第30卷 第2期
2015年6月:167-173

地 质 找 矿 论 丛
Contributions to Geology and Mineral Resources Research

Vol.30 No.2
Jun.2015:167-173

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2015.02.002

滇东南铝土矿床共生矿产及伴生矿产研究

王行军[1,2],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.河北省地球物理勘查院,河北 廊坊 065000;
3.云南省有色地质局,昆明 650051;4.西南有色昆明勘测设计(院)股份有限公司,昆明 650051)

摘要: 滇东南地区铝土矿资源丰富。文章以滇东南主要铝土矿床为研究对象,对其中共生、伴生的矿产进行了评价。全区含铝岩系 $w(TiO_2)$平均值为4.58%,明显高于钛原生矿床的边界品位,并且有92.6%的样品分析结果已超过钛原生矿床的边界品位;$w(\Sigma REE)$平均值为769.10×10^{-6},接近吸附性稀土矿床的边界品位,其中有45.7%的样品分析结果超过吸附性稀土矿床的边界品位;$w(Nb)$平均值为121.03×10^{-6},为风化壳型铌矿床的边界品位的2倍多,并且有84.0%的样品分析结果高于风化壳型铌矿床的边界品位;$w(Ga)$平均值为28.86×10^{-6},高于铝土矿之中镓的最低工业品位,其中有68.5%样品的分析结果超过了铝土矿之中镓的最低工业品位。滇东南地区铝土矿床稀土元素、黑色金属元素钛和稀有金属元素铌含量高达边界品位,可考虑综合利用。

关键词: 滇东南;铝土矿床;共生矿产;伴生矿产;云南省

中图分类号: P611.22,P618.45 **文献标识码:** A

0 引言

滇东南地区铝土矿资源丰富,截至2013年底探明累计铝土矿资源量3.23×10^8 t,约占云南铝土矿资源量的76%。目前,滇东南地区已发现的铝土矿矿床(点)有34个(图1),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)。

前人对滇东南地区的这些铝土矿床曾进行过大量研究工作。缪鹰等[1-6]对杨柳井、板茂、红舍克、天生桥一者五舍等铝土矿床的地质特征、矿床成因及找矿标志进行了研究。黄仁新等[7-10]对滇东南地区铝土矿的类型、成因、找矿标志进行了研究。严健[11]、周洁[12]分别对丘北大铁铝土矿床和文山天生桥一者五舍铝土矿床的地球化学特征进行了研究,并对铝土矿的成矿物质来源进行了探讨。刘加强[13]、毛志芳[14]分别对滇东南地区、丘北地区岩相地古理进行了研究,认为滇东南地区在吴家坪早期为低能淤泥质海岸-局部浅海的沉积环境,铝土矿最有利的沉积环境为潮下带-浅海上部。冯晓宏等[3,5,11,15-17]对滇东南地区铝土矿的成矿物质进行了研究,但研究成果分歧较大,大致有碳酸盐说、玄武岩说、古陆说3种。刘汉和[18]在对红舍克铝土矿成地质特征和找矿前景研究时,对其中伴生的分散元素Ga进行简单的论述。高泽培等[17]对丘北县大铁铝土矿床的矿床特征进行了研究,同时对伴生的Fe_2O_3,TiO_2,Ga进行了评价。王根厚等②③在对滇东南地区铝土矿床的地球化学特征及成矿预测进行研究时,发现铝土矿床中的共生稀土元素,并普遍伴生分散元素Ga。王行军等对丘北大铁铝土矿床的稀土元素特征进行了研究,并对其成矿物质来源进

收稿日期: 2014-01-15; **改回日期:** 2014-04-09; **责任编辑:** 王传泰

基金项目: 云南省铝土矿成矿规律与成矿预测研究项目(云南有色地质局,编号:20100610-02)和滇东南主要铝土矿矿床构造地质和成矿作用研究项目(云南有色地质局,编号:20100610-03)联合资助。

作者简介: 王行军(1970—),男,博士,研究方向构造地质学,主要从事区域地质矿产调查研究工作。通信地址:北京市海淀区学院路29号,中国地质大学(北京)地球科学与资源学院;邮政编码:100083;E-mail:wxj1861@163.com

通信作者: 王根厚(1963—),男,教授,研究方向构造地质学,主要从事构造地质学的教学、科研工作。通信地址:北京市海淀区学院路29号,中国地质大学(北京)地球科学与资源学院;邮政编码:100083;E-mail:wgh@cugb.edu.cn

