

华南长汀和缅北迈扎央离子吸附型稀土矿床的 稀土赋存状态比较

李潇雨^{1,2}, 熊文良^{1,2}, 张丽军^{1,2}, 陈达^{1,2}, 朱志敏^{1,2}

(1. 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国地质调查局稀土资源应用技术创新中心, 四川 成都 610041)

摘要:以华南福建长汀和缅甸北部某地的花岗岩风化壳离子吸附型稀土矿床为研究对象, 对比研究两个地区离子吸附型稀土矿床中的全风化层地球化学特征和 REE 赋存状态变化。两地风化壳基岩均为黑云母二长花岗岩, 对成矿有利的 (含) 稀土副矿物是榍石、褐帘石、磷灰石、独居石和氟碳铈矿等矿物, 易于形成离子吸附型轻稀土矿床。经对比后发现, 两地稀土矿床由于其地理位置、海拔高度、构造背景、风化程度等各方面都存在明显的不同, 导致两地矿床属性存在较大的差异。长汀矿区的风化程度更高, CIA 指数高达 92.07%, 这可能是造成长汀矿区存在更多粘土矿物的主要原因, 也较缅北更容易发育与硬锰矿和高岭石等粘土矿物紧密嵌布的胶态稀土; 虽然缅北矿区风化程度较低, 但缅北 iREE 矿体的保存厚度却更大, 这可能是其地貌条件更有利于 iREE 的保存——缅北地区地壳抬升和地表剥蚀也可能更接近于阈值, 也可能其存在更合理的强弱侵蚀交替间隔。iLREE 矿床浸出后形成的 iREE 尾矿总体来说是一种含 REE 较低, 化学性质较稳定的黏土类物质, 从综合利用的角度来看, 应加强对低品位难浸 iREE 尾矿稀土回收工艺的开发与研究, 实现离子型稀土矿资源的可持续利用是今后的一个重要方向。

关键词: 花岗岩风化壳; 离子吸附性稀土; 赋存状态; 综合利用

doi:10.12476/kczhly.202302200064

中图分类号: TD955 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 04-0184-14

引用格式: 李潇雨, 熊文良, 张丽军, 等. 华南长汀和缅北迈扎央离子吸附型稀土矿床的稀土赋存状态比较[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(4): 184-197.

LI Xiaoyu, XIONG Wenliang, ZHANG Lijun, et al. Comparative study on REE occurrence mode in ion-adsorption type REE deposits from changting, fujian, and northern myanmar[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(4): 184-197.

稀土元素是 21 世纪重要的战略资源, 17 种稀土元素可分为轻、中、重稀土, 其中轻稀土包括镧、铈、镨、钕, 中稀土包括钐、铕、钆、铽和镱, 其余则为重稀土元素。全球市场对稀土 (REE), 尤其是重稀土 (HREE) 的需求量与日俱增^[1-4], 而离子吸附型稀土又是重稀土的主要来源, 满足了全世界新兴产业发展对于 Gd、Tb、Dy 等中、重稀土几乎全部的需求, 因而也是人类共同的珍贵稀缺资源^[1,5-19]。中国稀土在地域分布

特点鲜明, 呈现“北轻南重”的资源格局, 离子吸附型稀土矿 (简称为 iREE) 主要分布在华南地区, 是中国独具特色的优势矿产。但近年来由于中、重稀土供不应求, 海外稀土资源已成为中国稀土消费市场的重要补充, 目前主要依靠从缅甸进口离子型稀土矿^[20]。

以往研究发现, 中国南岭地区广泛分布着由富稀土花岗岩风化形成的风化壳型稀土矿床^[21-26], 该类型矿床中 REE 主要以离子态吸附在风化壳中

收稿日期: 2023-02-20

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFC2902201); 中国地质调查局地质大调查项目 (DD20221809); 四川省中央引导地方科技发展专项 (2022ZYD0126); 四川省自然科学基金项目 (23NSFSC0495)

