

文章编号: 1000-4734(2021)04-0400-13

黔北道真新民铝土矿含铝岩系中关键金属 富集特征与资源潜力

苏之良¹, 杜蔺^{1*}, 巩鑫¹, 袁民汕¹, 文愿运², 李阳²

(1. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局 地质矿产勘查院, 贵州 贵阳 550005; 2. 中国科学院 地球化学研究所, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 黔北务(川)一正(安)一道(真)铝土矿成矿带是贵州省重要的铝土矿资源地, 其中道真新民铝土矿床是近年在该成矿带内探获的又一大型铝土矿床, 伴生Li、Ga、Sc和稀土元素等关键金属资源。以该矿床含铝岩系为剖析对象, 对其中Li、Ga、Sc和REE等关键金属进行研究, 系统总结其富集特征并分析其资源潜力。结果表明, 研究区含铝岩系各类岩(矿)石中均不同程度富集Li、Ga、Sc和REE等关键金属。在含铝岩系垂向剖面上, 关键金属具有上部富Li、中部富Ga、下部富REE, 而Sc含量变化较小的富集特征。在岩(矿)石类型上, Li、Ga和REE分别主要富集于铝土岩、铝土矿和绿泥石泥岩中, Li主要富集在致密状铝土矿中, Ga在土状铝土矿、碎屑状铝土矿、豆鲕状铝土矿中相对富集, REE在致密状铝土矿和土状铝土矿中的含量相对富集, 而Sc在不同类型岩(矿)石中的含量变化不大。研究区含铝岩系不同岩(矿)石中, Li与SiO₂正相关, Ga、Sc与Al₂O₃、TiO₂正相关, 而REE与Fe₂O₃正相关, Li、Ga、Sc、REE之间不存在相关关系, 原岩风化程度可能是控制这些元素富集的关键因素之一。新民铝土矿床含铝岩系中, 关键金属Li、Ga、Sc、REE的资源潜力和潜在经济价值巨大, 预测Li、Ga、Sc和REE的远景资源储量分别达到大型矿床规模的3.2倍、3.8倍、669倍和2.1倍。

关键词: 含铝岩系; 关键金属; 富集特征; 资源潜力; 新民; 黔北

中图分类号: P617; P618.7

文献标识码: A

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2021.41.088

第一作者: 苏之良, 男, 1965年生, 高级工程师, 矿产普查与勘探专业, 从事矿产地质勘查研究与管理工
E-mail: 3626351967@qq.com

Characteristics of the critical metal enrichment and the resource potential for bauxite-bearing rocks in the Xinmin bauxite deposit in Daozhen County, Guizhou Province, China

SU Zhi-liang¹, DU Lin^{1*}, GONG Xin¹, GUN Min-shan¹, WEN Yuan-yun², LI Yang²

(1. Geological and Mineral Exploration Institute, Non-ferrous Metals and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau of Guizhou, Guiyang 550005, China; 2. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

Abstract: The Wuchuan-Zheng'an-Daozhen bauxite metallogenic belt in the northern Guizhou is an important bauxite resource area in Guizhou Province. The Xinmin bauxite deposit in Daozhen County is a newly discovered large bauxite deposit with resources of associated critical metals of Li, Ga, Sc, REE and other elements. The bauxite-bearing rocks of the Xinmin bauxite deposit have been chosen for analyzing contents of critical metals of Li, Ga, Sc and REE in order to systematically summarize enrichment characteristics of those critical metals and to evaluate their resource potentials in the deposit. The results show that critical metals of Li, Ga, Sc, REE and other elements are enriched, to varying degrees, in bauxite-bearing rocks in the Xinmin

收稿日期: 2021-02-01

基金项目: 贵州省地质勘查基金项目(编号: GZMC-ZG20192015-4)

* 通讯作者, E-mail: 370611046@qq.com

bauxite deposit. On the vertical profile of the bauxite-bearing rock series, Li is enriched in the upper part, Ga is enriched in the middle part, and REE are enriched in the lower part, but Sc contents are limitedly changed among all parts. In terms of rock (ore) types, Li, Ga, and REE are mainly concentrated in bauxite-bearing rocks, bauxite, and chlorite mudstone, respectively. In terms of bauxite types, Li is mainly concentrated in compact bauxite, Ga is relatively concentrated in earthy bauxite, bean and oolitic bauxite, and detrital bauxite, the REE is relatively enriched in compact bauxite and earthy bauxite. However, Sc contents in various types of rocks (ores) are not changed significantly. In the different types of rocks (ores) of the bauxite-bearing rock series in the study area, Li is positively correlated with SiO_2 , Ga and Sc are positively correlated with Al_2O_3 , TiO_2 , REE is positively correlated with Fe_2O_3 . However, there is no correlation among Li, Ga, Sc, and REE. The degree of weathering of the original rocks could be one of the key factors controlling the enrichment of these elements. The bauxite-bearing rock series of the Xinmin bauxite deposit have huge resource potential of critical metals of Li, Ga, Sc and REE with great economic values. It is predicted the potential resources of Li, Ga, Sc and REE in the bauxite-bearing rocks of the Xinmin bauxite deposit are about 3.2, 3.8, 669, 2.1 times of their theoretical values of the large scale deposits, respectively.

Keywords: Bauxite-bearing rock series; critical metals; enrichment characteristics; resource potential; Xinmin; Northern Guizhou

随着新能源、信息通讯、国防军工等高新技术的迅速发展, 全球对关键金属的需求呈爆发式增长, 世界各国贸易争端不断加剧, 各国纷纷制定和部署各自关键金属发展、研究战略计划^[1-9]。我国在这方面起步较晚, 但近年随着科技与经济高速发展, 对关键金属矿产的需求趋势增加迅猛, 关键金属矿产资源研究已上升到国家战略层面^[10-13]。铝土矿是我国优势矿种, 其中常伴生锂 (Li)、镓 (Ga)、钪 (Sc) 和稀土元素 (REE) 等关键金属矿产资源, 具有巨大的潜在经济价值^[14-16]。黔北务 (川) — 正 (安) — 道 (真) 地区属黔中—渝南铝土矿成矿带^[17]之务川—正安—道真铝土矿成矿亚带^[18-19], 是贵州省重要的铝土矿资源地^[20-21]。近年来发现的道真新民铝土矿床是黔北地区铝土矿找矿的又一重大突破, 探明铝土矿资源储量近 4000 万吨, 且铝土矿中伴生有稀有金属 (Li)、稀土元素 (Ga、Sc)、稀土元素等关键金属矿产^[22]。前人关于该矿床的研究主要集中在地质特征^[23]、控矿因素^[24]、地球化学特征^[25]、成矿机理^[26]等方面, 龙克树^[27]对铝土矿中稀土元素的富集机制做过研究, 认为在干热气候下的海相咸水环境更易使稀土元素富集。本文在新民矿床最新勘探及研究成果的基础上, 以含铝岩系为研究对象, 系统研究 Li、Ga、Sc、REE 等关键金属在含铝岩系中的富集特征, 并评价其资源潜力, 以期指导该区铝土矿含铝岩系中关键金属矿产的勘查工作, 从而为务川—正安—道真成矿带内含铝岩系中关键金属资源储备和综合利用提供科学依据。

1 地质背景

1.1 矿区地质特征

新民铝土矿区位于上扬子地台上扬子陆块南部被动边缘褶冲带之凤冈滑脱褶皱带 (图 1a)^[28]。区内出露的岩层有下志留统韩家店组 (S_{1hj}) 泥页岩, 上石炭统黄龙组 (C_2h) 灰岩, 下二叠统大竹园组 (P_1d) 泥岩、铝土岩、铝土矿, 中二叠统梁山组 (P_2l) 炭质泥岩, 中二叠统栖霞组 (P_2q) 和茅口组 (P_2m) 灰岩, 上二叠统吴家坪组 (P_3w) 和长兴组 (P_3c) 灰岩、硅质岩, 下三叠统夜郎组 (T_{1y}) 灰岩、泥页岩、粉砂岩, 第四系 (Q) 灰岩转石、粘土、砂 (图 1b、图 2), 其中, 下二叠统大竹园组为矿区内铝土矿的含矿地层, 习称含铝岩系^[22]。

新民矿区位于大塘向斜东翼南部, 总体呈单斜构造, 地层倾向 $275^\circ \sim 350^\circ$, 倾角 $5^\circ \sim 65^\circ$, 东部较陡, 往西逐渐变缓。区内共发育 4 条断层, 断层走向北北东向, 为张性正断层, 属于成矿期后断层, 为燕山运动的产物 (图 1b)^[22]。

