

王行军, 王梓桐, 王根厚, 等. 滇东南铝土矿床地球化学特征及成矿物质来源[J]. 中国地质, 2015, 42(1): 248-264.

Wang Xingjun, Wang Zitong, Wang Genhou, et al. Geochemical characteristics and ore-forming materials of bauxite deposits in southeast Yunnan Province[J]. *Geology in China*, 2015, 42(1): 248-264(in Chinese with English abstract).

滇东南铝土矿床地球化学特征及成矿物质来源研究

王行军¹ 王梓桐² 王根厚¹ 周洁¹ 毕丽莎¹ 崔银亮³

张道红³ 李伟清⁴ 范良军⁴

(1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059;

3. 云南省有色地质局, 云南 昆明 650051; 4. 西南有色昆明勘测设计(院)股份有限公司, 云南 昆明 650051)

摘要:滇东南地区铝土矿资源丰富。本文以滇东南沉积型铝土矿为对象,研究了铝土矿的地球化学特征,进而对其成矿物质来源进行了讨论。含铝岩系之中富含稀土元素、分散元素镓、黑色金属元素钛和稀土金属元素铈,均已达到工业开采要求。含铝岩系的稀土总量总体较高,但样品之间稀土总量差别较大;具中等程度的铈负异常;铈异常较为复杂,具铈正异常和铈负异常;稀土配分曲线均为向右倾斜的弱“V”字型曲线,斜率不等,反映稀土元素分馏程度不等;稀土配分曲线特征与下伏威宁组灰岩的稀土曲线特征一致,说明含铝岩系与下伏威宁组灰岩关系密切。含铝岩系明显富集大离子亲石元素Li、U、高场强元素Nb、Ta、Zr、Hf、Th、过渡元素V、Cr、Ti和分散元素Ga,其余元素则明显亏损。野外观察发现含铝岩系直接在风化壳上沉积,含铝岩系具复杂的铈异常和中等的Th/U比值(3~7)、高的Sr/Ba比值(>1)以及高钛率值(3.41~44.02)。这些特征说明滇东南铝土矿的成矿物质主要来源于下伏威宁组灰岩风化形成的风化壳,沉积作用起到了对风化壳上成矿物质的改造作用。

关键词:铝土矿床;地球化学;成矿物质;滇东南

中图分类号:P618.45 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2015)01-0248-17

Geochemical characteristics and ore-forming materials of bauxite deposits in southeast Yunnan Province

WANG Xing-jun¹, WANG Zi-tong², WANG Gen-hou¹, ZHOU Jie¹, BI Li-sha¹,

CUI Yin-liang³, ZHANG Dao-hong³, LI Wei-qing⁴, FAN Liang-jun⁴

(1. School of Geosciences and Resource, China University of Geology, Beijing 100083, China; 2. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059, Sichuan, China; 3. Nonferrous Geological Bureau of Yunnan Province, Kunming, 650051, Yunnan, China; 4. Southwest Non-ferrous Metals Survey and Design Co., Ltd., in Kunming, Kunming, 650051, Yunnan, China)

Abstract: There exist abundant bauxite resources in southeastern Yunnan Province. Taking sedimentary bauxite deposits in

收稿日期:2014-01-14;改回日期:2014-10-28

基金项目:云南有色地质局项目(20100610-02、20100610-03)联合资助。

作者简介:王行军,男,1970年生,博士,主要从事区域地质矿产调查研究工作;E-mail:wxj1861@163.com。

通讯作者:王根厚,男,1963年生,教授,博士生导师,主要从事构造地质学的教学、科研工作;E-mail:wgh@cugb.edu.cn。

southeastern Yunnan Province as the research objects, the authors studied their geochemical characteristics and discussed their ore-forming material sources. These deposits are enriched in rare earth elements, dispersed elements gallium, ferrous metal element Ti and rare metal element Nb in aluminum-containing rocks, with the reserves attaining the requirements of industrial exploitation. In aluminum-containing rocks, there are generally high REE values and big differences between samples, with the characteristics of moderate Eu negative anomaly, complex Ce anomalies composed of positive and negative anomalies. REE distribution patterns for normalized aluminum-containing rocks exhibit rightly-oblique curve with weak "V" shape and different slopes, reflecting varying degrees of REE fractionation. REE characteristics are similar to features of underlying limestone of Weining Formation, which shows that there exists a close relationship between aluminum-containing rocks and limestones of Weining Formation. Aluminum-containing rocks are enriched in LILE elements Li, U, high field strength elements Nb, Ta, Zr, Hf, Th, transition elements V, Cr, Ti, and dispersed elements Ga, with the obvious depletion of the remaining elements. The authors found that aluminum-containing rocks deposited directly in the weathering crust. Aluminum-containing rocks have complex Ce anomalies and moderate Th/U (3-7), high Sr/Ba (> 1) and high Al_2O_3/TiO_2 (3.41-44.02), suggesting that main ore-forming materials of sedimentary bauxite deposits were derived from the weathering crust of limestones of Weining Formation, and sedimentation played the role of the reformation of the ore-forming materials of the weathering crust.

Key words: bauxite deposit; geochemical characteristics; ore-forming materials; southeast Yunnan Province

About the first author: WANG Xing-jun, male, born in 1970, senior engineer, doctor, engages in regional geological and mineral resource survey and the study of tectonics and sedimentology; E-mail: wxj1861@163.com.

About the corresponding author: WANG Geng-hou, male, born in 1963, professor, supervisor of doctor candidates, engages in teaching and study of tectonics; E-mail: wgh@cugb.edu.cn.

滇东南地区铝土矿资源丰富,铝土矿资源量居云南省第一位。通过3年找矿计划的实施,滇东南地区新增333+334铝土矿资源量2.36亿t,累计铝土矿资源量3.23亿t,约占云南铝土矿资源量的76%。目前,滇东南地区已发现铝土矿矿床(点)36个,其中有大型矿床3个(天生桥、大铁、飞尺角)、中型矿床4个(红舍克、二道箐、板茂、卖酒坪)、小型矿床4个(砂子塘、白色姑、铁厂、谷桃)(图1)。

虽然滇东南地区铝土矿资源丰富,但滇东南地区铝土矿的研究程度相对较低。缪鹰^[1]、成功等^[2]、蒋秀坤等^[3]、高泽培等^[4]分别对杨柳井、板茂、红舍克、大铁等铝土矿床的矿床特征、成因及找矿标志进行了研究;王根厚等^[5]对滇东南地区铝土矿床的地球化学特征及成矿预测等的研究表明滇东南地区铝土矿床之中普遍伴生有稀土元素和分散元素镓。王行军等^[5-6]通过对丘北大铁铝土矿床的稀土元素特征、天生桥—者五舍铝土矿床的地球化学特征研究,认为其成矿物质来源于

下伏威宁组灰岩。王训练等^[6]、刘加强等^[7]对滇东南地区铝土矿成矿期的岩相古地理进行了研究,结果表明铝土矿成矿期时滇东南地区处于一个低能泥质海岸环境,铝土矿主要形成于潮下带下部—浅海上部。范良军等^[8]研究了文山—麻栗坡断裂和丘北—广南—富宁断裂对铝土矿成矿作用的影响,认为前者对滇东南地区构造格架控制作用明显,而后者对含矿胶体运移及沉积的作用控制作用明显。冯晓宏等^[9]对滇东南地区铝土矿的成矿物质来源研究认为滇东南地区铝土矿成矿物质来源于峨眉山玄武岩。黄仁新^[10]对滇东南地区铝土矿床的类型进行详细划分,划分出3个类型6个亚类,古风化壳红土型铝土矿是基性火山碎屑岩风化剥蚀的产物,碎屑沉积铝土矿是胶体沉积作用的产物,堆积型铝土矿是前2类铝土矿后期改造的产物。范玉周等^[11]对滇东南地区铝地球化学异常进行了筛选,并进行成矿预测。

本文在“云南省铝土矿成矿规律与成矿预测研

①王根厚,王行军. 云南省铝土矿成矿规律与成矿预测研究. 2011.

②王根厚,王行军. 滇东南主要铝土矿床构造地质和成矿作用研究. 2013.

③王训练,周洪瑞. 云南省铝土矿主要成矿期岩相古地理和构造环境研究. 2011.

④王训练,周洪瑞. 滇东南主要铝土矿区精确岩相古地理和成矿作用研究. 2013.

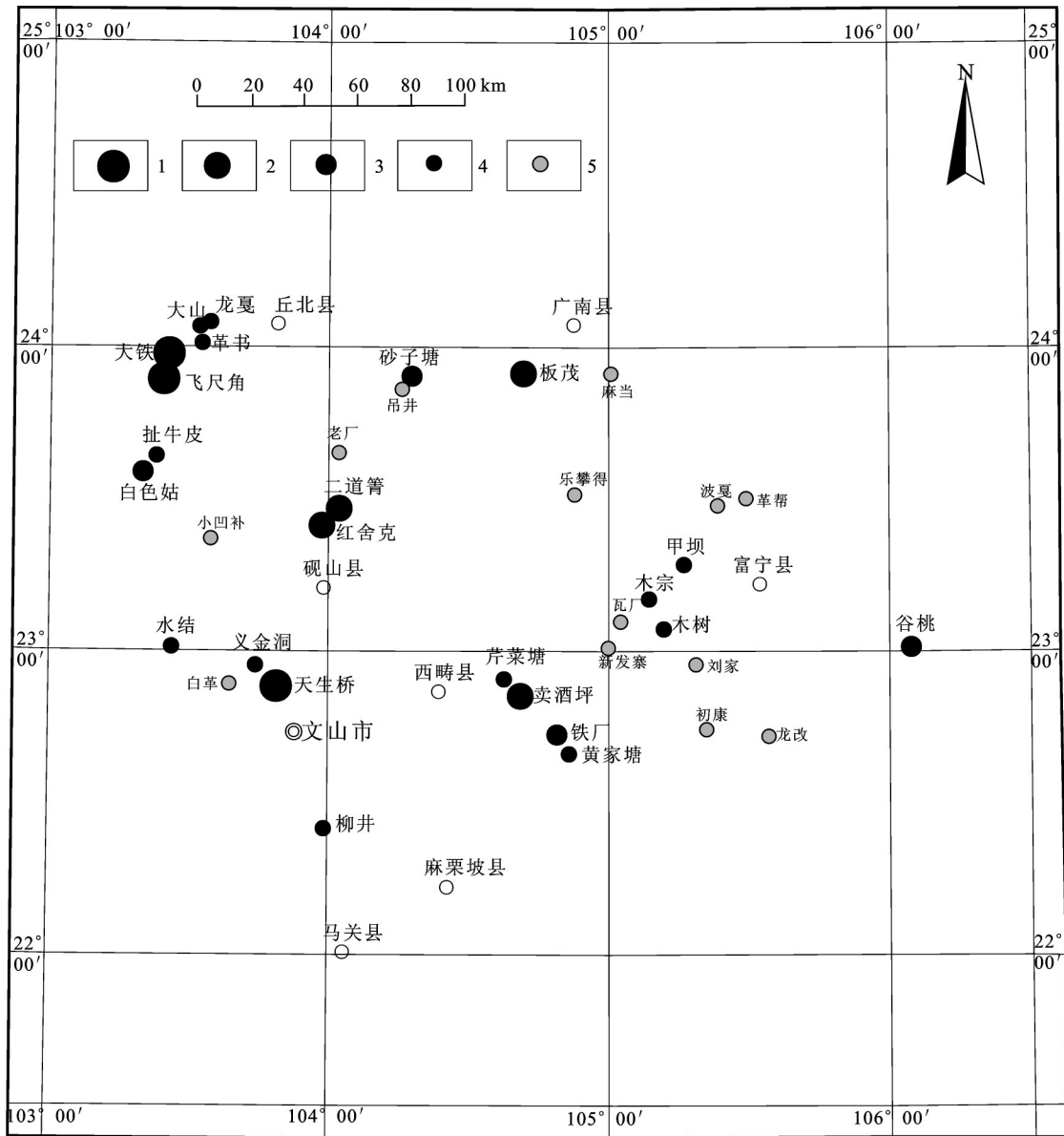


图1 滇东南地区铝土矿床(点)分布图
(据云南有色地质局, 2009^①, 略有修改)

1—大型铝土矿床; 2—中型铝土矿床; 3—小型铝土矿床; 4—铝土矿矿点; 5—赤铁矿矿点

Fig.1 The distribution of bauxite deposits and bauxite mineral ore spots in southeast Yunnan Province
(modified after Nonferrous Geological Bureau of Yunnan Province, 2009^①)

1—Large bauxite deposit; 2—Medium bauxite deposit; 3—Small bauxite deposit; 4—Bauxite ore spot; 5—Hematite ore spot

究”、“滇东南主要铝土矿矿床构造地质和成矿作用研究”的基础之上,对滇东南主要铝土矿床的地球化学特征及成矿物质来源进行了详细研究。对滇东南主要铝土矿矿床的地球化学特征的研究表明,其中伴生有黑色金属铁、钛、分散元素镓、稀有金属

元素铈和稀土元素,为今后铝土矿中伴生元素的综合利用提供理论依据;对滇东南铝土矿矿床沉积型铝土矿的成矿物质的研究表明,其成矿物质来源于下伏灰岩,成矿物质来源近,沉积型铝土矿成矿属近源沉积,这一研究结果为铝土矿的下一步勘查工

① 云南省有色地质局. 云南省铝土矿找矿行动计划勘查工作方案. 2009.