作者简介: 李潇雨 (1981-), 女, 正高级工程师, 主要从事矿物学、岩石学、矿床学研究。

的高岭石、埃洛石等黏土矿物和白云母、黑云母、水化黑云母和磁铁矿等矿物上^[27]。近年来,除了在南岭地区(江西赣南、福建武夷山),花岗岩风化壳型稀土矿床在云南、广西、广东乃至浙江等地也取得了重要的找矿突破^[28],尤其是云南滇西一带——除已开采的陇川 iREE 矿床外,又相继发现了多个 iREE 矿床和异常矿化点或矿化带^[10,29-40]。

以往针对花岗岩风化壳型 iREE 矿床研究重点主要是集中在矿床地球化学特征方面,风化壳中的独立稀土矿物、稀土类质同象矿物的赋存状态和分布规律则很少涉及。近期的研究已证实,在 iREE 矿床中稀土元素往往具有多因继承性——矿床中 REE 赋存状态在不同的成矿历史过程中发生了明显的变化:如从岩浆成因副矿物到热液交代矿物再到风化壳中的离子相^[41]。由于 iREE 矿床主要赋存在全风化层中(也有少量在残坡积层中),查明全风化层中的 REE 赋存状态,将有利于查明 iREE 成矿过程中的 REE 赋存状态变化情况,并且独立稀土矿物、稀土元素类质同象的矿物赋存状态需要特别关注——其矿物学性质决定了它们在原地浸出工艺中将不随着离子吸附态 REE 一同浸出,而是保留在矿床中成为独特的“iREE 尾矿”。

将对比研究福建长汀和缅北某地两个地区 iREE 矿床中的稀土矿物特点、组成和含量变化,旨在查明两地风化壳中的 REE 的赋存状态和分布规律,厘清地理位置、海拔高度、构造背景、风化程度等条件对 REE 赋存状态是否造成差异,并研究其基岩和成矿过程中 REE 赋存状态和配分变化,预测最终在矿床中将会形成的独特“iREE 尾矿”的特点和综合利用建议。

1 地质背景

福建长汀位于闽西南坳陷带之清流—武平复式背斜的中部,桃溪韧性剪切带之北东侧,主体构造线呈北东向展布,海拔 350~400 m,高差小,植被稀少,属亚热带湿润季风型气候,温暖多雨,日照充足;其成矿母岩为中生代燕山早期中粗粒、中细粒黑云母花岗岩,稀土矿矿体(层)呈似层状,产状随地形起伏变化,主要产于花岗岩风化壳中的全风化层内,少量赋存于残坡积层和半风化层中,矿体厚度一般约为 2~8 m。

缅甸北部某矿区位于印度板块与欧亚板块之间,大地构造位置属掸泰马板块的北部,平均海拔 1 000 m,属构造侵蚀低山地貌区,也属亚热带季风气候类型;其成矿母岩为中生代含稀土二长花岗岩,岩体展布受区域性构造格架的控制,沿北东-南西向分布;稀土矿矿体(层)主要产于花岗岩风化壳中的全风化层内,红土风化层和花岗岩半风化层也有少量矿体,风化壳厚度一般 25~50 m。

