

贵州务-正-道地区铝土矿含矿岩系中三稀元素 赋存状态、富集机理及资源潜力

金中国¹⁾, 刘玲¹⁾, 黄智龙²⁾, 刘辰生³⁾, 郑明泓¹⁾, 谷静²⁾, 邹林⁴⁾, 王林¹⁾

1) 贵州省有色金属和核工业地质勘查局, 贵阳, 550005;

2) 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳, 550081;

3) 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙, 410083; 4) 有色金属矿产地质调查中心, 北京, 100012

内容提要:黔北务-正-道地区铝土矿含矿岩系为下二叠统大竹园组, 与下伏志留系下统韩家店组或上石炭统黄龙组及上覆中二叠统梁山组均呈假整合接触, 古沉积环境主要为浅湖相, 矿床成因属古风化壳沉积型。勘查实践及研究表明: ①含铝岩系的各类岩石、矿石中均富含 Li、Ga、Sc、REE 等三稀元素, 在空间分布及不同矿石中含量变化大, 相差 1~3 个数量级。Li 在研究区东、西两侧含量相对高, 常富集于含矿岩系上部及矿体中致密块状、豆鲕状矿石中; Ga 在研究区北侧及含矿岩系中部较富集, Sc 在道真沙坝—平木山一带富集程度高, 在含矿岩系中含量变化小; REE 相对富集于南部、显著富集于含矿岩系的下部。②含矿岩系形成于古赤道附近气候温湿、开放的氧化环境, 铝矿物及高岭石、蒙脱石等富铝黏土矿物丰富, 促进 Li、Ga、Sc 和 REE 等三稀元素以离子吸附态形式随铝土矿脱硅、去铁、降硫的成矿过程同迁移、同富集; 同时由于 Li、Ga、Sc、REE 等三稀元素与 Al、Zr、Ti、Nb、Ta、Hf、Ti、Cr、Th、U 等亲石元素离子半径相近, 地球化学性质相似, 在铝土矿成矿过程中可能部分以类质同象形式赋存。③次生淋滤改造作用及环境 pH 变化, 是促进独立稀土矿物形成及 REE 在含矿岩系底部富集的重要因素, 含矿岩系下部的富稀土层中应有大量稀土以独立矿物存在(特别是 $\Sigma\text{REE} > 800 \times 10^{-6}$ 的地段); 古沉积环境、成岩成矿期后的地形地貌及构造运动影响约束了 Li、Ga、Sc 和 REE 的不均匀分布。④以含铝岩系为评价对象, 研究区 Li、Ga、Sc 资源潜力及潜在经济价值巨大。

关键词:含铝岩系; 三稀元素; 赋存状态; 富集机理; 资源潜力; 务-正-道地区

“三稀”是稀土、稀有和稀散元素的简称, 三稀金属是当前及今后培育发展战略性新兴产业(Wang Denghong et al., 2013a)。锂(Li)、镓(Ga)、钪(Sc)和稀土(REE)是重要的三稀元素, 在铝土矿中广泛富集。Li 是最轻的稀有金属和重要的能源金属, 也是我国高新技术产业发展的保障性资源和战略性资源之一(Li Jiankang et al., 2014)。Ga 属稀散元素, 其产品广泛应用于新能源、新材料等领域, 被誉为“电子工业的脊梁”(Moskalyk, 2003)。Sc 属稀有分散元素(Liu Yingjun et al., 1986), 世界上 70%~80%的

Sc 伴生在铝土矿中, 且 98% 以上的 Sc 富集于生产氧化铝的赤泥中(Xu Lu et al., 2018)。

务(川)-正(安)-道(真)铝土矿集区为渝南-黔中铝土矿成矿带的重要组成部分, 近 10 年来相继探明了 10 余个大型铝土矿床, 提交铝土矿石资源储量超 7 亿吨, 并综合评价了矿石中 Ga、Li、Sc 等伴生矿产^①, 找矿取得重大突破。同期, 有关专家学者(Liu Ping, 2007; Lu Fangkang et al., 2009; Jin Zhongguo et al., 2009, 2011, 2012, 2015a; Gu et al., 2013; Wang Denghong et al., 2013b; Wang Xiaomei et

注: 本文为国家十二五科技支撑计划重点项目(编号 BAB201104B04)、贵州省基础性公益性项目(编号 黔国土资发[2010]120 号)和贵州省科技计划项目(编号 黔科合 J 字[2014]2166)联合资助成果。

收稿日期: 2019-02-28; 改回日期: 2019-06-23; 网络发表日期: 2019-08-22; 责任编辑: 范宏瑞; 责任编辑: 周健。

作者简介: 金中国, 男, 1965 年生。博士, 研究员, 主要从事矿产勘查与成矿预测研究。Email: gzkjygz@sina.com。通讯作者: 黄智龙, 男, 1967 年生。博士, 研究员, 主要从事矿床地球化学研究。Email: huangzhilong@vip.gyig.ac.cn。

引用本文: 金中国, 刘玲, 黄智龙, 刘辰生, 郑明泓, 谷静, 邹林, 王林. 2019. 贵州务-正-道地区铝土矿含矿岩系中三稀元素赋存状态、富集机理及资源潜力. 地质学报, 93(11): 2847~2861. doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.20191917.

Jin Zhongguo, Liu Ling, Huang Zhilong, Liu Chensheng, Zheng Minghong, Gu Jin, Zou Lin, Wang Lin. 2019. Occurrence state, enrichment mechanism and resource potential of rare earth, rare metal and rare-scattered elements in ore-bearing rocks in the Wuchuan-Zheng'an-Doazhen bauxite deposit, Guizhou Province. Acta Geologica Sinica, 93(11): 2847~2861.

al., 2013; Wang et al., 2013; Li Peigang et al., 2014; Gu Jing et al., 2015; Han Ying et al., 2016) 对铝土矿中伴生微量元素的地球化学特征进行了不同程度研究,取得了丰硕的成果。但含矿岩系中三稀元素的来源、元素地球化学行为、富集机理、铝土矿成矿过程中沉积环境的影响及伴生资源潜力评价等方面的研究成果发表较少。本文以国家科技支撑重点计划项目和国家级整装勘查项目成果为支撑^{①②},以含铝岩系为研究对象,对 Li、Ga、Sc 和 REE 在铝土矿成矿过程中的分布规律、赋存状态、富集机理作进一步探讨,深化古风化壳型铝土矿成矿理论认识,以期指导系统勘查、评价含矿岩系中三稀资源,扩大资源储量,并为科学开发、综合利用提供信息。

1 区域地质背景及含矿岩系特征

1.1 区域地质背景

务-正-道铝土矿集区位于黔北与渝南接壤地带,区域出露寒武纪至侏罗纪地层,其中,寒武系、奥陶系、志留系、二叠系、三叠系分布范围大,上石炭统黄龙组及侏罗系零星分布,中-上志留统、泥盆系和下石炭统缺失。构造主体格架呈 NE 和 NNE 向展布,发育以隔槽为主的“侏罗山式”褶皱(Wang Yangeng, 1996);断裂以 NE、NNE 和 NW 向为主,多沿背斜轴部分布。铝土矿床产于各向斜区,下二叠统大竹园组为含矿岩系。研究区未见岩浆岩出露(图 1)。

1.2 含矿岩系特征

研究区含矿岩系大竹园组(P_1d)与上覆中二叠统梁山组(P_2l)和下伏上石炭统黄龙组(C_2h)或下志留统韩家店组(S_1hj)均呈假整合接触(图 2),与黔中地区铝土矿含矿岩系结构“上覆下石炭统摆佐组(C_1b)→含矿岩系下石炭统九架炉组(C_1jj)→下伏中上寒武统”有较大差异(Yang Ruidong et al., 2018)。含矿岩系分布范围、保存情况及含矿性受古沉积环境、成岩成矿后的地形地貌、后期构造破坏程度等因素控制(Jin Zhongguo et al., 2013)。在各向斜轴部及北部向斜区含矿岩系保存较完整,在向斜扬起端含矿性较好;在道真向斜东翼、浣溪向斜东段、桃园向斜西翼中南段连续性较差。据统计,研究区含矿岩系地表出露长约 675km,分布面积约 2190km²,厚 0~16m,一般 4~7m,可分为三个岩性段,上部(P_1d^3)为铝土质页岩、黏土岩,厚 0.2~2.4m;中部(P_1d^2)主要为铝土矿层,厚 0.7~11.3m;下部(P_1d^1)为含铁绿泥石岩、铝土质页岩,

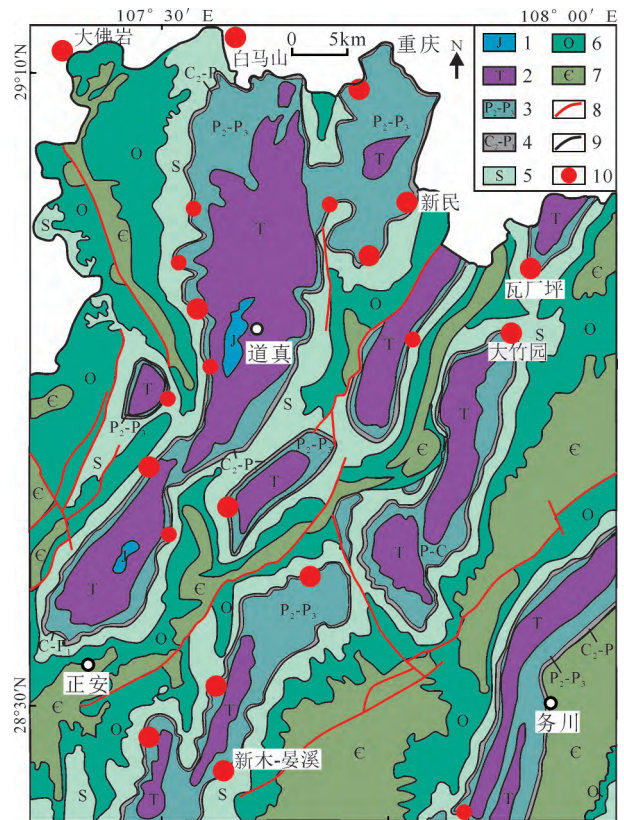


图 1 黔北务-正-道铝土矿集区地质略图

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

1—侏罗系;2—三叠系;3—中-上二叠统;4—下二叠统—上石炭统;5—志留系;6—奥陶系;7—寒武系;8—断层;9—地层界线;10—铝土矿床

1—Jurassic; 2—Triassic; 3—Middle-Upper Permian; 4—Lower Permian-Upper Carboniferous; 5—Silurian; 6—Ordovician; 7—Cambrian; 8—fault; 9—stratigraphic boundary; 10—bauxite ore deposits

厚 0.7~1.8m。含矿岩系及矿体(层)厚度从北至南逐渐减薄(Jin Zhongguo et al., 2018)。

2 样品采集与分析

样品采自瓦厂坪、新民、新木-晏溪三个矿床的钻孔,其中大竹园组(P_1d) 104 件,黄龙组(C_2h) 18 件,韩家店组(S_1hj) 21 件,梁山组(P_2l) 3 件,总计 149 件。样品分析由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完成,其中微量元素采用电感耦合等离子质谱仪分析,常量元素采用 X 荧光光谱仪分析。大竹园矿床的 81 件样品数据据 Li Peigang et al. (2014)整理形成,测试单位为中国地质科学院国家地质实验中心。其他矿床的 Li、Ga、Sc 分析数据来自务-正-道地区铝土矿整装勘查报告^③,测试单位为国土资源部贵阳矿产资源监督检