作指明了方向。

1 滇东南铝土矿床地球特征

滇东南地区铝土矿床有2种类型,一种是沉积型铝土矿床,另一种是堆积型铝土矿床。

1.1 沉积型铝土矿床

沉积型铝土矿赋存在龙潭组下部,含铝岩系的层序自下而上为:铁质岩-铁铝质岩-铝土矿-铝质粘土岩-黑色炭质泥岩夹煤线。

龙潭组为一套海陆交互相含煤沉积,下部为灰褐色-褐红色铁质泥岩、铁质岩、铁铝质岩、铁质铝土矿、铝土岩、泥质铝土矿,可见浸染黄铁矿;中部为灰色-褐灰色粉砂质泥岩,深灰色、灰黑色、黑色炭质泥岩夹煤线或煤层;上部为灰色灰岩、灰色硅质灰岩夹灰黑色硅质岩。与下伏峨眉山玄武岩或阳新组呈平行不整合接触,局部超覆于上石炭统之上;与上覆地层飞仙组呈整合接触。

该类型铝土矿矿石呈灰白色、灰色、深灰色、褐灰色。矿石以致密状结构、碎屑状结构、团粒状结构为主,豆状结构、鲕状结构较少。矿石构造以块状构造为主,条带状构造次之。矿石类型主要为碎屑状铝土矿、致密状铝土矿,其次为豆鲕状铝土矿。

1.2 堆积型铝土矿床

堆积型铝土矿床赋存于第四系松散堆积物,一般堆积型铝土矿含矿层上部为褐红砂质粘土或腐植土,中部为褐红色粘土、砂质粘土夹褐色、紫色棱角状铝土矿,是堆积铝土矿重要赋存部位,下部为红褐色粘土,偶见铝土矿块及褐黑色磨圆度较高的铝土矿砾石。含矿层的厚度、品位以龙潭组地层形成的残坡积层为中心,呈半环形展布,向外矿体厚度变薄、矿石品位变低。

矿石呈灰白色、灰色、深灰色、褐灰色。矿石以致密状结构、碎屑状结构、团粒状结构为主,豆状结构、鲕状结构较少。矿石构造以块状构造、孔穴状构造为主,条带状构造次之。矿石类型主要为碎屑状铝土矿、致密状铝土矿、孔穴状铝土矿,其次为豆鲕状铝土矿。

2 滇东南铝土矿床地球化学特征

样品的分析测试由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,主量元素的分析测试采用荷兰

PANalytical公司生产的X射线荧光光谱仪(Axios max X)完成,稀土元素、微量元素的分析测度采用美国ThermoFisher公司生产的等离子体质谱仪(ICP-MS)(X Serise 2)完成。分析精度高于5%。

2.1 滇东南主要铝土矿床常量元素特征

针对滇东南地区主要的铝土矿床共采集了196件样品,其中含铝岩系样品162件,下伏威宁组灰岩30件,下伏峨眉山玄武岩3件,夹于含铝岩系之中的凝灰岩1件。分析结果见表1。本次研究的样品涉及了天生桥、大铁、飞尺角、红舍克、砂子塘、白色姑、水结等7个典型铝土矿床(点),样品采自岩石露头、钻孔岩心。

本次研究含铝岩系的分类命名,以岩矿鉴定为基础,根据常量元素分析结果对其岩性进行必要的校正,具体是依据 Al_2O_3 、 $TFeO$ 、 Al_2O_3+TFeO 的含量将含铝岩系的主要岩性划分为铝土矿($Al_2O_3 \geq 50\%$)、铁质铝土矿($40\% \leq Al_2O_3 < 50\%$, $TFeO \geq 20\%$)、泥质铝土矿($40\% \leq Al_2O_3 < 50\%$, $TFeO < 20\%$)、铁质岩($TFeO \geq 40\%$)、铁铝质岩($Al_2O_3+TFeO \geq 50\%$, $Al_2O_3 < 40\%$, $TFeO < 40\%$);下伏威宁组灰岩则依据岩矿鉴定结果确定其岩石名称。本次研究工作,常量元素分析结果之中烧失量较高,但考虑到如果去除烧失量重新计算,将会影响到含铝岩系铝土矿品质的评价,故采用原始分析结果对含铝岩系和下伏灰岩、玄武岩的常量元素特征进行研究和描述。

铝土矿 Al_2O_3 含量高,为52.87%~65.73%; $TFeO$ 含量较低,含量为0.62%~13.83%; Al_2O_3+TFeO 含量高,为61.56%~75.90%; SiO_2 含量低,为4.21%~22.69%; TiO_2 含量较低,为0.85%~6.73%; MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 含量低,分别为0.02%~0.47%、0.08%~0.23%、0.06%~0.50%、0~0.57%。钛率(A/T)值变化范围较大,为8.58~75.79。铝硅比值(A/S)变化较大,为2.47~14.35,说明其矿石品质不同。 SiO_2 与 Al_2O_3 、 $TFeO$ 、 Al_2O_3+TFeO 呈负相关关系,相关性明显。 SiO_2 与A/T呈正相关关系,相关性较为明显(图2)。

铁质铝土矿 Al_2O_3 含量较高,为42.64%~45.98%; $TFeO$ 含量较高,含量为18.89%~29.33%; Al_2O_3+TFeO 含量高,为64.24%~72.52%; SiO_2 含量低,为7.48%~18.11%; TiO_2 含量中等,为2.21%~5.81%; MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 含量低,分别为0.09%

表1 滇东南主要铝土矿床各类岩石常量元素(%)分析结果及特征参数一览

Table 1 Major element (%) content and characteristic parameters for primary bauxite deposits, southeast Yunnan Province

序号	矿床	样数	岩性	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOS	Σ	A/T	A/S
1	天生桥	20	铝土矿 ⁺	6.77	6.73	57.74	13.83	0.01	0.47	0.18	0.10	0.09	0.08	13.67	99.67	8.58	8.52
2	砂子塘	3	铝土矿 ⁺	4.21	3.74	60.40	15.50	0.02	0.30	0.09	0.09	0.00	0.06	15.30	99.72	16.13	14.35
3	大铁	3	铝土矿 ⁺	17.11	1.96	57.80	6.77	0.19	0.10	0.13	0.11	0.13	0.34	15.10	99.75	29.47	3.38
4	飞尺角	2	铝土矿 ⁺	22.69	1.94	56.14	4.69	0.00	0.04	0.07	0.06	0.03	0.09	14.07	99.80	28.95	2.47
5	红舍克	7	铝土矿 ⁺	16.87	1.03	56.86	9.08	0.22	0.16	0.10	0.14	0.30	0.10	14.11	98.97	55.28	3.37
6	白色姑	3	铝土矿 ⁺	9.01	2.27	65.73	7.24	0.00	0.07	0.08	0.19	0.12	0.08	14.75	99.54	29.02	7.30
7	水结	2	铝土矿 ⁺	20.35	1.20	52.87	8.70	0.00	0.11	0.12	0.34	0.57	0.09	15.53	99.87	44.02	2.60
8	芹菜塘	1	铝土矿 ⁺	20.09	0.85	64.26	0.62	0.01	0.02	0.23	0.50	0.27	0.07	13.09	100.00	75.79	3.20
9	天生桥	14	铁质铝土矿 ⁺	7.48	5.38	43.19	29.33	0.02	0.73	0.25	0.05	0.01	0.09	13.17	99.70	8.03	5.78
10	砂子塘	3	铁质铝土矿 ⁺	14.24	5.72	42.73	21.52	0.01	0.63	0.11	0.07	0.03	0.04	14.69	99.77	7.47	3.00
11	大铁	8	铁质铝土矿 ⁺	14.13	5.81	42.64	22.95	0.12	0.26	0.37	0.06	0.06	0.24	12.77	99.40	7.34	3.02
12	红舍克	2	铁质铝土矿 ⁺	14.63	2.80	45.98	23.40	0.01	0.42	0.14	0.17	1.16	0.23	10.96	99.88	16.39	3.14
13	白色姑	4	铁质铝土矿 ⁺	18.11	2.21	45.76	18.89	0.01	0.32	0.11	0.23	0.22	0.06	13.76	99.68	20.74	2.53
14	大铁	4	泥质铝土矿 ⁺	30.63	7.38	41.64	6.41	0.00	0.09	0.13	0.14	0.41	0.24	12.78	99.84	5.64	1.36
15	红舍克	2	泥质铝土矿 ⁺	34.44	1.25	44.58	5.44	0.00	0.23	0.14	0.21	1.89	0.12	12.40	100.70	35.58	1.29
16	天生桥	5	铁铝质岩	9.41	4.60	34.12	36.71	0.03	0.50	0.50	0.04	0.01	0.17	13.61	99.69	7.42	3.63
17	砂子塘	3	铁铝质岩	23.10	4.47	31.25	26.62	0.00	0.57	0.24	0.13	0.19	0.01	13.04	99.61	6.99	1.35
18	大铁	19	铁铝质岩	22.17	6.30	29.51	28.70	0.13	0.40	0.33	0.09	0.11	0.24	11.80	99.78	4.68	1.33
19	飞尺角	4	铁铝质岩	22.13	5.75	33.49	27.01	0.06	0.17	0.12	0.09	0.04	0.09	10.91	99.84	5.83	1.51
20	红舍克	1	铁铝质岩	28.02	0.92	32.35	26.98	0.00	0.36	0.07	0.08	0.11	0.05	12.79	101.73	35.35	1.15
21	白色姑	1	铁铝质岩	17.54	4.32	35.93	28.35	0.04	1.07	0.18	0.06	0.02	0.07	11.86	99.44	8.32	2.05
22	水结	2	铁铝质岩	21.93	8.69	29.67	25.69	0.01	0.14	0.09	0.07	0.03	0.21	12.83	99.38	3.41	1.35
23	天生桥	2	铁质岩	9.47	2.89	22.29	55.65	0.06	0.56	0.43	0.05	0.01	0.07	8.36	99.83	7.71	2.35
24	大铁	3	铁质岩	18.25	1.96	11.82	57.93	0.13	0.26	0.27	0.13	0.20	0.21	9.02	100.18	6.04	0.65
25	飞尺角	1	铁质岩	13.69	0.90	16.25	58.09	0.00	0.32	0.43	0.05	0.28	0.19	9.81	100.02	18.09	1.19
26	杨柳井	1	铁质岩	4.59	4.32	38.25	41.17	0.14	0.17	0.11	0.06	0.02	0.07	19.05	107.94	8.85	8.33
27	大铁	5	菱镁矿 ⁺	23.60	5.92	25.96	25.09	0.27	0.90	0.79	0.06	0.09	0.28	17.60	100.56	4.38	1.10
28	砂子塘	3	铝质粘土岩	40.48	1.17	39.58	4.93	0.00	0.07	0.07	0.13	0.19	0.00	13.42	100.02	33.80	0.98
29	大铁	20	铝质粘土岩	37.56	4.49	28.89	13.89	0.07	0.25	0.27	0.16	0.42	0.25	13.43	99.67	6.43	0.77
30	飞尺角	6	铝质粘土岩	42.73	5.27	33.49	5.28	0.01	0.07	0.08	0.05	0.04	0.08	13.02	100.13	6.35	0.78
31	红舍克	7	铝质粘土岩	42.91	1.18	33.71	8.32	0.00	0.21	0.07	0.26	0.70	0.10	12.06	99.54	28.58	0.79
32	白色姑	1	铝质粘土岩	48.55	2.10	33.88	1.61	0.03	0.07	0.06	0.11	0.41	0.05	13.16	100.01	16.13	0.70
33	天生桥	13	灰岩	0.16	0.01	0.26	0.28	0.02	0.24	55.70	0.01	0.02	0.00	43.28	99.97	23.83	1.64
34	砂子塘	3	灰岩	1.25	0.02	1.15	0.15	0.01	0.15	55.02	0.03	0.02	0.00	42.30	100.11	55.35	0.92
35	大铁	11	灰岩	3.25	0.60	2.12	0.76	0.03	0.11	53.48	0.08	0.03	0.04	39.82	100.32	3.51	0.65
36	飞尺角	1	灰岩	2.36	0.22	3.15	0.46	0.01	0.02	54.52	0.05	0.02	0.02	39.11	99.92	14.20	1.34
37	红舍克	1	灰岩	3.80	0.09	4.15	0.33	0.00	0.02	51.84	0.08	0.09	0.02	16.51	76.94	44.17	1.09
38	白色姑	1	灰岩	3.18	0.32	4.68	0.60	0.01	1.69	48.73	0.14	0.02	0.03	40.59	100.00	14.63	1.47
39	大铁	3	玄武岩	37.62	3.24	22.08	19.40	0.17	2.73	4.07	0.62	0.86	0.41	8.52	99.74	6.82	0.59
40	峨眉山	51	玄武岩	48.37	3.32	12.22	12.03	0.18	5.74	8.85	2.69	1.60	0.14		95.14	3.68	0.25
41	白色姑	1	凝灰岩	37.45	1.79	13.87	11.33	0.15	3.53	14.30	2.27	1.76	0.18	12.99	99.63	7.75	0.37