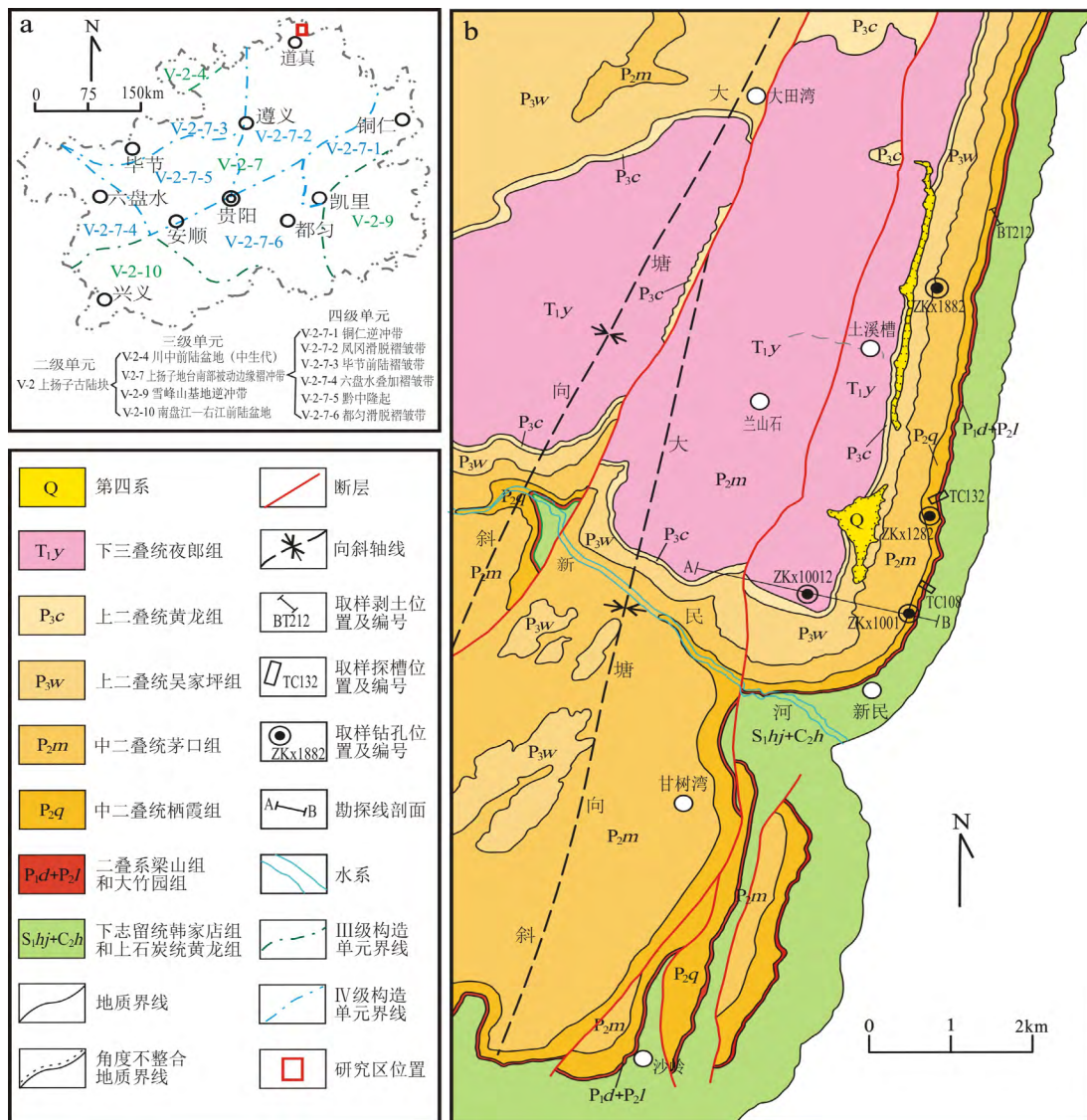


图 1 新民铝土矿区大地构造位置图 (a, 据文献[28]修改) 与地质简图 (b)

Fig. 1. The geotectonic location map (a) and geological sketch (b) for the Xinmin bauxite deposit.

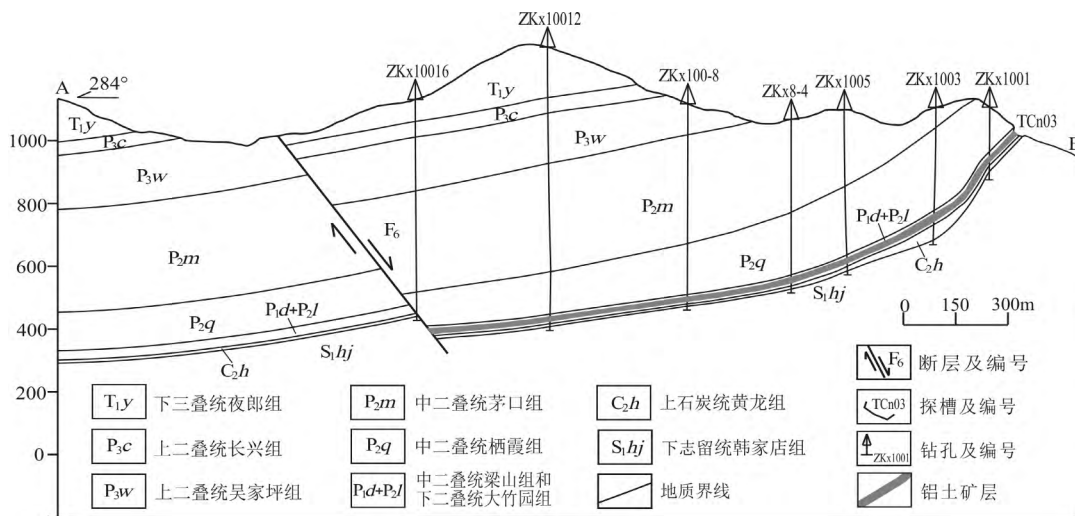


图 2 新民铝土矿区 A-B 勘探线剖面图

Fig. 2. The profile for the prospecting line A-B from the Xinmin bauxite deposit.

1.2 含铝岩系地质特征

矿区内铝土矿赋存层位为下二叠统大竹园组 (P₁d), 其分布范围及保存情况受向斜构造控制和后期断层活动影响。在平面上, 以矿区中部的新民河为界, 矿区北部, 含铝岩系出露较连续、保存完整; 而矿区南部, 由于断层破坏, 致使含铝岩系支离破碎, 连续性和完整性较差 (图 1b)。在剖面上, 含铝岩系上覆地层为中二叠统梁山组, 下伏地层为下志留统韩家店组或上石炭统黄龙组, 其与上覆梁山组、下伏韩家店组或黄龙组均呈假整合接触 (图 3); 含铝岩系厚度在 2.64~12.93 m 之间, 平均厚度 5.92 m, 厚度由北向南呈逐渐减小趋势^[22]。含铝岩系的岩性有铝土矿 (图 4a-d)、铝土岩 (图 4e, f)、铝质泥岩 (图 4g)、绿泥石泥岩 (图 4h) 及褐铁矿 (图 4d, g) 等, 根据岩性组合特征, 可将其分为绿泥石泥岩-铝质泥岩-单层铝土矿型、绿泥石泥岩-铝质泥岩-复层铝土矿型、绿泥石泥岩-铝质泥岩型 3 种剖面类型。