2 样品采集和分析方法

本次样品分别采自缅甸某地和福建长汀 iREE 矿床全风化层内,采用洛阳铲取样,采集到的样品均为松散土状,破碎至-2 mm 缩分制备全风化层综合样。

花岗岩风化壳样品的主量、微量及稀土元素分析测试在中国地质科学院矿产综合利用研究所实验测试中心完成,主量元素测试方法为粉末压片 X 荧光光谱(XRF),数据的烧失量为单独额外测量所得;微量和稀土元素测试仪器为 X-Series 型电感耦合等离子体质谱仪,分析误差小于 5%。X 衍射分析采用 X 射线衍射仪(Ultima IV)。花岗岩风化壳中纳米级稀土矿物的电镜和能谱分析由透射电子显微镜 Tecnai G2 F20 S-TWIN 测定,稀土矿物的扫描电镜和能谱分析采用 sigma 300 场发射电镜和 Quantax 200 Xflash 6 | 60 能谱仪,测试条件为加速电压 10 kV 或 20 kV,激发电流 20 nA,电子束直径为 5 μm ,能谱检测允许误差:元素含量>20%时,相对误差 $\leq 5\%$;3%~20%时,相对误差 $\leq 10\%$;1%~3%时,相对误差 $\leq 20\%$;0.5%~1%时,相对误差 $\leq 30\%$;0.1%~0.5%时,相对误差 $< 50\%$ 。

3 结 果

3.1 花岗岩全风化层元素地球化学

福建长汀花岗岩全风化层成矿母岩为中生代燕山早期黑云母花岗岩,基岩中(含)稀土副矿物主要为榍石、褐帘石、磷灰石、独居石和氟碳铈矿等,稀土矿矿体主要赋存于全风化花岗岩层中,少部赋存于残坡积层和半风化层中,矿体形态受地形、地貌控制。

CIA 指数(化学蚀变指数)是判断化学风化程度的化学指标,其公式为 $\text{CIA} = \{(\text{Al}_2\text{O}_3)/[(\text{Al}_2\text{O}_3) +$

(CaO*)+(Na₂O)+(K₂O)]}×100(其中 CaO*仅为硅酸盐中的 CaO) ；

两地风化壳全风化层综合样常量元素化验分析结果见表 1。

表 1 全风化层综合样常量元素和稀土元素分析结果

单位: g/t

Table 1 Analysis results of major elements and rare earth elements in comprehensive samples of completely weathered layer

矿区	Na ₂ O*	Al ₂ O ₃ *	CaO*	K ₂ O*	MgO*	FeO*	MnO*	SiO ₂ *	P ₂ O ₅ *
福建长汀	0.062	15.907	0.014	1.295	0.175	2.642	0.139	70.799	0.014
缅北	0.295	18.754	0.026	4.562	0.569	3.474	0.072	62.792	0.078
矿区	La ₂ O ₃	CeO ₂	Pr ₆ O ₁₁	Nd ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	Eu ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	Tb ₄ O ₇	Dy ₂ O ₃
福建长汀	249.500	75.900	66.450	265.500	52.950	7.085	34.400	5.045	26.050
缅北	198.500	62.200	51.800	206.00	41.100	5.545	27.650	3.965	20.700
矿区	Ho ₂ O ₃	Er ₂ O ₃	Tm ₂ O ₃	Yb ₂ O ₃	Lu ₂ O ₃	Y ₂ O ₃			
福建长汀	4.665	15.550	2.310	15.100	2.200	145.000			
缅北	4.020	12.350	1.845	12.050	1.790	118.500			

注：常量元素为X荧光光谱定量分析结果，单位为%；稀土元素为化学分析结果。

经计算，长汀花岗岩全风化层 CIA 指数为 92.07%。从 XRD 分析结果（图 1）可以看出，长汀地区花岗岩全风化层中矿物组成较为简单，主要为石英、黏土矿物（包括高岭石、地开石、伊利石）、白云母和钾长石，其中还含有微量的稀土矿物独居石（因其他稀土矿物含量很低，衍射只识别出独居石的特征峰值）。

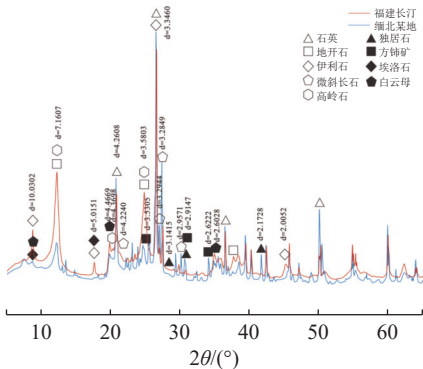


图 1 两地花岗岩风化壳稀土矿 XRD 分析结果对比
Fig.1 Comparison of XRD analysis results of rare earth minerals in granite weathering crust between the two places