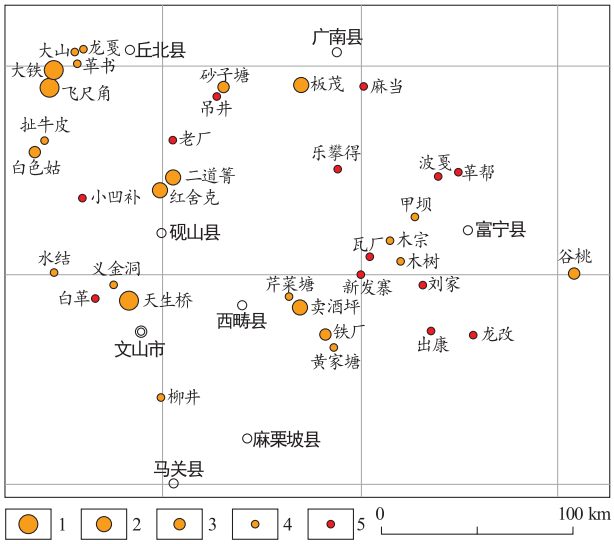

图 1 滇东南地区铝土矿床(点)分布图(据①改编)

Fig. 1 The distribution map of bauxite deposits (occurrences) in southeast Yunnan province

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

行了讨论,认为成矿物来源于下伏威宁组灰岩[19];对天生桥—者五舍铝土矿床的地球化学特征研究[20]显示其共生有稀土元素、黑色金属 Ti 以及稀有金属元素 Nb,所有共生矿产均可做为独立矿产资源开发利用。

虽然前人对滇东南地区铝土矿床的矿成地质特征、地球化学特征、矿床成因、找矿标志、找矿前景等方面进行过大量研究工作,但滇东南地区铝土矿的研究程度相对较低,而且对其中所共生、伴生各类矿产也没有进行过系统的研究工作。本文是基于"云南省铝土矿成矿规律与成矿预测研究"① 和"滇东南主要铝土矿矿床构造地质和成矿作用研究"② 项目成果,对滇东南主要铝土矿床中共生矿产、伴生矿产进行探讨。

1 铝土矿床地质特征

滇东南地区铝土矿床有两种类型,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

(1)赋矿岩系。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、黑色碳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。其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。

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

(3)矿石特征。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

(1)赋矿部位。堆积型铝土矿床赋存于第四系松散堆积物的中部。一般含矿层上部为褐红砂质黏土或腐植土,中部(含矿层)为褐红色黏土、砂质黏土夹褐色、紫色棱角状铝土矿,下部为红褐色黏土,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。

(2)矿石特征。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 铝土矿床共生、伴生矿产特征

针对滇东南地区主要的铝土矿床含铝岩系共采集样品 162 件。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、微量元素的分析测试采用美国 ThermorFisher 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%。