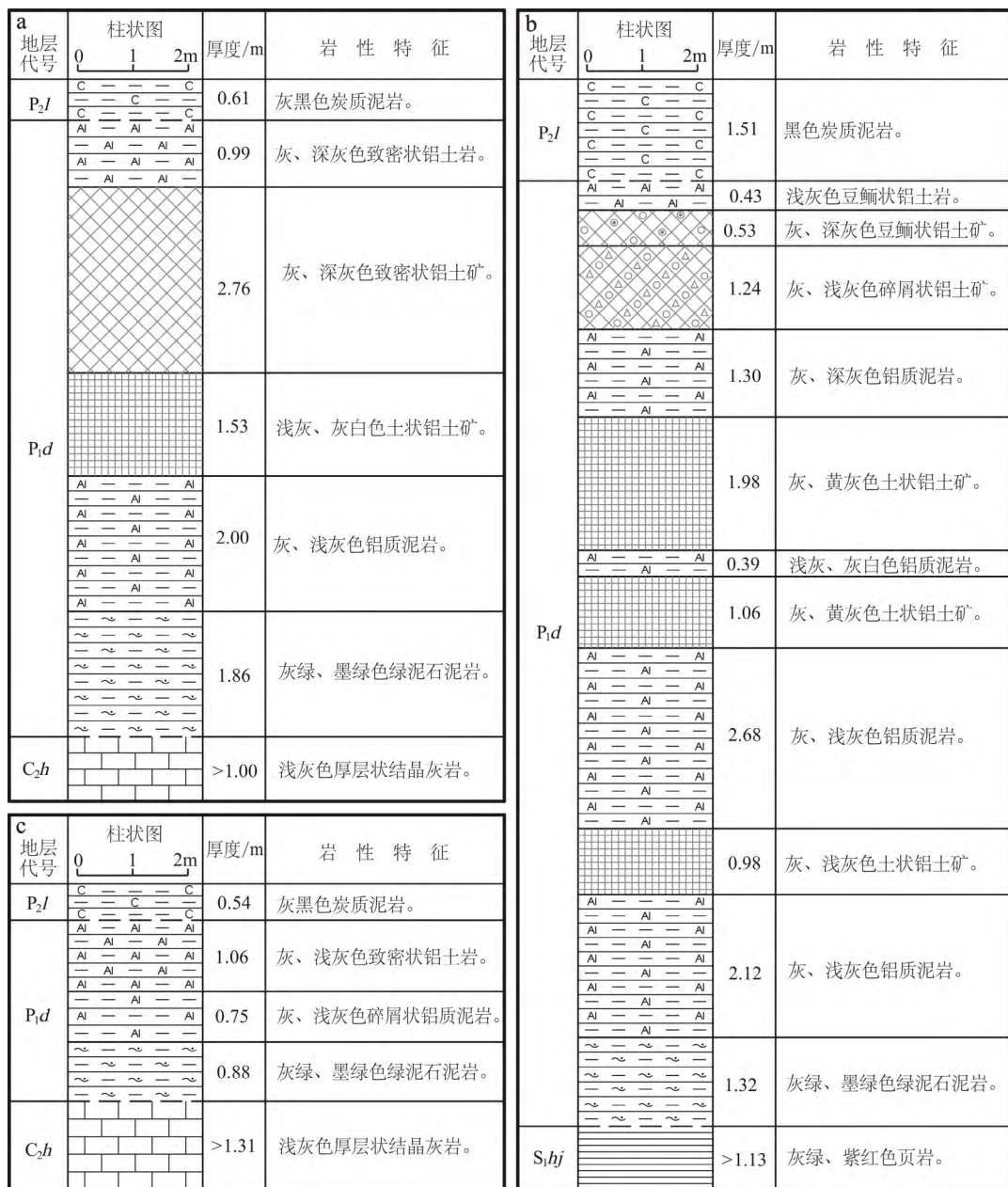
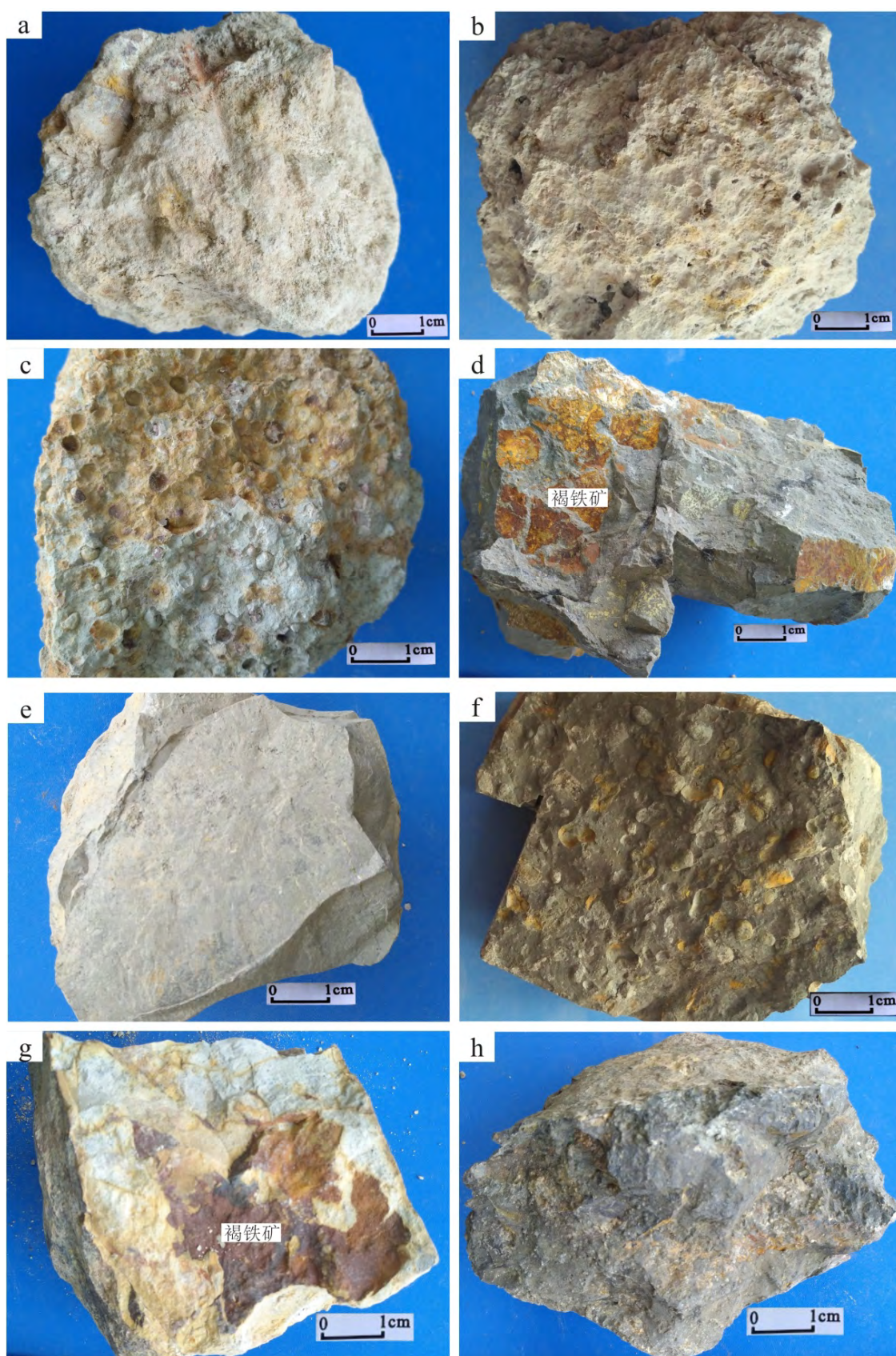


图 3 新民铝土矿区 ZKx1282 含铝岩系柱状图 (a)、ZKx1025 含铝岩系柱状图 (b) 及 ZKx1121 含铝岩系柱状图 (c)
 Fig. 3. The stratigraphic columns of bauxite-bearing rock series for the ZKx1282 (a), ZKx1025 (b), and ZKx1121 (c) drillholes from the Xinmin bauxite deposit.



a-土状铝土矿; b-碎屑状铝土矿; c-豆鲕状铝土矿; d-致密状铝土矿; e-致密状铝土岩; f-豆鲕状铝土岩; g-铝质泥岩; h-绿泥石泥岩

图4 新民铝土矿区含铝岩系岩(矿)石特征

Fig. 4. Characteristics of bauxite-bearing rocks and bauxite ores of the Xinmin bauxite deposit.

1) 绿泥石泥岩-铝质泥岩-单层铝土矿型 此类剖面底部为灰绿、墨绿色绿泥石泥岩, 下部为灰至浅灰色铝质泥岩或铝土岩, 中部为灰至浅灰色土状铝土矿、碎屑状铝土矿、豆鲕状铝土矿, 上部为浅灰至深灰色致密状铝土矿或铝土岩, 顶部为灰、浅灰色铝质泥岩(图 3a)。此类剖面的特点是仅产出一层铝土矿, 矿石类型以半土状和致密状为主, 次为碎屑状和豆鲕状, 铝土矿与底板泥岩的化学成分之间呈突变关系, 暗示铝土矿是经过搬运后异地沉积而成。

2) 绿泥石泥岩-铝质泥岩-复层铝土矿型 此类剖面底部为灰绿、墨绿色绿泥石泥岩, 下部为灰、浅灰铝质泥岩或铝土岩, 中部有两层或两层以上的铝土矿产出, 上部为浅灰至深灰色致密状铝土矿或铝土岩, 顶部为灰、浅灰色铝质泥岩(图 3b)。此类剖面的特点是含铝岩系中有两层或两层以上的铝土矿产出, 铝土矿层之间有明显的沉积间断, 夹层的岩性以浅灰色铝质泥岩为主, 呈透镜状分布; 矿石类型以半土状、碎屑状为主, 致密状次之, 局部见豆鲕状, 铝土矿与底板泥岩的化学成分之间有一定的突变关系, 反映了铝土矿是经过多次搬运沉积且有短期的沉积间断的特征。

3) 绿泥石泥岩—铝质泥岩型 此类剖面下部为灰绿、深灰色绿泥石泥岩, 中部为灰、浅灰铝质泥岩, 上部为灰、浅灰色铝质泥岩或铝土岩(图 3c)。此类剖面以不产铝土矿为主要特征, 厚度小, 岩石中 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 一般在 30%~40% 之间, 局部可过渡到铝土岩。此类剖面在研究区内分布较少, 代表了无铝土矿产出的无矿地带。

2 样品采集与分析

本次研究工作在 BT212、TC132、TC108、ZKx1882、ZKx1282 等 5 个探矿工程中共采集样品 30 件, 其中, 上覆梁山组碳质泥岩 2 件, 含铝岩系 22 件, 下伏黄龙组灰岩 3 件、韩家店组泥页岩 3 件。样品分析由澳实分析检测(广州)有限公司完成, 常量元素采用 X 射线荧光光谱仪完成, 分析精度高于 5%, 微量元素和稀土元素采用等离子体质谱测定, 分析精度高于 10%。其余样品数据来自贵州省新兴产业矿产资源调查评价报告^[29], 测试单位为有色金属桂林矿产地质测试中心。

