

黔西北金沙地区含铝岩系中稀土元素富集机理

客昆, 赖杨, 龚大兴, 田恩源

(中国地质科学院矿产综合利用研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 黔西北金沙地区下石炭统九架炉组含铝岩系中稀土元素含量较高, 具有一定勘探潜力。本文通过野外剖面测量、探槽编录、岩心编录、镜下鉴定、主微量、稀土元素化学分析等方法, 研究含铝岩系中稀土元素富集机制, 得出: 黔西北金沙地区含铝岩系中 ΣREE 含量较高, 在 $156.30 \times 10^{-6} \sim 1\,543.70 \times 10^{-6}$ 之间, 平均为 743.49×10^{-6} , 轻稀土相对富集, $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 值在 2.20~10.69 之间。含铝岩系中稀土元素的富集受黏土矿物含量、含铁矿物等多种因素共同影响, 轻稀土在碱性条件下水解率较高易富集, 氧化环境下有利于 REE^{3+} 的沉积, 土状铝土矿沉积水体呈弱碱性, 沉积环境为氧化环境, 为稀土元素的富集提供了良好的富集条件, 钻孔 ZK01 底部高铁土状铝土矿中稀土元素含量在 0.115%~0.150%, 指示金沙地区含铝岩系中稀土元素具有较大勘探潜力。

关键词: 黔西北; 九架炉组; 含铝岩系; 富集机制; 地球科学

doi:10.12476/kczhly.202505270093

中图分类号: TD985:P612 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 04-0083-08

引用格式: 客昆, 赖杨, 龚大兴, 等. 黔西北金沙地区含铝岩系中稀土元素富集机理[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(4): 83-90.

QIE Kun, LAI Yang, GONG Daxing, et al. Enrichment mechanism of rare earth elements in the aluminum-bearing rock series of the jinsha area in northwest guizhou province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(4): 83-90.

稀土资源在国防和工业方面起着至关重要的作用, 是一种非常重要的战略性矿产资源^[1-2], 美国、欧盟、日本、澳大利亚以及中国均把稀土列为危机矿产、关键原材料或战略性矿产^[3-6]。地壳中稀土总含量平均约为 147×10^{-6} , 其中 Ce 丰度最高, 为 43×10^{-6} , 远高于 Cu(27×10^{-6}) 和 Pb(11×10^{-6}) 等一些大宗金属元素^[7], 主要分布在中、印、美、俄、澳大利亚、巴西、越南、俄罗斯等国家^[8]。

中国的稀土资源储量和产量都位居全球首位^[9-10]。近年来, 为保持我国稀土资源储量优势, 必须进一步加大稀土矿床勘探力度, 探求新类型稀土矿产资源。因此, 稀土矿成矿规律及伴生矿产中稀土元素的富集机理成为研究热点。迄今为

止, 在各种矿物中已鉴定出超过 250 种含稀土的矿物, 如碳酸盐、磷酸盐、硅酸盐、氧化物和卤化物^[11-13]。全球铝土矿资源丰富, 主要分布在亚洲、非洲、大洋洲内 17 个国家^[14-15], 许多铝土矿中存在着稀土矿富集现象, 部分铝土矿中伴生稀土矿品位达到了稀土矿床的边界品位^[16-17], 以往在铝土矿区发现过伴生的稀土矿床的先例^[18]。随着矿产综合利用技术的不断提高, 伴生稀土矿床的工业品位会适当降低, 铝土矿可作为潜在的稀土资源勘探对象^[19]。黔北务川—正安—道真(务—正—道)地区位于黔西北—渝南铝土矿成矿带, 该成矿带铝土矿含矿岩系底部黏土岩中 REE 明显富集, 同样达到综合利用标准^[20-22], 表明该区域

收稿日期: 2025-05-27

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目 (DD202311-14)

作者简介: 客昆 (1987-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向地质调查与矿产勘查。

通信作者: 赖杨 (1987-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为地质调查与矿产勘查。

具有形成伴生稀土矿床的巨大潜力。

黔西北金沙地区下石炭统九架炉组含铝岩系中稀土元素含量较高,但缺少对含铝岩系中稀土元素富集机理及稀土元素指示意义的研究。本文以黔西北金沙地区下石炭统九架炉组含铝岩系为研究对象,通过野外剖面测量、探槽编录掌握含铝岩系的岩性组合特征,结合镜下观察、化学分析等方法,综合分析黔西北金沙地区下石炭统九架炉组含铝岩系中稀土元素富集机理及稀土元素指示意义。并为后续稀土元素资源综合利用提供依据。

1 地质背景

黔西北地区在志留纪末的广西运动和泥盆纪末的紫云运动期间大面积抬升,形成长期隆起区。早石炭世岩关期气候湿热,暴露地表的早古生代岩石全面红土化、钙红土化,形成的含三水铝石红土风化壳物质,为沉积型铝土矿提供了物源^[23-24]。黔西北—渝南石炭纪含铝岩系,自北向南分布在修文、息烽、遵义、正安、道真 5 个铝土矿带,矿带之间为 NWW 向的无矿带或基本无矿带所间隔^[25-26]。金沙—息烽地区处于息烽—遵义铝土矿区内,赋矿层位为下石炭统九架炉组 (C_{1j1})^[27] (图 1)。