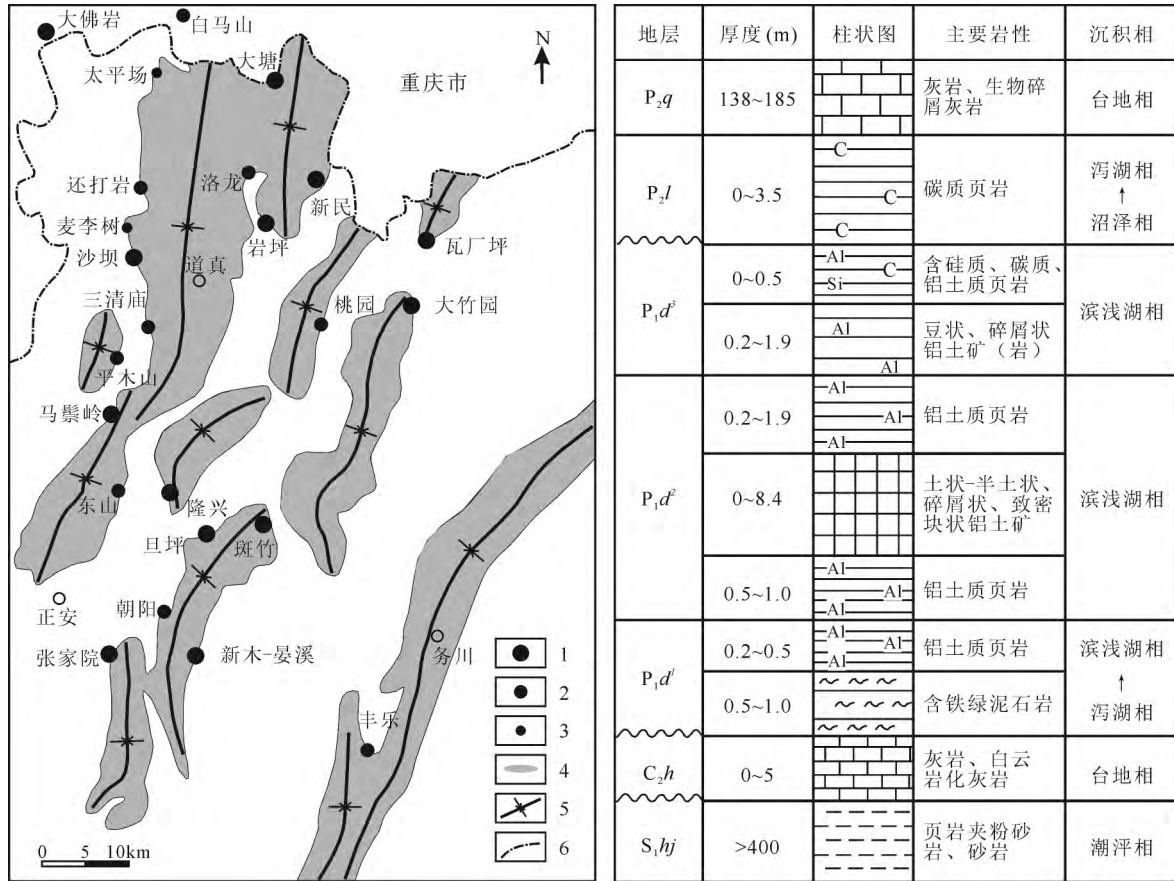


图 2 黔北务-正-道铝土矿含矿岩系分布及柱状示意图

Fig 2 Distribution of ore-bearing rock series and bar diagram of Wuchuan-Zheng'an-Daozhen bauxite in the north of Guizhou

- 1—大型铝土矿床; 2—中型铝土矿床; 3—小型铝土矿床; 4—含矿岩系; 5—向斜轴; 6—省界
- 1—Large bauxite deposits; 2—medium bauxite deposits; 3—small bauxite deposits;
- 4—ore-bearing rock series; 5—synclinal axis; 6—provincial boundary

测中心和贵州有色化验监测中心。

3 分析结果及讨论

3.1 Li、Ga、Sc 和 REE 分布规律

3.1.1 平面分布规律

(1)在各矿床的含矿岩系中 Li、Ga、Sc、ΣREE 含量变化大(表 1),相差 1~3 个数量级,其中 Li、Ga、Sc 平均含量在北东部的瓦厂坪、大竹园矿床中相对高,在南部的新木-晏溪矿床中相对低;ΣREE 在新木-晏溪矿床的含矿岩系中最高(558.63 × 10⁻⁶),在大竹园矿床中最低(158.59 × 10⁻⁶)。

(2)在各矿床的矿石中(表 2,图 3),Ga 含量具有北部较高(瓦厂坪 82 × 10⁻⁶、还打岩 150 × 10⁻⁶)、南西部较低(平木山、马鬃岭均为 18 × 10⁻⁶)的分布特征,Li 含量具有东、西两侧相对高(瓦厂坪 813 × 10⁻⁶、马鬃岭 1203 × 10⁻⁶)、中南部新木-晏溪(224 × 10⁻⁶)、斑竹园(354 × 10⁻⁶)、桃园(191 × 10⁻⁶)、三清

庙(234 × 10⁻⁶)一带相对低的分布态势;Sc 在道真沙坝和平木山矿床富集特征显著(为 94 × 10⁻⁶和 70 × 10⁻⁶),南部的浣溪至张家院一带贫化趋势明显,含量为 9 × 10⁻⁶~17 × 10⁻⁶;ΣREE 分布从南向北逐步降低(新木-晏溪 153.97 × 10⁻⁶→大竹园 91.69 × 10⁻⁶→瓦厂坪 85.03 × 10⁻⁶)。

(3)在瓦厂坪、新民和新木-晏溪 3 个矿床的韩家店组页岩、泥岩中,ΣREE 较接近 214.80 × 10⁻⁶~223.95 × 10⁻⁶,黄龙组灰岩中含量显著降低,为 16.60 × 10⁻⁶~51.63 × 10⁻⁶。

3.1.2 剖面分布规律

研究区含矿岩系中三稀元素含量总体呈上部富 Li、中部富 Ga、下部富 REE 的分布规律:

(1)剖面从上至下(表 1),全区 Li 含量逐渐降低(761.30 × 10⁻⁶ → 557.72 × 10⁻⁶ → 387.37 × 10⁻⁶),其中在瓦厂坪、大竹园矿床含矿岩系上部锂显著富集(含量分别为 1569.09 × 10⁻⁶、1056.13 ×

表 1 务-正-道地区铝土矿典型矿床三稀元素含量特征表

Table 1 Content characteristics of tridilute elements of typical bauxite deposits in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area

取样层位	样品性质	件数	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Li(×10 ⁻⁶)	Sc(×10 ⁻⁶)	Ga(×10 ⁻⁶)	ΣREE(×10 ⁻⁶)		
瓦厂坪矿床	P ₂ l	碳质页岩	1	2.80	60.07	24.20	2.34	2.32	96.80	
	P ₁ d ³	铝土岩、 铝土质黏土岩	6	35.40~48.56 41.95	27.07~47.30 37.66	641.44~2725.03 1569.09	15.54~23.81 20.08	27.50~126.92 69.52	53.31~228.66 103.17	
			P ₁ d ²	12	40.00~72.72 59.18	6.64~27.04 15.99	7.14~2004.65 698.43	14.33~48.39 27.41	11.51~295.00 74.67	56.84~199.343 117.30
	P ₁ d ¹	绿泥石岩、 铝土质页岩	29	25.03~36.64 38.39	24.79~43.60 38.76	36.16~910.88 364.35	16.32~45.10 29.17	25.12~47.40 36.58	97.04~1733.61 852.19	
			P ₁ d 平均值		47	45.51	30.80	877.29	25.55	60.26
	C ₂ h	灰岩	8	0.12~1.88 0.48	0.27~4.87 1.71	0.59~281.59 75.63	1.35~36.00 9.95	0.08~3.35 1.06	0.76~227.13 51.63	
	S ₁ hj	泥岩、页岩	7	14.14~24.00 18.97	58.58~66.16 61.86	19.65~509.88 113.20	11.84~38.60 17.46	18.17~25.80 21.47	172.44~327.31 222.52	
	新民矿床	P ₁ d ³	铝土岩、 铝土质黏土岩	2	31.26~37.23 34.25	36.90~40.96 38.52	236.07~550.23 394.17	8.28~10.40 9.34	9.04~17.80 13.40	30.18~95.28 62.73
				P ₁ d ²	21	40.14~76.35 57.11	4.29~37.79 19.21	1.01~1020.15 421.75	3.68~27.30 15.37	25.12~119.74 59.10
		P ₁ d ¹	绿泥石岩、 铝土质页岩	9	27.25~37.36 32.78	13.42~47.37 37.86	3.67~1780.04 441.27	0.36~32.10 17.33	15.72~55.95 34.51	76.37~6399.38 869.13
P ₁ d 平均值				32	38.43	31.86	419.06	14.01	36.57	358.82
C ₂ h		灰岩	6	0.50~1.73 0.90	0.74~2.80 1.42	2.25~82.58 40.91	2.30~25.92 14.50	0.19~1.02 0.57	2.85~27.40 16.60	
S ₁ hj		泥岩、页岩	7	16.55~22.46 19.44	54.21~67.92 62.24	1.65~50.41 31.69	0.23~22.40 12.31	18.20~25.71 21.79	177.34~277.22 214.80	
新木晏溪矿床		P ₂ l	碳质页岩	2	1.81~7.86 4.84	40.29~49.76 45.03	5.52~7.13 6.33	2.08~4.52 3.30	2.34~5.59 3.97	17.28~56.14 36.71
		P ₁ d ³	铝土岩、 铝土质黏土岩	1	36.56	43.96	25.80	18.36	13.30	32.23
				P ₁ d ²	18	44.75~77.50 57.89	1.68~26.63 17.36	0.55~1359.87 356.26	2.38~39.40 15.78	7.79~106.00 54.11
		P ₁ d ¹	绿泥石岩、 铝土质页岩	9	24.79~47.37 37.87	25.03~35.25 31.56	0.72~629.93 229.12	0.50~31.10 8.05	15.0~53.4 34.1	113.58~6339.19 1505.99
	P ₁ d 平均值			28	44.11	30.93	203.73	14.06	33.84	558.63
	C ₂ h	灰岩	4	0.10~1.20 0.47	0.24~1.85 0.91	0.60~3.23 1.91	0.51~2.46 1.49	0.23~0.80 0.46	8.80~54.29 27.68	
	S ₁ hj	泥岩、页岩	7	15.16~20.68 17.44	51.66~66.27 59.52	1.25~586.03 134.12	0.56~32.20 13.90	11.8~23.92 20.51	184.01~316.11 223.95	
	大竹园矿床	P ₁ d ³	铝土岩、 铝土质黏土岩	12	28.43~50.65 39.67	25.33~41.89 33.29	444.30~2021.60 1056.13	16.32~36.80 27.41	31.08~73.76 48.95	48.06~276.67 142.04
				P ₁ d ²	50	49.52~79.77 66.95	1.41~28.59 10.55	0.34~2715.60 745.44	4.62~54.94 19.53	12.26~132.56 54.09
		P ₁ d ¹	绿泥石岩、 铝土质页岩	19	25.95~51.20 38.45	22.25~42.97 34.68	156.00~970.50 514.74	8.85~48.57 23.20	21.44~82.60 38.26	35.91~1133.44 285.35
P ₁ d 平均值				81	53.33	20.95	740.67	21.32	49.62	158.59
全区		P ₁ d ³	铝土岩、 铝土质黏土岩	21	38.11	38.30	761.30	18.80	36.29	85.04
	P ₁ d ²			101	60.28	15.78	557.72	19.52	60.49	88.47
	P ₁ d ¹	绿泥石岩、 铝土质页岩	66	36.85	35.72	387.37	19.44	35.86	878.17	
			P ₁ d 平均值		188	45.08	29.93	568.79	19.25	44.21
	C ₂ h	灰岩	18	0.62	1.35	39.48	8.65	0.70	31.97	
	S ₁ hj	泥岩、页岩	21	18.62	61.21	93.00	14.56	21.26	220.42	
	P ₁ d 平均值 / C ₂ h 平均值			72.71	22.17	14.41	2.20	63.16	10.96	
P ₁ d 平均值 / S ₁ hj 平均值			2.42	0.49	6.12	1.32	2.08	1.59		
铝土矿石块段最低工业品位 / C ₂ h 平均值 = 55% / 0.62% = 88.71; 铝土矿石块段最低工业品位 / S ₁ hj 平均值 = 55% / 18.62% = 2.95										