3 含铝岩系中关键金属富集特征

分析结果(表 1)表明, 新民铝土矿区含铝岩系各类岩(矿)石中均不同程度富集关键金属元素 Li、Ga、Sc 和 REE。

3.1 Li

含铝岩系各类岩(矿)石中 Li 含量(表 1)大部分远高于其地壳丰度值^[30]。含铝岩系上部铝土岩中 Li 含量相对较高, $w(\text{Li})$ 介于 $620.00 \times 10^{-6} \sim 1096.36 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 911.27×10^{-6} , 富集系数 $K_{\text{Li}}=45.56$ 。含铝岩系中部铝土矿中, Li 含量变化范围较大, $w(\text{Li})$ 介于 $3.50 \times 10^{-6} \sim 1750.00 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 490.96×10^{-6} 。其中, 致密块状铝土矿中 Li 含量较高且变化范围较小, $w(\text{Li})$ 介于 $1030.00 \times 10^{-6} \sim 1750.00 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 1335.75×10^{-6} , 富集系数 $K_{\text{Li}}=66.79$; 豆鲕状铝土矿中 Li 含量相对较低, $w(\text{Li})$ 介于 $203.00 \times 10^{-6} \sim 295.00 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 248.07×10^{-6} , 富集系数 $K_{\text{Li}}=12.40$; 碎屑状铝土矿中 Li 含量中等, $w(\text{Li})$ 介于 $72.50 \times 10^{-6} \sim 460.00 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 254.93×10^{-6} , 富集系数 $K_{\text{Li}}=12.75$; 土状铝土矿 Li 含量相对最低, $w(\text{Li})$ 介于 $3.50 \times 10^{-6} \sim 9.70 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 5.35×10^{-6} , 明显低于地壳丰度, 呈现亏损特征。此外, 在含铝岩系下部铝质泥岩、绿泥石泥岩中, Li 含量相对较低, $w(\text{Li})$ 介于 $283.40 \times 10^{-6} \sim 738.70 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 471.68×10^{-6} 。其中, 铝质泥岩中 $w(\text{Li})$ 介于 $320.00 \times 10^{-6} \sim 738.70 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 526.14×10^{-6} , 富集系数 $K_{\text{Li}}=26.31$; 绿泥石泥岩 $w(\text{Li})$ 介于 $283.40 \times 10^{-6} \sim 480.00 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 403.60×10^{-6} , 富集系数 $K_{\text{Li}}=20.18$ 。

表 1 新民铝土矿床中关键金属含量特征表

Table 1. Contents of major elements and critical metals of various types of rocks and ores from the Xinmin bauxite deposit

位置	样号	样品岩性特征	w _B /%				w _B /10 ⁻⁶				
			Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Li	Ga	Sc	ΣREE	
P ₂ l	ZKx1882H3	灰黑色碳质泥岩	28.43	41.43	8.94	1.28	57.40	37.60	22.60	324.1	
	ZKx1282H3	灰黑色碳质泥岩	28.56	40.25	8.04	1.42	45.60	31.50	21.30	534.2	
	ZKx1001H1	黑色碳质泥岩	27.58	40.45	8.99	1.26	88.27	36.10	28.10	390.0	
	ZKx10012H1	黑色碳质泥岩	23.37	40.09	6.95	1.07	83.62	31.00	22.70	370.0	
	P ₂ l 平均值			26.99	40.56	8.23	1.26	68.72	34.05	23.68	404.6
矿层顶部	TC108H1	浅灰色铝土岩	43.18	34.89	3.17	2.05	620.0	81.90	17.10	155.4	
	TC132H1	浅灰色铝土岩	45.72	35.84	1.86	1.13	1090	24.90	22.20	59.37	
	ZKx1882H4	浅灰色铝土岩	45.23	31.12	4.04	2.92	1000	82.40	29.50	81.58	
	ZKx1282H4	浅灰色铝土岩	40.71	42.50	1.02	0.98	750.0	19.90	45.30	155.7	
	ZKx1001H3	浅灰色铝土岩	45.00	28.81	5.96	1.79	1096	42.60	31.50	140.0	
矿层顶部平均值			43.97	34.63	3.21	1.77	911.3	50.34	29.12	118.4	
矿层	BT212H1	深灰色致密状铝土矿	66.11	15.13	1.70	1.12	1100	38.90	31.90	110.4	
	TC132H3	浅灰色致密状铝土矿	59.09	21.94	1.88	1.48	1750	39.10	17.30	57.60	
	ZKx1282H5	浅灰色致密状铝土矿	56.84	23.28	2.76	2.19	1030	78.50	41.60	240.7	
	ZKx10012H2	浅灰色致密状铝土矿	60.56	16.84	2.48	1.97	1463	47.80	61.60	520.0	
	致密状铝土矿平均值			60.65	19.30	2.21	1.69	1336	51.08	38.10	232.2
	TC132H2	浅灰色豆瓣状铝土矿	78.70	3.14	1.33	1.82	203.0	135.5	16.80	62.79	
	ZKx1882H5	浅灰色豆瓣状铝土矿	61.76	16.48	2.43	3.58	295.0	163.0	31.10	96.40	
	ZKx1001H4	浅灰色豆瓣状铝土矿	70.43	7.99	1.65	3.11	246.2	64.30	32.20	100.0	
	豆瓣状铝土矿平均值			70.30	9.20	1.80	2.84	248.1	120.9	26.70	86.40
	BT212H2	浅灰色碎屑状铝土矿	66.97	15.35	0.68	2.03	460.0	91.0	11.20	104.7	
P ₁ d	ZKx1882H6	浅灰色碎屑状铝土矿	68.65	8.91	2.83	4.32	72.50	164.5	35.10	114.7	
	ZKx1001H5	浅灰色碎屑状铝土矿	59.40	11.18	1.74	2.08	232.3	114.9	34.60	190.0	
	碎屑状铝土矿平均值			65.01	11.81	1.75	2.81	254.9	123.5	26.97	136.5
	BT212H3	浅灰色土状铝土矿	80.48	0.57	1.57	3.04	3.90	120.0	21.90	164.4	
	TC108H2	黄灰色土状铝土矿	75.96	0.94	4.94	3.53	3.50	129.0	18.10	165.4	
	ZKx1882H7	灰白色土状铝土矿	73.97	1.45	2.44	6.78	4.30	159.5	36.30	261.2	
	ZKx1282H6	灰白色土状铝土矿	70.99	0.98	7.72	2.60	9.70	124.5	36.40	309.7	
	土状铝土矿平均值			75.35	0.99	4.17	3.99	5.35	133.3	28.18	225.2
	矿层平均值			67.85	10.30	2.58	2.83	491.0	105.0	30.44	178.4
	矿层底部	BT212H4	浅灰色铝质泥岩	46.05	32.90	3.40	2.55	412.0	65.10	26.00	270.2
TC108H3		灰黄色铝质泥岩	35.26	43.25	4.94	1.44	320.0	27.00	33.80	452.6	
ZKx1882H9		浅灰色铝质泥岩	37.83	44.50	1.99	1.60	570.0	28.70	45.20	614.9	
ZKx1282H7		浅灰色铝质泥岩	37.31	44.53	2.04	1.61	590.0	39.50	47.10	751.7	
ZKx1001H6		浅灰色铝质泥岩	40.08	29.40	11.74	1.75	738.7	62.40	27.40	440.0	
铝质泥岩平均值			39.31	38.92	4.82	1.79	526.1	44.54	35.90	505.9	
TC108H4		墨绿色铁绿泥石泥岩	25.18	23.94	34.78	0.85	411.0	37.20	20.40	814.7	
ZKx1882H10		灰绿色铁绿泥石泥岩	25.39	26.75	31.15	1.12	440.0	35.50	25.30	2361	
ZKx1282H8		灰绿色绿泥石泥岩	34.96	41.32	5.05	1.48	480.0	38.40	32.40	1026	
ZKx1001H7		灰绿色铁绿泥石泥岩	22.73	19.43	39.80	1.03	283.4	36.70	32.00	2250	
绿泥石泥岩平均值			27.07	27.86	27.70	1.12	403.6	36.95	27.53	1613	
矿层底部平均值			33.87	34.00	14.99	1.49	471.7	41.17	32.18	998.0	
P ₁ d 平均值			52.66	22.26	6.68	2.21	559.8	74.74	30.76	431.1	
C ₂ h	TC108H5	灰岩	0.60	0.63	1.23	0.01	8.70	1.50	2.30	133.3	
	ZKx1882H11	灰岩	1.02	1.19	2.08	0.03	11.60	1.60	2.00	42.11	
	ZKx1282H9	灰岩	2.11	2.89	1.36	0.09	6.90	3.00	3.00	59.45	
C ₂ h 平均值			1.24	1.57	1.56	0.04	9.07	2.03	2.43	78.28	
S ₁ h _j	BT212H6	泥页岩	24.61	22.96	8.09	0.57	239.0	40.80	22.90	173.9	
	ZKx1882H12	泥页岩	18.48	60.24	7.69	0.75	38.20	25.10	18.70	254.8	
	ZKx1282H10	泥页岩	16.19	65.27	5.92	0.72	39.10	21.10	14.70	229.9	
S ₁ h _j 平均值			19.76	49.49	7.23	0.68	105.4	29.00	18.77	219.5	
地壳克拉克值							20	15	22	165.35	