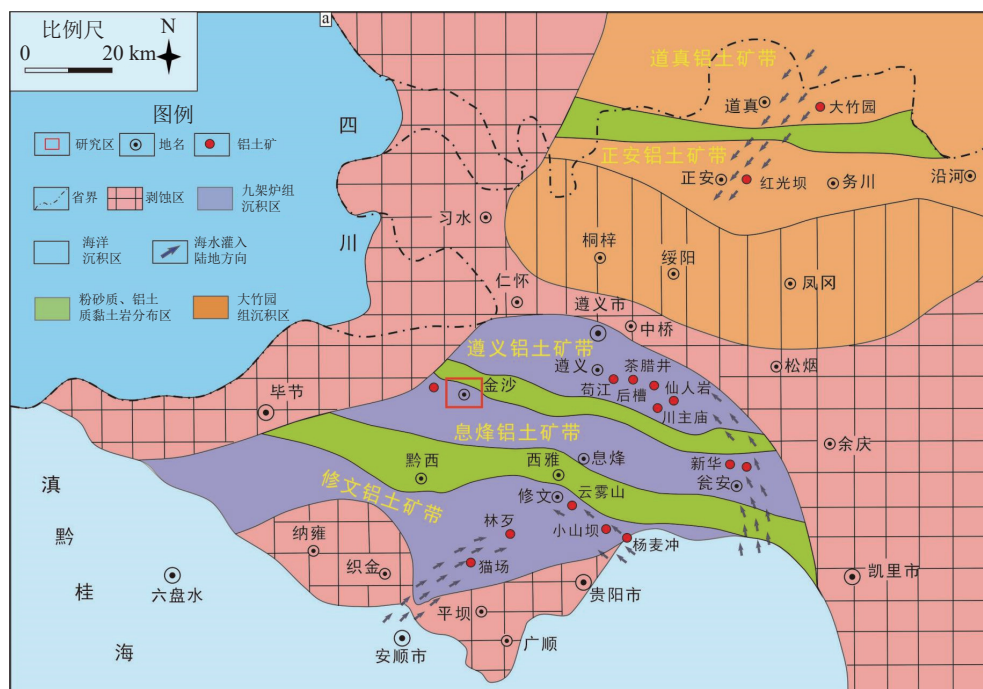


图 1 黔西北金沙地区铝土矿沉积分布^[23]

Fig.1 Distribution map of bauxite deposits in Jinsha Area, northwest Guizhou Province

2 样品采集及分析测试

采集贵州金沙—息烽一带 2 个剥土剖面、1 个探槽、1 口钻井共计 30 件样品。进行镜下观察、主量元素、微量元素、稀土元素分析。其中,岩矿鉴定由廊坊市拓轩岩矿检测中心完成,主量元素、微量元素、稀土元素分析由中国地质科学院矿产综合利用研究所分析测试中心完成。岩矿鉴定使用徕卡偏光显微镜 dm4500 完成,鉴定标准参照 DZ/T 0130—2006《地质矿产试验测试质量管理规范》,主量元素分析采用 Opima5300V 电感耦合等离子体光谱仪,依据 DZ/T 0279.2—2016《区

域地球化学样品分析方法 第 2 部分:氧化钙等 27 个分量测定电感耦合等离子体原子发射光谱法》进行分析测试;微量元素采用 AXIOS MAX-X 射线荧光光谱仪,依据 GB/T 14506—2010《硅酸盐岩石化学分析方法》、GB/T 1450628—2010《硅酸盐岩石化学分析方法第 28 部分:16 个主成分量测定 X-射线荧光光谱法》进行分析测试;稀土配分采用 NexION 350X 电感耦合等离子体质谱仪依据 GB/T 14506.29—2010《硅酸盐岩石化学分析方法第 29 部分:稀土等 22 个元素量测定电感耦合等离子体质谱法》进行分析测试。

3 含铝岩系岩性特征

宏观特征：含铝岩系主要赋存于下石炭统九架炉组（C₂jj）地层中，为一套湖泊相的黏土岩，矿体厚度较为稳定，在区域中呈近北东—南西向带状分布，厚度在0~36 m之间，下伏地层为桐梓组微晶灰岩，含铝岩系底部为灰绿色—灰色碎屑状或鳞片状含绿泥石黏土岩，中部为浅灰色、深灰色中—厚层状、松散土状、碎屑状铝土质黏土岩（图2a），中上部可见有鲕粒状铝土矿

（图2b），鲕粒大小在2 mm×7 mm，具微—泥晶含鲕豆粒砂砾屑结构，由内碎屑、鲕豆粒和填隙物三部分构成，主要由硬水铝石（51%）、黏土矿物（48%）、石英（<1%）、黄铁矿（<1%）等物质组成（图2e），上部为浅灰色、灰色中厚层致密状铝土质黏土岩间夹一层1.1 m厚黑色炭质泥岩（图2c），层面可见大量植物碎片化石（图2d），主要成分为硬水铝石（15%）、黏土矿物（83%）、石英（<1%）、黄铁矿（<1%）（图2f）。