缅北某地花岗岩全风化层成矿母岩为中生代二长花岗岩，岩体展布受区域性构造格架的控制，沿北东—南西向分布，基岩中（含）稀土副矿物主要为榍石、褐帘石、磷灰石、独居石等。稀土矿矿体（层）主要产于花岗岩风化壳中的全风化层内，红土风化层和花岗岩半风化层有少量矿体，矿体形态受地形、地貌控制。

CIA 指数：经计算，缅北某地花岗岩全风化层 CIA 指数为 79.34%。从 X 衍射分析结果（图 1）可以看出，缅北地区花岗岩全风化层中矿物组成

较长汀复杂的多，主要矿物为石英、钾长石、黏土矿物（包括高岭石、埃洛石 Halloysite）、黑云母、绢云母和斜长石，同样含有微量的稀土矿物独居石和方钠矿。

两地花岗岩风化壳全风化层综合样 REE 球粒陨石标准化分布模式为左倾“V”字型（图 2）。两地花岗岩风化壳全风化层 REE 分布具有类似的趋势，都存在 Ce 明显的负异常（两地 δCe 均为 0.14），而 La、Pr、Nd 则明显的正异常，Eu 均有轻微的负异常（长汀 δEu 为 0.48，缅北 δEu 为 0.47）[42]。

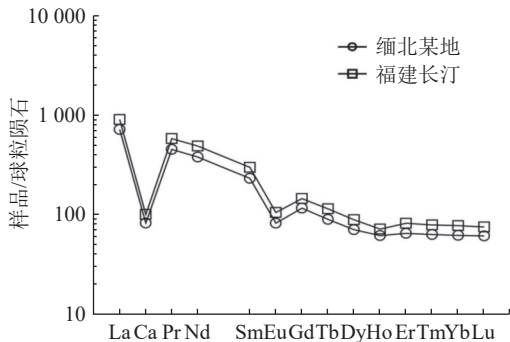


图 2 福建长汀和缅北地区花岗岩风化壳 REE 球粒陨石标准化分布模式[27]

Fig.2 Normalized REE chondrite distribution pattern of granite weathering crust in Changting, Fujian and northern Myanmar[27]

3.2 福建长汀 iREE（含）稀土矿物赋存状态

长汀地区花岗岩全风化层中稀土元素的赋存状态主要为黏土矿物离子吸附相（其所占稀土元素配分比例为 67.76%），其次是碎屑矿物、稀土副矿物相（约占稀土元素配分 32.24%）——主要赋存于独居石、磷钇矿、锆石、榍石、赤铁矿、

钛铁矿、硬锰矿等矿物中（其中以独居石和磷钇矿等稀土矿物相存在的占 14.70%，还有少量分布于胶态沉积相稀土中（约占 3.78%），并且本矿区的胶态稀土多与硬锰矿紧密连生，而其他矿物中稀土元素以类质同象存在或在其他矿物颗粒表面附着纳米级稀土矿物颗粒）。