注:A/T为Al₂O₃/TiO₂,A/S为Al₂O₃/SiO₂;峨眉山玄武岩分析数据来源于汪云亮等(1993)^[12]。

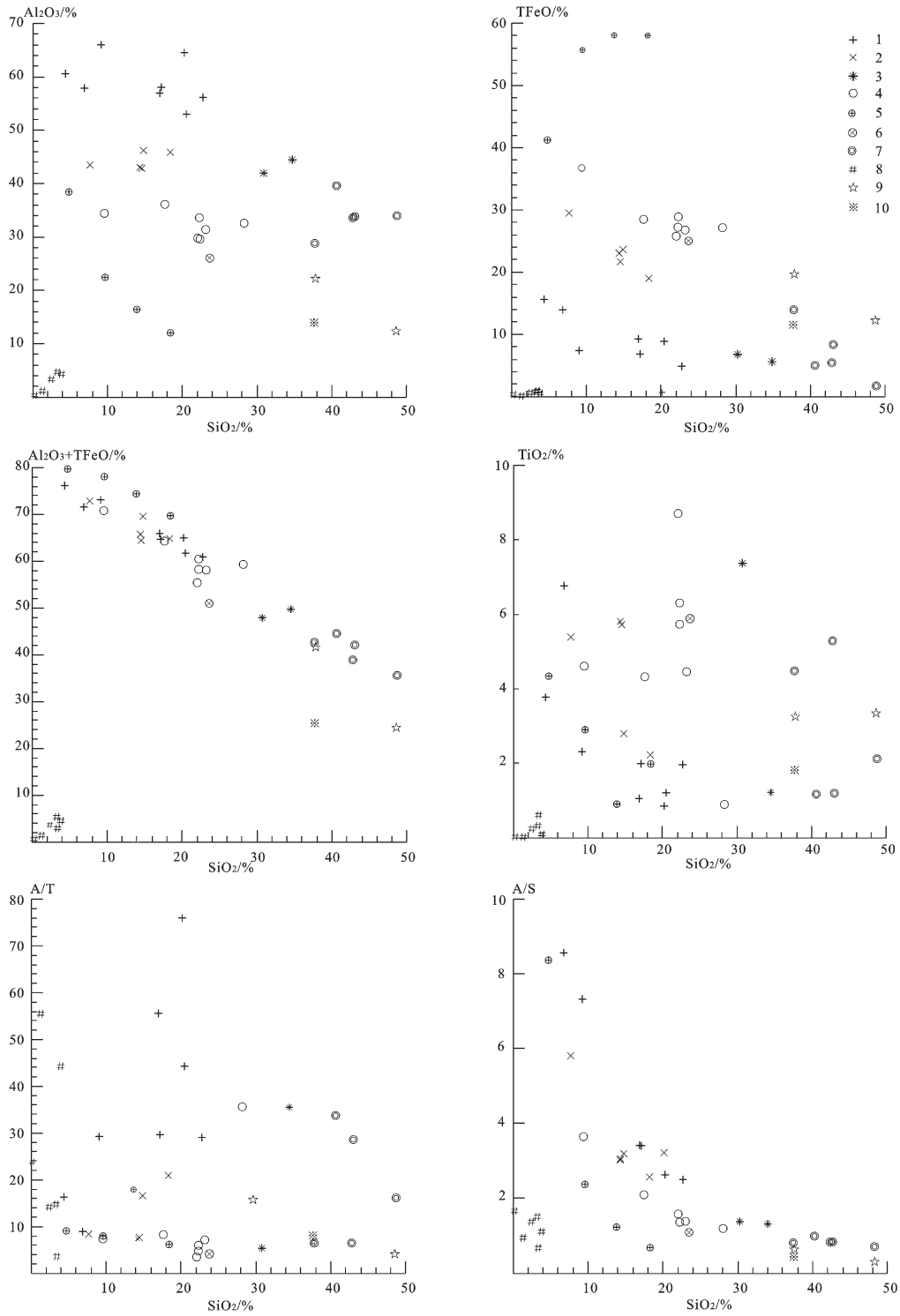


图2 滇东南主要铝土矿床各类岩石的哈克图解

1—铝土矿;2—铁质铝土矿;3—泥质铝土矿;4—铁铝质岩;5—铁质岩;6—菱镁矿;7—铝质粘土岩;8—灰岩;9—玄武岩;10—凝灰岩

Fig. 2 Harker diagram of primary bauxite deposits, southeast Yunnan Province

1-Bauxite;2-Iron bauxite;3-Argillaceous bauxite;4-Allite;5-Ferruginous rock;6-Magnesite;7-Aluminum clay stone;
8-Limestone;9-Basalt;10-Tuff

~0.73%、0.11%~0.37%、0.05%~0.23%、0.01%~0.41%。钛率(A/T)值变化范围较大,为7.47~20.74。铝硅比值(A/S)变化较大,为2.53~5.78,说明其矿石品质不同。SiO₂与TFeO、Al₂O₃+TFeO、A/S呈负相关关系,相关性明显。SiO₂与A/T呈正相关关系,相关性较为明显(图2)。

泥质铝土矿 Al₂O₃ 含量较高,为41.64%~44.58%;TFeO含量低,含量为5.44%~6.41%;Al₂O₃+TFeO含量较高,为48.05%~50.02%;SiO₂含量较高,为30.63%~34.44%;TiO₂含量差别较大,为1.25%~7.38%;MgO、CaO、Na₂O、K₂O含量低,分别为0.09%~0.23%、0.13%~0.14%、0.14%~0.21%、0.41%~1.89%。钛率(A/T)值变化范围较大,为5.64~35.58。铝硅比值(A/S)较小,为1.29~1.36,说明其中的Al₂O₃主要赋存在粘土矿物之中。SiO₂与TFeO、Al₂O₃+TFeO呈负相关关系,相关性明显。SiO₂与Al₂O₃呈正相关关系,相关性较为明显(图2)。

铁铝质岩 Al₂O₃ 含量较低,为29.51%~35.93%;TFeO含量中等,含量26.62%~36.71%;Al₂O₃+TFeO含量较高,为60.74%~79.42%;SiO₂含量中等,为9.41%~28.02%;TiO₂含量较高,为0.92%~8.69%;MgO、CaO、Na₂O、K₂O含量低,分别为0.17%~1.07%、0.07%~0.50%、0.04%~0.15%、0.01%~0.19%。SiO₂与Al₂O₃+TFeO呈负相关关系,相关性不明显。钛率(A/T)值变化范围较大,为3.41~35.35。铝硅比值(A/S)较小,为1.35~3.63,说明其矿石品质不佳。SiO₂与Al₂O₃、TFeO、Al₂O₃+TFeO、A/S呈负相关关系,相关性明显。SiO₂与TiO₂、A/T呈正相关关系,相关性较为明显(图2)。

铁质岩 Al₂O₃ 含量低,为11.82%~38.25%;TFeO含量高,含量41.17%~58.09%;Al₂O₃+TFeO含量高,为64.24%~72.52%;SiO₂含量低,为4.59%~18.25%;TiO₂含量较低,为0.90%~4.32%;MgO、CaO、Na₂O、K₂O含量低,分别为0.17%~0.56%、0.11%~0.43%、0.05%~0.13%、0.02%~0.28%。SiO₂与Al₂O₃+TFeO呈负相关关系,相关性不明显。钛率(A/T)值变化范围较大,为6.04~18.09。铝硅比值(A/S)变化较大,为0.65~8.33。SiO₂与TFeO、Al₂O₃+TFeO呈负相关关系,相关性明显,其余元素和地球化学参数与SiO₂相关性不明显(图2)。

菱镁矿 Al₂O₃ 含量低,为25.96%;TFeO含量中

等,含量25.09%;Al₂O₃+TFeO含量中等,为51.05%;SiO₂含量中等,为23.60%;TiO₂含量较高,为5.92%;MgO、CaO、Na₂O、K₂O含量低,分别为0.90%、0.79%、0.06%、0.09%。钛率(A/T)值中等,为4.38。铝硅比值(A/S)较小,为1.10。

铝质粘土岩 Al₂O₃ 含量中等,为28.89%~39.58%;TFeO含量低,含量1.61%~13.89%;Al₂O₃+TFeO含量较低,为35.49%~44.51%;SiO₂含量高,为37.56%~48.55%;TiO₂含量较低,为1.17%~5.27%;MgO、CaO、Na₂O、K₂O含量低,分别为0.07%~0.25%、0.06%~0.27%、0.05%~0.26%、0.04%~0.70%。SiO₂与Al₂O₃+TFeO、MgO、CaO呈负相关关系,相关性较为明显(图2)。钛率(A/T)值变化范围较大,为6.43~33.80。铝硅比值(A/S)低,为0.70~0.98,说明其中Al₂O₃来源于粘土矿物。SiO₂与Al₂O₃、TFeO、Al₂O₃+TFeO呈负相关关系,相关性明显。SiO₂与A/T呈正相关关系,相关性较为明显(图2)。

灰岩 Al₂O₃ 含量低,为0.26%~4.68%;TFeO含量低,为0.15%~0.76%;Al₂O₃+TFeO含量低,为0.54%~5.28%;SiO₂含量低,为0.16%~3.80%;TiO₂含量极低,为0.01%~0.60%;CaO含量高,为48.73%~55.70%;MgO、Na₂O、K₂O含量低,分别为0.02%~1.69%、0.01%~0.14%、0.02%~0.09%。钛率(A/T)值总体高并且变化范围较大,为3.51~55.35,其特征与含铝岩系特征较为一致,说明二者之间亲缘关系明显。铝硅比值(A/S)低,为0.65~1.64。SiO₂与Al₂O₃、TFeO、Al₂O₃+TFeO、A/S呈正相关关系,相关性明显(图2)。

玄武岩 Al₂O₃ 含量低,为12.22%~18.66%;TFeO含量较低,含量12.03%~19.40%;Al₂O₃+TFeO含量较低,为24.25%~38.06%;SiO₂含量高,为39.87%~48.37%;TiO₂含量中等,为3.32%~3.86%;MgO、CaO含量较高,含量分别为2.73%~5.74%、4.07%~8.85%;Na₂O、K₂O含量低,分别为0.62%~2.69%、0.86%~1.60%。钛率(A/T)值较小,为3.68~4.79,明显低于含铝岩系的钛率值。铝硅比值(A/S)低,为0.25~0.59。SiO₂与Al₂O₃、TFeO、Al₂O₃+TFeO、A/T呈负相关关系(图2)。

凝灰岩 Al₂O₃ 含量低,为13.87%;TFeO含量较低,含量11.33%;Al₂O₃+TFeO含量低,为25.20%;SiO₂含量较高,为37.45%;TiO₂含量低,为1.79%;

MgO、CaO 含量较高,含量分别为 3.53%、14.30%; Na₂O、K₂O 含量低,分别为 1.76%、0.18%。钛率(A/T)值较高,为 7.75。铝硅比值(A/S)低,为 0.37。