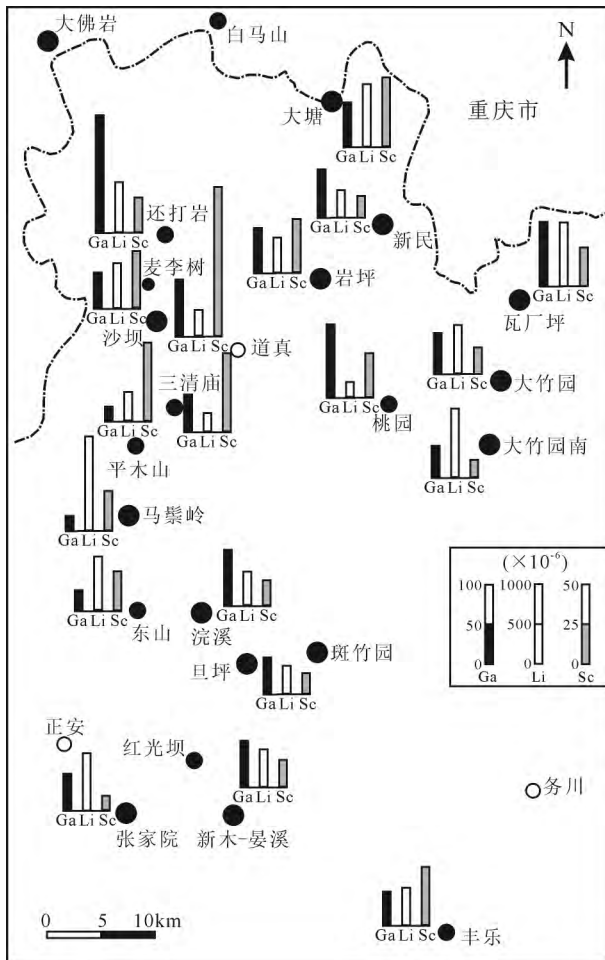


图 3 务-正-道地区铝土矿床 Li、Ga 和 Sc 含量分布图
Fig. 3 Li, Ga and Sc contents distribution of bauxite deposits in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area

10^{-6}), 在新木-晏溪矿床含矿岩系上部锂 (含量 25.80×10^{-6}) 显著贫化; Σ REE 则逐渐升高 ($85.04 \times 10^{-6} \rightarrow 88.47 \times 10^{-6} \rightarrow 878.17 \times 10^{-6}$), 在各矿床含矿岩系下部的绿泥石岩中 Σ REE 富集显著。

(2) Ga 在含矿岩系中部的铝土矿 (岩) 中相对富集, 含量总体呈含矿岩系中部铝土矿 (岩) > 含矿岩系下部含铁绿泥石岩、铝土质页岩 > 含矿岩系上部铝土岩、铝土质黏土岩的趋势, 与重庆大佛岩铝土矿床 Ga 分布特征相似 (Chen Yang et al., 2013)。

(3) Sc 含量从上至下总体变化小 (表 1), 但在瓦厂坪矿床 ($20.08 \times 10^{-6} \rightarrow 27.14 \times 10^{-6} \rightarrow 29.17 \times 10^{-6}$) 和新民矿床 ($9.34 \times 10^{-6} \rightarrow 15.37 \times 10^{-6} \rightarrow 17.33 \times 10^{-6}$) 逐渐升高, 在新木-晏溪矿床中含量逐渐降低 ($18.36 \times 10^{-6} \rightarrow 15.78 \times 10^{-6} \rightarrow 8.05 \times 10^{-6}$), 在大竹园矿床的含矿岩系上部含量最高 (27.41×10^{-6})。

3.1.3 矿石中分布规律

(1) 矿石中 Li 元素含量的变化, 总体呈致密状

> 豆鲕状 > 碎屑状 > 土状-半土状矿石趋势 (表 2、图 4), 仅在各矿床的致密状、豆鲕状铝土矿中较富集 (瓦厂坪和大竹园矿床最高含量分别达 2725.03×10^{-6} 、 2715.60×10^{-6}), 与 Wang Denghong et al (2013b) 研究大竹园矿床中 Li 含量特征一致。在瓦厂坪矿床中, 致密块状与土状矿石的 Li 平均含量比相差 396 倍 ($1918.73 \times 10^{-6} / 4.84 \times 10^{-6}$); 各类矿石中, Li 与 SiO_2 含量总体呈正相关关系, 与 Al_2O_3 含量呈负相关关系。

(2) Σ REE 在新木-晏溪矿床的致密块状矿石中最富集 (含量 1190.07×10^{-6}), 其次在新民矿床的致密状、豆鲕状矿石中相对富集 (含量分别为 231.85×10^{-6} 和 185.68×10^{-6})。

(3) Sc 元素在瓦厂坪矿床的碎屑状矿石中含量相对高 (33.86×10^{-6}), 在大竹园矿床的豆鲕状矿石中含量最低 (8.09×10^{-6}), 在其余矿床的各类矿石中含量较接近。

(4) Ga 元素在瓦厂坪矿床的各类矿石中含量相对高 ($75.96 \times 10^{-6} \sim 89.68 \times 10^{-6}$), 以致密块状最突出; 其他矿床内除新木-晏溪和新民矿床的豆鲕状矿石中含量较高外 (分别为 79.52×10^{-6} 和 72.77×10^{-6}), 其余矿床的各类矿石中含量相对低 ($44.59 \times 10^{-6} \sim 66.30 \times 10^{-6}$)。

3.1.4 P_1d 与下伏 S_1hj 、 C_2h 中元素含量的比值特征

(1) 含矿岩系中 (P_1d) 铝土矿、铝土岩与下伏 S_1hj 泥岩、页岩、 C_2h 灰岩的 Li、Ga、Sc、 Σ REE 及 Al_2O_3 、 SiO_2 含量相比, 表现为 $P_1d > S_1hj > C_2h$ (表 1)。

(2) P_1d/S_1hj 元素含量比值显示, Li 的富集度最高 (6.12 倍), Σ REE、Sc 富集程度低 (为 1.59 倍和 1.32 倍); SiO_2 为亏损组分, 亏损了约 50%。

(3) P_1d/C_2h 元素含量比值反映出, 除 Sc 富集程度低外 (2.20 倍), Ga、 Σ REE、 SiO_2 显著富集, 富集系数 > 10, 其中 Al_2O_3 、Ga 富集系数 > 60, 表明这些元素主要为亲泥岩、页岩、黏土岩等碎屑岩, 而硫酸盐岩。但 C_2h 灰岩中 Sc 平均含量 (8.65×10^{-6}) 与世界灰岩的 Sc 含量 ($0.4 \times 10^{-6} \sim 1.5 \times 10^{-6}$) (Norman et al., 1968) 相比, 富集系数达 5.77 ~ 21.63, 属高 Sc 地球化学背景的灰岩。

(4) 铝土矿石块段最低工业品位 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 55\%$) 与 C_2h 、 S_1hj 中 Al_2O_3 的平均值对比显示, S_1hj 泥岩、页岩富集成工业品位的铝土矿石, 仅需富集 2.95 倍, 而 C_2h 灰岩需富集达 88.71 倍, 表明

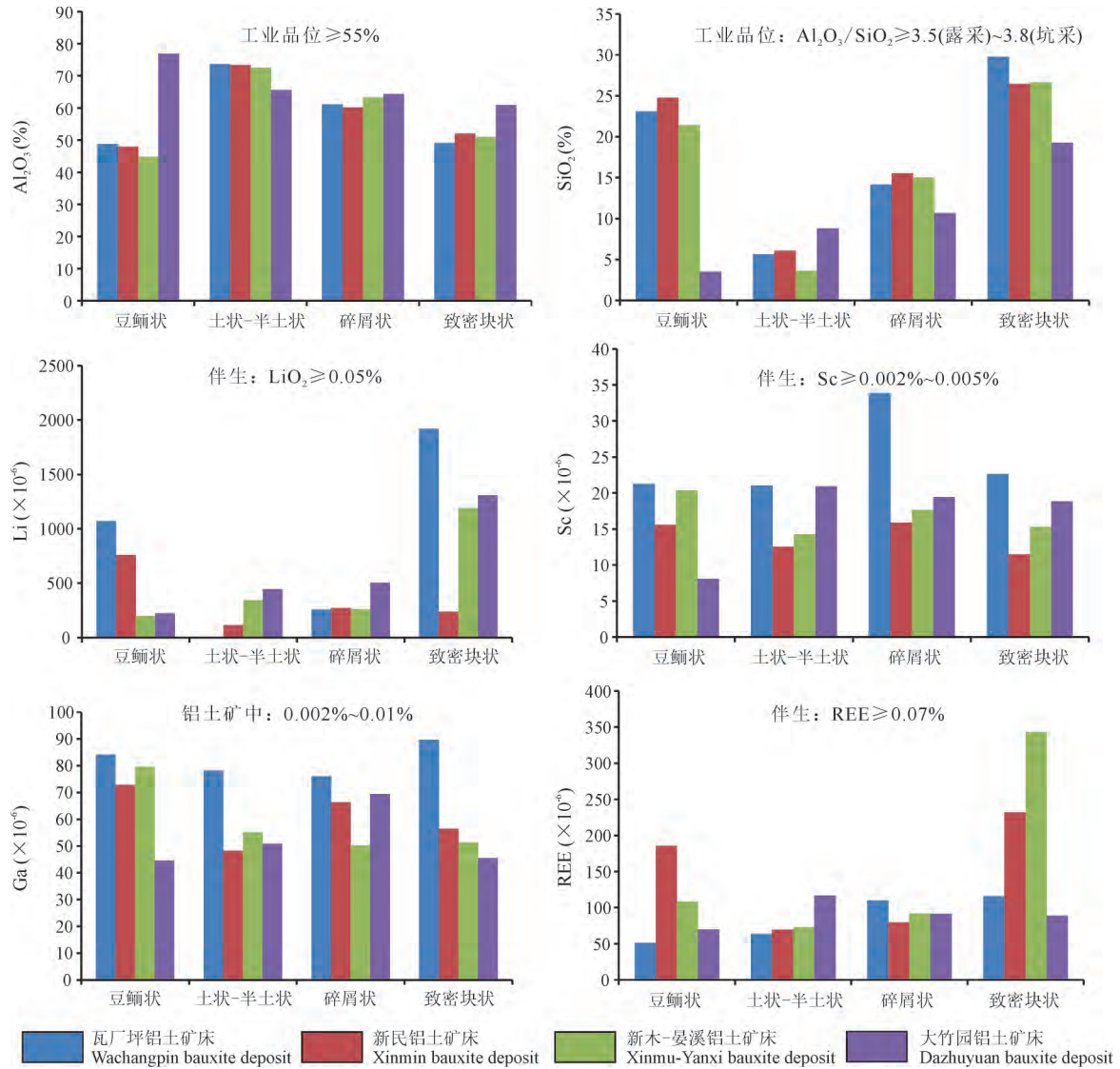


图 4 务-正-道地区典型铝土矿床不同矿石中 Al_2O_3 、 SiO_2 、Li、Ga、Sc 和 ΣREE 含量分布图

Fig. 4 Al_2O_3 、 SiO_2 、Li、Ga、Sc and ΣREE contents in different ores of typical bauxite deposit in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area