由于样品较多,故本次工作采用平均值,分析结果见表 1 所述。主要的伴生矿产为 TiO_2,REE,Ga,Nb,Zr,Li。

表 1　滇东南主要铝土矿床共生、伴生矿种一览表

Table 1　Schedule of by-products in bauxite deposits, southeast Yunnan province

序号	矿床	样数	岩性	分析结果(w_B/$\times10^{-6}$)								
				TiO_2	ΣREE	ΣLREE	ΣY	Ga	Nb	Ta	Zr	Li
1	天生桥	20	铝土矿	6.73	557.03	422.60	54.76	21	217	12.4	2 086	109
		14	铁质铝土矿	5.38	983.52	731.69	101.53	27	182	12.5	1 651	89
		5	铁铝质岩	4.60	2 419.40	1 603.47	278.69	30	176	9.7	1454	70
		2	铁质岩	2.89	2 020.31	1 403.03	270.48	24	97	7.4	911	71
		41	平均值	5.82	1 001.16	719.98	281.16	24.44	194.16		1 883	96
			最高值	7.87	4 292.47	2 483.68	1 808.79	49.73	322.80		2 566	657
			最低值	2.84	130.16	87.11	43.05	9.30	18.46		906	3
			超边界品位样数	41	40	41	11	27	41		8	2
2	砂子塘	3	铝土矿	3.74	885.98	595.31	98.69	16	148	12.0	1 339	49
		3	铁质铝土矿	5.72	1 046.90	735.50	118.43	28	133	11.5	1 011	513
		3	铁铝质岩	4.47	589.54	404.63	65.71	31	129	8.6	860	435
		3	铝质黏土岩	1.17	423.71	283.59	45.53	26	92	5.9	568	577
		12	平均值	3.78	736.53	504.76	231.77	25.25	125.43		944	394
			最高值	5.87	1 491.27	946.47	544.80	36.21	157.89		1 568	682
			最低值	1.10	385.56	107.93	140.11	9.11	78.27		538	5
			超边界品位样数	12	6	7	3	10	12		0	7
3	大铁	3	铝土矿	1.96	1678.29	962.25	205.95	54	147	9.3	976	198
		8	铁质铝土矿	5.81	976.31	648.92	98.29	23	115	6.8	821	79
		4	泥质铝土矿	7.38	605.31	508.04	49.95	21	86	5.6	594	140
		19	铁铝质岩	6.30	409.53	325.11	34.87	35	82	5.1	548	99
		3	铁质岩	1.96	207.43	151.54	19.68	18	39	2.4	274	24
		5	菱镁矿	5.92	338.68	239.24	34.36	24	45	3.0	314	185
		20	铝质黏土岩	4.49	808.44	491.67	87.00	37	80	5.4	540	183
		62	平均值	5.27	669.88	447.93	221.95	32.08	83.79		572	134
			最高值	10.42	5693.62	1884.31	3809.31	84.24	228.51		1452	480
			最低值	0.24	84.18	66.61	17.58	8.24	10.63		89	4
			超边界品位样数	60	11	15	10	45	43		0	8
4	飞尺角	2	铝土矿	1.94	978.22	3 25.61	166.63	24	137	8.3	1127	181
		4	铁铝质岩	5.75	281.24	229.14	21.40	28	110	7.0	736	41
		1	铁质岩	0.90	444.11	258.28	46.91	13	20	1.4	202	99
		6	铝质黏土岩	5.27	389.94	290.07	42.33	34	113	7.5	782	158
		13	平均值	4.57	451.16	274.36	176.82	29.13	108.50		777	121
			最高值	6.38	1 451.62	459.35	1 125.49	38.61	262.89		1 644	344
			最低值	0.90	208.64	92.92	39.34	8.29	20.36		202	17
			超边界品位样数	12	1	1	1	10	12		0	3
5	红舍克	7	铝土矿	1.03	793.01	620.45	61.68	32	102	5.9	877	199
		2	铁质铝土矿	2.80	1412.98	1049.34	117.82	14	115	6.0	850	260
		2	泥质铝土矿	1.25	1003.35	704.19	93.04	45	71	4.9	451	224
		1	铁铝质岩	0.92	245.71	196.14	15.62	24	90	6.4	632	63
		7	铝质黏土岩	1.18	851.64	630.93	220.71	37	65	4.7	587	270
		20	平均值	1.44	861.85	652.17	209.68	31.40	86.35		722	216
			最高值	3.74	1649.67	1180.85	573.52	67.72	219.51		1611	1 207
			最低值	0.59	245.71	196.14	49.57	5.64	38.66		376	5
			超边界品位样数	11	11	15	3	13	14		0	5
6	白色姑	3	铝土矿	2.27	750.91	577.08	70.01	13	166	9.0	1561	38
		4	铁质铝土矿	2.21	1230.91	807.33	147.74	34	119	7.5	944	274
		1	铁铝质岩	4.32	518.57	448.39	29.47	41	231	13.7	1553	144
		1	铝质黏土岩	2.10	516.95	403.16	41.21	39	162	10.1	1162	370
		9	平均值	2.45	912.43	645.79	266.64	28.41	151.75		1241	192
			最高值	4.32	1550.22	1 101.48	494.64	59.49	230.85		1 985	370
			最低值	1.74	576.95	403.16	70.18	11.69	94.95		769	3.92
			超边界品位样数	9	5	8	4	4	9		0	3
7	水结	2	铝土矿	1.20	528.57	406.39	46.79	10	74	4.7	889	276
		2	铁铝质岩	8.69	197.40	176.20	10.36	37	91	5.8	551	79
		4	平均值	4.95	362.98	291.30	71.49	23.93	82.57		720	177
			最高值	10.82	636.36	524.85	132.85	39.40	133.92		963	543
			最低值	0.94	160.00	140.89	19.12	5.64	48.50		315	38
			超边界品位样数	3	0	1	0	2	3		0	1
8	芹菜塘	1	铝土矿	0.85	410.17	302.69	107.48	9	100	6.2	857	261
			超边界品位样数	0	0	0	0	0	1		0	0
9	杨柳井	1	铁质岩	4.32	687.99	580.51	107.48	6	94	5.5	963	9
			超边界品位样数	1	0	1	0	0	1		0	0
一般工业标准[21]				1	800	500	300	20	$(Ta,Nb)_2O_5$ 0.008% Nb 56.8	Ta 65.5	ZrO_2 0.3% Zr 2221	Li_2O 0.06% Li 279