2.2 滇东南主要铝土矿床稀土元素特征

铝土矿稀土总量较高, $\Sigma \text{REE}=410.17 \times 10^{-6} \sim 1678.22 \times 10^{-6}$;轻稀土总量较高, $\text{LREE}=302.69 \times 10^{-6} \sim 962.25 \times 10^{-6}$;重稀土总量较低, $\text{HREE}=39.46 \times 10^{-6} \sim 205.95 \times 10^{-6}$;轻重稀土分馏程度不等, $\text{LREE}/\text{HREE}=1.95 \sim 10.01$, $(\text{La}/\text{Yb})_N=1.62 \sim 8.45$;轻稀土元素分馏程度高, $(\text{La}/\text{Sm})_N=4.12 \sim 12.15$;重稀土元素分馏程度低, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N=0.54 \sim 1.19$; $\delta\text{Eu}=0.44 \sim 0.61$, 具中等铈负异常; $\delta\text{Ce}=0.66 \sim 1.31$, 具中等铈负异常-弱铈正异常,说明部分铝土矿成矿物质可能来源于海水之中^[13,14](表2)。稀土配分曲线为向右倾斜的斜率不等的弱“V”字型曲线,说明稀土元素分馏程度不等,属轻稀土富集型^[13,15-16](图3)。

铁质铝土矿稀土总量高, $\Sigma \text{REE}=976.31 \times 10^{-6} \sim 1412.90 \times 10^{-6}$;轻稀土总量高, $\text{LREE}=648.92 \times 10^{-6} \sim 1049.34 \times 10^{-6}$;重稀土总量较高, $\text{HREE}=98.29 \times 10^{-6} \sim 147.74 \times 10^{-6}$;轻重稀土分馏程度较高, $\text{LREE}/\text{HREE}=5.46 \sim 8.91$, $(\text{La}/\text{Yb})_N=7.31 \sim 10.34$;轻稀土元素分馏程度较高, $(\text{La}/\text{Sm})_N=3.54 \sim 5.81$;重稀土元素分馏程度较低, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N=1.23 \sim 1.90$; $\delta\text{Eu}=0.57 \sim 0.70$, 具中等铈负异常; $\delta\text{Ce}=0.51 \sim 1.03$, 具中等铈负异常-无铈异常,说明部分铁质铝土矿成矿物质可能来源于海水之中^[13,14](表2)。稀土配分曲线为向右陡倾的弱“V”字型曲线,属轻稀土富集型^[13,15-16](图3)。

泥质铝土矿稀土总量较高, $\Sigma \text{REE}=605.31 \times 10^{-6} \sim 1003.35 \times 10^{-6}$;轻稀土总量较高, $\text{LREE}=508.04 \times 10^{-6} \sim 704.19 \times 10^{-6}$;重稀土总量较低, $\text{HREE}=49.95 \times 10^{-6} \sim 93.04 \times 10^{-6}$;轻重稀土分馏程度较高, $\text{LREE}/\text{HLREE}=7.57 \sim 10.17$, $(\text{La}/\text{Yb})_N=8.44 \sim 14.11$;轻稀土元素分馏程度不等, $(\text{La}/\text{Sm})_N=2.24 \sim 6.79$;重稀土元素分馏程度不等, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N=0.88 \sim 3.58$; $\delta\text{Eu}=0.58 \sim 0.96$, 具中等铈负异常-无铈异常; $\delta\text{Ce}=0.65 \sim 0.91$, 具中等铈负异常-弱铈负异常,说明泥质铝土矿成矿物质可能来源于海水之中^[13,14](表2)。稀土配分曲线为向右缓倾的弱“V”字型曲线、向右陡斜的弱“V”字型曲线,属轻稀土富集型^[13,15-16](图4)。

铁铝质岩稀土总量差别较大,多数样品稀土总量较低, $\Sigma \text{REE}=197.40 \times 10^{-6} \sim 589.54 \times 10^{-6}$;轻稀土总

量同样差别较大, $\text{LREE}=176.20 \times 10^{-6} \sim 404.63 \times 10^{-6}$;重稀土总量较低, $\text{HREE}=10.36 \times 10^{-6} \sim 109.57 \times 10^{-6}$;轻重稀土分馏程度较高, $\text{LREE}/\text{HREE}=5.75 \sim 17.00$, $(\text{La}/\text{Yb})_N=7.10 \sim 21.30$;轻稀土元素分馏程度较高, $(\text{La}/\text{Sm})_N=3.41 \sim 13.87$;重稀土元素分馏程度较低, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N=0.64 \sim 2.30$; $\delta\text{Eu}=0.42 \sim 1.00$, 具中等铈负异常-无铈异常; $\delta\text{Ce}=0.93 \sim 3.30$, 具弱铈负异常-强铈正异常,多数样品具铈正异常,说明铁铝质岩的成矿物质没有经历充分的沉积作用,也预示着其可能直接来源于风化壳^[13,14](表2)。稀土配分曲线为向右倾斜斜率中等的较平滑曲线或向右陡倾的弱“V”字形曲线,属轻稀土富集型^[13,15-16](图4)。

铁质岩稀土总量总体较高,但差别较大, $\Sigma \text{REE}=207.43 \times 10^{-6} \sim 2020.31 \times 10^{-6}$;轻稀土总量同样差别较大, $\text{LREE}=151.54 \times 10^{-6} \sim 1403.03 \times 10^{-6}$;重稀土总量同样差别较大, $\text{HREE}=19.68 \times 10^{-6} \sim 270.48 \times 10^{-6}$;轻重稀土分馏程度较高, $\text{LREE}/\text{HREE}=5.19 \sim 19.43$, $(\text{La}/\text{Yb})_N=6.84 \sim 16.45$;轻稀土元素分馏程度中等, $(\text{La}/\text{Sm})_N=2.05 \sim 6.44$;重稀土元素分馏程度中等, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N=1.06 \sim 2.05$; $\delta\text{Eu}=0.51 \sim 0.76$, 具中等铈负异常-弱铈负异常; $\delta\text{Ce}=0.49 \sim 2.28$, 具中等铈负异常-中等铈正异常,说明铁质岩的部分成矿物质没有经历充分的沉积作用,直接来源于风化壳^[13,14](表2)。稀土配分曲线为向右倾斜斜率中等的较平滑曲线或向右缓倾的弱“V”字形曲线,属轻稀土富集型^[13,15-16](图4)。

菱镁矿稀土总量总体中等, $\Sigma \text{REE}=338.68 \times 10^{-6}$;轻稀土总量中等, $\text{LREE}=239.24 \times 10^{-6}$;重稀土总量较低, $\text{HREE}=34.36 \times 10^{-6}$;轻重稀土分馏程度中等, $\text{LREE}/\text{HREE}=6.96$, $(\text{La}/\text{Yb})_N=8.37$;轻稀土元素分馏程度中等, $(\text{La}/\text{Sm})_N=2.95$;重稀土元素分馏程度较高, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N=2.18$; $\delta\text{Eu}=1.01$, 无铈异常; $\delta\text{Ce}=1.11$, 具弱铈正异常(表2)。稀土配分曲线为向右倾斜斜率中等的较平滑曲线,属轻稀土富集型^[13,15-16](图4)。

铝质粘土岩稀土总量总体较高, $\Sigma \text{REE}=389.94 \times 10^{-6} \sim 851.64 \times 10^{-6}$,多数样品的稀土总量高于 500×10^{-6} ;轻稀土总量较高, $\text{LREE}=283.59 \times 10^{-6} \sim 630.93 \times 10^{-6}$;重稀土总量较高, $\text{HREE}=41.21 \times 10^{-6} \sim 87.00 \times 10^{-6}$;轻重稀土分馏程度较高, $\text{LREE}/\text{HREE}=6.23 \sim 9.78$, $(\text{La}/\text{Yb})_N=5.30 \sim 10.68$;轻稀土元素分馏程度较高, $(\text{La}/\text{Sm})_N=2.64 \sim 5.90$;重稀土元素分馏程度

表2 滇东南主要矿床各类岩石稀土元素(10^{-6})分析结果及特征参数一览
 Table 2 Rare earth element (10^{-6}) content and characteristic parameters for primary bauxite deposits, southeast Yunnan Province

序号	矿床	样数	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
1	天生桥	20	铝土矿	123.64	213.11	18.58	55.92	9.46	1.90	10.86	2.03	14.71	3.18	9.06	1.73	9.86	3.33	79.67
2	砂子塘	3	铝土矿	230.89	253.07	24.52	72.43	11.96	2.46	15.97	3.13	25.58	6.33	19.79	3.75	20.15	3.98	191.98
3	大铁	3	铝土矿	272.23	385.49	52.80	201.50	41.59	8.65	46.08	8.57	58.54	12.13	36.10	5.65	33.77	5.11	510.09
4	飞尺角	2	铝土矿	82.57	164.69	14.14	47.78	12.92	3.52	23.18	5.91	47.63	10.85	33.97	5.46	34.43	5.21	485.98
5	红舍克	7	铝土矿	141.48	352.13	25.30	85.83	13.54	2.17	13.45	2.35	15.63	3.30	10.76	1.86	12.35	1.98	110.87
6	白色姑	3	铝土矿	179.55	245.25	28.87	100.11	19.54	3.77	18.20	3.04	18.57	3.49	10.66	1.85	12.32	1.86	103.82
7	水结	2	铝土矿	144.88	185.85	18.20	50.30	6.18	0.99	6.41	1.31	10.88	2.69	9.69	1.82	12.05	1.94	75.38
8	芹菜塘	1	铝土矿	100.30	136.40	14.97	44.28	5.89	0.85	5.68	1.18	9.34	2.23	7.92	1.53	9.98	1.60	68.02
9	天生桥	14	铁质铝土矿	180.78	337.12	27.23	147.69	32.14	6.74	30.15	4.83	28.75	5.45	13.89	2.36	12.77	3.34	150.30
10	砂子塘	3	铁质铝土矿	193.00	319.67	39.77	144.73	31.14	7.18	30.77	5.07	32.42	6.66	18.67	3.30	17.80	3.75	192.97
11	大铁	8	铁质铝土矿	175.98	290.51	32.27	122.01	22.73	5.42	26.30	4.46	28.10	5.59	15.93	2.33	13.58	2.01	229.10
12	红舍克	2	铁质铝土矿	306.86	441.21	58.64	203.28	33.21	6.14	30.51	4.79	29.88	6.30	20.00	3.22	20.01	3.11	245.83
13	白色姑	4	铁质铝土矿	255.70	256.02	51.95	196.48	39.73	7.44	38.23	6.62	40.38	7.91	23.71	3.79	23.49	3.61	275.84
14	大铁	4	泥质铝土矿	100.26	212.99	31.14	127.49	28.15	8.02	21.24	2.80	12.60	1.92	5.14	0.77	4.79	0.68	47.33
15	红舍克	2	泥质铝土矿	227.85	276.15	39.55	135.59	21.11	3.94	19.89	3.52	23.91	5.15	16.72	2.79	18.21	2.86	206.12
16	天生桥	5	铁铝质岩	431.22	609.32	53.43	408.08	83.69	17.73	85.61	13.78	81.40	15.79	38.97	6.21	31.55	5.38	537.25
17	砂子塘	3	铁铝质岩	88.77	215.88	17.42	64.71	14.60	3.27	14.90	2.74	18.15	3.68	11.14	1.83	11.24	2.03	119.20
18	大铁	19	铁铝质岩	66.72	161.47	16.69	64.46	12.30	3.47	11.45	1.81	9.95	1.71	4.65	0.68	4.03	0.59	49.56
19	飞尺角	4	铁铝质岩	41.53	135.01	9.23	34.52	7.10	1.75	6.45	1.01	5.78	1.03	3.00	0.49	3.16	0.47	30.70
20	红舍克	1	铁铝质岩	70.07	83.69	9.93	28.85	3.18	0.43	2.90	0.52	3.63	0.84	2.97	0.54	3.63	0.59	33.95
21	白色姑	1	铁铝质岩	51.29	339.99	10.92	37.81	7.11	1.26	7.42	1.23	8.09	1.60	4.76	0.76	4.87	0.74	40.72
22	水结	2	铁铝质岩	41.92	81.07	9.95	36.05	5.60	1.61	3.86	0.52	2.55	0.44	1.26	0.20	1.33	0.20	10.84
23	天生桥	2	铁质岩	330.30	422.05	109.26	420.61	101.21	19.61	82.78	13.55	78.80	14.48	37.08	6.20	32.57	5.04	346.80
24	大铁	3	铁质岩	35.65	72.17	7.78	29.18	5.38	1.38	5.60	0.89	5.29	1.01	3.03	0.48	2.94	0.46	36.21
25	飞尺角	1	铁质岩	91.40	83.18	15.63	57.51	8.93	1.63	10.27	1.86	12.78	2.93	8.70	1.33	7.82	1.22	138.92
26	杨柳井	1	铁质岩	96.92	406.35	15.68	49.18	10.50	1.89	9.70	1.50	8.17	1.37	3.96	0.63	3.97	0.57	35.74
27	大铁	5	菱镁矿	48.56	114.74	12.18	49.89	10.35	3.53	10.57	1.75	10.09	1.81	4.96	0.69	3.91	0.57	65.07
28	砂子塘	3	铝质粘土岩	91.06	97.26	17.47	64.17	11.50	2.13	10.86	1.82	11.57	2.39	7.66	1.30	8.56	1.37	94.59
29	大铁	20	铝质粘土岩	124.56	193.05	28.39	114.62	24.31	6.74	25.42	4.01	23.92	4.67	13.62	1.99	11.62	1.75	229.77
30	飞尺角	6	铝质粘土岩	61.78	125.04	16.87	68.52	14.72	3.15	12.45	2.08	11.97	2.09	5.94	0.94	5.97	0.90	57.53
31	红舍克	7	铝质粘土岩	204.89	248.43	34.16	117.69	21.83	3.93	20.62	3.42	20.70	4.02	12.34	2.02	12.93	2.02	142.64
32	白色姑	1	铝质粘土岩	53.46	288.96	11.34	39.08	8.57	1.75	10.51	1.89	11.73	2.12	6.14	1.02	6.80	1.01	72.58
33	天生桥	13	灰岩	7.56	8.92	1.96	9.37	2.59	0.68	3.54	0.68	4.54	0.93	2.34	0.39	1.99	0.28	30.40
34	砂子塘	3	灰岩	4.04	3.04	0.69	2.92	0.62	0.16	0.87	0.14	0.92	0.20	0.58	0.09	0.45	0.07	12.84
35	大铁	11	灰岩	6.03	8.37	1.12	4.22	0.88	0.23	1.08	0.18	1.12	0.24	0.71	0.10	0.61	0.09	12.02
36	飞尺角	1	灰岩	4.95	15.13	0.73	2.48	0.45	0.10	0.55	0.09	0.59	0.12	0.39	0.06	0.34	0.05	6.96
37	红舍克	1	灰岩	14.71	14.54	2.07	7.01	1.24	0.28	1.79	0.28	1.84	0.39	1.15	0.15	0.89	0.13	19.71
38	白色姑	1	灰岩	25.18	20.70	3.33	9.57	1.36	0.23	1.36	0.22	1.50	0.31	0.94	0.16	0.91	0.15	13.00
39	大铁	3	玄武岩	49.81	85.96	15.56	69.72	16.28	4.80	18.89	3.59	25.02	5.42	15.93	2.40	13.82	2.08	188.03
40	峨眉山	51	玄武岩	41.50	95.24	0.00	52.57	10.00	2.84	0.00	1.42	6.19	0.70	0.00	0.00	2.55	0.39	0.00
41	白色姑	1	凝灰岩	42.40	89.80	10.56	41.37	8.58	2.08	8.40	1.43	8.68	1.64	4.76	0.75	4.76	0.76	39.64