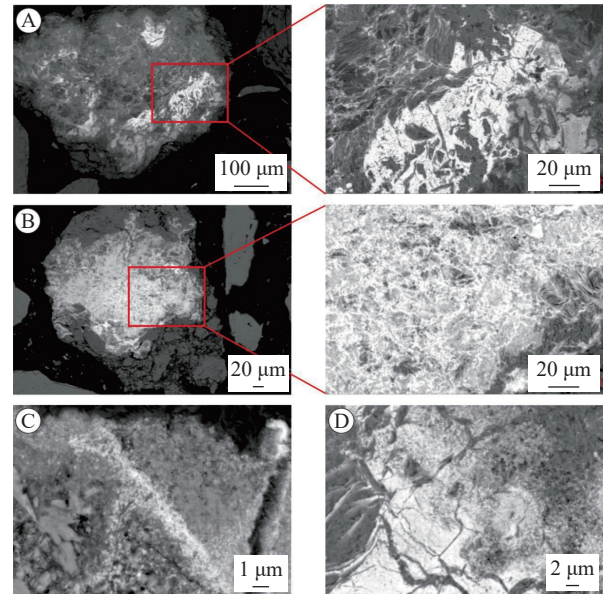
长汀 iREE 稀土矿物种类有：独居石、磷钇矿、胶态稀土和方钨矿（表 2）。独立稀土矿物主

要嵌布状态有（1）大颗粒的稀土独立矿物嵌布于黏土矿物集合体中（图 3 A）；（2）呈微细粒的独立矿物颗粒与金红石、钛铁矿等颗粒连生（如图 4 D）。（3）以胶态稀土（胶态稀土为纳米级稀土矿物集合体，或是指稀土元素以水不溶性的氧化物或氢氧化物胶体沉积在矿物上或与某种氧化物成键的稀土矿物）浸染状嵌布于黏土矿物中（图 3 C、D）。

表 2 长汀 iREE 中稀土独立矿物的稀土元素分布特征							单位：%
Table 2 Distribution characteristics of rare earth elements of rare earth independent minerals in Changting iREE							
矿物名称	化学成分式	理论ΣREO/%	实测ΣREO*/%	LREE/%	HREE/%	矿物含量/%	
稀土离子 化合物	独居石 Monazite-(Ce)	(Ce,La,Nd,Th)[PO ₄]	轻稀土（铈组）氧化 物约占39~74； 重稀土（钇组） 氧化物占0~5	37.8~55.25	45~54.29	0~0.96	0.03
	方钨石 Cerianite- (Ce)	(Ce,Th)O ₂	100.00	86.43~86.75	86.43~86.75	0.00	0.005
	磷钇矿 Xenotime- (Y)	YPO ₄	61.40	50.96	21.37	29.59	极微量
	胶态稀土	纳米级稀土矿物集合	暂无	16.93~45.94	15.20~44.72	1.22~1.73	0.02

实测ΣREO*为能谱半定量测试结果。

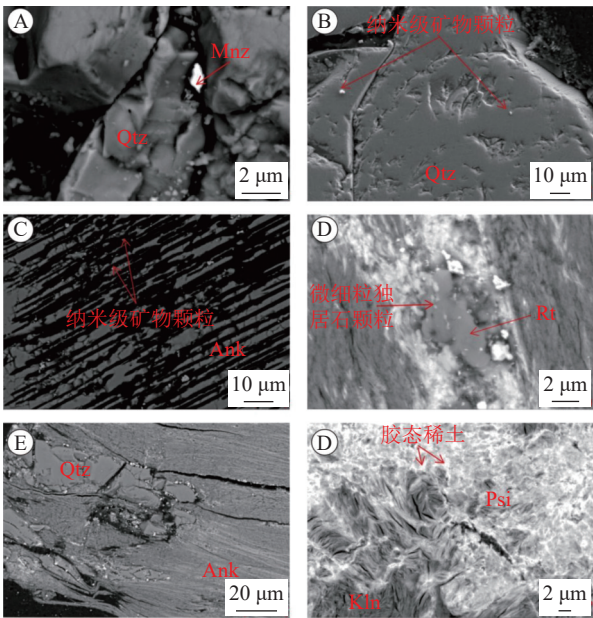
除了前述的几种稀土元素主要赋存状态，在两个矿区均存在 REE 以类质同象赋存在其他矿物晶格中或以纳米级稀土矿物颗粒附着在碎屑矿物