S_1hj 泥岩、页岩对成矿的贡献率远大于 C_2h 灰岩,与有关学者 (Gu et al., 2013; Wang et al., 2013; Huang Zhilong et al., 2014) 研究认为,务-正-道地区铝土矿成矿母岩主要为韩家店组的观点一致。

3.2 赋存状态

国内外学者对铝土矿中 Li、Ga、Sc 和 REE 的赋存状态做了大量研究,尤以 REE 的研究成果最为突出 (Mongelli, 1997; Mordberg, 2000; Laskou, 2003; Wang et al., 2010),发现了大量的稀土矿物,证实部分铝土矿床中 REE 富集以独立稀土矿物存在。国内学者针对黔中-黔北铝土矿床 (Xiao Jinkai et al., 1994; Zhang Yuxue et al., 1999; Tuo Biyang et al., 2007; Ye Lin et al., 2007),山西铝土矿床

(Wang Yinxi et al., 2000; Chai Donghao et al., 2001; Yang Junchen et al., 2004),河南铝土矿床 (Tang Yanjie et al., 2002; Li Zhongming et al., 2007; Liu Xuefei, 2011),广西铝土矿床 (Wang Qingfei et al., 2012),渝南地区铝土矿床 (Li Junmin et al., 2013; Chen Yang et al., 2013) 研究认为, Li、Ga、Sc 和 REE 等三稀元素主要以离子状态吸附和以类质同象赋存于一水硬铝石、三水铝石等铝矿物、高岭石等黏土矿物及金红石、锆石、锐钛矿等副矿物中,或其表面及矿物之间,以独立矿物存在较少见,且在氧化铝传统的生产工艺过程中, REE、Sc 主要富集于赤泥内,而 Ga、Li 则主要富集于循环母液中。在山西虽未见独立稀土矿物报道,

表 2 务-正-道地区典型铝土矿床主要矿石中三稀元素特征表

Table 2 Characteristics of tridilute elements in main ores of typical bauxite deposits in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area

名称	样品性质	件数	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Li (×10 ⁻⁶)	Sc (×10 ⁻⁶)	Ga (×10 ⁻⁶)	∑REE (×10 ⁻⁶)
瓦厂坪矿床	豆鲮状铝土矿	4	40.00~53.63 48.79	21.82~24.86 23.09	12.64~2004.65 1069.55	14.33~29.77 21.22	56.11~109.02 84.11	34.16~85.79 51.31
	土状-半土状铝土矿	4	70.23~75.86 73.64	4.10~6.69 5.63	1.36~9.17 4.84	5.87~48.40 21.04	24.70~131.34 78.14	29.58~144.97 63.25
	碎屑状铝土矿	3	58.32~65.68 61.07	10.72~20.92 14.14	36.16~480.55 258.35	21.13~47.42 33.86	65.71~85.40 75.96	90.60~130.79 109.61
	致密块状铝土矿	5	47.41~51.40 49.00	27.04~33.20 29.78	1124.84~2725.03 1918.73	15.55~38.60 22.65	57.50~126.92 89.68	32.28~374.13 115.95
	平均	16	58.13	18.16	812.87	24.69	81.97	85.03
新民矿床	豆鲮状铝土矿	3	42.89~51.28 47.94	15.02~30.29 24.79	28.20~1610.00 759.73	13.30~18.40 15.57	35.10~106.00 72.77	60.21~352.04 185.68
	土状-半土状铝土矿	7	70.41~76.35 73.36	4.19~9.56 6.07	1.01~723.69 115.94	3.68~40.04 12.55	25.01~77.20 48.30	13.45~268.28 69.52
	碎屑状铝土矿	5	55.32~67.70 60.15	9.41~21.38 15.52	62.7~774.00 271.94	8.02~20.21 15.86	36.10~119.74 66.30	16.82~167.29 79.51
	致密块状铝土矿	2	51.00~53.02 52.01	26.23~26.63 26.43	38.60~441.03 239.82	8.86~14.40 11.48	38.00~77.00 56.50	38.02~425.68 231.85
	平均	17	58.42	18.20	346.86	13.92	60.96	141.64
新木晏溪矿床	豆鲮状铝土矿	1	44.75	21.42	197.94	20.39	79.52	108.30
	土状-半土状铝土矿	10	66.07~77.50 72.48	1.68~8.69 3.62	0.55~1359.87 346.21	2.38~39.40 14.27	7.79~116.00 55.04	30.07~154.65 73.02
	碎屑状铝土矿	6	58.23~71.50 63.32	12.08~18.02 15.00	7.54~525.00 260.42	4.53~34.40 17.62	7.86~109.46 50.20	49.57~171.91 91.80
	致密块状铝土矿	1	51.00	26.63	1190.07	15.30	51.30	342.76
	平均	18	57.89	16.67	433.56	16.89	59.02	153.97
大竹园矿床	豆鲮状铝土矿	1	76.92	3.48	224.10	8.09	44.59	69.81
	土状-半土状铝土矿	18	41.52~79.77 65.59	1.41~22.09 8.79	0.34~1410.60 445.06	8.48~54.94 20.90	32.86~75.69 50.83	40.34~246.08 116.71
	碎屑状铝土矿	14	42.82~79.86 64.35	1.35~20.86 10.68	5.54~1513.40 503.64	4.62~34.05 19.45	12.26~132.56 69.37	4.20~219.95 91.26
	致密块状铝土矿	17	52.32~75.98 60.94	3.47~28.59 19.26	38.72~2715.60 1309.07	5.60~44.65 18.82	30.96~70.99 45.54	20.08~230.45 88.98
	平均	50	66.95	10.55	620.47	16.82	52.58	91.69

表 3 务-正-道地区其他矿床的铝土矿石中 Ga、Li 和 Sc 含量(×10⁻⁶)

Table 3 Contents (×10⁻⁶) of Ga, Li and Sc in bauxite ore from other deposits in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area

矿床名称	还打岩	沙坝	麦李树	三清庙	大塘	桃园	马鬃岭	东山	浣溪	大竹园南	旦坪	张家院	岩坪	平木山	丰乐
Ga	150	72	45	48	56	93	18	26	71	40	46	46	63	18	43
Li	640	327	570	234	798	191	1203	679	428	873	354	733	459	366	478
Sc	22	94	36	50	44	28	25	25	16	11	13	9	37	70	37
矿系厚度(m)	6.06	6.49	6.13	5.98	6.50	5.90	5.67	5.86	5.07	6.06	4.71	4.95	5.44	4.20	4.23
矿体厚度(m)	1.54	1.98	1.50	1.67	1.91	1.74	1.81	1.42	1.17	1.77	1.38	1.34	1.85	1.43	1.38

但却发现了古风化壳型稀土矿床(Li Zhongming et al., 2007; Ye Feng et al., 2015)。

近年,针对务-正-道地区铝土矿中 Li、Ga、Sc 和 REE 的赋存状态有关专家学者进行了不同程度探讨。Wang Denghong et al. (2013b)通过对大竹园矿床研究认为, Li 在铝土矿中可能以吸附态产出; Lu Fangkang et al. (2009)对瓦厂坪矿床的一水铝石进行分析测试,发现 Ga 含量达 758 × 10⁻⁶, Ga₂O₃ 含量 0.01%~0.06%, Al 与 Ga 呈明显的正

相关关系,推测 Ga 主要以类质同象赋存于一水铝石中,与 Liu Yingjun et al. (1965, 1986)研究我国某些沉积型铝土矿床中 Ga 的赋存形态(Al 与 Ga 类质同象置换)和铝土矿中一水铝石 Ga 的含量高(高达 800 × 10⁻⁶)相吻合。由于在成岩过程中, Zr 常存在于金红石、钛铁矿等钛矿物中, Ti 也常存在于锆石、异性石等锆矿物中,故常形成 Ti 与 Zr 类质同象的 Ti-Zr 矿物(Liu Yingjun et al., 1986; Zhao Zhenhua et al., 2010)。

Gu et al. (2013), Huang Yuanling (2013), Hung Zhilong et al. (2014), Jin Zhongguo et al (2015b)等通过研究,在瓦厂坪矿床富含矿岩系下部的含铁绿泥岩、铝土质黏土岩中发现了氟碳钙铈矿 $[CaCe_{1.1}La_{0.9}(CO_3)_3F_2]$ 和磷钇矿 $[Y(PO)_4]$ (图5),REE含量分别为 1188.90×10^{-6} 和 1089.21×10^{-6} ;Wang Xiaomei et al. (2013)在正安红光坝矿床含矿岩系中发现了氟菱钙铈矿 $[Ce_2Ca(CO_3)_3F_2]$,REE含量为 807.06×10^{-6} 。据Huang Yuanling(2013)对瓦厂坪矿床REE赋存状态初步分析,发现以矿物相为主(53%~68%),其次为离子相(17%~35%),胶态沉积相和水溶相较低(0.7%~1.1%)。矿物相中,在以高岭石和伊利石为主的黏土矿物中REE含量高(51%~90%),其次为铁矿物(4.6%~29%),在碳酸盐矿物及石英中含量较低(<1.2%);Li et al. (2013)对重庆武隆申基坪、南川大佛岩、洪官渡铝土矿床研究也发现了方铈矿、氟碳铈矿、氟碳钙铈矿及磷钇矿等稀土矿物,REE含量最高为 859.90×10^{-6} ,与务正道地区发现的独立稀土矿物相似。

综上所述,研究区含铝岩系中Li、Ga、Sc和

REE的赋存状态可能存在离子吸附、类质同象置换、镶嵌在矿物表面凹陷部位及矿物之间等多种形式,还可见少量REE以独立矿物存在,各种赋存状态的比例及其控制因素还有待深入研究。

3.3 赋存状态的约束机理

3.3.1 三稀元素以类质同象赋存的内因

务正道地区铝土矿含铝岩系及其矿体中均较富含REE、Li、Sc、Ga、Zr、Ti、Nb、Ta、Hf、Ti、Cr、Th、U等亲石元素(Gu et al, 2013; Jin Zhongguo et al., 2015a),这是由于 Li^+ (0.068nm)、 Sc^{3+} (0.073nm)、 Ga^{3+} (0.062nm)与 Al^{3+} (0.051nm)、 Cr^{3+} (0.063nm)、 Fe^{3+} (0.064nm)、 Mg^{2+} (0.066nm)、 Fe^{2+} (0.074nm)和 Ti^{4+} (0.068nm)等离子半径较接近,在铁镁硅酸盐和铝硅酸盐矿物中, Li^+ 与 Al^{3+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 等, Ga^{3+} 与 Al^{3+} 、 Cr^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Ti^{4+} 等, Sc^{3+} 与 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 及 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 REE^{3+} 等易形成类质同象置换;而 REE^{3+} (La^{3+} 为0.102nm→ Lu^{3+} 为0.085nm)与 Th^{4+} (0.102nm)、 U^{4+} (0.097nm)、 Hf^{4+} (0.078nm)、 Zr^{4+} (0.079nm)、 Nb^{5+} (0.069nm)、 Ta^{5+} (0.068nm)等元素的离子半径相近,且电荷、配位数、电离势、电负性等地球化学