续表2

序号	矿床	样数	岩性	Σ REE	LREE	HREE	LREE/HREE	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N	δ Eu	δ Ce
1	天生桥	20	铝土矿	557.03	422.60	54.76	7.72	8.45	8.22	0.89	0.57	0.96
2	砂子塘	3	铝土矿	885.98	595.31	98.69	6.03	7.73	12.15	0.64	0.54	0.66
3	大铁	3	铝土矿	1678.29	962.25	205.95	4.67	5.43	4.12	1.10	0.60	0.73
4	飞尺角	2	铝土矿	978.22	325.61	166.63	1.95	1.62	4.02	0.54	0.61	1.07
5	红舍克	7	铝土矿	793.01	620.45	61.68	10.06	7.72	6.57	0.88	0.48	1.31
6	白色姑	3	铝土矿	750.91	577.08	70.01	8.24	9.82	5.78	1.19	0.60	0.74
7	水结	2	铝土矿	528.57	406.39	46.79	8.69	8.11	14.76	0.43	0.47	0.75
8	芹菜塘	1	铝土矿	410.17	302.69	39.46	7.67	6.78	10.70	0.46	0.44	0.76
9	天生桥	14	铁质铝土矿	983.52	731.69	101.53	7.21	9.54	3.54	1.90	0.65	1.03
10	砂子塘	3	铁质铝土矿	1046.90	735.50	118.43	6.21	7.31	3.90	1.40	0.70	0.83
11	大铁	8	铁质铝土矿	976.31	648.92	98.29	6.60	8.74	4.87	1.56	0.67	0.86
12	红舍克	2	铁质铝土矿	1412.98	1049.34	117.82	8.91	10.34	5.81	1.23	0.58	0.74
13	白色姑	4	铁质铝土矿	1230.91	807.33	147.74	5.46	7.34	4.05	1.31	0.57	0.51
14	大铁	4	泥质铝土矿	605.31	508.04	49.95	10.17	14.11	2.24	3.58	0.96	0.91
15	红舍克	2	泥质铝土矿	1003.35	704.19	93.04	7.57	8.44	6.79	0.88	0.58	0.65
16	天生桥	5	铁铝质岩	2419.40	1603.47	278.69	5.75	9.21	3.24	2.19	0.63	0.82
17	砂子塘	3	铁铝质岩	589.54	404.63	65.71	6.16	5.33	3.83	1.07	0.67	1.25
18	大铁	19	铁铝质岩	409.53	325.11	34.87	9.32	11.17	3.41	2.30	0.87	1.14
19	飞尺角	4	铁铝质岩	281.24	229.14	21.40	10.71	8.85	3.68	1.65	0.77	1.59
20	红舍克	1	铁铝质岩	245.71	196.14	15.62	12.56	13.00	13.87	0.64	0.42	0.67
21	白色姑	1	铁铝质岩	518.57	448.39	29.47	15.22	7.10	4.54	1.23	0.52	3.30
22	水结	2	铁铝质岩	197.40	176.20	10.36	17.00	21.30	4.71	2.35	1.00	0.93
23	天生桥	2	铁质岩	2020.31	1403.03	270.48	5.19	6.84	2.05	2.05	0.63	0.53
24	大铁	3	铁质岩	207.43	151.54	19.68	7.70	8.16	4.17	1.53	0.76	1.00
25	飞尺角	1	铁质岩	444.11	258.28	46.91	5.51	7.89	6.44	1.06	0.51	0.49
26	杨柳井	1	铁质岩	646.13	580.51	29.88	19.43	16.45	5.81	1.97	0.56	2.28
27	大铁	5	菱镁矿	338.68	239.24	34.36	6.96	8.37	2.95	2.18	1.01	1.11
28	砂子塘	3	铝质粘土岩	423.71	283.59	45.53	6.23	7.17	4.98	1.02	0.57	0.55
29	大铁	20	铝质粘土岩	808.44	491.67	87.00	5.65	7.23	3.22	1.77	0.82	0.75
30	飞尺角	6	铝质粘土岩	389.94	290.07	42.33	6.85	6.98	2.64	1.68	0.69	0.92
31	红舍克	7	铝质粘土岩	851.64	630.93	78.07	8.08	10.68	5.90	1.29	0.55	0.65
32	白色姑	1	铝质粘土岩	516.95	403.16	41.21	9.78	5.30	3.92	1.25	0.56	2.70
33	天生桥	13	灰岩	76.17	31.08	14.69	2.12	2.56	1.84	1.44	0.68	0.55
34	砂子塘	3	灰岩	27.63	11.47	3.31	3.46	6.05	4.08	1.56	0.65	0.40
35	大铁	11	灰岩	37.01	20.85	4.14	5.04	6.62	4.29	1.42	0.71	0.72
36	飞尺角	1	灰岩	32.99	23.84	2.19	10.87	9.72	6.91	1.30	0.62	1.71
37	红舍克	1	灰岩	66.18	39.85	6.62	6.02	11.09	7.47	1.61	0.56	0.56
38	白色姑	1	灰岩	78.92	60.37	5.55	10.88	18.59	11.66	1.20	0.52	0.47
39	大铁	3	玄武岩	517.30	242.12	87.15	2.78	2.43	1.92	1.10	0.83	0.74
40	峨眉山	51	玄武岩	213.38	202.14	11.24	17.98	10.99	2.61	0.00	1.50	1.76
41	白色姑	1	凝灰岩	265.60	194.79	31.18	6.25	6.01	3.11	1.42	0.74	1.00

注:峨眉山玄武岩分析数据来源于文献[12]。

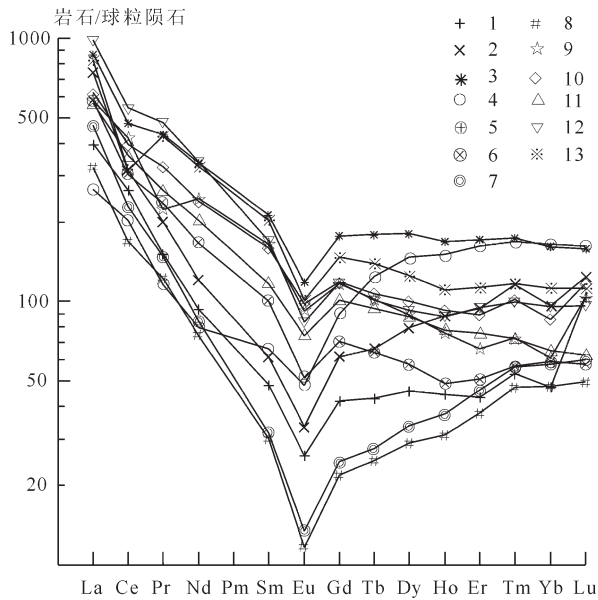


图3 滇东南主要铝土矿床铝土矿、铁质铝土矿稀土元素配分模式曲线图

(球粒陨石值据 Boynton, 1984^[17]; 序号同表2)

Fig.3 Chondrite-normalized REE patterns of bauxites and iron bauxites of primary bauxites deposits, southeast Yunnan Province (chondrite REE values after Boynton, 1984^[17]; sequence number as for Table 2)

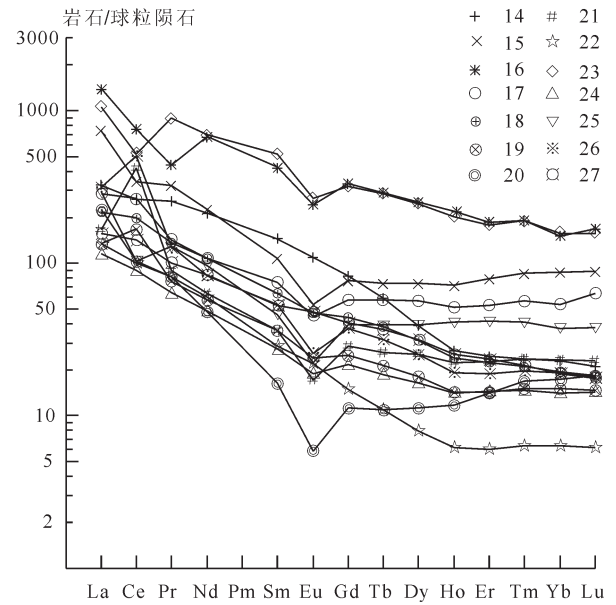


图4 滇东南主要铝土矿床泥质铝土矿、铁铝质岩、铁质岩、菱镁矿稀土元素配分模式曲线图

(球粒陨石值据 Boynton, 1984^[17]; 序号同表2)

Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns of argillaceous bauxites, allites, ferruginous rocks and magnesites of primary bauxites deposits, southeast Yunnan Province (chondrite REE values after Boynton, 1984^[17]; sequence number as for Table 2)

中等, $(Gd/Yb)_N=1.02\sim 1.77$; $\delta Eu=0.55\sim 0.82$, 具中等铈负异常-弱铈负异常; $\delta Ce=0.65\sim 2.70$, 具中等铈负异常-中等铈正异常, 多数样品表现为铈弱负异常, 说明铝质粘土岩经历了较明显的沉积作用^[13,14] (表2)。稀土配分曲线为向右倾斜斜率中等的弱“V”字型曲线, 属轻稀土富集型^[13,15-16] (图5)。