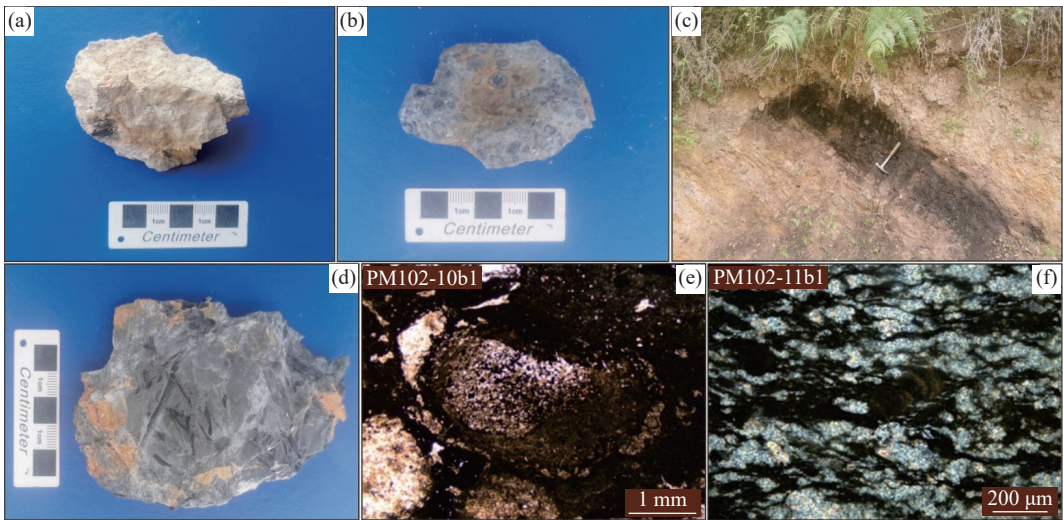


图2 黔西北金沙地区九架炉组含铝岩系岩性特征
Fig.2 Lithological characteristics of the manganese-bearing rock series in Jiashan Area, northwest Guizhou

4 含铝岩系地球化学特征

黔西北金沙地区含铝岩系 Al₂O₃ 含量在8.57%~52.92%之间、（Fe₂O₃+FeO）含量在0.93%~42.60%之间，Sr/Cu在1.74~238.59之间，V/Zr在0.23~1.13之间，Sr/Ba在0.21~4.61之间，Tu/U在2.29~8.13之间，Al₂O₃含量与稀土元素总量具负相关关系，（Fe₂O₃+FeO）与稀土总量呈正相关关系（表1、2）。含铝岩系ΣREE含量较高，在（156.31~1 543.70）×10⁻⁶之间，平

均为743.49×10⁻⁶（表2），ΣLREE/ΣHREE 值在0.47~6.40之间，平均值为3.38，轻稀土相对富集。含铝岩系上部鲕豆状铝土矿中ΣHREE相对富集，ΣLREE/ΣHREE 值在0.47~1.60之间，平均为0.90，底部土状铝土矿中，轻稀土相对富集ΣLREE/ΣHREE 值在2.20~10.69之间，平均为4.62，δEu值在0.53~0.77之间，平均为0.72，δCe 值在0.78~1.14之间，平均为0.93。

表1 黔西北金沙地区含铝岩系及底板岩石化学分析数据
Table 1 Chemical analysis data of aluminous rock series and basement rocks in Jinsha Area, northwest Guizhou Province

样品编号	岩性	SiO ₂ /×10 ⁻²	Al ₂ O ₃ /×10 ⁻²	Fe ₂ O ₃ /×10 ⁻²	FeO /×10 ⁻²	Cu /×10 ⁻⁶	Sr /×10 ⁻⁶	Ba /×10 ⁻⁶	V /×10 ⁻⁶	Zr /×10 ⁻⁶	U /×10 ⁻⁶	Th /×10 ⁻⁶	Sr/Cu	V/Zr	Sr/Ba	Tu/U
PM101-H1	灰色微晶灰岩	25.69	1.99	1.01	0.56	4.32	92.6	33.2	18.1	36.6	0.84	2.50	21.44	0.49	2.79	2.98
PM101-H2	土状铝土矿	40.50	24.03	13.3	0.45	117.00	203.0	236.0	120.0	113.0	9.97	22.80	1.74	1.06	0.86	2.29
PM101-H3	土状铝土矿	45.30	32.61	2.11	0.14	20.40	710.0	374.0	139.0	128.0	4.81	28.30	34.80	1.09	1.90	5.88
PM101-H4	鲕粒状铝土矿	33.50	46.65	0.55	0.38	9.63	133.0	167.0	248.0	666.0	9.43	53.20	13.81	0.37	0.80	5.64