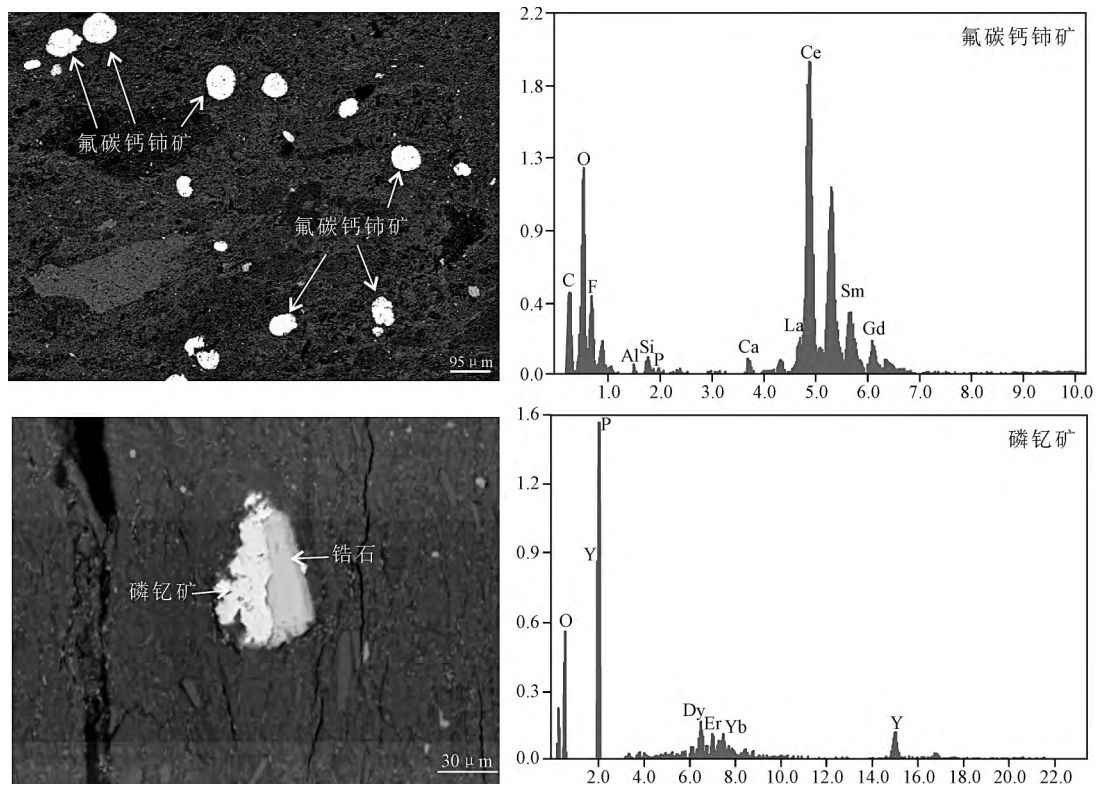


图5 瓦厂坪矿床电子探针分析发现的氟碳钙铈矿和磷钇矿独立稀土矿物
Fig 5 Formolite and yttrium phosphorus ore (independent rare earth mineral) discovered by electron probe analysis in the Wachanping deposit

参数也接近,故 REE 与这些元素的地球化学性质相似,在硅酸盐矿物中常以等价或异价进行类质同象置换(Liu Yingjun et al., 1986)。Th、U 在含矿岩系中普遍富集,与黔中息烽云峰铝土矿区发现独立铀矿物有相似性(Long et al., 2017)。

铝土矿碎屑锆石 REE 分析结果显示,REE 含量高,且变化范围大($197 \times 10^{-6} \sim 19553 \times 10^{-6}$),为典型的 HREE 富集(Huang Zhilong et al., 2014),这是由于 HREE 中 Lu^{3+} 、 Y^{3+} 离子半径分别为 0.086nm、0.085nm, La^{3+} 为 0.102nm, Zr^{4+} 为 0.079nm, Zr^{4+} 与 Lu^{3+} 、 Y^{3+} 离子半径更接近,更容易进入锆石晶格,导致锆石中强烈富集 HREE,形成“磷钇矿式”置换模式: $\text{Zr}^{4+} + \text{Si}^{4+} \rightarrow \text{REE}^{3+} + \text{P}^{5+}$ 的结果(Zhao Zhenhua, 2010)。

据 X 衍射和电子探针波谱分析表明,研究区铝土矿中铝的独立矿物主要为一水硬铝石(占矿物总量的 40.94%~96.90%),并富含高岭石、蒙脱石、伊利石等黏土矿物(占矿物总量的 3.20%~54.06%)。一水硬铝石中 Al_2O_3 含量高(71.70%~90.61%) (Huang Zhilong et al., 2014; Jin Zhongguo et al., 2015b)。Ga 相对富集于含矿岩系中部的矿体中,与 Ga、Al 的单水化合物在晶体结构上完全相似,两者能最大程度发生类质同象置换密切相关(Liu Yingjun et al., 1986)。而在含矿岩系上部的铝土岩、黏土岩及下部的含铁绿泥石岩中,未检出一水硬铝石,仅见含量 1.81%~2.42% 的一水软铝石, Al_2O_3 含量低($< 40\%$), Ga、Al 类质同象置换及相关性弱,故富集程度低,与国内外有关学者研究结果一致(Tang Yanjie et al., 2002; Calagari et al., 2007; Lu Fangkang et al., 2009)。

Liu Ping (2007)通过对黔中及务-正-道地区不同铝土矿床采集 9 件可溶性样和 1 件烧成样试验,发现矿石中伴生 Ga 相对溶出率为 93%~98.6%,绝大部分 Ga 以 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Ga}_2\text{O}_3$ 形式进入溶液,均可以回收利用;Ke Shengnan et al. (2016)通过对山西某拜耳氧化铝厂赤泥硫酸酸浸实验, Ga 的浸出率可达 90%。目前中铝贵州分公司采用树脂吸附法从拜耳母液中提取金属 Ga(拜耳母液→树脂吸附→酸解析→碱溶→电解→提取金属 Ga),结果证实, Ga 在铝冶炼过程均可综合回收利用。

3.3.2 黏土矿物为三稀元素以离子吸附态赋存提供条件

务-正-道地区铝土矿含矿岩系主要形成于古赤道附近气候温湿、相对开放的氧化环境,形成了丰富

的以高岭石、蒙脱石和绿泥石为主的黏土矿物。矿物学特征研究表明(Jin Zhongguo et al., 2015b),瓦厂坪、新民、新木-晏溪矿床中高岭石、蒙脱石、伊利石、绿泥石等黏土矿物分别占总矿物量的 55.90%~91.22%、3.20%~36.43% 和 50.35%~75.43%,其中主要为高岭石,含量为 3.20%~91.22%。黏土矿物粒度细,表面积大,吸附能力强,游离的 REE、Sc、Ga 和 Li 等元素主要呈阳离子吸附形式附着在其表面。

通过 Grant(1986)质量平衡方程和图解法计算(Jin Zhongguo et al., 2011)研究表明:①从成矿母岩(S_1h_j 页岩)→ P_1d 铝土质页岩,主量元素 Al_2O_3 、 TiO_2 强富集,含量增加 112%~255%, SiO_2 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 K_2O 等流失亏损,是成矿母岩在风化作用及地表水的作用下,活泼的金属元素 K、Na、Ca、Mg 等被大量溶出,部分 Fe、Si 被溶出,惰性的 Al、Ti 残留富集,母岩中钙长石、钾长石水解形成富 Al 高岭石等黏土矿物的结果;微量元素 Li、Sc、V、Cr、Ga、Zr、Nb、Hf、Ta、Th 和 U 等明显富集, HREE 明显富集, LREE 相对亏损。②从铝土质页岩→块状、致密状铝土矿(岩),主量元素除 SiO_2 、 Na_2O 继续流失亏损外,其余均富集,其中 MgO 、 CaO 、 Fe_2O_3 的富集原因可能与黄龙组碳酸盐岩红土化产物的混入及部分黄铁矿氧化形成铁氧化物有关;微量元素 Nb、Mo、Hf、Ta、Th、U 迁入显著(含量增加 $> 100\%$), Li 含量增加也较明显(89%, $911 \times 10^{-6} \rightarrow 1785 \times 10^{-6}$), Li 的富集可能主要与含铝黏土矿物增加、吸附能力增强有关;REE 出现分异, MREE 富集,而 HREE、LREE 均亏损。③从致密块状铝土矿→土状铝土矿,主量元素 Al_2O_3 、 TiO_2 、 MgO 进一步富集,其余为不同程度的亏损;微量元素中 Sc、Y、Nb、Mo、REE、Hf、Ta、Tl、Th 和 U 等呈不同程度富集,且 LREE 相对 HREE 富集程度高,而 Li 为亏损元素。表明在铝土矿(岩)、黏土岩持续发生脱硅、去铁(在矿系下部富集形成含铁绿泥石岩)、降硫(黄铁矿氧化, S 流失)、富铝的过程中, LREE 逐渐富集, Li 则逐渐亏损。这是由于风化程度越高,离子半径小的 HREE 被黏土等吸附剂的吸附能力减弱,易被淋滤流失,导致相对富集 LREE (Liu Yingjun et al., 1986; Ma Yingjun et al., 2004)。同时活泼的 Li 也易被淋滤流失,造成 Li 在土状、半土状矿石中贫化,在改造作用弱的鲕状、致密块状矿石中富集,与大竹园矿床淋滤试验,土状矿石中 Li、Sc 等元素较致密块状矿石易浸出结果一致

(Li Peigang et al., 2014)。含矿岩系上部相对富集 Li, 是由于含矿岩系上部主要为致密块状铝土岩, 次生改造弱所致。

3.3.3 次生淋滤改造作用促进三稀元素富集

大量研究成果表明, 不同的稀土矿物形成于不同的环境。磷钇矿形成于在酸性条件, 而氟碳钙铈矿则形成于下碱性条件 (Johannesson et al., 1995; Mongelli, 1997)。务-正-道地区含矿岩系成岩成矿后经历了多次强烈的隆升作用, 导致含矿岩系暴露于地表或浅表遭受淋滤改造, 其中的有机质、黄铁矿氧化, 形成酸性环境, 酸性淋滤作用是可交换性吸附态 REE 迁移和富集的动力 (Zhao Zhi et al., 2017), 促进 REE 以氟络合物形式随地下水向下渗滤迁移, 同时溶解沉积物中磷酸盐, 由于离子半径较小的 HREE 向下渗滤迁移的速率大于离子半径较大的 LREE (Ma Yingjun et al., 2004), 风化过程中地球化学性质稳定、常被吸附富集于铝矿物中的 Y 元素, 与活动性较强的磷酸盐岩结合, 在含矿岩系中部、下部弱酸环境沉淀形成磷钇矿 (MacLean et al., 1997; Onac et al., 2005)。渗滤迁移至底部的酸性溶液, 由于巨厚的下伏韩家店组泥岩、页岩具较好的隔水作用及黄龙组灰岩、白云质灰岩中碱土金属元素 Ca、Mg 的中和作用, 溶液转变为碱性条件, 导致大量 REE 沉淀富集, 高含量的 Ce^{3+} 与氟络合物形成氟碳钙铈矿等独立稀土矿物。在含矿岩系底部铁绿泥岩中, 由于黏土矿物含量相对高于上部铝土岩和中部铝土矿 (Huang Zhilong et al., 2014), 吸附能力强, 也是导致稀土元素富集的重要原因。

3.3.4 沉积环境及构造运动制约三稀元素的分布

研究认为, 务-正-道地区在晚石炭世达拉期末短暂海相沉积形成了黄龙组灰岩 (Du Yuansheng et al., 2014), 大竹园早期的地壳差异升降运动, 形成了古地貌为东、南和西三面环山, 地势南高北低的湖盆、滨浅湖或相对封闭的海湾环境 (Liu Chensheng et al., 2015a, 2015b; Jin Zhongguo et al., 2018)。勘查证明, 铝土矿集中产于 900~1400m 海拔标高, 在南部的新木-晏溪矿床矿体埋藏最浅 (平均 144m), 其次为北部的新民、瓦厂坪和大竹园矿床 (200~300m)^①。研究区南部古地势相对高, 含矿岩系埋藏浅, 次生淋滤作用强, 导致 REE 富集和 Li 的流失程度相对高。马鬃岭矿床由于断裂构造活动的牵引影响, 矿体产出从地表延伸至深部达 1055m, 致密块状矿石发育, Li 较富集。Ga 在中北部陆相浅湖沉积区形成的矿床中富集, 是物源丰富、沉积分异