灰岩稀土总量总体低, $\sum REE=27.63\times 10^{-6}\sim 76.17\times 10^{-6}$; 轻稀土总量低, $LREE=11.47\times 10^{-6}\sim 60.37\times 10^{-6}$; 重稀土总量低, $HREE=2.19\times 10^{-6}\sim 14.69\times 10^{-6}$; 轻重稀土分馏程度不等, $LREE/HREE=2.12\sim 10.88$, $(La/Yb)_N=2.56\sim 18.59$; 轻稀土元素分馏程度不等, $(La/Sm)_N=1.84\sim 11.66$; 重稀土元素分馏程度中等, $(Gd/Yb)_N=1.20\sim 1.56$; $\delta Eu=0.52\sim 0.71$, 具中等铈负异常-弱铈负异常; $\delta Ce=0.40\sim 1.71$, 具弱铈负异常-中等铈正异常(表2)。稀土配分曲线为向右陡倾的弱“V”字型曲线或近水平的弱“V”字型曲线, 多属轻稀土富集型^[13,15-16] (图6)。

玄武岩稀土总量差别较大, $\sum REE=213.38\times 10^{-6}\sim 517.30\times 10^{-6}$; 轻稀土总量较低, $LREE=202.14\times 10^{-6}\sim 242.12\times 10^{-6}$; 重稀土总量差别较大, $HREE=11.24\times$

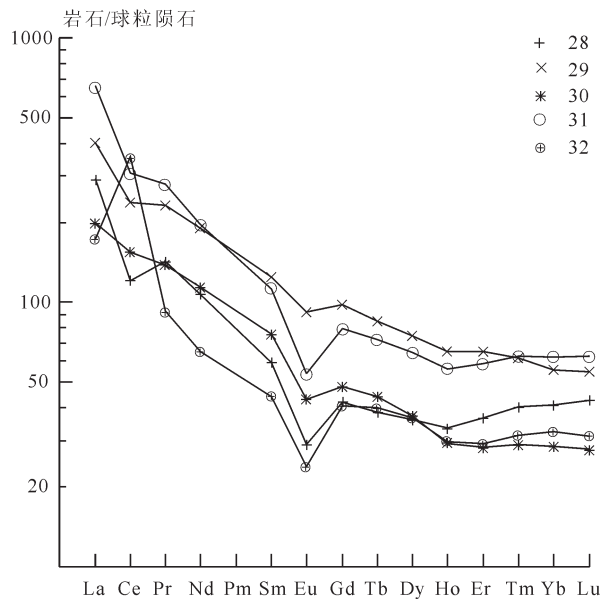


图5 滇东南主要铝土矿床铝质粘土岩稀土元素配分模式曲线图

(球粒陨石值据 Boynton, 1984^[17]; 序号同表2)

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns of aluminum clay stones of primary bauxites deposits, southeast Yunnan Province (chondrite REE values after Boynton, 1984^[17]; sequence number as for Table 2)

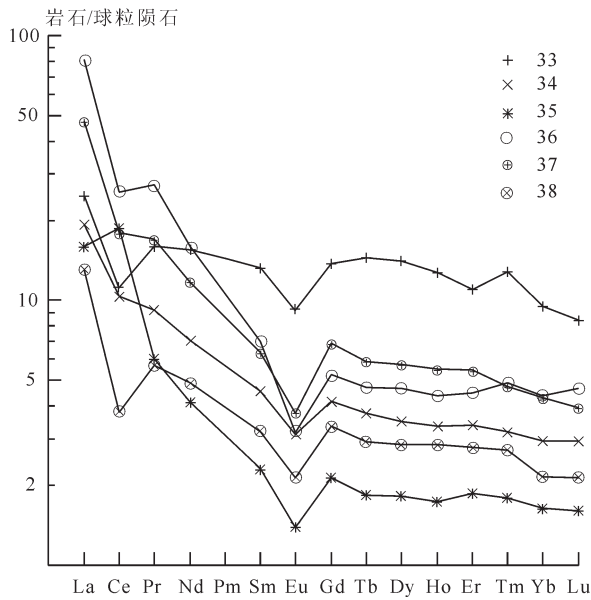


图6 滇东南主要铝土矿床下伏威宁组灰岩稀土元素配分模式曲线图
(球粒陨石值据 Boynton, 1984^[17]; 序号同表2)

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns of limestones of Weining Formation in primary bauxites deposits, southeast Yunnan Province (chondrite REE values after Boynton, 1984^[17]; sequence number as for Table 2)

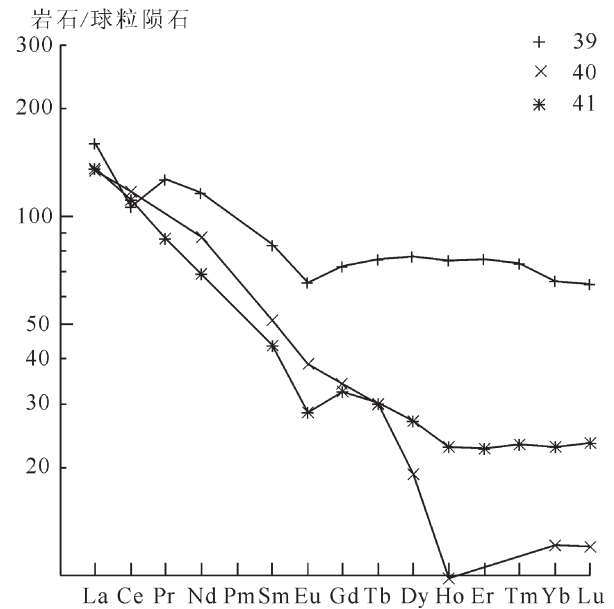


图7 滇东南主要铝土矿床下伏峨眉山组玄武岩、凝灰岩稀土元素配分模式曲线图
(球粒陨石值据 Boynton, 1984^[17]; 序号同表2)

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns of basalts and tuff of Emeishan Formation in primary bauxites deposits, southeast Yunnan Province (chondrite REE values after Boynton, 1984^[17]; sequence number as for Table 2)

$10^{-6} \sim 87.15 \times 10^{-6}$; 轻重稀土分馏程度不等, $LREE/HREE=2.78 \sim 17.98$, $(La/Yb)_N=2.43 \sim 10.99$ (表2)。稀土配分曲线为向右陡倾的弱“V”字型曲线或向右缓倾的弱“V”字型曲线, 属轻稀土富集型^[13,15-16] (图7)。

凝灰岩稀土总量较低, $\Sigma REE=265.60 \times 10^{-6}$; 轻稀土总量低, $LREE=194.79 \times 10^{-6}$; 重稀土总量较低, $HREE=31.18 \times 10^{-6}$; 轻重稀土分馏程度中等, $LREE/HREE=6.25$, $(La/Yb)_N=6.01$; 轻稀土元素分馏程度较高, $(La/Sm)_N=3.11$; 重稀土元素分馏程度较高, $(Gd/Yb)_N=1.42$; $\delta Eu=0.74$, 具弱铕负异常; $\delta Ce=1.00$, 无铈异常(表2)。稀土配分曲线为向右倾斜斜率中等的弱“V”字型曲线, 属轻稀土富集型^[13,15-16] (图7)。

2.3 滇东南主要铝土矿床微量元素特征

与维氏地壳丰度值相比, 铝土矿大离子亲石元素 Li、K、U 和高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf、Th 以及过渡元素 V、Cr、Ti 含量高于地壳丰度值, 过渡元素 Ni 和分散元素 Ga 含量与地壳丰度值相当, 其余各元素则明显低于地壳丰度值; 铁质铝土矿大离子亲石元素 Li、U 和高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf、Th 以及过渡元素 V、Cr、Ti 等元素表现出富集, 分散元素 Ga 和过渡

元素 Ni 元素富集贫化不明显, 其余元素则表现出贫化; 泥质铝土矿大离子亲石元素 Li、U 和高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf、Th 以及过渡元素 V、Cr、Ti 等的浓集克拉克值明显大于 1, 而大离子亲石元素 Sr 和分散元素 Ga 的浓集克拉克值接近于 1, 其余各元素的浓集克拉克值小于 1; 铁铝质岩的大离子亲石元素 Li、U 和高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf、Th 以及过渡元素 V、Cr、Ti 和分散元素 Ga 含量高于地壳丰度值, 其余各元素则明显低于地壳丰度值; 铁质岩之中多数元素表现为不同程度的贫化, 而高场强元素 Hf 和大离子亲石元素 U 以及过渡元素 Cr、Ti 富集特征明显; 菱镁矿之中高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf 和大离子亲石元素 Li、U 以及过渡元素 V、Cr、Ni、Ti 和分散元素 Ga 含量高于地壳丰度值, 其余各元素则明显低于地壳丰度值; 铝质粘土岩大离子亲石元素 Li、U 和高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf、Th 以及过渡元素 Cr、Ti 和分散元素 Ga 的浓集克拉克值明显大于 1, 其余各元素的浓集克拉克值小于 1; 绝大多数灰岩之中微量元素含量很低, 明显低于地壳丰度值; 玄武岩之中大离子亲石元素 Rb、U 和过渡元素 Co 的含量明显低

于地壳丰度值,而高场强元素 Zr、Hf 和过渡元素 V、Ti、Cr、Ni 明显高于地壳丰度值,其余各元素富集贫化特征不一;凝灰岩则表现出高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf 和过渡元素 V、Ti、Cr、Ni 以及分散元素 Ga 富集特征,其余各元素则表现出贫化特征^[18](表3)。

3 伴生稀土元素和分散元素

3.1 稀土元素

滇东南地区铝土矿床之中稀土元素含量高,铁质铝土矿-铁质岩-泥质铝土矿-铝土矿-铝质粘土岩-铁铝质岩-菱镁矿稀土含量依次增高,稀土总量算术平均值分别为 $1047.42.38 \times 10^{-6}$ ($n=31$)、 821.88×10^{-6} ($n=7$)、 737.90×10^{-6} ($n=6$)、 733.19×10^{-6} ($n=41$)、 709.60×10^{-6} ($n=37$)、 683.74×10^{-6} ($n=35$)、 338.68×10^{-6} ($n=5$)。全区含铝岩系稀土总量算术平均值 769.10×10^{-6} ($n=162$),接近稀土矿床的边界品位(800×10^{-6});轻稀土总量平均值为 538.50×10^{-6} ($n=162$),高于吸附性稀土矿床的边界品位(500×10^{-6});重稀土(ΣY)总量平均值 230.60×10^{-6} ($n=162$),接近吸附性稀土矿床的边界品位(300×10^{-6})^[19]。

3.2 分散元素

前人研究表明,滇东南地区铝土矿之中普遍含有分散元素镓(Ga)^[20]。本次研究工作,对滇东南铝土矿伴生的分散元素进行了研究,与前人的研究结果一致,铝土矿之中普遍伴生镓(Ga),其中有近70%以上的样品镓含量高于铝土矿之中镓的最低工业品位(20×10^{-6})^[19];镓含量为 $5.64 \times 10^{-6} \sim 53.57 \times 10^{-6}$,全区算术平均值为 28.77×10^{-6} ($n=162$),仍高于铝土矿之中镓的最低工业品位(20×10^{-6})^[19]。其余各分散元素(Ge、In、Tl)含量较低,均低于最低的工业指标,不具备综合利用条件。

3.3 黑色金属元素

滇东南铝土矿床之中除伴生黑色金属元素 Fe 以外,还普遍伴生 Ti。滇东南铝土矿床含铝岩系表现出菱镁矿→铁铝质岩→泥质铝土矿→铁质铝土矿→铝土矿→铝质粘土岩→铁质岩 TiO₂ 含量依次降低,平均含量分别为 5.92% ($n=5$)→ 5.76% ($n=35$)→

5.34% ($n=6$)→ 4.95% ($n=31$)→ 4.22% ($n=41$)→ 3.66% ($n=37$)→ 2.41% ($n=7$)。本区含钛矿物主要为锐钛矿,其次为金红石。全区含铝岩系 TiO₂ 含量平均值 4.58% ($n=162$)(表1),高于钛原生矿床的边界品位(1%)^[19]。

3.4 稀有金属元素

天生桥—者五舍铝土矿床之中,稀有金属元素 Nb、Ta、Zr、Hf 由铝土矿→铁质铝土矿→铁铝质岩→铝质粘土岩→泥质铝土矿→铁质岩→菱镁矿依次含量降低(表3),并且稀有金属元素 Nb 含量较高。Nb 含量为 $20 \times 10^{-6} \sim 231 \times 10^{-6}$,全区平均值为 120.95×10^{-6} ($n=162$)(表3),高于风化壳铌矿床的边界品位 $Nb \geq 56.8 \times 10^{-6}$, $Nb_2O_5 \geq 0.008\%$ ^[19]。

4 成矿物质讨论

目前,关于沉积型铝土矿床成因的认识趋于统一,即“古风化壳-沉积”这一模式^[20,21];但对成矿物质来源,却长期存在着“基底说”和“古陆说”之争^[22]。基底说认为沉积型铝土矿的成矿物质来源于下伏的碳酸盐岩,而古陆说则认为沉积型铝土矿的成矿物质来源于附近古陆的硅酸盐。对于滇东南铝土矿床成矿物质来源也有基底说、古陆说,而且基底说又有灰岩、玄武岩、灰岩与玄武岩混合说之争。蒋秀坤等认为红舍克铝土矿床成矿物质来源于越北古陆的岩浆岩、变质岩^[3];成功等^[2]、王行军等^[5,6]、王根厚等^[20]的研究表明滇东南铝土矿成矿物质来源于下伏威宁组灰岩;冯晓宏等的研究表明滇东南铝土矿成矿物质来源于峨眉山组灰岩^[9];高泽培等^[4]、黄仁新^[10]、王训练等^[9]认为滇东南铝土矿成矿物质来源于下伏威宁组灰岩和峨眉山组玄武岩,并且以玄武岩为主。

4.1 稀土元素特征

4.1.1 稀土元素配分特征

前人研究表明,稀土元素的分配在沉积作用、成岩作用,甚至低级变质作用过程中,基本保持不变,也就是说稀土元素一般不受成岩作用影响^[13-14,16,23]。因此,稀土元素是研究沉积岩物质来源的示踪剂。戴

①王根厚,王行军. 云南省铝土矿成矿规律与成矿预测研究. 2011.