总体而言, 在含铝岩系垂向剖面上, Li 含量从上至下呈逐渐降低的变化趋势(图 5), 而在岩(矿)石类型上, Li 含量具有铝土岩>铝质泥岩>铝土矿>绿泥石泥岩的变化规律, 表现出亲铝土岩的特征。值得注意的是, 铝土矿石中 Li 含量变化范围较大, 其中, 致密块状铝土矿中 Li 最为富集, 含量明显高于其他岩石和铝土矿石, 而碎屑状铝土矿和豆鲕状铝土矿中的 Li 含量明显低于致密块状铝土矿石和其他岩石中的含量, 土状铝土矿中 Li 则呈现亏损特征, 由此可知, 随着 Al_2O_3 含量的增加和风化程度的加强, Li 含量逐渐降低, 暗示研究区 Li 的富集与原岩风化程度关系十分密切, 原岩风化程度越高, Li 的富集程度越低。

3.2 Ga

含铝岩系各类岩(矿)石中 Ga 含量(表 1)均都高于地壳丰度值^[30]。含铝岩系上部铝土岩中 $w(\text{Ga})$ 介于 $19.90 \times 10^{-6} \sim 82.40 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 50.34×10^{-6} , 富集系数 $K_{\text{Ga}}=3.36$ 。含铝岩系中部铝土矿中 $w(\text{Ga})$ 介于 $38.90 \times 10^{-6} \sim 164.50 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 105.04×10^{-6} 。其中, 致密状铝土矿中 $w(\text{Ga})$ 介于 $38.90 \times 10^{-6} \sim 78.50 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 51.08×10^{-6} , 富集系数 $K_{\text{Ga}}=3.41$; 豆鲕状铝土矿中 $w(\text{Ga})$ 介于 $64.30 \times 10^{-6} \sim 163.00 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 120.93×10^{-6} , 富集系数 $K_{\text{Ga}}=8.06$; 碎屑状铝土矿中 $w(\text{Ga})$ 介于 $91.00 \times 10^{-6} \sim 164.50 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 123.47×10^{-6} , 富集系数 $K_{\text{Ga}}=8.23$; 土状铝土矿中 $w(\text{Ga})$ 介于 $120.0 \times 10^{-6} \sim 159.50 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 133.25×10^{-6} , 富集系数 $K_{\text{Ga}}=8.88$ 。此外, 在含铝岩系下部铝质泥岩和绿泥石泥岩中, $w(\text{Ga})$ 介于 $27.00 \times 10^{-6} \sim 65.10 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 41.17×10^{-6} 。其中, 铝质泥岩中 $w(\text{Ga})$ 介于 $27.00 \times 10^{-6} \sim 65.10 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 44.54×10^{-6} , 富集系数 $K_{\text{Ga}}=2.97$; 绿泥石泥岩中 $w(\text{Ga})$ 介于 $35.50 \times 10^{-6} \sim 38.40 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 36.95×10^{-6} , 富集系数 $K_{\text{Ga}}=2.46$ 。

由上可知, 在含铝岩系垂向剖面上, Ga 含量表现为上部和下部低、中部高的富集特征(图 5); 在岩(矿)石类型上, Ga 含量总体上具有铝土矿>铝土岩>铝质泥岩>绿泥石泥岩的变化规律, 表现出亲铝土矿的特征, 且在不同矿石类型中, Ga 含量具有土状铝土矿>碎屑状铝土矿>豆鲕状铝土矿>致密状铝土矿的规律, 由此可知, 随着 Al_2O_3 含量的增加和风化程度的加强, Ga 含量逐渐升高, 同样暗示 Ga 的富集与原岩风化程度关系密切, 原岩风化程度越高, Ga 的富集程度越高。

3.3 Sc

Sc 在含铝岩系中的含量相对较低(表 1), 大多略高于其地壳丰度值^[30]。其中, 含铝岩系上部铝土岩中, $w(\text{Sc})$ 介于 $17.10 \times 10^{-6} \sim 45.30 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 29.12×10^{-6} , 富集系数 $K_{\text{Sc}}=1.32$ 。含铝岩系中部铝土矿中, $w(\text{Sc})$ 介于 $11.20 \times 10^{-6} \sim 61.60 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 30.44×10^{-6} 。其中, 致密状铝土矿中 $w(\text{Sc})$ 介于 $17.30 \times 10^{-6} \sim 61.60 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 38.10×10^{-6} , 富集系数 $K_{\text{Sc}}=1.73$; 豆鲕状铝土矿中 $w(\text{Sc})$ 介于 $16.80 \times 10^{-6} \sim 32.20 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 26.70×10^{-6} , 富集系数 $K_{\text{Sc}}=1.21$; 碎屑状铝土矿中 $w(\text{Sc})$ 介于 $11.20 \times 10^{-6} \sim 35.10 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 26.97×10^{-6} , 富集系数 $K_{\text{Sc}}=1.23$; 土状铝土矿中 $w(\text{Sc})$ 介于 $18.10 \times 10^{-6} \sim 36.40 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 28.18×10^{-6} , 富集系数 $K_{\text{Sc}}=1.28$ 。在含铝岩系下部铝质泥岩和绿泥石泥岩中, $w(\text{Sc})$ 介于 $20.40 \times 10^{-6} \sim 47.10 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 32.18×10^{-6} ; 其中, 铝质泥岩中 $w(\text{Sc})$ 介于 $26.00 \times 10^{-6} \sim 47.10 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 35.90×10^{-6} , 富集系数 $K_{\text{Sc}}=1.63$; 而绿泥石泥岩中 $w(\text{Sc})$ 介于 $20.40 \times 10^{-6} \sim 32.40 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 27.53×10^{-6} , 富集系数 $K_{\text{Sc}}=1.25$ 。

总体而言, 在含铝岩系垂向剖面上, Sc 含量从上至下呈逐渐升高的趋势(图 5); 而在岩石类型上, Sc 含量呈铝质泥岩>铝土矿>铝土岩>绿泥石泥岩的变化趋势, 在不同铝土矿石类型上, Sc 含量具有致密状铝土矿石>碎屑状铝土矿石>土状铝土矿石>豆鲕状铝土矿石的变化规律。

3.4 REE

与 $\sum \text{REE}$ 地壳丰度值^[30]相比, 在含铝岩系上部铝土岩中, $w(\sum \text{REE})=59.37 \times 10^{-6} \sim 155.71 \times 10^{-6}$, 平均 118.41×10^{-6} , 表现为亏损。在含铝岩系中部铝土矿中, $w(\sum \text{REE})$ 变化范围较大, 介于 $57.60 \times 10^{-6} \sim$

520.00×10⁻⁶ 之间, 平均 178.43×10⁻⁶。其中, 致密铝土矿中 $w(\Sigma\text{REE})=57.60\times 10^{-6}\sim 520.00\times 10^{-6}$, 平均 232.16×10⁻⁶, 略高于地壳丰度, 富集系数 $K_{\Sigma\text{REE}}=1.40$; 豆鲕状铝土矿中 $w(\Sigma\text{REE})=62.79\times 10^{-6}\sim 100.00\times 10^{-6}$, 平均 86.40×10⁻⁶, 表现为亏损特征; 碎屑状铝土矿中 $w(\Sigma\text{REE})=104.68\times 10^{-6}\sim 190.00\times 10^{-6}$, 平均 136.47×10⁻⁶, 表现为亏损特征; 土状铝土矿中 $w(\Sigma\text{REE})=164.42\times 10^{-6}\sim 309.68\times 10^{-6}$, 平均 225.18×10⁻⁶, 略高于地壳丰度值, 其富集系数 $K_{\Sigma\text{REE}}=1.36$ 。此外, 在含铝岩系下部铝质泥岩和绿泥石泥岩中, $w(\Sigma\text{REE})$ 变化范围较大, 介于 270.23×10⁻⁶~2361.33×10⁻⁶之间, 平均 997.97×10⁻⁶; 其中, 铝质泥岩中 $w(\Sigma\text{REE})=270.23\times 10^{-6}\sim 751.73\times 10^{-6}$, 平均 505.88×10⁻⁶, 明显高于地壳丰度, 富集系数 $K_{\Sigma\text{REE}}=3.06$, 而绿泥石泥岩中 $w(\Sigma\text{REE})$ 相对最高, 变化范围在 841.70×10⁻⁶~2361.33×10⁻⁶之间, 平均 1613.08×10⁻⁶, 远高于地壳丰度值, 富集系数 $K_{\Sigma\text{REE}}$ 达到 9.76 (表 1)。