A—与高岭石和硬锰矿共生的独居石颗粒，及其微区放大图，B—与高岭石和硬锰矿共生的胶态稀土，及其微区放大图，C—在黏土矿物中呈细脉浸染状分布的胶态稀土，D—在高岭石颗粒间嵌布的独居石颗粒和呈星点状浸染分布的胶态稀土颗粒。

图 3 长汀花岗岩风化壳 iREE 矿体中稀土独立矿物形态特征的扫描电子图像

Fig.3 SEM of the morphological characteristics of rare earth independent minerals in iREE orebody of Changting granite weathering crust



A—石英颗粒裂隙中的微细粒独居石颗粒，B—石英颗粒表面附着的纳米级矿物颗粒，C—云母解理缝间夹杂着微细粒的矿物颗粒，D—金红石颗粒表面附着的纳米级独居石颗粒，E—石英和云母的颗粒间附着着微细粒的矿物颗粒，F—硬锰矿颗粒间被纳米级的胶态稀土颗粒充填。（Mnz-独居石、Qtz-石英、Ank-铁白云母、Rt-金红石、Kln-高岭石、Psi-硬锰矿）

图 4 长汀花岗岩风化壳 iREE 矿体中其他矿物颗粒表面、颗粒的裂隙或颗粒间普遍附着的纳米级微细粒矿物的扫描电子图像

Fig.4 SEM of other mineral particle surfaces, particle fissures or nano-sized fine-grained minerals commonly attached between particles in iREE orebody of Changting granite weathering crust

颗粒表面。碎屑矿物种类有：石英、钾长石、云母、锆石、金红石（含铈金红石）、（高钇）钛铁矿、赤铁矿、褐铁矿（褐铁矿是以水针铁矿等铁的氢氧化物为主的混合体，常混含 SiO₂、Al₂O₃ 以及 CaO、CaCO₃、P₂O₅、Mn 等）和硬锰矿。稀土元素分布特征见表 3。

表 3 福建长汀稀土矿稀土元素分布特征
Table 3 Distribution characteristics of rare earth elements in Changting rare earth mine, Fujian

矿物名称		化学成分式	实测ΣREO*%	矿物含量%
	石英Quartz	SiO ₂	0~0.03	54.04
	钾长石k-feldspar	KAlSi ₃ O ₈	0.06~0.08	7.80
	斜长石Plagioclase	(Na,Ca)[Al ₂ Si ₂ O ₈]	0~0.01	0.04
	黑云母Biotite	K(Mg,Fe) ₃ (Al,Fe)Si ₃ O ₁₀ (OH,F) ₂	0~0.18	5.46
	锆石Zircon	ZrSiO ₄	0~4.03	0.01
以类质同象存在其他矿物晶格中或以纳米级稀土矿物颗粒附着在碎屑矿物颗粒表面	金红石（含铈金红石）Rutile	TiO ₂	2.98~3.26	0.18
	钛铁矿（含铈（钇）钛铁矿）Ilmenite	FeTiO ₃	0.02~2.81 (Y ₂ O ₃ : 0~0.08)	0.32
	赤铁矿Hematite	Fe ₂ O ₃	0.49~0.71 (Y ₂ O ₃ : 0~0.11)	0.49
	褐铁矿Goethite	针铁矿标准化学式为2Fe ₂ O ₃ ·3H ₂ O	0~0.57	1.28
	硬锰矿Psilomelane	硬锰矿常与胶态稀土紧密嵌布， 导致能谱分析结果中含有较高的 REO(Ba,H ₂ O) ₂ Mn ₅ O ₁₀	4.28~25.10 (Y ₂ O ₃ : 0~6.54)	0.18

