]. *沉积学报*, 2012, 30(5): 909–918.
Li Junmin, Ding Jun, Yin Fuguang, et al. Regularities of distribution and geochemical characteristics of Sc in bauxite of Shenjiping mine, southern Chongqing[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(5): 909–918(in Chinese with English abstract).
- [19] 李军敏, 陈莉, 徐金沙, 等. 渝南大佛岩矿区铝土矿碎屑锆石中钪的赋存形式研究[J]. *沉积学报*, 2013, 31(4): 630–638.
Li Junmin, Chen Li, Xu Jinsha, et al. Existing form of scandium in detrital zircon from bauxite of the Dafoyan mine, southern Chongqing[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(4): 630–638(in Chinese with English abstract).
- [20] 李再会, 闫武, 廖朝贵, 等. 重庆南川—武隆铝土矿矿物学、地球化学特征[J]. *沉积与特提斯地质*, 2012, 32(3): 87–100.
Li Zaihui, Yan Wu, Liao Chaogui, et al. Mineralogical and geochemical characteristics of the Wulong–Nanchuan bauxite deposit in Chongqing[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2012, 32(3): 87–100 (in Chinese with English abstract).
- [21] 王登红, 王瑞江, 李建康, 等. 中国三稀矿产资源战略调查研究进展综述[J]. *中国地质*, 2013, 40(2): 361–370.
Wang Denghong, Wang Ruijiang, Li Jiankang, et al. The progress in strategic research survey of rare earth, rare metal and rare scattered elements mineral resources[J]. *Geology in China*, 2013, 40(2): 361–370(in Chinese with English abstract).
- [22] 赵运发, 元小卫, 王智勇, 等. 山西铝土矿稀有稀土元素综合利用评价[J]. *世界有色金属*, 2004, 6: 35–37.
Zhao Yunfa, Yuan Xiaowei, Wang Zhiyong, et al. The evaluation of comprehensive utilization of rare elements and REE in the bauxite deposit in Shanxi[J]. *World Nonferrous Metals*, 2004, 6: 35–37(in Chinese with English abstract).
- [23] 张淳, 肖连生, 夏文堂. 从铝土矿中提取Ga、Nb、Li、Sc的可行性初步研究[J]. *稀有金属和硬质合金*, 2005, 33(2): 9–18.
Zhang Chun, Xiao Liansheng, Xia Wentang. Preliminary feasibility study of extracting Ga, Nb, Li and Sc from bauxite ore[J]. *Rare Metals and Cemented Carbides*, 2005, 33(2): 9–18(in Chinese with English abstract).
- [24] 武国辉, 金中国, 鲍淼, 等. 黔北务—正一道铝土矿成矿规律探讨[J]. *地质与勘探*, 2008, 44(6): 31–35.
Wu Guohui, Jin Zhongguo, Bao Miao, et al. Bauxite metallogenic regularity in the Wuchuan–Zheng’an–Daozhen area, northern Guizhou[J]. *Geology and Prospecting*, 2008, 44(6): 31–35(in Chinese with English abstract).
- [25] 金中国, 武国辉, 黄智龙, 等. 贵州务川瓦厂坪铝土矿床地球化学特征[J]. *矿物学报*, 2009, 29(4): 458–462.
Jin Zhongguo, Wu Guohui, Huang Zhilong, et al. The geochemical characteristics of Wuchangping bauxite deposit in Wuchuan County, Guizhou Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2009, 29(4): 458–462(in Chinese with English abstract).
- [26] 金中国, 向贤礼, 黄智龙, 等. 黔北务川瓦厂坪铝土矿床元素迁移规律研究[J]. *地质与勘探*, 2011, 47(6): 957–966.
Jin Zhongguo, Xiang Xianli, Huang Zhilong, et al. Regularities of elements migration in Wuchangping bauxite deposit in Wuchuan County, northern Guizhou province[J]. *Geology and Prospecting*, 2011, 47(6): 957–966(in Chinese with English abstract).
- [27] 金中国, 刘玲, 黄智龙, 等. 贵州务—正一道地区铝土矿床稀土组成及其地质意义[J]. *地质与勘探*, 2012, 48(6): 1067–1076.