总体而言, 在含铝岩系垂向剖面上, 从上至下表现出上部和中部稀土总量低, 而下部稀土总量高的富集规律 (图 5)。在岩石类型上, ΣREE 总体上呈绿泥石泥岩>铝质泥岩>铝土矿>铝土岩的变化趋势, 表现出亲绿泥石泥岩的特征。在矿石类型上, ΣREE 总体上呈致密状铝土矿>土状铝土矿>碎屑状铝土矿>豆鲕状铝土矿的变化趋势。

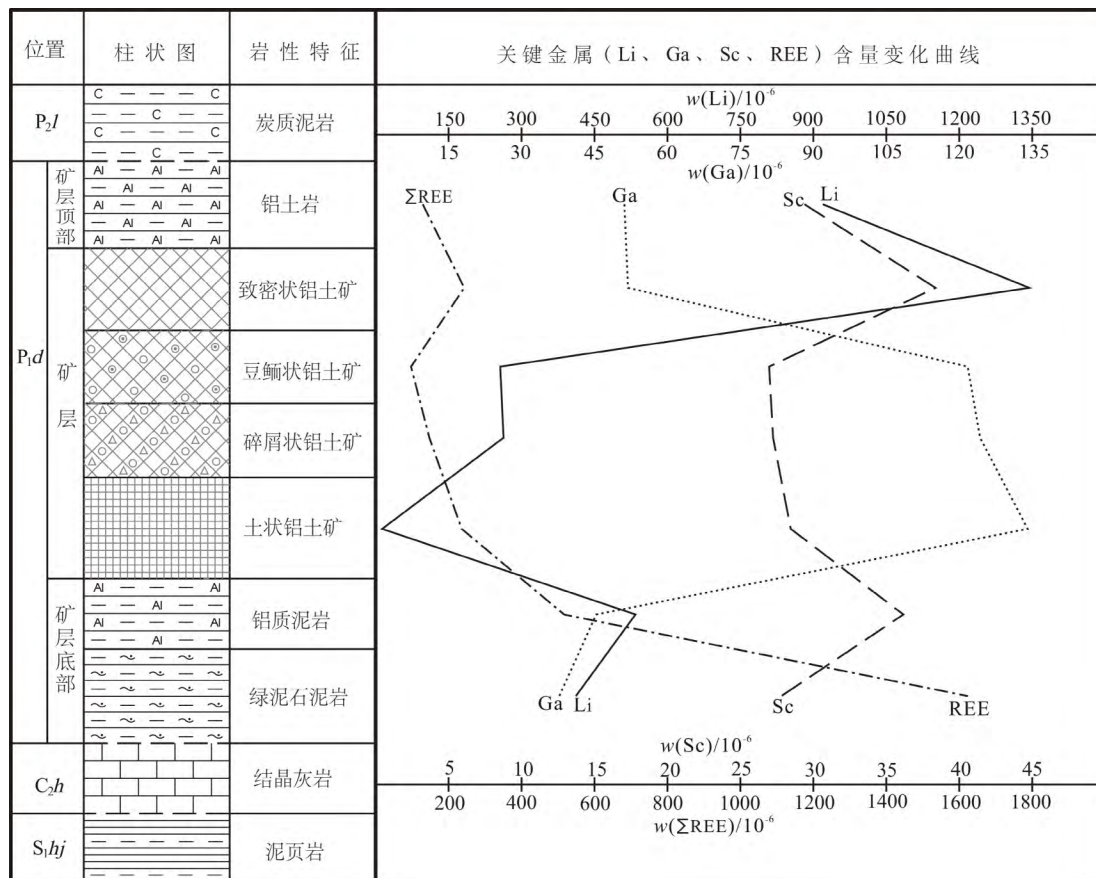


图 5 关键金属 Li、Ga、Sc、REE 在含铝岩系中的含量变化图

Fig. 5. Variation for contents of critical metals of Li, Ga, Sc, and REE in the bauxite-bearing rock series.

4 讨论

4.1 关键金属富集控制因素

为了研究新民铝土矿床含铝岩系中关键金属 Li、Ga、Sc、REE 与主量元素 Al₂O₃、SiO₂、Fe₂O₃、TiO₂ 之间的相关性, 本次对含铝岩系中的相关矿产进行了 R 型聚类分析。相关系数 (表 2) 和相关谱系图 (图 6) 表明, 含铝岩系各类岩 (矿) 石中关键金属与主量元素之间存在一定的相关关系, 按照相

关系数 $r=0.8$ 、 0.7 、 0.4 、 0.2 ，可将元素划分为 4 个相关组合：① $r>0.8$ ， Fe_2O_3 与 $\sum\text{REE}$ 正相关，相关性明显；② $r>0.7$ ， Al_2O_3 、 TiO_2 、 Ga 正相关，相关性较明显。③ $0.7>r>0.4$ ， SiO_2 与 Li 正相关，相关性低。④ $0.4>r>0.2$ ， Fe_2O_3 与 SiO_2 、 Li 与 Sc 正相关，相关性微弱。

通过元素关系图（图 7）中可以更好看出：① Li 与 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 不相关，而与 SiO_2 呈正相关关系，表明 Li 富集在 SiO_2 相对富集的部位；② Ga 、 Sc 与 SiO_2 、 Fe_2O_3 不相关，而与 Al_2O_3 、 TiO_2 呈正相关关系，表明 Ga 、 Sc 主要富集于铝土矿石中；③ REE 与 SiO_2 、 TiO_2 不相关，而与 Fe_2O_3 呈正相关关系，与 Al_2O_3 呈负相关关系，表明铝土矿石并非 REE 富集地段，而 Fe_2O_3 富集部位是 REE 富集的有利地段；④ Li 、 Ga 、 Sc 、 REE 之间不存在相关关系（图略），暗示其富集控制因素存在显著差异。

综合关键金属的富集特征及相关矿产相关性分析认为， Li 、 Ga 、 Sc 、 REE 在研究区含铝岩系中分异富集，可能是这些元素在含矿岩系原岩的风化过程中，由于活化迁移等地球化学性质的差异，造成其富集于含铝岩系不同部位。因此，原岩风化程度可能是控制这些元素富集的关键因素之一，这与贵州修文小山坝铝土矿的研究结果^[31]类似。

4.2 关键金属资源潜力分析

根据地质勘探成果^[22]，新民铝土矿床含铝岩系地表出露长度 12.89 km，分布面积 31.86 km²，厚度 2.64~12.93 m，平均厚度 5.92 m。按照工业指标（边界品位： $w(\text{Al}_2\text{O}_3)\geq 40\%$ ， $A/S(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)\geq 1.8$ ；工业品位： $w(\text{Al}_2\text{O}_3)\geq 55\%$ ， $A/S\geq 3.5$ ；最小可采厚度 ≥ 0.8 m）圈定铝土矿资源储量分布面积 8.54 km²，铝土矿体厚度 0.80~9.24 m，平均厚度 2.25 m（图 8）。

关于铝土矿中伴生关键金属元素最低综合利用和评价指标目前在全球与我国均尚不完善，根据我国 2014 年由地质出版社出版的《矿产资源工业要求手册》^[32]，除镓外，沉积型铝土矿床中伴生锂、铈、稀土元素等尚无综合评价的工业指标。本次研究参考国内一些已有关键金属综合利用标准：1) Li 参照前人的评价指标（边界品位： $w(\text{Li}_2\text{O})\geq 0.1\%$ ，即 $w(\text{Li})\geq 0.046\%$ ）^[33]，研究区含铝岩系上部铝土岩及致密状铝土矿中 Li 含量达到了评价要求，其平面分布面积为 31.86 km²，平均铅垂厚度 1.50 m，体质量 2.80 g/cm³，平均品位 1099×10^{-6} ；2) 根据《矿产资源工业要求手册》（2014 修订版）^[32]， Ga 的综合评价工业指标为 $w(\text{Ga})\geq 0.01\%$ ，研究区含铝岩系中部豆鲕状铝土矿、碎屑状铝土矿及土状铝土矿中 Ga

表 2 新民铝土矿床相关矿产相关系数矩阵表

Table 2. Correlation coefficient matrix table of related major and trace elements in the Xinmin bauxite deposit

元素	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	TiO_2	Li	Ga	Sc	$\sum\text{REE}$
Al_2O_3	1							
SiO_2	-0.804	1						
Fe_2O_3	-0.611	0.214	1					
TiO_2	0.730	-0.563	-0.335	1				
Li	-0.232	0.421	-0.153	-0.457	1			
Ga	0.731	-0.743	-0.287	0.797	-0.581	1		
Sc	-0.132	0.232	-0.143	0.033	0.234	-0.188	1	
$\sum\text{REE}$	0.035	0.211	0.829	-0.347	-0.133	-0.381	0.107	1

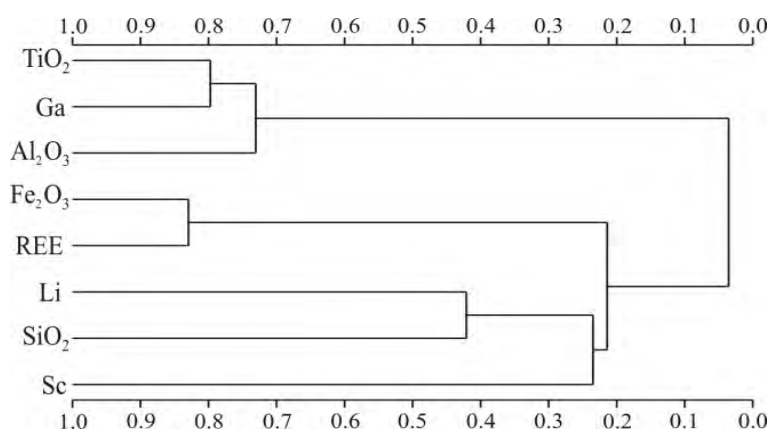


图 6 新民铝土矿床相关矿产谱系图

Fig. 6. The pedigree diagram of major and trace elements for the Xinmin bauxite deposit.