样品编号	岩性	SiO ₂ / $\times 10^{-2}$	Al ₂ O ₃ / $\times 10^{-2}$	Fe ₂ O ₃ / $\times 10^{-2}$	FeO / $\times 10^{-2}$	Cu / $\times 10^{-6}$	Sr / $\times 10^{-6}$	Ba / $\times 10^{-6}$	V / $\times 10^{-6}$	Zr / $\times 10^{-6}$	U / $\times 10^{-6}$	Th / $\times 10^{-6}$	Sr/Cu	V/Zr	Sr/Ba	Tu/U
TC101-H1	灰色微晶灰岩	58.94	12.97	5.64	8.38	14.10	62.5	94.7	90.0	654.0	3.84	14.20	4.43	0.14	0.66	3.70
TC101-H2	土状铝土矿	41.80	25.55	8.30	5.57	45.60	285.0	254.0	156.0	243.0	7.07	29.00	6.25	0.64	1.12	4.10
TC101-H3	土状铝土矿	45.20	34.06	1.59	0.91	63.60	521.0	300.0	163.0	144.0	5.60	28.40	8.19	1.13	1.74	5.07
TC101-H4	鲕粒状铝土矿	26.10	52.92	1.56	0.49	8.60	108.0	87.4	163.0	715.0	10.90	51.80	12.56	0.23	1.24	4.75
TC101-H5	鲕粒状铝土矿	32.80	40.14	4.91	0.40	16.60	74.1	354.0	349.0	950.0	11.10	75.20	4.46	0.37	0.21	6.77
PM102-H1	灰色微晶灰岩	22.03	7.49	1.89	0.18	16.30	112.0	217.0	54.7	55.1	3.37	5.73	6.87	0.99	0.52	1.70
PM102-H3	土状铝土矿	44.40	34.07	3.95	0.14	25.40	517.0	557.0	143.0	132.0	3.42	27.80	20.35	1.08	0.93	8.13
PM102-H5	鲕粒状铝土矿	61.80	16.94	4.08	2.25	8.17	198.0	338.0	93.2	231.0	4.23	20.30	24.24	0.40	0.59	4.80
PM102-H6	鲕粒状铝土矿	39.20	29.12	4.04	2.08	31.10	7 420.0	1 610.0	154.0	305.0	11.20	33.70	238.59	0.50	4.61	3.01
ZK01-H1	灰色微晶灰岩	10.26	2.49	2.46	1.99	2.45	196.0	43.6	34.9	83.6	2.07	3.61	80.00	0.42	4.50	1.74
ZK01-H2	土状铝土矿	47.30	16.46	2.45	19.44	70.90	1 100.0	129.0	116.0	134.0	6.74	39.20	15.52	0.87	8.53	5.82
ZK01-H3	土状铝土矿	27.50	8.57	14.60	27.94	78.70	659.0	35.9	108.0	127.0	3.05	15.50	8.37	0.85	18.36	5.08
ZK01-H4	土状铝土矿	46.20	29.75	2.32	3.32	23.00	441.0	294.0	140.0	132.0	3.66	24.00	19.17	1.06	1.50	6.56
ZK01-H5	鲕粒状铝土矿	38.40	41.16	1.75	0.32	9.92	154.0	258.0	174.0	315.0	4.19	33.70	15.52	0.55	0.60	8.04
ZK01-H6	鲕粒状铝土矿	32.30	43.79	2.04	0.64	4.76	82.5	185.0	242.0	611.0	6.20	30.50	17.33	0.40	0.45	4.92

表 2 黔西北金沙地区含铝岩系及底板稀土元素含量																	单位: g/t	
Table 2 Content of rare earth elements in the aluminous rock series and the floor of Jinsha Area in northwest Guizhou																		
样品编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	ΣLREE	ΣHREE
PM101-H1	6.17	12.9	1.80	7.98	1.36	0.27	1.44	0.29	1.23	0.38	0.68	0.14	0.75	0.15	6.42	41.96	30.48	11.48
PM101-H9	75.60	147.0	17.80	79.90	17.50	2.89	15.20	1.79	6.76	1.71	3.27	0.68	3.48	0.69	24.80	422.17	340.69	81.48
PM101-H10	290.00	592.0	82.60	322.00	41.40	6.97	37.20	6.05	24.70	5.83	10.80	2.40	11.20	2.24	77.00	1 543.70	1 334.97	208.72
PM101-H11	25.80	44.9	4.78	17.40	2.74	0.65	3.10	0.67	3.42	1.01	2.26	0.59	3.17	0.62	18.00	156.31	96.27	60.04
TC101-H1	36.90	58.0	6.61	22.60	2.49	0.41	2.76	0.50	2.28	0.68	1.53	0.39	2.13	0.41	11.10	149.00	127.00	21.78
TC101-H5	95.80	187.0	22.00	92.40	15.20	2.61	13.90	2.33	9.93	2.61	4.82	1.07	6.07	1.07	42.40	525.41	415.01	110.40
TC101-H6	128.00	228.0	25.20	93.80	17.40	3.37	16.40	2.62	10.50	2.19	3.91	0.75	3.61	0.67	27.60	604.32	495.77	108.55
TC101-H8	15.90	26.6	2.93	11.10	1.95	0.46	2.43	0.61	3.56	1.20	2.58	0.70	3.73	0.77	19.50	116.42	58.94	57.48
TC101-H9	8.10	15.3	1.90	8.11	2.04	0.52	2.71	0.79	4.62	1.57	3.20	0.82	4.52	0.84	24.30	108.14	35.97	72.17
PM102-H1	14.50	20.3	2.43	9.35	1.60	0.35	1.56	0.29	1.25	0.34	0.71	0.20	0.87	0.18	6.13	60.06	48.53	11.53
PM102-H3	315.00	318.0	50.30	207.00	22.60	3.95	19.20	2.27	7.31	1.50	2.84	0.51	2.90	0.54	18.70	1 002.60	916.85	85.77
PM102-H5	57.00	117.0	13.90	55.90	10.30	1.88	11.50	1.75	7.93	2.59	4.09	1.08	5.14	0.97	32.70	341.03	255.98	85.05
PM102-H6	226.00	443.0	47.50	225.00	41.90	11.20	64.70	14.40	60.40	14.70	24.00	5.18	24.20	3.52	206.00	1 441.10	994.60	446.50
ZK01-H1	10.40	24.2	2.78	10.00	2.19	0.52	2.40	0.48	3.15	0.70	1.58	0.27	1.94	0.31	18.50	79.42	50.09	29.33
ZK01-H4	146.00	414.0	51.80	304.00	78.80	12.80	42.80	5.82	33.40	6.32	14.20	1.90	11.00	1.57	129.00	1 369.40	1 007.4	362.01
ZK01-H5	138.00	460.0	73.40	454.00	72.90	11.80	42.20	5.64	29.20	5.69	13.70	1.69	9.30	1.23	83.80	1 510.60	1 210.10	300.45
ZK01-H6	200.00	433.0	53.70	223.00	29.50	4.03	17.30	2.20	10.40	1.82	4.52	0.51	3.53	0.58	25.70	1 149.80	943.23	206.56
ZK01-H8	31.30	42.9	4.35	12.00	2.02	0.54	2.28	0.52	2.52	0.67	1.74	0.37	2.33	0.31	12.80	290.65	93.11	197.54
ZK01-H9	59.10	131.0	14.00	57.80	8.14	1.41	5.50	1.00	7.66	1.92	4.64	0.82	4.99	0.73	30.00	570.71	271.45	299.26