②王根厚,王行军. 滇东南主要铝土矿床构造地质和成矿作用研究. 2013.

③云南省有色地质勘查院. 云南省砚山县红舍克铝土矿勘探报告. 2005.

④王训练,周洪瑞. 云南省铝土矿主要成矿期岩相古地理和构造环境研究. 2011.

表3 滇东南主要铝土矿各类岩性微量元素(10^{-6})分析结果及特征参数一览Table 3 Trance element (10^{-6}) content and characteristic parameters for primary bauxite deposits, southeast Yunnan Province

序号	矿床	样数	岩性	Cs	Rb	Sr	Ba	Ga	Nb	Ta	Zr	Hf	Th	V	Cr	Co	Ni	Li	U	Th/U	Sr/Ba
1	天生桥	20	铝土矿	0.9	2.2	54	42	21	217	12.4	2086	53	56	229	222	18	38	109	15.7	3.54	1.27
2	砂子塘	3	铝土矿	0.3	0.4	14	9	16	148	12.0	1339	33	45	97	265	8	64	49	6.3	7.13	1.52
3	大铁	3	铝土矿	3.0	2.5	280	114	54	147	9.3	976	24	61	164	492	39	83	198	5.3	11.54	2.46
4	飞尺角	2	铝土矿	0.4	2.5	42	13	24	137	8.3	1127	28	55	172	543	19	43	181	6.8	8.00	3.32
5	红舍克	7	铝土矿	1.0	3.9	93	23	32	102	5.9	877	22	40	149	465	62	89	199	8.5	4.68	4.11
6	白色姑	3	铝土矿	0.5	2.2	58	30	13	166	9.0	1561	38	40	216	387	7	12	38	6.5	6.16	1.94
7	水结	2	铝土矿	2.9	11.4	60	46	10	74	4.7	889	22	27	239	452	9	57	276	8.2	3.28	1.32
8	芹菜塘	1	铝土矿	2.3	8.1	166	80	9	100	6.2	857	23	37	176	487	1	6	261	20.1	1.82	2.09
9	天生桥	14	铁质铝土矿	0.5	0.3	65	25	27	182	12.5	1651	43	48	286	243	23	51	89	19.3	2.46	2.61
10	砂子塘	3	铁质铝土矿	1.0	0.9	18	62	28	133	11.5	1011	26	30	236	806	29	128	513	4.4	6.88	0.29
11	大铁	8	铁质铝土矿	2.1	3.4	245	27	23	115	6.8	821	20	34	406	360	55	72	79	6.2	5.55	9.20
12	红舍克	2	铁质铝土矿	1.1	4.2	214	24	14	115	6.0	850	19	31	258	396	5	58	260	11.2	2.81	9.05
13	白色姑	4	铁质铝土矿	1.9	2.5	58	53	34	119	7.5	944	24	48	140	298	18	43	274	6.3	7.52	1.10
14	大铁	4	泥质铝土矿	2.4	8.0	418	111	21	86	5.6	594	16	27	795	296	5	46	140	10.9	2.49	3.77
15	红舍克	2	泥质铝土矿	2.7	6.3	357	37	45	71	4.9	451	15	42	167	574	2	36	224	17.0	2.45	9.69
16	天生桥	5	铁铝质岩	0.7	0.4	109	25	30	176	9.7	1454	37	42	285	184	23	106	70	20.4	2.05	4.33
17	砂子塘	3	铁铝质岩	3.2	4.6	40	40	31	129	8.6	860	21	38	217	507	20	76	435	6.1	6.26	1.01
18	大铁	19	铁铝质岩	2.2	5.3	422	67	35	82	5.1	548	13	20	476	233	45	97	99	4.8	4.13	6.27
19	飞尺角	4	铁铝质岩	0.6	3.6	115	32	28	110	7.0	736	18	27	550	277	28	56	41	7.1	3.88	3.55
20	红舍克	1	铁铝质岩	3.3	6.8	666	114	24	90	6.4	632	19	59	280	419	1	37	63	27.3	2.17	5.83
21	白色姑	1	铁铝质岩	0.3	2.4	59	19	41	231	13.7	1553	36	47	277	438	28	49	144	5.8	8.18	3.19
22	水结	2	铁铝质岩	0.2	4.3	135	62	37	91	5.8	551	13	12	587	286	14	55	79	4.3	2.73	2.19
23	天生桥	2	铁质岩	1.4	0.7	31	192	24	97	7.4	911	27	29	199	140	28	69	71	30.0	0.98	0.16
24	大铁	3	铁质岩	1.8	6.1	125	32	18	39	2.4	274	6	8	161	137	66	55	24	3.9	2.15	3.89
25	飞尺角	1	铁质岩	1.3	2.5	56	70	13	20	1.4	202	5	11	108	183	14	63	99	5.1	2.25	0.80
26	杨柳井	1	铁质岩	0.4	2.5	48	30	6	94	5.5	963	24	19	174	532	6	30	9	9.6	1.99	1.57
27	大铁	5	菱镁矿	3.2	4.0	1242	76	24	45	3.0	314	8	12	485	185	45	81	185	2.8	4.29	16.40
28	砂子塘	3	铝质粘土岩	2.5	2.4	238	26	26	92	5.9	568	16	34	185	523	6	39	577	10.1	3.39	9.01
29	大铁	20	铝质粘土岩	4.2	10.9	484	157	37	80	5.4	540	14	19	432	211	62	119	183	5.8	3.38	3.09
30	飞尺角	6	铝质粘土岩	0.7	3.8	103	29	34	113	7.5	782	20	34	547	287	9	66	158	8.9	3.84	3.58
31	红舍克	7	铝质粘土岩	5.8	10.1	257	57	37	65	4.7	587	16	45	165	436	4	58	270	14.3	3.13	4.55
32	白色姑	1	铝质粘土岩	2.1	9.9	38	369	39	162	10.1	1162	29	58	174	220	91	47	370	9.4	6.15	0.10
33	天生桥	13	灰岩	0.1	0.4	102	18	0	1	0.1	15	0	0	12	7	1	6	3	0.4	1.22	5.55
34	砂子塘	3	灰岩	0.1	0.8	80	9	0	0	0.0	13	0	0	11	14	1	6	3	0.3	1.22	9.15
35	大铁	11	灰岩	0.2	2.4	89	16	1	1	0.1	21	1	0	14	12	1	6	2	0.2	1.29	5.51
36	飞尺角	1	灰岩	0.1	2.5	115	26	0	1	0.1	20	0	0	11	14	1	5	1	0.3	1.20	4.45
37	红舍克	1	灰岩	10.6	35.3	80	83	40	56	3.8	512	13	36	206	318	8	71	198	11.4	3.12	0.96
38	白色姑	1	灰岩	0.2	3.3	67	16	1	1	0.1	25	1	0	10	20	1	6	2	0.2	2.10	4.10
39	大铁	3	玄武岩	15.3	38.3	191	336	31	32	2.2	276	7	7	348	145	37	133	108	2.1	3.49	0.57
40	峨眉山	51	玄武岩	0.5	34.1	585	1666	0	0	0.0	332	8	6	334	164	46	77	0	0.9	7.26	0.35
41	白色姑	1	凝灰岩	12.3	41.4	153	227	21	37	2.4	258	6	8	260	326	35	114	22	1.4	5.79	0.67

注:峨眉山玄武岩分析数据来源于文献[12]。

塔根等^[24]、王力等^[25]、李普涛等^[26]和叶霖等^[27]利用稀土元素配分特征对广西、贵州铝土矿矿床的成矿物质来源进行了研究。对比含铝岩系的稀土配分曲线与下伏威宁组灰岩、峨眉山组玄武岩的稀土配分曲线,发现含铝岩系的稀土配分曲线与威宁组灰岩较为相似,这说明滇东南铝土矿的成矿物质来源于下伏威宁组灰岩。

4.1.2 δCe

在岩石风化过程中,在弱酸条件下, Ce^{3+} 被氧化成 Ce^{4+} ,与其他稀土元素分离,而且 Ce^{4+} 极易水解而在原地停留下来,使淋出的溶液中贫Ce,因此造成海水中的Ce强烈亏损;因此,对于沉积岩Ce负异常,反映了它是海相的生物或化学沉积^[13]。滇东南地区铝土矿床含铝岩系 δCe 为0.49~3.30,有近三分之一的样品具有铈正异常,这说明滇东南铝土矿床含铝岩系沉积作用改造不明显。

4.2 微量元素特征

4.2.1 Th/U 比值

前人曾利用Th/U研究铝土矿成因,认为铝土矿为强烈红土化作用的产物,其 $\text{Th}/\text{U}>7$;还原环境下的沉积产物,其 $\text{Th}/\text{U}<2$; $\text{Th}/\text{U}=2\sim 7$ 时,可能是风化作用不彻底或者沉积混杂所致;并据此判断铝土矿的原地残积和异地沉积成因^[25,28-29]。滇东南地区铝土矿Th/U比值为0.98~11.54,平均值为4.04,说明其成矿物质来源于风化壳和海水沉积。

4.2.2 Sr/Ba 比值

前人利用Sr/Ba比值,研究沉积物的形成环境; $\text{Sr}/\text{Ba}>1$,沉积物形成海水环境; $\text{Sr}/\text{Ba}<1$,沉积物形成于淡水环境; $1>\text{Sr}/\text{Ba}>0.6$,沉积物形成于半咸水环境^[25,29-31]。滇东南地区含铝岩系Sr/Ba为0.10~16.90,并且多数大于1,说明滇东南地区铝土矿形成于海相环境,这也说明滇东南铝土矿经历了海水的沉积作用。

4.3 钛率

前人利用铝土矿钛率与基底灰岩、古陆变质岩、岩浆岩等岩性钛率相关性特征,研究铝土矿的成矿物质来源^[4,22,32-38]。

滇东南地区铝土矿床含铝岩系的钛率值为3.41~44.02,下伏威宁组灰岩的钛率值为3.15~44.17,而峨眉山组玄武岩的钛率值为3.68~4.79。从钛率值来看,滇东南地区铝土矿床的钛率与下伏威

宁组灰岩的钛率非常接近,二者亲缘关系明显。

5 结 论

(1)滇东南地区铝土矿床稀土元素、分散元素镓(Ga)、黑色金属元素钛(Ti)和稀有金属元素铌(Nb)含量高,已达最低工业品位,可以综合利用。

(2)滇东南地区铝土矿床部分样品具铈正异常, Th/U 比值中等,说明其成矿物质主要来源于风化壳,部分来源于沉积作用。

(3)滇东南地区铝土矿床样品的稀土配分曲线与下伏威宁组灰岩的稀土配分曲线相近,而与峨眉山组玄武岩的稀土配分曲线相差较大,说明滇东南铝土矿床与下伏威宁组灰岩亲缘关系明显。

(4)滇东南地区铝土矿床样品钛率比值高,且变化范围较大,与下伏威宁组灰岩的钛率值一致,这说明滇东南铝土矿床的成矿物质来源于下伏威宁组灰岩。

(5)滇东南地区铝土矿床Sr/Ba 比值较高,多大于1,这说明滇东南地区铝土矿床形成于海相环境,成矿物质经历了沉积作用的改造。

致谢:在野外工作期间,得到了云南省有色地质局、西南有色昆明勘测设计(院)股份有限公司有关领导和同仁的大力支持,在此表示诚挚的谢意!