2.1 黑色金属 Ti

滇东南的铝土矿床中普遍伴生 Ti，其含钛矿物主要为锐钛矿，其次为金红石。全区主要铝土矿床含铝岩系 $w(TiO_2)=0.85\%\sim10.82\%$ 之间（见表1），其平均值为 4.58%（$n=162$）；其中 150 件样品的 $w(TiO_2)>1\%$，约有 92.6% 的样品的 $w(TiO_2)$ 超过钛原生矿床的边界品位（$w(TiO_2)=1\%$[21]）。

区内主要铝土矿床各类岩性的钛含量，按野外所观察到的含铝岩系层序，具有由菱镁矿→铁铝质岩→泥质铝土矿→铁质铝土矿→铝土矿→铝质黏土岩→铁质岩依次降低的特征，其平均值分别为 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%（$n=7$）。主要铝土矿床的 $w(TiO_2)$ 总体高，但差别较大，且由天生桥铝土矿（5.82%，$n=41$）→水结（4.95%，$n=4$）→飞尺角（4.57%，$n=13$）→大铁（4.49%，$n=62$）→杨柳井（4.32%，$n=1$）→砂子塘（3.78%，$n=12$）→白色姑铝土矿（2.45%，$n=9$）→红舍克（1.44%，$n=20$）→芹菜塘铝土矿（0.85%，$n=1$）有依次降低的特征，显示出滇东南地区铝土矿的 $w(TiO_2)$ 由西向东降低的特点，反映出滇东南地区在吴家坪期的古地理格局可能为由西向东水体变深④[13-14]。在表生条件下，含钛矿物遭受风化作用，以氢氧化物沉淀下来，钛的氢氧化物失水并发生重结晶作用，经锐钛矿→板钛矿→金红石；风化作用使风化壳中钛发生富集[22]。滇东南地区铝土矿之中富含锐钛矿，说明其成矿物质来源于风化壳，经过海水的改造，就近距离沉积而形成。

2.2 稀土元素

王根厚等②在对滇东南地区铝土矿地球化学特征进行研究时发现铝土矿之中富含稀土元素，并对丘北县大铁铝土矿的稀土元素特征进行过讨论[19]。

滇东南地区铝土矿床之中稀土元素含量总体较高，但不同样品之间差别较大（表1），$w(\Sigma REE)=84.18\times10^{-6}\sim5\ 693.62\times10^{-6}$ 之间，$w(LREE)=66.61\times10^{-6}\sim248.68\times10^{-6}$，$w(HREE)$ 值为 $17.58\times10^{-6}\sim3\ 809.31\times10^{-6}$。区内含铝岩系各岩性的 $w(\Sigma REE)$ 表现为由铁质铝土矿→铁质岩→泥质铝土矿→铝土矿→铝质黏土岩→铁铝质岩→菱镁矿依次增高，其 $w(\Sigma REE)$ 算术平均值分别为 182.27×10^{-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}（$n=5$）；在主要铝土矿床中，以天生桥的 $w(\Sigma REE)$ 最高（$1\ 001.16\times10^{-6}$，$n=41$），其次为白色姑（912.43×10^{-6}，$n=9$）、红舍克（851.64×10^{-6}，$n=20$）、砂子塘（736.53×10^{-6}，$n=12$）、大铁（669.82×10^{-6}，$n=62$）、杨柳井（687.99×10^{-6}，$n=1$）、芹菜塘（410.17×10^{-6}，$n=1$），水结铝土矿床中的 $w(\Sigma REE)$ 最低（362.98×10^{-6}，$n=9$）。滇东南地区铝土矿的稀土元素含量的变化趋势，总体表现为由南西向北东由高变低。