5 讨 论

5.1 沉积水体酸碱性

La/Y 比值可作为铝土矿沉积过程中水体 pH 值变化的重要依据,当 La/Y 比值大于 1 时,指示

沉积水体 pH 值大于 7,显碱性,当 La/Y 比值小于 1 时,指示沉积水体 pH 值小于 7,显酸性^[28],雷国良(1995)通过实验模拟得出 pH 值在 7~9 时 REE 元素具有最大水解率。黔西北金沙地区

剖面、探槽、钻孔可知含铝岩系上部鲕粒状铝土矿 La/Y 比值在 0.3~2.4 之间,大部分区域呈酸性,局部呈碱性,ΣREE 含量较低,ΣLREE 含量较低,但 ΣHREE 含量较高,ΣLREE/ΣHREE 在 0.47~1.60 之间,含铝岩系下部土状铝土矿中 La/Y 比值在 2.2~10.7 之间,为碱性沉积环境,ΣREE 含量较高,ΣLREE 较为富集,ΣLREE/ΣHREE 在 2.2~10.7 之间,表明轻稀土在酸性条件下水解率较低不易富集,在碱性条件下水解率较高易富集;重稀土在酸性条件下水解率相对较高易富集,在碱性环境下水解率较低不易富集。

5.2 古气候环境

沉积岩中 Sr/Cu 比值相对能灵敏响应其气候环境的更替。一般认为, Sr/Cu>10 为干热气候, 1<Sr/Cu<10 为温湿气候^[29]。黔西北金沙地区含铝岩系 Sr/Cu 比值在 1.74~238.59 之间,上部鲕粒状铝土矿与下部松散土状 Sr/Cu 比值分布不均,无明显差异,表明含铝岩系在沉积过程中潮湿与干热气候交替,研究区内潮湿及干热气候环境下对 ΣREE 含量的富集影响较小。

5.3 氧化还原环境

海水在氧化及偏碱性条件下, Ce³⁺被氧化成较难溶解的 CeO₂ 沉积下来,致使海水中显示 Ce 的负异常,海底沉积物显示正异常^[30]。黔西北金沙地区含铝岩系 δEu 值在 0.54~0.77 之间,平均为 0.62, δCe 值在 0.55~1.14,平均为 0.93,除三个样品显示微弱正异常,其余均为负异常,表明含铝岩系中稀土元素主要在氧化环境下富集,微弱还原环境下富集的较少。沉积岩中 Tu/U 比值是反映沉积环境氧化-还原条件的重要参数^[31], Tu/U 比值介于 0~2 之间,指示一种缺氧的底部水体环境, Tu/U 比值大于大陆地壳的平均值 3.8 则指示一种氧化的环境条件^[32]。黔西北金沙地区含铝岩系 Tu/U 比值介于 2.29~8.04 之间,平均为 5.39,为氧化环境。

5.4 Fe 浓度对稀土元素富集的影响

含铝岩系中稀土元素的富集在一定程度上受黏土矿物(高岭石、蒙脱石、伊利石)、含铁矿物(如针铁矿等)、含钙矿物(磷灰石、方解石、白云石等)的控制^[33],铝土矿中 La 的含量取决于 Fe 的含量^[34],黔西北金沙地区含铝岩系(Fe₂O₃+FeO)与稀土总量呈正相关关系,钻孔