Jin Zhongguo, Liu Ling, Huang Zhilong, et al. REE composition of the bauxite deposits, in the Wuchuan–Zheng’an–Daozhen area, Guizhou province, and its geological significance[J]. *Geology and Prospecting*, 2012, 48(6): 1067–1076(in Chinese with English abstract).
- [28] 殷科华. 黔北务—正一道铝土矿的成矿作用及成矿模式[J]. *沉积学报*, 2009, 27(3): 452–457.
Yin Kehua. Mineralization and metallogenic model for bauxite in the Wuchuan–Zheng’an–Daozhen area, northern, Guizhou[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(3): 452–457(in Chinese with English abstract).
- [29] 刘平, 廖友常. 黔中—渝南铝土矿含矿岩系时代探讨[J]. *中国地质*, 2012, 39(3): 661–682.
Liu Ping, Liao Youchang. A tentative discussion on the age of bauxite-bearing rock series in central Guizhou–southern Chongqing area[J]. *Geology in China*, 2012, 39(3): 661–682(in Chinese with English abstract).
- [30] 赵芝, 王登红, 李沛刚, 等. 黔北大竹园组碎屑锆石年代学及成矿指示意义[J]. *岩矿测试*, 2012, 32(1): 166–173.
Zhao Zhi, Wang Denghong, Li Peigang, et al. Detrital zircon U–Pb geochronology of Dazhuyuan formation in northern Guizhou: Implications for bauxite mineralization[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2013, 32(1): 166–173(in Chinese with English abstract).
- [31] 崔滔, 焦养泉, 杜远生, 等. 黔北务—正一道地区铝土矿沉积特征及分布规律[J]. *地质科技情报*, 2013, 32(1): 52–56.
Cui Tao, Jiao Yangquan, Du Yuansheng, et al. Sedimentary characteristics and distribution features of bauxite in the Wuchuan–Zheng’an–Daozhen area, northern Guizhou[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2013, 32(1): 46–51(in Chinese with English abstract).
- [32] 杜远生, 周琦, 金中国, 等. 黔北铝土矿基础地质与成矿作用研究进展[J]. *地质科技情报*, 2013, 32(1): 1–6.
Du Yuansheng, Zhou Qi, Jin Zhongguo, et al. Advances in basic Geology and metallogenic regularity study of bauxite in the Wuchuan–Zheng’an–Daozhen area, northern Guizhou[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2013, 32(1): 1–6

- (in Chinese with English abstract).
- [33] 李沛刚, 赵芝, 刘新星, 等. 贵州务—正—道铝土矿区域成矿规律及其对整装勘查的意义[J]. 岩矿测试, 2013, 32(5): 832–839.
Li Peigang, Zhao Zhi, Liu Xinxing, et al. Metallogeny of the Wuchuan–Zheng’an–Daozhen bauxite ore field and its significance in uncompartimentalized prospecting in Guizhou, China[J]. Rock and Mineral Analysis, 2013, 32(5): 832–839(in Chinese with English abstract).
- [34] 汪小妹, 焦养泉, 杜远生, 等. 黔北务—正—道地区铝土矿稀土元素地球化学特征[J]. 地质科技情报, 2013, 32(1): 27–33.
Wang Xiaomei, Jiao Yangquan, Du Yuansheng, et al. Rare earth elements geochemistry of bauxite in the Wuchuan–Zheng’an–Daozhen area, northern Guizhou[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(1): 27–33(in Chinese with English abstract).
- [35] Gu J, Huang Z L, Fan H P, et al. Mineralogy, geochemistry, and genesis of lateritic bauxite deposits in the Wuchuan–Zheng’an–Daozhen area, Northern Guizhou Province, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2013, 130: 44–59.
- [36] Gu J, Huang Z L, Fan H P, et al. 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[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 70–71: 265–282.
- [37] 李沛刚, 王登红, 赵芝, 等. 贵州大竹园铝土矿床地质、地球化学与成矿规律[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 1–218.
Li Peigang, Wang Denghong, Zhao Zhi, et al. Geology, Geochemistry and Metallogeny of the Dazhuyuan Bauxite Deposit, Guizhou Province[M]. Beijing: Science Press, 2014: 1–218(in Chinese).