滇东南地区含铝岩系 $w(\Sigma REE)$ 算术平均值为 769.10×10^{-6}（$n=162$），接近吸附性稀土矿床的边界品位（$w(\Sigma REE)=800\times10^{-6}$），其中有 74 件超过吸附性稀土矿床的边界品位，约占 45.7%；$w(LREE)$ 平均值为 538.50×10^{-6}（$n=162$），高于吸附性稀土矿床的边界品位（$w(LREE)=500\times10^{-6}$），其中有 89 件超过稀土矿床的边界品位，约占 54.9%；$w(\Sigma Y)$ 平均值为 230.60×10^{-6}（$n=162$），接近吸附性稀土矿床的边界品位值（$w(\Sigma Y)=300\times10^{-6}$[21]），其中有 32 件超过吸附性稀土矿床的边界品位，约占 19.8%。

2.3 分散元素

本次工作对滇东南铝土矿伴生的分散元素进行了研究，结果与前人②③⑤[17,19-20]的研究基本一致，表明在铝土矿之中普遍含有分散元素 Ga。

铝土矿床中的 Ga 含量高，$w(Ga)=5.64\times10^{-6}\sim84.24\times10^{-6}$。按野外所观察到的含铝岩系层序，含铝岩系各岩性的 $w(Ga)$ 值表现为由铁质岩→铝土矿→菱镁矿→铁质铝土矿—泥质铝土矿→铁铝质岩→铝质黏土岩依次增高，但变化幅度不大，$w(Ga)$ 算术平均值分别为 17.29×10^{-6}（$n=7$），23.66×10^{-6}（$n=41$），24.00×10^{-6}（n=5），26.13×10^{-6}（$n=31$），29.00×10^{-6}（$n=6$），33.11×10^{-6}（$n=35$），17.29×10^{-6}（$n=7$），总体表现为由铁质岩向铝质黏土岩 Ga 含量增高的趋势。主要铝土矿床中，大铁铝矿床的 Ga 含量最高，算术平均值为 32.08×10^{-6}（$n=62$）；其次为红舍克、飞尺角、白色姑、砂子塘、天生桥、水结、芹菜塘、杨柳井铝土矿床，其镓含量算术平均值为 31.40×10^{-6}（$n=20$），29.13×10^{-6}（$n=13$），28.47×10^{-6}（$n=9$），25.25×10^{-6}（$n=12$），24.44×10^{-6}（$n=41$），23.93×10^{-6}（$n=4$），9.00×10^{-6}（$n=1$），6.00×10^{-6}（$n=1$）。

滇东南地区铝土矿床中本次采集的 162 件样品中有 111 件样品镓含量超过了铝土矿之中镓的最低工业品位，约占 68.5%；全区 $w(Ga)$ 算术平均值为 28.86×10^{-6}（$n=162$），仍高于铝土矿之中镓的最低

工业品位(20×10^{-6})[21]。

2.4　稀有金属元素

王行军等[20]在对天生桥—者五舍铝土矿床地球化学特征进行研究时发现在该矿床内含铝岩系普遍伴生稀有金属元素 Nb,在铝土矿内伴生 Zr。

2.4.1　Nb

滇东南铝土矿床中稀有金属元素 Nb 含量高,其 $w(Nb)=18.46\times10^{-6}\sim322.80\times10^{-6}$。含铝岩系中以铝土矿 Nb 含量最高(表 1),$w(Nb)$平均值为 169.73×10^{-6}($n=41$);其次为铁质铝土矿、铁铝质岩、铝质粘土岩、泥质铝土矿、铁质岩、菱镁矿,平均值分别为 147.52×10^{-6}($n=31$),107.66×10^{-6}($n=35$),85.70×10^{-6}($n=37$),81.00×10^{-6}($n=6$),60.71×10^{-6}($n=7$),45.00×10^{-6}($n=5$),显示出 Nb 含量与铝土矿中铝的含量呈正相关。在主要铝土矿床中,以天生桥铝土矿床的 Nb 含量最高,$w(Nb)$平均值为 194.16×10^{-6}($n=41$);其次为白色姑、砂子塘、飞尺角、芹菜塘、杨柳井、红舍克、大铁、水结铝土矿床,其 $w(Nb)$平均值为分别为 151.75×10^{-6}($n=9$),125.49×10^{-6}($n=12$),108.50×10^{-6}($n=13$),100.00×10^{-6}($n=1$),94.00×10^{-6}($n=1$),86.35×10^{-6}($n=20$),83.79×10^{-6}($n=62$),82.57×10^{-6}($n=4$),显示铝土矿床中 Nb 的含量由北西向南东变低。