好、沉积形成的含矿岩系或矿体厚度相对大、潮湿炎热、酸性介质环境形成黏土矿物多, 可能大部分 Ga 被吸附所致, 少量 Ga 为成岩成矿过程中与 Al 发生内质同象置换的结果。在道真沙坝、平木山一带 Sc 较富集, 可能与该区域紧邻黔北古陆边缘的古河流, 沿古河流迁移的风化物中赤铁矿、磷质碳酸质的黏土岩较丰富, 且富含钪 ($10 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$) 有关 (Zhang Yuxue et al., 1999)。

4 资源潜力分析——以瓦厂坪矿床为例

务川瓦厂坪矿床为大型矿床, 矿体露头线在地表呈斜“U”字型展布 (图 6), 东西两翼地表出露长度均大于 4km, 平均厚 2.17m, 矿石平均品位 $Al_2O_3 > 60\%$, $A/S > 6$ 。按照《矿产资源工业要求手册》(National Commission of Mineral Reserves, 2010), Ga 含量均达到综合评价指标 ($0.01\% \sim 0.002\%$); 研究区 REE 分布特征为典型的 LREE 富集型 (Wang et al., 2013; Gu et al., 2013), 参照风化壳型稀土矿床指标 (REO: 边界位 $> 0.07\%$, 工业品位 $> 0.1\%$), 部分矿床含矿岩系下部达到边界要求 (本文不评价); Sc 参考国外工业回收指标 ($20 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$) (Zhao Yunfa et al., 2004), 大部分矿床达到综合评价要求; Li 在沉积铝土矿中目前尚无规范, Li 以平均含量计算, 综合评价矿体中伴生 Ga、Li 及 Sc 资源量 (表 4)。

表 4 瓦厂坪矿床伴生元素含量 ($\times 10^{-6}$) 及资源量 (t)

Table 4 Associated element content ($\times 10^{-6}$) and resource amount (t) of the Wachanping deposit

元素	Ga	Li	Sc
含量/资源量	145/5086	285/13993	27.4/1021

目前, 研究区圈定铝土矿资源储量的范围约占含矿岩系分布面积的 30%, 且综合评价 Ga、Sc、Li 伴生资源仅针对能圈定铝土矿体的地段 (边界指标: $Al_2O_3 \geq 40\%$, $Al_2O/SiO_2 \geq 1.8$; 工业指标: $Al_2O_3 \geq 55\%$, Al_2O/SiO_2 3.5 或 3.8), 而对铝土矿体产出连续性差, 未达到圈定铝土体, 但铝土岩、铝土质黏土岩, 多可作为铁矾土或耐火黏土圈定资源的区段均未综合评价。据表 3 可知, 矿体厚度一般为含矿岩系的 1/3~1/4, 加之未开展铝土矿找矿的含矿岩系空白区分布范围大, 找矿远景好, 表明增加 Ga、Sc、Li 等伴生资源的潜力和潜在的经济价值巨大。后续勘查应加强含矿岩系三稀资源的系统评价, 为开发铝土矿过程中伴生三稀资源综合利用, 提高铝土

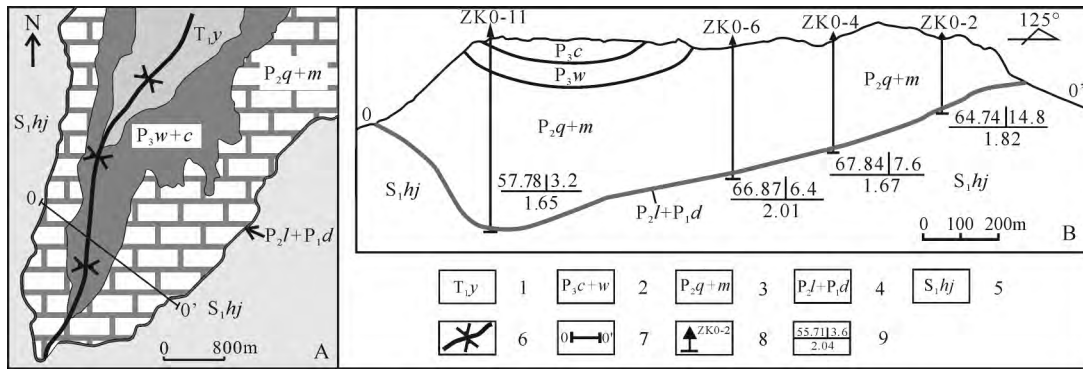


图 6 瓦厂坪矿床地质简图(A)及勘探线剖面图(B)

Fig 6 Geological map (A) and prospecting line profile (B) of the Wachangping deposit

1—夜郎组; 2—上二叠统长兴组+吴家坪组; 3—中二叠统栖霞组—茅口组; 4—中二叠统梁山组—下二叠统大竹园组;
 5—下志留统韩家店组; 6—向斜轴; 7—勘探线及编号; 8—钻孔及编号; 9— $\frac{Al_2O_3 \text{ 含量}(\%)}{\text{铝硅比}}$
 $\frac{\text{矿体厚度}(m)}$

1—Yelang Group; 2—Upper Permian Changxing Formation + Wujiaping Formation; 3—Qixia and Maokou Formations of Middle Permian;
 4—Middle Permian Liangshan Formation-Lower Permian Dazhuyuan Formation; 5—Lower Silurian Hanjiadian Group; 6—synclinal axis;
 7—exploration lines and numbers; 8—drilling and numbering; 9— $\frac{Al_2O_3 \text{ content}(\%)}{\text{The ore body thickness}(m)}$

矿附加值提供依据,同时降低因铝土矿层薄、埋深大而增加的开采成本。

5 结论

(1)含铝岩系的各类岩石、矿石中均富含 Li、Ga、Sc、REE 等三稀元素,在空间及不同矿石中含量分布受古沉积环境、物源、成岩成矿期后的地形地貌及构造运动影响的约束。

(2)研究区铝土矿含矿岩系剖面上,总体呈上部富 Li、中部富 Ga、下部富 REE、Sc 含量变化小的分布特征,含矿岩系下部的富稀土层中应有大量 REE 以独立矿物存在(特别是 ΣREE 含量 $\geq 800 \times 10^{-6}$ 的地段),REE 及 Li、Sc、Ga 主要以类质同象产于铝矿物、富铝的黏土矿物、地球化学性质稳定的副矿物晶格之中,或以离子状态吸附形式赋存于这些矿物表面及其之间。

(3)次生淋滤改造是增强铝土矿脱硅、去铁、降硫、富铝的重要成矿作用,也是促进 Li、Ga、Sc 和 REE 等三稀元素以类质同象、离子吸附态形式同迁移、同富集的成矿过程。

(4)研究区含铝岩系中 Li、Ga、Sc、REE 资源潜力及潜在经济价值巨大,后续勘查应加强共生资源的系统评价,促进资源的综合利用,提高铝土矿附加值,延长产业链。

致谢: 感谢匿名审稿专家提出的宝贵意见!

注释

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. 2013. 贵州省务正道地区铝土矿整装勘查报告.

② 有色金属矿产地质调查中心,贵州省有色金属和核工业地质勘查局,中国有色桂林矿产地质研究院有限公司. 2016. 贵州省务正道地区铝土矿勘查技术集成与示范研究.

References

Calagari A A, Abedini A. 2007. Geochemical investigations on Permo-Triassic bauxite horizon at Kanisheeteh, east of Bukan, west-Azarbaidjan, Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 94: 1~18.

Chai Donghao, Qu Zhiming, Chen Hancheng, Chai Feng. 2001. New discovery and industrial significance of rare and rare-earth elements in Shanxi bauxite. *Light Metals*, 6:6~10 (in Chinese with English abstract).

Chen Yang, Cheng Jun, Ren Shicong. 2013. Distribution of Ga in Dafoyan bauxite mining area, southern Chongqing. *Chinese Journal of Rare Metals*, 37(1): 140~148 (in Chinese with English abstract).

Du Yuansheng, Zhou Qi, Jin Zhongguo, Ling Wenli, Wang Xiaomei, Yu Wenchao, Cui Tao, Lei Zhiyuan, Weng Shenfu, Wu Bo, Qin Yongjun, Cao Jianzhou, Peng Xianhong, Zhang Zhen, Deng Hu. 2014. Mineralization model for the Early Permian bauxite deposits in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou Province. *Journal of Palaeogeography*, 16(1):1~8 (in Chinese with English abstract).

Gu Jing, Huang Zhilong, Fan Hongpeng, Jin Zhongguo, Yan Zaifei, Zhang Jiawei. 2013. Mineralogy, geochemistry and genesis of lateritic bauxite deposits in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, Northern Guizhou Province, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 130: 44~59.

Grant J A. 1986. The isocon diagram: A simple solution to Gresens' s equation for metasomatic alteration. *Economic Geology*, 81: 1976~1982.

Johannesson K H, Stetzenbach K J, Hodge V F. 1995. Speciation of the rare earth element neodymium in groundwaters of the Nevada test site and Yucca Mountain and implications for actinide solubility. *Applied Geochemistry*, 10(5): 565~572.

Gu Jing, Huang Zhilong, Jin Zhongguo, Ding Ping. 2015. REE geochemistry and ore-forming process of the Wachangping bauxite deposit, Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou Province, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(2): 229