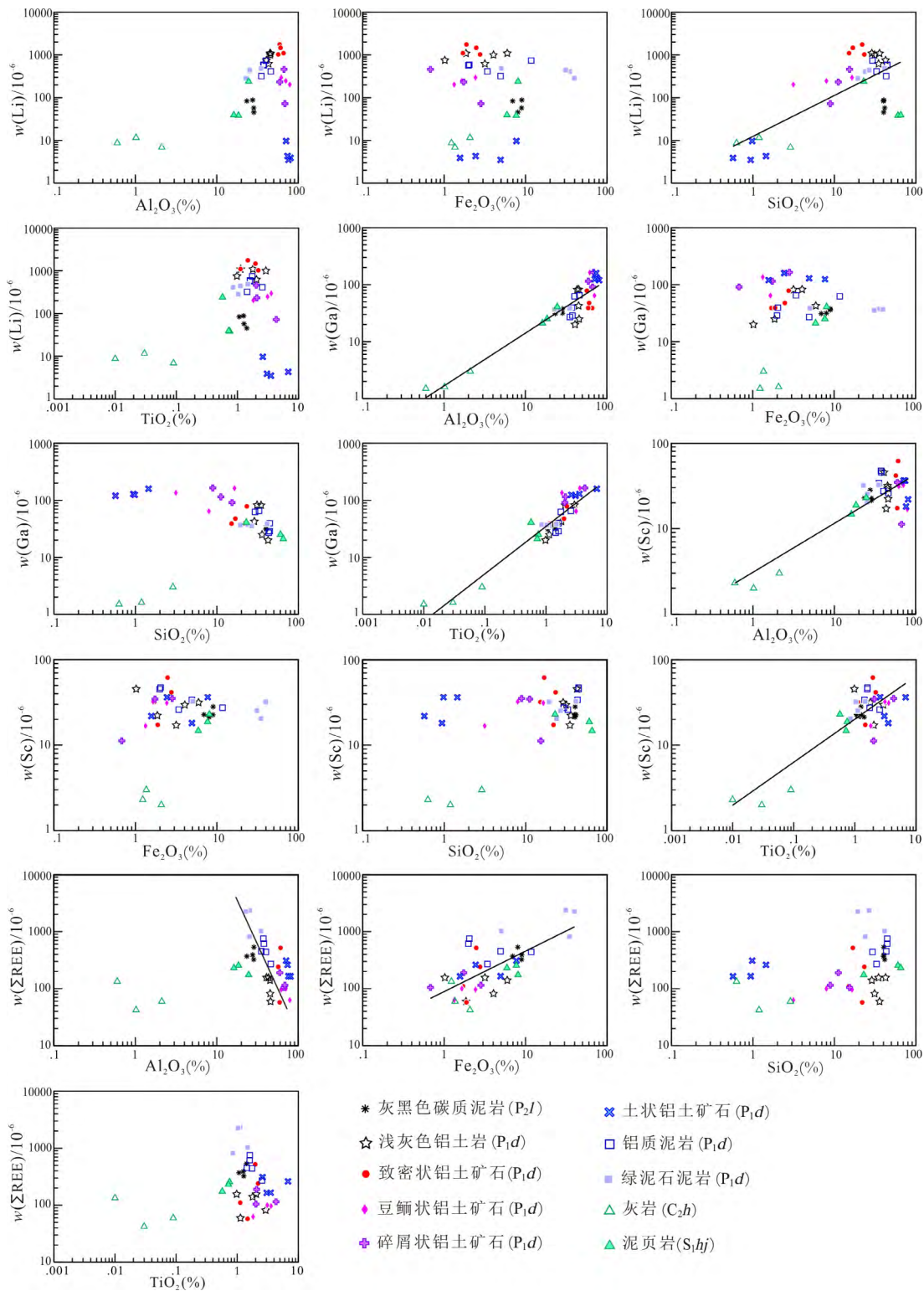


图 7 新民铝土矿床含铝岩系不同岩 (矿) 石中元素关系图

Fig. 7. Relationship diagrams for elements in different types of rocks (ores) of bauxite-bearing rock series from the Xinmin bauxite deposit.

含量达到综合评价要求, 其平面分布面积为 8.54 km^2 , 平均铅垂厚度 2.60 m , 体质量 2.68 g/cm^3 , 平均品位 126.6×10^{-6} ; 3) Sc 参考前人的评价标准 $w(\text{Sc}) \geq 30 \times 10^{-6}$ [16, 34], 研究区含铝岩系中部铝土矿层及底部的铝质泥岩、绿泥石泥岩中的 Sc 含量达到评价要求, 其平面分布面积为 31.86 km^2 , 平均铅垂厚度

2.50 m, 体质量 2.70 g/cm³, 平均品位 31.12×10⁻⁶; 4) 研究区稀土元素属典型的轻稀土富集型^[26, 35-37], 参照风化壳离子吸附型轻稀土矿床的工业指标 (边界品位: REO≥0.07%, 工业品位: REO≥0.1%)^[38], 含铝岩系底部绿泥石泥岩中的稀土含量达到了评价要求, 其平面分布面积为 31.86 km², 平均铅垂厚度 1.50 m, 体质量 2.70 g/cm³, 平均品位 1613×10⁻⁶。

根据以上评价标准, 预测研究区含铝岩系中 Li、Ga、Sc、REE 的远景资源储量 (表 3)。其中, Li 远景资源储量达到大型规模的 3.2 倍, Ga 远景资源储量达到大型规模的 3.8 倍, Sc 远景资源储量达到大型规模的 669 倍, REE 远景资源储量达到大型规模的 2.1 倍。由此可见, 新民铝土矿床中关键金属 Li、Ga、Sc、REE 具有良好资源潜力, 且其潜在经济价值巨大。然而上述关键金属的赋存形式目前仍不清楚, 其关键控制因素仍需深化, 因此, 加强该区关键金属矿产的综合研究与综合评价, 将在未来开发利用铝土矿资源时, 不仅可以提高矿产资源的综合利用率, 降低开采成本, 从而获得更高经济效益, 更重要的是为建立我国关键金属资源战略储备基地提供实际地质地球化学支撑。

5 结论

1) 新民铝土矿床含铝岩系中富集 Li、Ga、Sc 和 REE 等关键金属资源。在含铝岩系垂向剖面上, 具有上部富 Li、中部富 Ga、下部富 REE 的富集规律, Sc 在含铝岩系中变化不大; 在不同岩 (矿) 石中, Li、Ga 和 REE 分别富集于铝土岩、铝土矿和绿泥石泥岩中; 此外, 在不同类型铝土矿石中, Li 主要富集在致密状铝土矿石中, Ga 在土状铝土矿石、碎屑状铝土矿石、豆鲕状铝土矿石中均较富集, 而 REE 在致密状铝土矿石和土状铝土矿石中相对富集, Sc 在各类铝土矿石中变化不大。

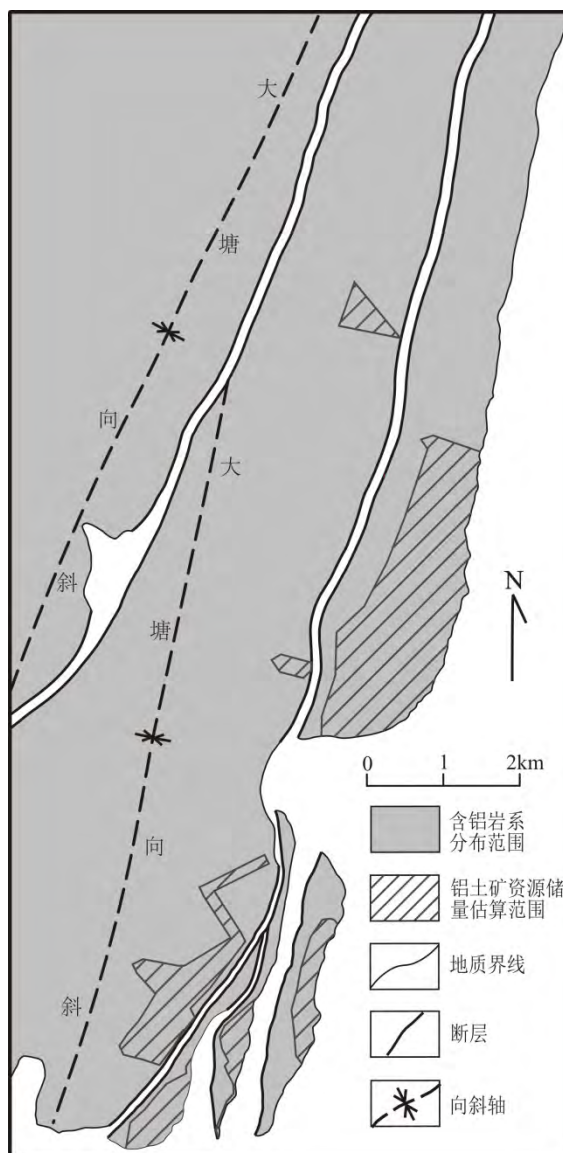


图 8 新民铝土矿床含铝岩系及资源储量估算范围分布图

Fig. 8. A map showing the distribution of bauxite-bearing rock series and the areas with estimated resources of the Xinmin bauxite deposit.