滇东南铝土矿床中共生有稀有金属元素铌(Nb),所采集的 162 件样品中有 136 件的 Nb 含量大于风化壳型铌矿床的边界品位;含铝岩系的 Nb 含量算术平均值为 $w(Nb)=121.03\times10^{-6}$($n=162$),高于风化壳型铌矿床的边界品位($w(Nb)\geqslant56.8\times10^{-6}$,$w(Nb_2O_5)\geqslant0.008\%$)[21]。

2.4.2　Zr

滇东南地区含铝岩系中 Zr 含量较高,其 $w(Zr)=202\times10^{-6}\sim2\ 566\times10^{-6}$。含铝岩系中各岩性的 $w(Zr)$值表现为由铝土矿→铁质铝土矿→铁铝质岩→铝质黏土岩→泥质铝土矿→铁质岩→菱镁矿依次降低,$w(Zr)$平均值分别为 $1\ 570\times10^{-6}$($n=41$),$1\ 232\times10^{-6}$($n=31$),757×10^{-6}($n=35$),607×10^{-6}($n=37$),546×10^{-6}($n=6$),544×10^{-6}($n=7$),314×10^{-6}($n=5$)。主要铝土矿床的 Zr 含量表现出由天生桥铝土矿床→白色姑→杨柳井→砂子塘→芹菜塘→飞尺角→红舍克→水结→大铁铝土矿床依次降低,其 $w(Zr)$平均值分别为 $1\ 883\times10^{-6}$($n=41$),$1\ 241\times10^{-6}$($n=9$),963×10^{-6}($n=1$),944×10^{-6}($n=12$),857×10^{-6}($n=1$),777×10^{-6}($n=13$),732×10^{-6}($n=20$),720×10^{-6}($n=4$),572×10^{-6}($n=62$),反映了滇东南地区铝土矿床由南西向北东方向 Zr 含量降低,与 Nb 表现出的特征一致。

滇东南铝土矿床含铝岩系之中,$w(Zr)$算术平均值为 989×10^{-6}($n=162$),其中共有 8 件样品的 Zr 含量超过风化壳型锆矿床的边界品位($w(Zr)\geqslant2\ 221\times10^{-6}$,$w(ZrO_2)\geqslant0.3\%$)[21]。

2.4.3　Li

滇东南地区含铝岩系之中 Li 含量较高,其 $w(Li)=3\times10^{-6}\sim1\ 207\times10^{-6}$。含铝岩系中各岩性的 $w(Li)$值表现为由铝质黏土岩→菱镁矿→泥质铝土矿→铁质铝土矿→铝土矿→铁铝质岩→铁质岩依次降低,$w(Li)$平均值分别为 232×10^{-6}($n=37$),185×10^{-6}($n=5$),168×10^{-6}($n=6$),162×10^{-6}($n=11$),137×10^{-6}($n=41$),116×10^{-6}($n=35$),46×10^{-6}($n=7$)。在主要铝土矿床中,以砂子塘铝土矿床中 Li 含量最高,$w(Li)$平均值为 393×10^{-6}($n=12$);其后依次为芹菜塘、红舍克、白色姑、水结、大铁、飞尺角、天生桥、杨柳井铝土矿床,$w(Li)$平均值分别为 261×10^{-6}($n=1$),216×10^{-6}($n=20$),192×10^{-6}($n=9$),178×10^{-6}($n=4$),134×10^{-6}($n=62$),121×10^{-6}($n=13$),96×10^{-6}($n=41$),9×10^{-6}($n=1$)。Li 含量的以上特征反映出滇东南地区铝土矿床中 Li 含量有由南西向北东方向升高的特点,与 Nb,Zr 含量的表现特征相反。

滇东南铝土矿床含铝岩系 $w(Li)$算术平均值为 158×10^{-6}($n=162$),其中有 29 件样品的 Li 含量超过盐类锂矿床的边界品位($w(Li)\geqslant279\times10^{-6}$,$w(LiO_2)\geqslant0.06\%$)[21]。

3　铝土矿床共生、伴生矿产相关性

本次工作主要探讨铝土矿床中与 Al 元素共生、伴生的 Fe,Ti,Ga,Nb,Li 和稀土元素之间的相关性。工作中使用中国地质调查局发展研究中心开发的 GeoExpl 2005 软件,对滇东南主要铝土矿床中相关矿产进行 R 型聚类分析,相关矿产的相似系数见表 2 所述,相关矿产图谱见图 2。