- ~239 (in Chinese with English abstract).
- Han Ying, Zou Lin, Wang Jingbin, Zhu Xinyou, Jin Zhongguo, Lu Xuanxuan, Guo Jiao. 2016. Geochemical characteristics of bauxite in the Wuzhengdao area, Guizhou Province. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(4): 653~662+691 (in Chinese with English abstract).
- Huang Yuanling. 2013. Study on the state of the presence of rare earth elements in an aluminum rock system in northern Fujian. Guiyang: Guizhou University, 1~49 (in Chinese).
- Huang Zhilong, Jin Zhongguo, Xiang Xianli, Gu Jing, Wu Guohui, Chen Xinglong, Su Zhiliang, Zhao Yuanyou, Ye Lin, Zou Lin. 2014. Metallogenetic Theory and Prediction of Bauxite Deposits in the Wuchuan Zheng'an Daozhen Area, Northern Guizhou Province, China. Beijing: Science Press, 1~241 (in Chinese).
- Ke Shengnan, Wang Haifang, Long Zheqing, Tian Yingxiao, Cheng Qiong. 2016. Study on the new process for collecting and extracting gallium from alumina red mud with sulfuric acid leaching. *Science Technology and Engineering*, 16(5): 41~44 (in Chinese with English abstract).
- Jin Zhongguo, Wu Guohui, Huang Zhilong, Zhou Jiayi. 2009. The geochemical characteristics of Wachangping bauxite deposit in Wuchuan county, northern Guizhou Province, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(4): 458~462 (in Chinese with English abstract).
- Jin Zhongguo, Xiang Xianli, Huang Zhilong, Liu Ling. 2011. Regularities of elements migration in Wachangping bauxite deposit in Wuchuan County, Guizhou Province. *Geology and Prospecting*, 47(6): 957~966 (in Chinese with English abstract).
- Jin Zhongguo, Liu Ling, Huang Zhilong, Bao Miao. 2012. REE composition of the bauxite deposits, in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, Guizhou Province, and its geological significance. *Geology and Prospecting*, 48(6): 1067~1076 (in Chinese with English abstract).
- Jin Zhongguo, Huang Zhilong, Liu Ling, Chen Xinglong, Bao Miao. 2013. Study on metallogenetic regularities of the bauxite deposits in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou. Beijing: Geological Publishing House, 1~152 (in Chinese).
- Jin Zhongguo, Zhou Jiayi, Huang Zhilong, Dai Longsheng, Xie Xi, Peng Song, Gu Jing. 2015a. 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. *Geology in China*, 42(6): 1910~1918 (in Chinese with English abstract).
- Jin Zhongguo, Zhou Jiayi, Huang Zhilong, Xie Xi, Gu Jing, Liu Ling, Xiang Xianli, Zou Lin, Han Ying, Dai Longsheng, Peng Song. 2015b. Mineralogy characteristics of the bauxite deposit in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou Province, China. *Acta Geologica Sinica*, 89(8): 1458~1470 (in Chinese with English abstract).
- Jin Zhongguo, Liu Chensheng, Zou Lin, Zheng Minghong, Zhang Li, Han Ying. 2018. The Sedimentary environment geochemical evidences of permian bauxite in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, Guizhou Province. *Acta Geologica Sinica*, 92(6): 817~827 (in Chinese with English abstract).
- Laskou M. 2003. Geochemical and mineralogical characteristics of the bauxite deposits of western Greece. *Mineral Exploration and Sustainable Development*, 77(1): 93~96.
- Li Zaihui, Din Jun, Xu Jinsha, Lv Tao, Li Junmin. 2013. Discovery of the REE minerals in the Wulong-Nanchuan bauxite deposits, Chongqing, China; insights on conditions of formation and processes. *Journal of Geochemical Exploration*, 133: 88~102.
- Long Yongzhen, Chi Guoxiang, Liu Jianping, Jin Zhongguo, Dai Tangen. 2017. Trace and rare earth elements constraints on the sources of the Yunfeng paleo-karstic bauxite deposit in the Xiuwen-Qingzhen area, Guizhou, China. *Ore Geology Reviews*, 91: 404~418.
- Li Jiangkang, Liu Xifang, Wang Denghong. 2014. The metallogenetic regularity of lithium deposit in China. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2269~2282 (in Chinese with English abstract).
- Li Junmin, Chen Li, Xu Jinsha, Yan Wu, Lv Tao, Yang Bo, Chen Yang. 2013. Existing form of scandium in detrital zircon from bauxite of the Dafoyan mine, southern Chongqing. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(4): 630~638 (in Chinese with English abstract).
- Li Peigang, Wang Denghong, Zhao Zhi, Lei Zhiyuan, Weng Shenfu, Du Fangying, Ye Deshu, Gu Wenao, Gao Lan, Xiong Ding. 2014. Geology, geochemistry and metallogeny of the Dazhuyuan bauxite deposit, Guizhou Province. Beijing: Science Press, 1~218 (in Chinese).
- Li Zhongming, Zhao Jianmin, Feng Hui, Li Wei, Jiao Zanchao, Yue Guoli. 2007. First discovery of palaeo-weathering crust type REE deposit in Yushan area of Henan Province and its significance. *Mineral Resources and Geology*, (2): 177~180 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chensheng, Jin Zhongguo, Guo Jianhua. 2015a. Facies analysis of sedimentary bauxite deposition in freshwater of Wuzhengdao in northern Guizhou. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 46(3): 962~969 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chensheng, Jin Zhongguo, Guo Jianhua. 2015b. Sequence stratigraphy of bauxite deposition in Wuzhengdao area in northern Guizhou. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 25(1): 179~189 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ping. 2007. Characteristics of associate gallium distributed in the bauxite in Guizhou and its prospects for comprehensive utilization; nine treatments of bauxite ores. *Guizhou Geology*, 24(2): 90~96 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xuefei. 2011. Material composition and ore-forming process of bauxite (clay) deposits in western Henan. Beijing: China University of Geoscience, 1~176 (in Chinese).
- Liu Yingjun, Cao Liming. 1987. Introduction to elements geochemistry. Beijing: Geological Publishing House, 26~41 (in Chinese).
- Liu Yingjun, Cao Liming, Li Zhaolin, Wang Henian, Chu Tongqing, Zhang Jingrong. 1986. Geochemistry of elements. Beijing: Science Press, 1~548 (in Chinese).
- Liu Yingjun. 1965. Some geochemical characteristics of gallium in certain bauxite mines in China. *Geological Theory Review*, 23(1): 42~49 (in Chinese with English abstract).
- Lu Fangkang, Huang Zhilong, Jin Zhongguo, Zhou Jiayi, Ding Wei, Gu Jing. 2009. 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. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(3): 373~379 (in Chinese with English abstract).
- Ma Yingjun, Huo Runke, Xu Zhifang, Zhang Hui, Liu Congqiang. 2004. REE behavior and influence factors during chemical weathering. *Advance in Earth Sciences*, 19(1): 87~94 (in Chinese with English abstract).
- MacLean W H, Bonavia F F, Sanna G. 1997. Argillite debris converted to bauxite during karst weathering evidence from immobile element geochemistry at the Olmedo deposit, Sardinia. *Mineralium Deposita*, 32(6): 607~616.
- Mongelli G. 1997. Ce-anomalies in the textural components of Upper Cretaceous karst bauxites from the Apulian carbonate platform (southern Italy). *Chemical Geology*, 14(140): 69~79.
- Mordberg L E, Stanley C J, Germann K. 2000. Rare earth element anomalies in crandallite group minerals from the Schugorsk bauxite deposit, Timan, Russia. *European Journal of Mineralogy*, 12(6): 1229~1243.
- Moskalyk R R. 2003. Gallium: The backbone of the electronics industry. *Miner Engineering*, 16: 921~929.
- Norman J C, Haskin L A. 1968. The geochemistry of Sc: A comparison to the rare and Fe. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 32(1): 93~108.

- Onac B P, Ettinger K, Kearns J, Balasz I I. 2005. A modern, guano-related occurrence of foggite, $\text{CaAl}(\text{PO}_4)(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ and churchite-(Y), $\text{YPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ in Cioclovina Cave, Romania. *Mineralogy and Petrology*, 85(3-4): 291~302.
- National commission of mineral reserves. 2010. Reference manual of mineral industry requirements. Beijing: Geological Publishing House, 280~282 (in Chinese).
- Tang Yanjie, Liu Jianchao, Jia Jianye. 2002. Study on occurrence state of gallium in the bauxite deposits of western Henan Province. *Journal of Xi'an Engineering University*, 24(4): 1~5 (in Chinese with English abstract).
- Tuo Biyang, Wang Jianli, Zhang Qin. 2007. Occurrence and utilization status of REE in bauxite. *Chinese Rare Earths*, 1: 117~119 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qingfei, Deng Jun, Liu Xuefei, Zhang Qizuan, Sun Silei, Jiang Chengzhu, Zhou Fang. 2010. Discovery of the REE minerals and its geological significance in the Quyang bauxite deposit, west Guangxi, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39: 701~712.
- Wang Xiaomei, Jiao Yangquan, Du Yuansheng, Zhou Qi, Cui Tao, Ji Bo, Lei Zhiyuan, Weng Shenfu, Jin Zhongguo, Xiong Xing. 2013. REE mobility and Ce anomaly in bauxite deposit of WZD area, northern Guizhou, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 133: 103~117.
- Wang Denghong, Wang Ruijiang, Li Jiankang, Zhao Zhi, Yu Yang, Dai Jingjing, Chen Zhenhui, Li Dexian, Qu Wenjun, Deng Maochun, Fu Xiaofang, Sun Yan, Zhen Guodong. 2013a. The progress in the strategic research and survey of rare earth, rare metal and rare-scattered elements mineral resources. *Geology China*, 40(2): 361~370 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Li Peigang, Qu Wenjun. 2013b. Discovery and preliminary study of the high tungsten and lithium contents in the Dazhuyuan bauxite deposit. Guizhou Province, China. *Science in China (Series D)*, 43(1): 44~51 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qingfei, Deng Jun, Liu Xuefei, Zhang Qizuan, Li Zhongming, Kang Wei, Cai Shuhui, Li Ning. 2012. Review on research of bauxite geology and genesis in China. *Geology and Exploration*, 48(3): 430~448 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaomei, Jiao Yangquan, Du Yuansheng, Zhou Qi, Cui Tao, Ji Bo, Lei Zhiyuan, Weng Shenfu, Jin Zhongguo, Xiong Xing. 2013. Rare earth elements geochemistry of bauxite in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou. *Geological Science and Technology Information*, 32(1): 27~33 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yangen. 1996. Major geo-events and regional geological features in Guizhou. *Guizhou Geology*, 13(2): 99~104 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yinxi, Li Huimin, Yang Jiedong, Qiu Liwen, Chai Donghao, Chen Ping. 2000. Discovery of Palaeoweathering type rare and rare earth element deposits in northern Chian and its significance. *Geological Journal of China Universities*, 4(4): 605~606 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Jinkai, Lei Jianquan. 1994. REE and scandium in red mud of Guizhou Al industrial area. *Chinese Science Bulletin*, 39(13): 1248 (in Chinese with English abstract).
- Xu Lu, Luo Yuzhi, Shi Guangda. 2018. Scandium pre-enrichment from red mud sulfuric acid curing leaching solution. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*, 11: 39~41 (in Chinese with English abstract).
- Yang Junchen, Wang Fengling, Li Desheng, Fei Yongchu, Wang Ling. 2004. Investigation on occurrence and trend of rare and rare-earth elements associated in bauxite. *Mining and Metallurgy*, 13(2): 89~92 (in Chinese with English abstract).
- Yang Ruidong, Gao Junbo, Zhao Kui, Yu Jiala, Zhu Chenglin, Gao Lei, Chen Jiyuan, Zhou Ruxian. 2018. Roof and loor characteristics of bauxite in Qingzhen, Guizhou, and their implications for bauxite mineralization. *Acta Geologica Sinica*, 92(10): 2155~2165 (in Chinese with English abstract).
- Ye Feng, Dong Guochen, Meng Zhaoguo, Jin Ning, Hou Zhanguo, Yang Quanlin, Liu Jing. 2015. Geochemical features of rare-earth elements of the bauxite deposit in the Gaojiashan region, Shanxi Province and their implications. *Geology and Exploration*, 51(3): 486~495 (in Chinese with English abstract).
- Ye Lin, Cheng Zengtao, Pan Ziping. 2007. The REE geochemical characteristics of the Xiaoshanba bauxite deposit, Guizhou. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 26(3): 228~233 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuxue, He Qiguang, Shao Shuxun, Zhang Shuying. 1999. Geochemical characteristics of Sc in bauxite. *Geology Geochemistry*, 27(2): 55~62 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yunfa, Qi Xiaowei, Wang Zhiyong, Chai Donghao. 2004. The evaluation of comprehensive utilization of rare elements and REE in the bauxite deposit in Shanxi. *World Nonferrous Metals*, 6: 35~37 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua. 2010. Trace element geochemistry of accessory minerals and its applications in petrogenesis and metallogenesis. *Earth Science Frontiers*, 17(1): 267~286 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhi, Wang Denghong, Chen Zhenghui, Che Zhenyu. 2017. Progress of research on metallogenic regularity of ion-adsorption type REE deposit in the Nanling range. *Acta Geologica Sinica*, 91(12): 2814~2817 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 柴东浩, 屈值明, 陈汉成, 柴峰. 2001. 山西铝土矿中稀有稀土元素的新发现及工业意义. *轻金属*, 6: 6~10.
- 陈阳, 程军, 任世聪, 李军敏, 陈威, 陈莉. 2013. 渝南大佛岩铝土矿伴生镓的分布规律研究. *稀有金属*, 37(1): 140~148.
- 杜远生, 周琦, 金中国, 凌文黎, 汪小妹, 余文超, 崔滔, 雷志远, 翁申富, 吴波, 覃永军, 曹建州, 彭先红, 张震, 邓虎. 2014. 黔北务正道地区早二叠世铝土矿成矿模式. *古地理学报*, 16(1): 1~8.
- 谷静, 黄智龙, 金中国, 丁萍. 2015. 贵州务川瓦厂坪铝土矿床稀土元素地球化学特征及其对成矿过程的指示. *矿物学报*, 35(2): 229~239.
- 韩英, 邹林, 王京彬, 祝新友, 金中国, 路轩轩, 郭娇. 2016. 贵州省务正道地区铝土矿地球化学特征及意义. *矿物岩石地球化学通报*, 35(4): 653~662+691.
- 黄智龙, 金中国, 向贤礼, 谷静, 武国辉, 陈兴龙, 苏之良, 赵远由, 叶霖, 邹林. 2014. 黔北务正道铝土矿成矿理论与预测. 北京: 科学出版社, 1~241.
- 黄苑龄. 2013. 黔北某铝质岩系中稀土元素赋存状态研究. 贵阳: 贵州大学, 1~49.
- 柯胜男, 海芳, 龙哲青, 田颖霄, 程琼. 2016. 氧化铝赤泥酸浸富集回收镓的新工艺研究. *科学技术与工程*, 16(5): 41~44.
- 金中国, 武国辉, 黄智龙, 周家喜. 2009. 贵州务川瓦厂坪铝土矿床地球化学特征. *矿物学报*, 29(4): 458~462.
- 金中国, 向贤礼, 黄智龙, 刘玲. 2011. 黔北务川瓦厂坪铝土矿床元素迁移规律研究. *地质与勘探*, 47(6): 957~966.
- 金中国, 刘玲, 黄智龙, 鲍森. 2012. 贵州务一正一道地区铝土矿床稀土组成及其地质意义. *地质与勘探*, 48(6): 1067~1076.
- 金中国, 黄智龙, 刘玲, 陈兴龙, 鲍森. 2013. 黔北务正道地区铝土矿成矿规律研究. 北京: 地质出版社, 1~152.
- 金中国, 周家喜, 黄智龙, 代龙省, 谢榭, 彭松, 谷静. 2015a. 黔北务正道地区典型铝土矿床伴生有益元素 锂、镓和钽分布规律. *中国地质*, 42(6): 1910~1918.
- 金中国, 周家喜, 黄智龙, 谢榭, 谷静, 刘玲, 向贤礼, 邹林, 韩英, 代龙省, 彭松. 2015b. 黔北务正道地区铝土矿床的矿物学特征. *地质学报*, 89(8): 1458~1470.
- 金中国, 刘辰生, 邹林, 郑明泓, 张力, 韩英. 2018. 贵州务正道地区二叠纪铝土矿沉积环境地球化学证据. *地质学报*, 92(6): 817~827.