表 3 新民铝土矿床关键金属资源储量

Table 3. The estimated resources of critical metals in the Xinmin bauxite deposit

元素	水平面积 /m ²	平均垂厚/m	体质量 /(t/m ³)	平均品位 /10 ⁻⁶	远景资源储量/t
Li	31.86	1.50	2.80	1099	147059
Ga	8.54	2.60	2.68	126.6	7534
Sc	31.86	2.50	2.70	31.12	6693
ΣREE	31.86	1.50	2.70	1613	208130

2) 研究区含铝岩系不同岩(矿)石中, Li 与 SiO₂ 呈正相关关系, Ga、Sc 与 Al₂O₃、TiO₂ 呈正相关关系, 而 REE 与 Fe₂O₃ 呈正相关关系, Li、Ga、Sc、REE 之间不存在相关关系, 这可能是这些元素在含矿岩系原岩的风化过程中, 由于活化迁移等地球化学性质的差异造成, 原岩风化程度可能是控制这些元素富集的关键因素之一。

3) 研究区含铝岩系中, 关键金属 Li、Ga、Sc、REE 的资源潜力和潜在经济价值巨大, 建议加强该区上述关键金属的赋存形式和关键控制因素等地质地球化学综合研究与综合评价, 不仅可以提高矿产资源的综合利用率, 降低开采成本, 从而获得更高经济效益, 更重要的是为建立我国关键金属资源战略储备基地提供实际地质地球化学支撑。

参 考 文 献:

- [1] 余韵, 陈甲斌. 美国危机矿产研究概况及其启示[J]. 国土资源情报, 2017(2): 45-51.
- [2] 中国地质期刊编辑部. 美国内政部确定钨、稀土、锂等 35 种关键矿产清单[J]. 中国地质, 2018, 45(5): 1086.
- [3] 吴初国, 马永欢, 张迎新. 澳大利亚矿业政策[J]. 国土资源情报, 2018(10): 61-67.
- [4] 张迎新. 欧盟将 14 类矿产确定为关键原材料[J]. 国土资源情报, 2011(5): 35-39+6.
- [5] 曹庭语. 日本稀有金属保障战略[J]. 国土资源情报, 2011(4): 42-46.
- [6] 张雅丽, 陈丽萍, 陈静, 等. 主要发达国家矿产资源安全保障战略[J]. 国土资源情报, 2019(11): 24-30.
- [7] Mongelli G, Mameli P, Oggiano G, et al. Generation of Ce anomalies in SW Sardinian manganese ores[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, 133(8): 42-49.
- [8] Nazari-Dehkordi T, Spandler C, Oliver N H S, et al. Unconformity-Related rare earth element deposits: A regional-scale hydrothermal mineralization type of northern Australia[J]. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 2018, 113(6): 1297-1305.
- [9] Qiao J Y, Tang J, Xue Q. Study on Pb release by several new lixiviants in weathered crust elution-deposited rare earth ore leaching process: Behavior and mechanism[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 190(8): 131-138.
- [10] 毛景文, 杨宗喜, 谢桂青, 等. 关键矿产——国际动向与思考[J]. 矿床地质, 2019, 38(4): 689-698.
- [11] 王登红. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向[J]. 地质学报, 2019, 93(6): 1189-1209.
- [12] 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 等. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题[J]. 中国科学基金, 2019, 33(2): 106-111.
- [13] 郭娟, 闫卫东, 徐曙光, 等. 中国关键矿产评价标准和清单的探讨[J]. 地球学报. 1-7[2021-01-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3474.P.20201014.1038.002.html>.
- [14] 叶霖, 潘自平, 程增涛. 贵州铝土矿中伴生元素综合利用前景[J]. 矿物学报, 2007(Z1):388-392.
- [15] 金中国, 刘辰生, 邹林, 郑明泓, 张力, 韩英. 贵州务-正-道地区二叠纪铝土矿沉积环境地球化学证据[J]. 地质学报, 2018, 92(04):817-827.
- [16] 龙克树, 付勇, 龙珍, 等. 全球铝土矿中稀土和铀的资源潜力分析[J]. 地质学报, 2019, 93(6): 1279-1295.
- [17] 陈毓川, 裴荣富, 宋天锐, 等. 中国矿床成矿系列初论[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 1-104.
- [18] 刘平. 初论贵州之铝土矿[J]. 贵州地质, 1987(1): 1-12.
- [19] 金中国, 黄志龙, 刘玲, 等. 黔北务正道地区铝土矿成矿规律研究[M]. 北京: 地质出版社, 2013: 1-152.
- [20] 金中国, 武国辉, 黄智龙, 等. 贵州务川瓦厂坪铝土矿床地球化学特征[J]. 矿物学报, 2009, 29(4): 458-462.
- [21] 金中国, 邹林, 张力, 等. 贵州务—正—道地区铝土矿成矿模式与找矿模型[J]. 沉积学报, 2018, 36(5): 914-926.
- [22] 杜藿, 赵磊, 李光春, 等. 贵州省道真县新民铝土矿勘探报告[R]. 贵阳: 贵州省有色金属和核工业地质勘查局地质矿产勘查院, 2018.
- [23] 杨朝贵, 杜藿. 贵州道真新民铝土矿床地质特征及成矿远景[J]. 现代矿业, 2017, 34(6): 37-40.
- [24] 莫光员, 金中国, 龚和强, 等. 黔北道真新民铝土矿床地质特征及控矿因素探讨[J]. 地质科技情报, 2013, 32(1): 40-45.
- [25] 代龙省, 金中国, 李光春, 等. 贵州道真新民铝土矿床地质-地球化学特征研究[J]. 矿物学报, 2015, 92(3): 587-603.
- [26] 杜藿, 郑明泓, 曾道国, 等. 贵州道真新民铝土矿床成矿机理[J]. 地质与勘探, 2020, 56(6): 1116-1133.
- [27] 龙克树, 付勇, 陈葵, 等. 黔北铝土矿稀土元素富集机制——以新民铝土矿为例[J]. 矿物学报, 2019, 39(04): 443-454.
- [28] 戴传国, 王学华, 陈建书, 等. 贵州省区域地质志[R]. 贵阳: 贵州省地质调查院, 2012.
- [29] 薛洪富, 向明坤, 袁民汕, 等. 贵州省新兴产业矿产资源调查评价报告[R]. 贵阳: 贵州省有色金属和核工业地质勘查局地质矿产勘查院, 2020.
- [30] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1984: 130-384.
- [31] 叶霖, 潘自平, 程增涛. 贵州修文小山坝铝土矿中镓等伴生元素分布规律研究[J]. 矿物学报, 2008(02): 105-111.
- [32] 邵厥年, 陶维屏, 张义勋, 等. 矿产资源工业手册[M]. 北京: 地质出版社, 2014, 231-298.
- [33] 温汉捷, 罗重光, 杜胜江, 等. 碳酸盐黏土型锂资源的发现及意义[J]. 科学通报, 2020, 65(1): 53-59.
- [34] 李军敏, 丁俊, 尹福光, 等. 渝南申基坪铝土矿矿区铀的分布规律及地球化学特征研究[J]. 沉积学报, 2012, 30(5): 909-918.
- [35] 汪小妹, 焦养泉, 杜远生, 等. 黔北务正道地区铝土矿稀土元素地球化学特征[J]. 地质科技情报, 2013, 32(1): 27-33.
- [36] Gu J, Huang Z L, Fan H P, et al. Mineralogy, geochemistry, and genesis of lateritic bauxite deposits in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, Northern Guizhou Province, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, 130: 44-59.
- [37] 金中国, 刘玲, 黄智龙, 等. 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[J]. 地质学报, 2019, 93(11): 2847-2861.
- [38] 杨子江, 张祖林, 黄定堂, 等. 稀土矿产地质勘查规范[S]. 北京: 中华人民共和国国土资源部, 2002: 40-41.