从表 2 和图 2 中不难看出,相似系数 $r\leqslant0.38$ 时,滇东南主要铝土矿床中主要矿产可分为 2 大组,第一大组包括 Ta,Ga,LREE,REE,HREE,TiO_2,TFeO,Li,第二大组有 Al_2O_3,Nb,Zr,两大组矿产之间为负相关。$r<0.2$时,第一大组可分为 2 个组,第

表 2 滇东南主要铝土矿床中共生、伴生矿产相似系数

Table 2 Similarity coefficient of by-products in bauxite deposits, southeast Yunnan province

元素名称	TiO_2	Al_2O_3	TFeO	Ga	Nb	Zr	Li	REE	HREE	LREE
TiO_2	1									
Al_2O_3	0.126	1								
TFeO	0.162	−0.128	1							
Ga	−0.064	−0.215	−0.118	1						
Nb	0.209	0.651	−0.08	−0.201	1					
Zr	0.211	0.674	−0.069	−0.222	0.934	1				
Li	−0.205	0.024	−0.171	0.019	−0.034	−0.084	1			
REE	−0.18	0.109	0.058	−0.049	0.189	0.177	0.115	1		
HREE	−0.149	0.131	0.105	−0.076	0.281	0.254	0.068	0.93	1	
LREE	−0.18	0.071	−0.007	−0.084	0.072	0.08	0.162	0.904	0.689	1

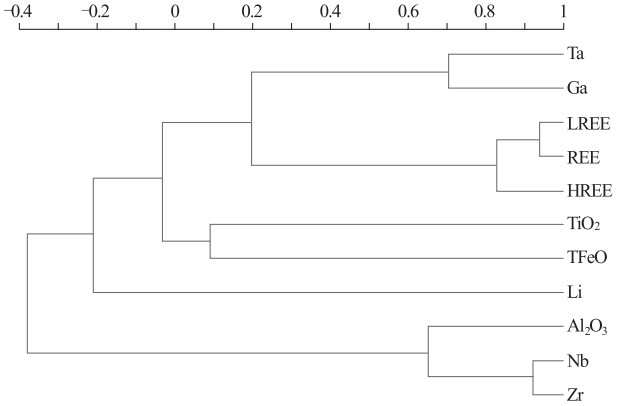

图 2 滇东南主要铝土矿床共生、伴生矿产谱系图

Fig. 2 Hierarchical diagram of by-products in bauxite deposits, southeast Yunnan province

一组包括 Ta, Ga, LREE, REE, HREE, TiO_2, TFeO,第二组为 Li。$r<0$ 时,第一组可分为 2 个亚组,第一亚组包括 Ta,Ga,LREE,REE,HREE,第二亚组包括 TiO_2,TFeO,二者相似系数 r 为 0.162。$r>0.2$ 时,第一组亚可分为 2 个小组,第一小组包括 Ta 和 Ga,第二小组包括 LREE,REE 和 HREE,两小组的相似系数分别大于 0.7 和 0.8。第二大组 Al_2O_3,Nb,Zr,在 $r>0.65$ 时可分为 2 个组,第一组为 Al_2O_3,第二组包括 Nb 和 Zr,二者相似系数为 0.934。

聚类分析显示,Al_2O_3 与 Nb 和 Zr 呈正相关;Al_2O_3 与 Ga 和 TFeO 呈负相关。

4 结论

(1)滇东南地区铝土矿床中的稀土元素、黑色金属元素 Ti 和稀有金属元素 Nb 含量高,已达单独利用矿床的边界品位,可以考虑综合利用。

(2)滇东南地区铝土矿床普遍伴生分散元素 Ga,并伴生有稀有金属 Zr 和 Li。

(3)滇东南铝土矿床中稀有金属元素 Nb,Zr 在各岩性之间的变化趋势相同,与铝土矿的品位呈负相关;而稀有金属元素 Li 在各岩性之间的变化趋势与 Nb 和 Zr 相反,与铝土矿的品位呈正相关。

(4)滇东南铝土矿床中 Ti,REE,Nb 和 Zr 含量分布由南西向北东方向降低,Li 含量由南西向北东方向升高,Ga 变化规律不明显。

(5)聚类分析显示,Al_2O_3 与 Nb 和 Zr 明显的呈正相关,Al_2O_3 与 Ga 和 TFeO 呈负相关。

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、云南省有色地质局 306 队有关领导和同仁的大力支持,在此表示诚挚的谢意!

注释:

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[R]. 2009.

② 王根厚,王行军. 云南省铝土矿成矿规律与成矿预测研究[R]. 2011.