ZK01 底部高铁土状铝土矿中稀土元素含量在 0.115%~0.150%,可见高铁黏土矿物更有利于对稀土元素的富集。

5.5 稀土元素富集机制

黔西北金沙地区含铝岩系中稀土元素的富集与沉积水体的酸碱度、氧化还原环境、黏土矿物含量、含铁矿物含量等多种因素相关。母岩的风化产物在被搬运的过程中,在弱酸性地表水的淋滤下,部分稀土氧化物逐渐被分解,释放出 REE³⁺, REE³⁺容易形成稳定的络合物, REE³⁺以络合物的形式赋存于孔隙水中^[35],富含 REE³⁺的孔隙水渗透至九架炉组上部鲕豆状铝土矿中时,部分被氧化 REE⁴⁺,并以稀土氧化物的形态富集在该层中,其中,轻稀土在酸性条件下水解率较低不易富集,重稀土元素在酸性条件下水解率相对较高易富集(ΣLREE/ΣHREE 在 0.47~1.60 之间),轻重稀土发生分异,剩余富含 REE³⁺的孔隙水渗透至九架炉组底部土状铝土矿中,九架炉组底部土状铝土矿对轻稀土元素的富集准备了良好的富集条件:①沉积水体呈弱碱性,轻稀土在碱性条件下水解率较高易富集;②沉积环境为氧化环境,有利于 REE³⁺的氧化沉积;③土状铝土矿中黏土矿物含量较高,有利于对稀土元素的吸附;④含铁矿物含量较高,有利于稀土元素的富集,孔隙水中大部分 REE³⁺富集沉积在含铝岩系底部土状铝土矿层中(图 3)。

6 结 论

(1) 黔西北金沙地区含铝岩系中 ΣREE 含量较高,在 156.31~1 543.70 g/t 之间,平均为 743.49 g/t,轻稀土相对富集,ΣLREE/ΣHREE 值在 2.20~10.69 之间,平均为 4.62, δEu 平均为 0.62, δCe 平均为 0.93。含铝岩系下部土状铝土矿为碱性沉积环境,氧化还原环境为氧化环境。

(2) 含铝岩系中稀土元素的富集受黏土矿物含量、含铁矿物含量等因素影响,黔西北金沙地区含铝岩系中(Fe₂O₃+FeO)与稀土总量呈正相关关系,钻孔 ZK01 底部高铁土状铝土矿中稀土元素含量在 0.115%~0.150%,高铁黏土矿物更有利于对稀土元素的富集。

(3) 黔西北金沙地区含铝岩系底部土状铝土矿沉积水体呈弱碱性,轻稀土在碱性条件下水解

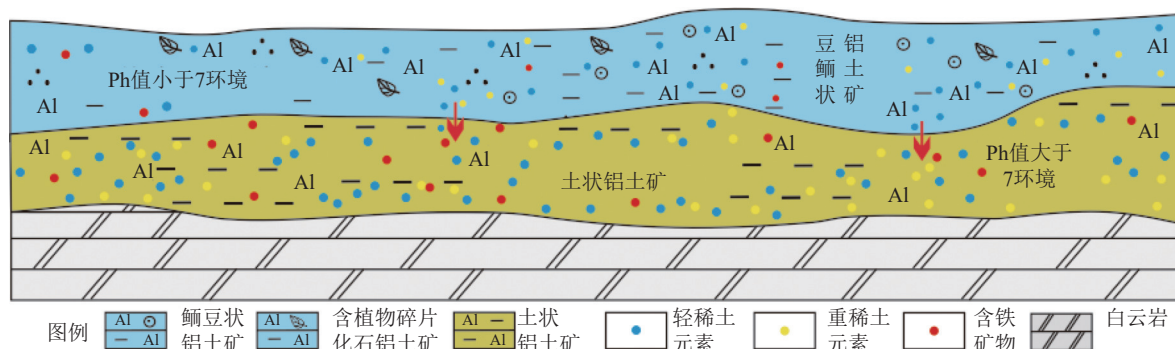


图3 黔西北金沙地区含铝岩系稀土富集机制^[35]

Fig.3 Mechanism of rare earth enrichment in the aluminum-bearing rock series in the Jinsha Area of northwest Guizhou Province^[35]

率较高易富集，沉积环境为氧化环境，有利于 REE^{3+} 的氧化沉积，土状铝土矿中黏土矿物含量较高，有利于对稀土元素的吸附，孔隙水中大部分 REE^{3+} 富集沉积在含铝岩系底部土状铝土矿层中。

参考文献:

- [1] 周政,熊文良,张丽军,等. 四川某低品位稀土尾矿回收稀土实验研究[J]. *矿产综合利用*, 2023(4):66-70.
- [2] ZHOU Z, XIONG W L, ZHANG L J, et al. Experimental study on the recovery of rare earth from a low grade rare earth tailings in Sichuan[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2023(4):66-70.
- [3] 陈昆峰,胡家乐,张一波,等. 稀土晶体材料研发现状与未来展望[J]. *无机盐工业*, 2020, 52(3):11-16.
- [4] CHEN K F, HU J L, ZHANG Y B, et al. Current R&D status and future trends of rare earth crystal materials[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2020, 52(3):11-16.
- [5] [3] Office of the Secretary,Interior. 2018. Final List of Critical Minerals 2018[EB/OL]. [2018-05-18].
- [6] Australian Government, Department of Industry, Innovation and Science, Australian Trade and Investment Commission. 2019. Australia's Critical Minerals Strategy 2019[R]. Australian: Australian Government, Department of Industry, Innovation and Science, Australian Trade and Investment Commission.
- [7] European Commission.Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020) Final Report[R]. Brussels: European Commission, 2020.
- [8] CHEN Q S, ZHANG Y F, XING J Y, et al. Methods of Strategic Mineral Resources Determination in China and Abroad[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2021, 42(2):137-144.
- [9] 李超,舒荣波,程蓉,等. 不同深度离子型稀土矿连续浸出实验[J]. *矿产综合利用*, 2023(4):78-82.
- [10] LI C, SHU R B, CHENG R, et al. Continuous leaching test of ion-type rare earth ore at different depths[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2023(4):78-82.
- [11] [8] US Geological Survey. Mineral commodity summaries. Reston: US Geological Survey,2010,128-129.
- [12] [9] 张博,宁阳坤,曹飞,等.世界稀土资源现状[J]. *矿产综合利用*, 2018 (4):23-25.
- [13] ZHANG B, NING Y K, CAO F,et al. Current situation of worldwide rare earth resources[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*,2014 (3):35-37.
- [14] [10] 张苏江,张立伟,张彦文,等. 国内外稀土矿产资源及其分布概述[J]. *无机盐工业*, 2020, 52(1):9-16.
- [15] ZHANG S J, ZHANG L W, ZHANG Y W, et al. Summarize on rare earth mineral resources and their distribution at home and abroad[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2020, 52(1):9-16.
- [16] [11] GUPTA C K, KRISHNAMURTHY N. Extractive metallurgy of rare earths[M] Florida:CRC Press, 2005.
- [17] [12] 马少兵,裴秋明,王亮,等. 内蒙古喀喇沁旗大西沟萤石矿床成因:来自稀土元素、流体包裹体和 H-O 同位素的制约[J]. *西北地质*, 2024, 57(4):50-65.
- [18] MA S B, PEI Q M, WANG L, et al. Genesis of the Daxigou fluorite deposit, Harqin Banner, Inner Mongolia, China: Constraints from rare earth elements, fluid inclusions and H-O isotopes[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(4):50-65.
- [19] [13] 谢志豪,何东升,刘爽,等. 贵州织金某含稀土磷矿工艺矿物学研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(6):135-141.
- [20] XIE Z H, HE D S, LIU S, et al. Study on process mineralogy of a rare earth-bearing phosphate ore in Zhijin,Guizhou[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(6):135-141.
- [21] [14] 龙克树,付勇,龙珍,等.全球铝土矿中稀土和钪的资源潜力分析[J]. *地质学报*, 2019, 93(6): 1279-1295.
- [22] LONG K S, FU Y, LONG Z, et al. Resource potential analysis

- of REO and Sc in global bauxite[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(6):1279-1295.
- [15] 黄智龙,金中国,向礼贤,等. 黔北务正道铝土矿成矿理论及预测[M].北京:科学出版社,2014:102-121.
- HUANG Z L, JIN Z G, XIANG L X, et al. The ore-forming theory and prediction of the Wuzhengdao bauxite deposit in northern Guizhou[M]. Beijing: Science Press, 2014: 102-121.
- [16] NIMILA D, NADEERA B, et al. Ilankoon et al. The story of rare earth elements (REEs): Occurrences, global distribution, genesis, geology, mineralogy and global production[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 122:2-17.
- [17] ZHU K Y, SU H M, et al. Mineralogical control and characteristics of rare earth elements occurrence in Carboniferous bauxites from western Henan Province, north China: A XRD, SEM-EDS and LA-ICP-MS analysis[J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 114:1-22.
- [18] 李中明,赵建敏,冯辉,等. 河南省郁山古风化壳型稀土矿层的首次发现及意义[J]. *矿产地质*, 2007, 2(2):177-180.
- LI Z M, ZHAO J M, FENG H, et al. First discovery of palaeo-weathering crust type REE deposit in Yushan area of Henan province and its significance[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2007, 2(2):177-180.
- [19] 黄苑龄,谷静,张杰,等. 黔北务-正-道铝土矿中稀土元素赋存状态[J]. *矿物学报*, 2021, 41(4/5):454-459.
- HUANG Y L, GU J, ZHANG J, et al. Study on the occurrence state of rare earth elements in bauxite deposits in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2021, 41(4/5):454-459.
- [20] 武国辉,金中国,鲍森,等. 黔北务正道铝土矿成矿规律探讨[J]. *地质与勘探*, 2008, 44(6):31-35.
- WU G H, JIN Z G, BAO M, et al. Discussion on the mineralization laws of Wuzhengdao bauxite deposit in Northern Guizhou[J]. *Geology and Exploration*, 44(6):31-35.
- [21] 叶霖,潘自平,程曾涛. 贵州铝土矿中伴生元素综合利用前景[J]. *矿物学报*, 2007(4):388-392.
- YE L, PAN Z P, CHENG Z T. The prospects for the comprehensive utilization of associated elements in Guizhou's bauxite deposits[J]. *Acta Mineralogica*, 2007(4):388-392.
- [22] 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(3):228-233.
- YE L, CHENG Z T, PAN Z P. The REE Geochemical characteristics of the Xiaoshanba bauxite deposit, Guizhou[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2007(3):228-233.
- [23] 刘平,廖友常. 黔西北-渝南铝土矿含矿岩系时代探讨[J]. *中国地质*, 2012, 39(3):661-682.
- LIU P, LIAO Y C. A tentative discussion on the age of bauxite-bearing rock series in central Guizhou-southern Chongqing Area[J]. *Geology in China*, 2010, 39(3): 661- 682.
- [24] 刘平,廖友常. 黔西北-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 P, LIAO Y C. 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.
- [25] 刘平. 黔北务-正-道地区铝土矿地质概要[J]. *地质与勘探*, 2007, 43(5):29-33.
- LIU P. Bauxite geology in the Wuchuan-Zhen'an-Daozhen area, northern Guizhou[J]. *Geology and Prospecting*, 2007, 43(5):29-33.
- [26] 刘平,廖友常. 试论遵义高铁铝土矿与低铁铝土矿的分带性及形成机制[J]. *中国地质*, 2013, 40(3):949-966.
- LIU P, LIAO Y C. The zonation and genetic mechanism of Zunyi high and low - ferrous bauxites[J]. *Geology in China*, 2013, 40(3):949-966.
- [27] 刘平,廖友常. 黔中-渝南铝土矿含矿岩系时代探讨[J]. *中国地质*, 2012, 39(3):661-682.
- LIU P, LIAO Y C. A tentative discussion on the age of bauxite-bearing rock series in central Guizhou—Southern Chongqing Area[J]. *Geology in China*, 2010, 39(3): 661- 682.
- [28] Maksimovic Z, Panto G. Contribution to the geochemistry of the rare earth elements in the karst-bauxite deposits of Yugoslavia and Greece[J]. *Geoderma*, 1991, 51(1-4):93-109.
- [29] 刘刚,周东升. 微量元素分析在判别沉积环境中的应用—以江汉盆地潜江组为例[J]. *石油实验地质*, 2007(3):307-310+314.
- LIU G, ZHOU D S. Application of microelements analysis in identifying sedimentary environment—taking Qianjiang formation in the Jianghan basin as an example[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2007(3):307-310+314.
- [30] 郑荣才,文华国,高红灿,等. 酒西盆地青西凹陷下沟组湖相喷流岩稀土元素地球化学特征[J]. *矿物岩石*, 2007, 26(4):41-47.
- ZHENG R C, WEN H G, GAO H C, et al. Geochemical characteristics of rare earth elements in lacustrine flow rocks of the Xiaogou formation in the Qingxi Depression of the Jiusi Basin[J]. *J MINE RAL PET ROL*, 2007, 26(4):41-47.