- [38] Wang Xiaomei, Jiao Yangquan, Du Yuansheng, et al. REE mobility and Ce anomaly in bauxite deposit of WZD area, Northern Guizhou, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2013, 133: 103–117.
- [39] Qi L, Hu J, Gregoire D C. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Talanta, 2000, 51: 507–513.
- [40] Li Zaihui, Din Jun, Xu Jinsha, et al. Discovery of the REE minerals in the Wulong–Nanchuan bauxite deposits, Chongqing, China: Insights on conditions of formation and processes[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2013, 133: 88–102.
- [41] 刘平, 廖友常. 黔中—渝南沉积型铝土矿区域成矿模式及找矿模型[J]. 中国地质, 2014, 41(6): 2063–2082.
Liu Ping, Liao Youchang. Regional metallogenic model and prospecting criteria of sedimentary bauxite deposits in Central Guizhou–Southern Chongqing region[J]. Geology in China, 2014, 41(6): 2063–2082(in Chinese with English abstract).
- [42] 刘平, 廖友常. 试论遵义高铁铝土矿与低铁铝土矿的分带性及形成机制[J]. 中国地质, 2013, 40(3): 949–966.
Liu Ping, Liao Youchang. The zonation and genetic mechanism of Zunyi high- and low-ferrous bauxites[J]. Geology in China, 2013, 40(3): 949–966(in Chinese with English abstract).
- [43] 杨军臣, 王凤玲, 李德胜, 等. 铝土矿中伴生稀有稀土元素赋存状态及走向查定[J]. 矿冶, 2004, 13(2): 89–92.
YangJunchen, Wang Fengling, Li Desheng, et al. Investigation on occurrence and trend of rare and rare-earth elements associated in bauxite[J]. Mining and Metallurgy, 2004, 13(2): 89–92(in Chinese with English abstract).
- [44] 张复新, 王立社. 内蒙古准格尔黑岱沟超大型煤型镓矿床的形成和物质来源[J]. 中国地质, 2009, 36(2): 417–423.
Zhang Fuxin, Wang Lishe. The formation and material sources of the super large Hadagou Ga-bearing coal deposit in Jungar Banner, Inner Mongoli[J]. Geology in China, 2009, 36(2): 417–423(in Chinese with English abstract).
- [45] 虞必阳, 王建丽, 张覃. 稀土元素在铝土矿中的赋存状态及利用现状[J]. 稀土, 2007, 1: 117–119.
Tuo Biyang, Wang Jianli, Zhang Qin. Occurrence and utilization status of REE in bauxite[J]. Chinese Rare Earths, 2007, 1: 117–119(in Chinese with English abstract).
- [46] 黄凡, 王登红, 陈毓川, 等. 中国铝矿中辉钨矿的稀土元素地球化学及其应用[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 287–301.
Huang Fan, Wang Denghong, Chen Yuchuan, et al. REE characteristics of molybdenites from endogenous molybdenum deposits in China[J]. Geology in China, 2013, 40(1): 287–301(in Chinese with English abstract).
- [47] 洪汉烈. 黏土矿物古气候意义研究的现状与展望[J]. 地质科技情报, 2010, 29(1): 1–7.
Hong Hanlie. A review on paleoclimate interpretation of clay minerals[J]. Geological Science and Technology Information, 2010, 29(1): 1–7(in Chinese with English abstract).
- [48] 刘云华, 黄同兴, 湛建国, 等. 桂西堆积型铝土矿中三水铝石成因矿物学研究[J]. 中国地质, 2004, 31(4): 413–419.
Liu Yunhua, Huang Tongxing, Shen Jianguo, et al. Minerageny of gibbsite in accumulation-type bauxite deposits in western Guangxi Province[J]. Geology in China, 2004, 31(4): 413–419(in Chinese with English abstract).
- [49] 张启明, 江新胜, 秦建华, 等. 黔北—渝南地区中二叠世早期梁山组的岩相古地理特征和铝土矿成矿效应[J]. 地质通报, 2012, 31(2): 558–568.
Zhang Qiming, Jiang Xinsheng, Qin Jianhua, et al. Lithofacies palaeogeography of the early Middle Permian Liangshan formation in northern Guizhou–southern Chongqing area and its bauxite ore-forming effect[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(4): 558–568(in Chinese with English abstract).