③ 王根厚,王行军. 滇东南主要铝土矿矿床构造地质和成矿作用研究[R]. 2013.

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[R]. 2011.

⑤ 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[R]. 2005.

参考文献:

[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):91-293.

[2] 成功,杨震,黄壁. 板茂铝土矿地质特征及成因分析[J]. 轻金属,2010(10):8-12.

[3] 仕竹焕,董家龙,杨松. 云南省砚山县红舍克铝土矿床地质特

征、找矿标志及资源潜力分析[J]. 矿产与地质，2007，21(3)：278－283.

[4] 刘汉和. 云南砚山红舍克原生及堆积铝土矿[J]. 云南地质，2007，26(1)：32－40.

[5] 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.

[6] 刘文勇，李伟清，程云茂. 云南省文山天生桥—者五舍沉积型铝土矿成矿地质特征及找矿前景研究[J]. 地球学报，2013，34(增刊 1)：141－145.

[7] 黄仁新. 滇东南地区铝土矿床类型[J]. 云南地质，1992，11(2)：121－129.

[8] 刀俊山，张准，蒙光志，等. 云南省文山地区铝土矿找矿远景预测[J]. 地球学报，2013，34(增刊 1)：135－140.

[9] 郭远生，瘳剑锋，郭欣，等. 云南省铝土矿床类型及成矿规律[J]. 矿物学报，2013，33(4)：441－448.

[10] 任运华，徐自斌，郑国龙，等. 云南省文山地区铝土矿床类型、成因及找矿标志[J]. 矿物学报，2013，33(4)：471－477.

[11] 严健，豆松，张道红. 云南丘北大铁铝土矿地球化学特征及成矿物质来源[J]. 矿物学报，2013，33(4)：462－470.

[12] 周洁，王根厚，吴春娇，等. 滇东南铝土微量元素地球化学特征与成矿环境研究[J]. 矿物学报，2013，33(4)：497－502.

[13] 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.

[14] 毛志芳，周洪瑞，王训练，等. 滇东南丘北地区晚二叠世吴家坪早期岩相古地理特征[J]. 矿物学报，2013，33(4)：599－605.

[15] 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.

[16] 刘加强，王训练，周洪瑞，等. 滇东南上二叠统吴家坪下部铝土矿地球化学特征及物源分析[J]. 地质与勘探，2012，48(3)：508－517.

[17] 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.

[18] 刘汉和. 云南红舍克铝土矿成矿地质特征和找矿前景研究[J]. 矿产与地质，2007，21(1)：47－51.

[19] 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.

[20] 王行军，王根厚，周洁. 2013. 滇东南文山市天生桥—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.

[21] 邵厥年，陶维屏. 矿产资源工业要求手册[M]. 北京：地质出版社，2010：117－120，137－144，117－120，217－225，231－246，255－271，280－282.

[22] 刘英俊，曹励明，李兆麟，等. 元素地球化学[M]. 北京：科学出版社，1984：50－58，125－215，378－387.

Research on the by-products of bauxite deposits in southeast Yunnan province

WANG Xingjun[1,2], WANG Genhou[1], ZHOU Jie[1], BI Lisha[1], CUI Yinliang[3], ZHANG Daohong[3], LI Weiqing[4], FAN Liangjun[4]

(1. *School of Geosciences and Resource, China University of Geology, Beijing* 10083, *China*;
2. *Hebei Institute of Geophysical Exploration, Langfang* 065000, *Hebei, China*;
3. *Nonferrous Geological Bureau of Yunnan Province, Kunming* 650051, *China*;
4. *Southwest non-ferrous Metals Survey and Design Co. Ltd. in Kunming, Kunming* 650051, *China*)

Abstract: The southeastern Yunnan province is abundant with bauxite resources. This paper researches on the major bauxite deposits and is concentrated on evaluation of the by-products. Average content of TiO_2 of 92.6% of total samples from the aluminum-bearing rock in the deposits is 4.58%, much higher than the cut-off grade of Titanium of the primary aluminum deposits; average content of ΣREE of 45.7% of total samples 769.10×10^{-6}, approximate to the cut-off grade of the adsorption rare earth deposits; average content of Nb of 84.0% of total samples, 121.03×10^{-6}, about two times of the cut-off grade of the lateritic Nb deposit; average content of Ga of 68.5% of total samples 28.86×10^{-6}, higher than minimum content of bauxite ore. Comprehensive utilization of the by-products should be considered.

Key Words: southeast Yunnan province; bauxite deposit; by-products; Yunnan province