- 李建康, 刘喜方, 王登红. 2014. 中国锂矿成矿规律概要. 地质学报, 88(12): 2269~2282.
- 李军敏, 陈莉, 徐金沙, 闫武, 吕涛, 杨波, 陈阳. 2013. 渝南大佛岩矿区铝土矿碎屑锆石中铀的赋存形式研究. 沉积学报, 31(4): 630~638.
- 李沛刚, 王登红, 赵芝, 雷志远, 翁申富, 杜芳应, 叶德书, 顾文鳌, 高兰, 熊星. 2014. 贵州大竹园铝土矿矿床地质、地球化学与成矿规律. 北京: 科学出版社, 1~218.
- 李中明, 赵建敏, 冯辉, 李伟, 焦赞超, 岳国利. 2007. 河南省郁山古风化壳型稀土矿层的首次发现及意义. 矿产与地质, (2): 177~180.
- 刘辰生, 金中国, 郭建华. 2015a. 黔北务正道地区淡水沉积型铝土矿床沉积相. 中南大学学报(自然科学版), 46(3): 962~969.
- 刘辰生, 金中国, 郭建华. 2015b. 黔北务正道地区沉积型铝土矿床层序地层学. 中国有色金属学报, 25(1): 179~189.
- 刘平. 2007. 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. 贵州地质, 24(2): 90~96.
- 刘学飞. 2011. 豫西铝(黏)土矿物质组成与成矿过程. 北京: 中国地质大学(北京), 1~176.
- 刘英俊, 曹励明. 1987. 元素地球化学导论. 北京: 地质出版社, 26~41.
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 王鹤年, 储同庆, 张景荣. 1986. 元素地球化学. 北京: 科学出版社: 1~548.
- 刘英俊. 1965. 我国某些铝土矿中铀的若干地球化学特征. 地质论评, 23(1): 42~49.
- 鲁方康, 黄智龙, 金中国, 周家喜, 丁伟, 谷静. 2009. 黔北务一正一道地区铝土矿镓含量特征与赋存状态初探. 矿物学报, 29(3): 373~379.
- 马英军, 霍润科, 徐志方, 张辉, 刘丛强. 2004. 化学风化作用中的稀土元素行为及其影响因素. 地球科学进展, 19(1): 87~94.
- 《矿产资源工业要求手册》编委会. 2010. 矿产资源工业要求手册. 北京: 地质出版社, 280~282.
- 汤艳杰, 刘建朝, 贾建业. 2002. 豫西铝土矿中铀的赋存状态研究. 西安工程学院学报, 24(4): 1~5.
- 虞必阳, 王建丽, 张覃. 2007. 稀土元素在铝土矿中的赋存状态及利用现状. 稀土, 1: 117~119.
- 王登红, 王瑞江, 李建康, 赵芝, 于扬, 代晶晶, 陈郑辉, 李德先, 屈文俊, 邓茂春, 付小方, 孙艳, 郑国栋. 2013a. 中国三稀矿产资源战略调查研究进展综述. 中国地质, 40(2): 361~370.
- 王登红, 李沛刚, 屈文俊, 雷志远, 廖友常. 2013b. 贵州大竹园铝土矿中铀和锂的发现与综合评价. 中国科学(D辑), 43(1): 44~51.
- 王庆飞, 邓军, 刘学飞, 张起钻, 李中明, 康微, 蔡书慧, 李宁. 2012. 铝土矿地质与成因研究进展. 地质与勘探, 48(3): 430~448.
- 汪小妹, 焦养泉, 杜远生, 周琦, 崔滔, 计波, 雷志远, 翁申富, 金中国, 熊星. 2013. 黔北务正道地区铝土矿稀土元素地球化学特征. 地质科技情报, 32(1): 27~33.
- 王砚耕. 1996. 贵州主要地质事件与区域地质特征. 贵州地质, 13(2): 99~104.
- 王银喜, 李惠民, 杨杰东, 裘丽雯, 柴东浩, 陈平. 2000. 华北古风化壳型稀有稀土矿床的发现及意义. 高校地质学报, (4): 605~606.
- 肖金凯, 雷剑泉. 1994. 贵州铝厂赤泥中铀和稀土. 科学通报, 39(13): 1248.
- 徐璐, 罗宇智, 史光大. 2018. 从赤泥硫酸熟化浸出液中预富集钪. 有色金属(冶炼部分), 11: 39~41.
- 杨军臣, 王凤玲, 李德胜, 费涌初, 王玲. 2004. 铝土矿中伴生稀有稀土元素赋存状态及走向查定. 矿冶, 13(2): 89~92.
- 杨瑞东, 高军波, 赵奎, 余家腊; 竺成林, 高磊, 陈吉艳, 周汝贤. 2018. 贵州清镇林歹铝土矿顶、底板特征及其对铝土矿成矿的影响. 地质学报, 92(10): 2155~2165.
- 叶枫, 董国臣, 孟兆国, 靳宁, 侯占国, 杨全林, 刘晶. 2015. 山西高家山铝土矿稀土元素地球化学特征及意义. 地质与勘探, 51(3): 486~495.
- 叶霖, 程曾涛, 潘自平. 2007. 贵州修文小山坝铝土矿中稀土元素地球化学特征. 矿物岩石地球化学通报, 26(3): 228~233.
- 张玉学, 何其光, 邵树勋, 张书英. 1999. 铝土矿的地球化学特征. 地质地球化学, 27(2): 55~62.
- 赵运发, 元小卫, 王智勇, 柴东浩. 2004. 山西铝土矿稀有稀土元素综合利用评价. 世界有色金属, 6: 35~37.
- 赵振华. 2010. 副矿物微量元素地球化学特征在成岩成矿作用研究中的应用. 地学前缘, 17(1): 267~286.
- 赵芝, 王登红, 陈郑辉, 陈振宇. 2017. 南岭离子吸附型稀土矿床成矿规律研究新进展. 地质学报, 91(12): 2814~2827.

Occurrence state, enrichment mechanism and resource potential of rare earth, rare metal and rare-scattered elements in ore-bearing rocks in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen bauxite deposit, Guizhou Province

JIN Zhongguo¹⁾, LIU Ling¹⁾, HUANG Zhilong^{*2)}, LIU Chensheng³⁾,
ZHENG Minghong¹⁾, GU Jin²⁾, ZOU Lin⁴⁾, WANG Lin¹⁾

1) *Non-ferrous Metals and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau of Guizhou, Guiyang, 550005;*

2) *State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy Sciences, Guiyang 550081;* 3) *School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083;*

4) *China Geological Survey for Nonferrous Metals Resource, Beijing, 100012*

** Corresponding author: huangzhilong@vip.gyig.ac.cn*

Abstract

The ore-bearing rock series of bauxite deposit in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen (WZD) area in northern Guizhou consists of lower Permian Dazhuyuan Formation, underlying lower Silurian Hanjiadian Formation or upper Carboniferous Huanglong Formation, and overlying middle Permian Liangshan Formation, three of which are in discordant contact. The paleosedimentary environment was mainly shallow lacustrine facies and the genesis of the deposit belongs to the sedimentary type of ancient weathering crust. Exploration and research show: (1) All the Al-bearing rock series are rich in Li, Ga, Sc, REE, etc., and vary greatly in spatial distribution and contents of different ores by 1~3 orders of magnitude. Lithium content is relatively high in the east and west sides of the study area. Li is concentrated in the upper part of the ore-bearing rock series and orebodies in massive and oolitic shapes. Ga is relatively enriched in the north of the study area and ore-bearing rock series. Sc is highly enriched in the Daozhenshaba-Pingmushan area and has little changes in content. REEs are relatively concentrated in the south and significantly in the lower part of ore-bearing rock series. (2) The ore-bearing rock series formed near the ancient equator in an open oxidized environment with warm and humid climate. Al-bearing minerals and Al-rich clay minerals (kaolinite and smectite) are abundant, promoting the migration and enrichment of Li, Ga, Sc and REE in the form of ion adsorption along with the mineralization process of desilicization, iron removal and sulfur reduction of bauxite. At the same time, Li, Ga, Sc, REE and other rare elements have similar ionic radius and geochemical properties as the lithotropic elements (Al, Zr, Ti, Nb, Ta, Hf, Ti, Cr, Th, U), and isomorphism may occur partially in the process of bauxite mineralization. (3) Secondary leaching modification and environmental pH changing are important factors to promote the formation of independent rare earth minerals and the enrichment of REEs at the bottom of ore-bearing rock series. A large amount of rare earth layers may occur at the bottom of ore-bearing rock series as independent minerals (especially in the section of $REE > 800 \times 10^{-6}$). The uneven distribution of Li, Ga, Sc and REEs were restricted by paleosedimentary environment, topography and geomorphology and tectonic movement after diagenesis and mineralization. (4) With Al-bearing rock series as the evaluation object, this study suggests that Li, Ga and Sc in the study area are of great resource potential and huge economic value.

Key words: aluminum-bearing rock series; three kinds of rare elements; occurrence state; enrichment mechanism; resource potential; Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area