参考文献(References):

- [1] 缪鹰. 文山杨柳井铝土矿矿床成因及找矿标志[J]. 云南地质, 2009, 28(3): 291-293.
- Miao Ying. The genesis and prospecting criteria of the bauxite deposit in Wenshan[J]. Yunnan Geology, 2009, 28(3): 291-293 (in Chinese with English abstract).
- [2] 成功, 杨震, 黄璧. 板茂铝土矿地质特征及成因分析[J]. 轻金属, 2010, 10: 8-12.
- Chen Gong, Yang Zhen, Huang Bi. Bauxite geological characteristics and genetic analysis of Banmao[J]. Light Metal, 2010, 10: 8-12 (in Chinese with English abstract).
- [3] 蒋秀坤, 李亚辉. 云南文山红舍克铝土矿成因分析[J]. 云南地质, 2012, 31(3): 316-319.
- Jiang Xiukun, Li Yahui. An analysis of the genesis of Hongsheke bauxite deposit in Wenshan, Yunnan[J]. Yunnan Geology, 2012, 31(3): 316-319 (in Chinese with English abstract).
- [4] 高泽培, 徐自斌, 任运华. 云南省丘北县大铁矿区铝土矿床特征分析与找矿标志[J]. 云南冶金, 2012, 41(4): 1-6.
- Gao Zepei, Xu Zibin, Ren Yunhua. Features analysis and prospecting marks of bauxite deposit at Datie mining area in

- Qiubei county of Yunnan province [J]. *Yunnan Metallurgy*, 2012, 41 (4): 1-6 (in Chinese with English abstract).
- [5] 王行军, 王根厚, 周洁, 等. 滇东南丘北县大铁铝土矿稀土元素特征研究[J]. *地球学报*, 2013, 34(增刊1): 127-134.
Wang Xingjun, Wang Genhou, Zhou Jie, et al. REE characteristics of the Datie bauxite deposit in Qiubei County, southeast Yunnan Province [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2013, 34(Sup. 1): 127-134 (in Chinese with English abstract).
- [6] 王行军, 王根厚, 周洁, 等. 滇东南文山市天生桥一者五舍铝土矿床地球化学特征研究[J]. *矿物学报*, 2013, 33(4): 485-496.
Wang Xingjun, Wang Genhou, Zhou Jie, et al. Geochemical characters of the Tianshengqiao-Zhewushe bauxite deposit, Southeastern Yunnan Province [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2013, 33(4): 485-496 (in Chinese with English abstract).
- [7] 刘加强, 毛志芳, 王训练, 等. 滇东南地区晚二叠世吴家坪早期岩相古地理[J]. *古地理学报*, 2012, 13(3): 365-370.
Liu Jiaqiang, Mao Zhifang, Wang Xunlian, et al. Lithofacies palaeogeography of the Late Permian early Wuchiapingian in southeastern Yunnan Province [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 13(3): 365-370 (in Chinese with English abstract).
- [8] 范良军, 朱观强, 杨文金. 滇东南地区铝土矿成矿与断裂关系浅析[J]. *广东科技*, 2012, 9: 117-118.
Fan Liangjun, Zhu Guanqiang, Yang Wenjin. Analysis of the relationship bauxite mineralization and faults in the southeastern of Yunnan province [J]. *Guangdong Science & Technology*, 2012, 9: 117-118 (in Chinese).
- [9] 冯晓宏, 王臣兴, 崔子良, 等. 滇东南铝土矿成矿物质来源探讨[J]. *云南地质*, 2009, 28(3): 233-242.
Feng Xiaohong, Wang Chenxing, Cui Ziliang, et al. The ore sources exploration of bauxite in Southeast Yunnan [J]. *Yunnan Geology*, 2009, 28(3): 233-242 (in Chinese with English abstract).
- [10] 黄仁新. 滇东南地区铝土矿床类型[J]. *云南地质*, 1992, 11(2): 121-129.
Huang Renxin. Types of bauxite deposits in southeastern Yunnan [J]. *Yunnan Geology*, 1992, 11(2): 121-129 (in Chinese with English abstract).
- [11] 范玉周, 范礼刚, 尹焕菊. 滇东南铝的地球化学异常及资源预测[J]. *云南地质*, 2010, 29(3): 251-256.
Fan Yuzhou, Fan Ligang, Yin Huanju. The Al resource prognosis and geochemical anomaly in SE Yunnan [J]. *Yunnan Geology*, 2010, 28(3): 251-256 (in Chinese with English abstract).
- [12] 汪云亮, 李臣初, 周蓉生, 等. 地球化学原理及其应用——兼论峨眉山玄武岩的成因[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1993: 61-66.
Wang Yunliang, Li Chenchu, Zhou Rongsheng, et al. Principle on Trace Element Geochemistry of Igneous Rocks and Its Applications — and Demonstration of the Petrogenesis of Emeishan Basalts [M]. Chendu: Chendu University of Science and Technology Press, 1993: 61-66 (in Chinese).
- [13] 王中刚, 于学元, 赵振华. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 76-93, 247-291.
Wang Zhonggang, Yu Xueyuan, Zhao Zhenhua. REE Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1989: 76-93, 247-291 (in Chinese).
- [14] 刘英俊, 曹励明. 元素地球化学导论[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 57-80.
Liu Yingjun, Cao Liming. Element Geochemistry Introduction [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 57-80 (in Chinese).
- [15] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992: 74-125.
Li Changnian. Trace Elements in Igneous Petrology [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1992: 74-125 (in Chinese).
- [16] 陈德潜, 陈刚. 实用稀土元素地球化学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990: 59-173.
Chen Deqian, Chen Gang. Practical REE Geochemistry [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1990: 59-173 (in Chinese).
- [17] Boynton W V. Geochemistry of the rare earth element: meteorite studies [C]//Henderson P (ed.). *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, 1984: 66-114.
- [18] 赵伦山, 张本仁. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 31-39.
Zhao Lunshan, Zhang Benren. Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988: 31-39 (in Chinese).
- [19] 邵厥年, 陶维屏. 矿产资源工业要求手册[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 117-120, 137-144, 275-300.
Shao Juenian, Tao Weiping. Mineral Resources Industry Requirements Manual [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010: 117-120, 137-144, 275-300 (in Chinese).
- [20] 廖士范. 论铝土矿床成因及矿床类型[J]. *华北地质矿产杂志*, 1994, 9 (2): 153-160.
Liao Shifan. A discussion on the genesis and classification of bauxite deposits [J]. *Jour Geol. & Min. Res. North China*, 1994, 9 (2): 153-160 (in Chinese with English abstract).
- [21] 刘长龄. 论铝土矿的成因学说[J]. *河北地质学院学报*, 1992, 15 (2): 195-204.
Liu Changling. On the theory of bauxite genesis [J]. *Journal of Hebei College of Geology*, 1992, 15(2): 195-204 (in Chinese with English abstract).
- [22] 李启津, 杨国高, 侯正洪. 铝土矿成矿理论研究中的几个问题[J]. *矿产与地质*, 1996, 10(1): 22-26.
Li Qijin, Yang Guogao, Hou Zhenghong. Several issues of bauxite ore theoretical studies [J]. *Mineral Resources and Geology*, 1996, 10(1): 22-26 (in Chinese).
- [23] 陈平, 柴东浩. 山西地块石炭纪铝土矿沉积地球化学研究[M]. 太原: 山西科学出版社, 1997: 68-127.
Chen Ping, Chai Donghao. Sedimentary Geochemistry of Carboniferous Bauxite Deposits in Shanxi Massif [M]. Taiyuan:

- Shanxi Science and Technology Press, 1997:68-127(in Chinese with English abstract).
- [24] 戴塔根, 龙永珍, 张起钻, 等. 桂西某些铝土矿床稀土元素地球化学研究[J]. 地质与勘探, 2003, 39(4): 1-5.
Dai Tagen, Long Yongzhen, Zhang Qizuan, et al. REE geochemistry of some bauxite deposits in the western Guangxi district [J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(4): 1-5 (in Chinese with English abstract).
- [25] 王力, 龙永珍, 彭省临. 桂西铝土矿成矿物质来源的地质地球化学分析[J]. 桂林工学院学报, 2004, 24(1): 1-6.
Wang Li, Long Yongzhen, Peng Shenglin. Geologic and geochemical study on material derivation of bauxite deposits in western Guangxi [J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 2004, 24(1): 1-6 (in Chinese with English abstract).
- [26] 李普涛, 张起钻. 广西靖西县三合铝土矿稀土元素地球化学研究[J]. 矿产与地质, 2008, 22(6): 536-545.
Li Putao, Zhang Qizuan. Research on geochemistry of REE in the Sanhe bauxite deposit in Jingxi County, Guangxi[J]. Mineral Resources and Geology, 2008, 22(6): 536-545 (in Chinese with English abstract).
- [27] 叶霖, 程曾涛, 潘自平. 贵州修文小山坝铝土矿中稀土元素地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26(3): 228-233.
Ye Lin, Cheng Zengtao, Pan Ziping. The REE geochemical characteristics of the Xiaoshanba bauxite deposit, Guizhou [J]. Bulletin Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2007, 26(3): 228-233 (in Chinese with English abstract).
- [28] Laukas T C. Origin of Bauxite at Eufaula Alabanma[J]. USA Clay Minerals, 1983, 18: 350-361.
- [29] 俞缙, 李普涛, 于航波. 靖西三合铝土矿微量元素地球化学特征与成矿环境研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2009, 28(3): 289-292.
Yu Ji, Li Putao, Yu Hangbo. Analysis on trace- element geochemical characteristics and ore- forming environment of bauxite mine in Sanhe town of Jingxi county [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2009, 28 (3): 289-292 (in Chinese with English abstract).
- [30] 黄镇国, 李平日, 张仲英, 等. 珠江三角洲形成发育演变[M]. 广州: 科学普及出版社广州分社, 1982:63-104.
Huang Zhenguo, Li Pingri, Zhang Zhongying, et al. The Formation, Development and Evolution of the Pearl River Delta [M]. Guangzhou: Guangzhou Branch, Popular Science Press, 1982:63-104 (in Chinese).
- [31] 蓝先洪, 马道修, 徐明广, 等. 珠江三角洲若干地球化学标志及指相意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1987, 7(1): 39-49.
Lan Xianhong, Ma Daoxiu, Xu Mingguang, et al. Some geochemical indicators of the Pearl River Delta and their facies significance [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1987, 7 (1): 39-49 (in Chinese with English abstract).
- [32] 王恩孚. 论中国古生代铝土矿成因[J]. 轻金属, 1987, 1: 1-5.
Wang Enfu. A discussion on genesis of China Paleozoic bauxite deposits [J]. Light Metal, 1987, 1: 1-5 (in Chinese).
- [33] 吴国炎. 华北铝土矿的物质来源及成矿模式探讨[J]. 河南地质, 1997, 15(3): 161-166.
Wu Guoyan. A discussion on material source and metallogenic model of bauxite deposits in north China [J]. Henan Geology, 1997, 15(3): 161-166 (in Chinese with English abstract).
- [34] 袁跃清. 河南省铝土矿床成因探讨[J]. 矿产与地质, 2005, 19(1): 52-56.
Yuan Yueqing. Genesis of bauxite deposit in Henan [J]. Mineral Resources and Geology, 2005, 19(1): 52-56 (in Chinese with English abstract).
- [35] 李建强, 刘志乾. 广西三水铝土矿床地质特征及成矿探讨[J]. 甘肃冶金, 2008, 30(6): 56-64.
Li Jianqiang, Liu Zhiqian. Geological characteristics and genesis of Sanshui bauxite deposit, Guangxi [J]. Gansu Metallurgy, 2008, 30(6): 56-64 (in Chinese).
- [36] 卢社香. 河南省的铝土矿[J]. 地质与资源, 2009, 18(1): 37-45.
Lu Shexiang. The bauxite deposits in Henan Province, China [J]. Geology and Resources, 2009, 18(1): 37-45 (in Chinese with English abstract).
- [37] 李传班, 刘幼平, 武国辉, 等. 贵州省凯里地区铝土矿床控矿因素研究[J]. 地质与勘探, 2012, 48(1): 31-37.
Li Chuanban, Liu Youping, Wu Guohui, et al. Ore- controlling factors of the bauxite deposits in the Kaili area, Guizhou Province [J]. Geology and Exploration, 2012, 48(1): 31-37 (in Chinese with English abstract).
- [38] 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).