- [31] Wignall P B, Twitchett R J. Oceanic anoxia and the End Permian mass extinction[J]. *Science*, 1996, 272: 1155-1158.
- [32] Kimura H, Watanabe Y. Oceanic anoxia at the Precambrian Cambrian boundary[J]. *Geology*, 2001, 29: 995-998.
- [33] 谷静, 黄智龙, 金中国. 黔北务-正-道地区新木-宴溪铝土矿含矿岩系底部稀土元素富集机制[J]. *矿物学报*, 2021, 41(4): 413-426.
- GU J, HUANG Z L, JIN Z G. The REE enrichment mechanism in the bottom layer of ore-bearing rocks of the Xinmu-Yanxi bauxite deposit in the Northern Guizhou, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2021, 41(4): 413-426.
- [34] MONGELLI G. Ce-anomalies in the textural components of Upper Cretaceous karst bauxites from the Apulian carbonate platform (southern Italy)[J]. *Chemical Geology*, 1997, 140(14): 69-79.
- [35] 唐波, 付勇, 龙克树, 等. 中国铝土矿含铝岩系伴生稀土资源分布特征及富集机制[J]. *地质学报*, 2024, 95(8): 2284-2305.
- TANG B, FU Y, LONG K S, et al. Distribution characteristics and enrichment mechanism of associated rare earth resources in aluminum-bearing rock series in bauxite deposits of China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2024, 95(8): 2284-2305.

Enrichment Mechanism of Rare Earth Elements in the Aluminum-bearing Rock Series of the Jinsha Area in Northwest Guizhou Province

QIE Kun, LAI Yang, GONG Daxing, TIAN Enyuan

(Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: The rare earth element (REE) content in the aluminum-bearing rock series of the Lower Carboniferous Jiujiayu Formation in the Jinsha Area of northwest Guizhou is relatively high, showing certain exploration potential. This paper studies the enrichment mechanism of REE in the aluminum-bearing rock series through field profile measurement, trench logging, core logging, microscopic identification, major and trace element, and REE chemical analysis. The results show that the ΣREE content in the aluminum-bearing rock series of the Jinsha Area in northwest Guizhou is relatively high, ranging from 156.31×10^{-6} to $1\,543.70 \times 10^{-6}$, with an average of 743.49×10^{-6} . Light rare earth elements are relatively enriched, and the $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ value ranges from 2.20 to 10.69. The enrichment of REE in the aluminum-bearing rock series is influenced by multiple factors such as the content of clay minerals and iron-bearing minerals. Light rare earth elements have a higher hydrolysis rate at alkaline conditions and are easily enriched. An oxidized environment is conducive to the deposition of REE^{3+} . The water body of the limonitic bauxite in the Jinsha Area is weakly alkaline, and the sedimentary environment is oxidized, providing favorable conditions for the enrichment of REE. The REE content in the high-iron limonitic bauxite at the bottom of borehole ZK01 ranges from 0.115% to 0.150%, indicating that the aluminum-bearing rock series in the Jinsha Area has great exploration potential for REE.

Keywords: southwest Guizhou; Jiujiayu Formation; aluminous rock series; enrichment mechanism; geoscience