实测ΣREO*为能谱半定量测试结果。

除金红石、钛铁矿存在稀土元素的类质同象矿物铈金红石、铈（钇）钛铁矿外，石英、钾长石、云母等矿物理论上并不含 REO，但在两地花岗岩风化壳样品中能谱半定量实测均含有微量的 REO（且其含量为变化值），用场发射扫描电镜对这些矿物微区放大分析，发现在矿物颗粒表面、颗粒的裂隙或颗粒粒间普遍附着纳米级的微细粒矿物——包括纳米级的赤铁矿、金红石、钛铁矿和独居石等（图 4 A-E）。由于长汀全风化样中硬锰矿常与胶态稀土紧密嵌布形成矿物集合体，从而导致能谱点分析结果显示硬锰矿有较高的 REO（图 4 F）。

3.3 缅北 iREE（含）稀土矿物赋存状态

缅北地区花岗岩全风化层中稀土元素的赋存

状态主要也为黏土矿物离子吸附相（其所占稀土元素配分比例为 61.43%），其次是碎屑矿物、稀土副矿物相（约占稀土元素配分 38.57%）——主要赋存于独居石（又可分为 3 个成分变种）、褐帘石、磷钇矿、锆石、钽石、硬锰矿等矿物中（其中以独居石、褐帘石和磷钇矿等稀土矿物相存在的占 12.98%，也有微量的胶态沉积相稀土发育（约为 0.51%），而其他矿物中稀土元素以类质同象存在或在其他矿物颗粒表面附着纳米级稀土矿物颗粒）。

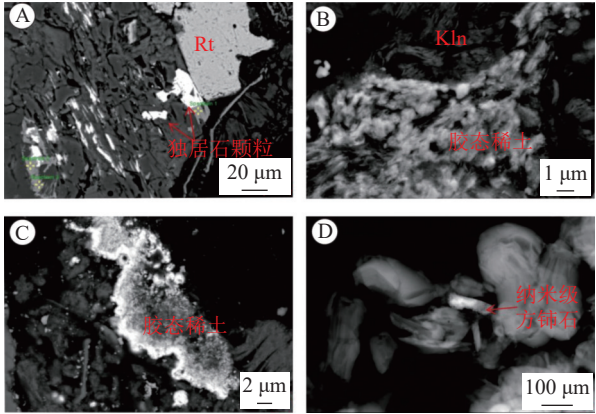
缅北 iREE 稀土矿物种类有：独居石（及其成分变种，富钽独居石、富钆独居石）、褐帘石、磷钇矿和微量的胶态稀土和方钨石（表 4）。独立稀土矿物主要嵌布状态有（1）呈微细粒的独立矿

表 4 缅甸某地稀土矿稀土元素分布特征
Table 4 Distribution characteristics of rare earth elements in Myanmar rare earth mine

矿物名称	化学成分式	理论ΣREO/%	实测ΣREO*/%	LREE/%	HREE/%	矿物含量/%
独居石 Monazite-(Ce)	(Ce,La,Nd,Th)[PO ₄]	轻稀土（铈组）氧化物约占39~74；重稀土（钇组）氧化物占0~5	45~72.98	45.00~72.98	0	0.02
富钆独居石 Monazite-(Nd、Ce)	(Nd,Ce,Sm,Pr,La,Gd,Zr)PO ₄	同上	36.2~68.95	33.27~68.95	0~2.93	0.01
富钽独居石 Monazite-(Ce)	(Ce,La,Nd,Th)[PO ₄]	同上	43.73	43.73	0	极微量
方钨石 Cerianite- (Ce)	(Ce,Th)O ₂	100.00	84.50	84.50	0	极微量
磷钇矿 Xenotime- (Y)	YPO ₄	61.40	51.60	19.40	32.20	极微量
胶态稀土	纳米级稀土矿物集合体	暂无	31.00~45.00	31.00~45.00	0	0.001

实测ΣREO*为能谱半定量测试结果。

物颗粒与金红石、钛铁矿等颗粒连生（如图5A）；
（2）呈微细粒的独立矿物颗粒嵌布于高岭石矿物的层间（图5B），或嵌布于黏土矿物或其他矿物（主要是云母）的颗粒粒间（图6F）。（3）以胶态稀土（纳米级单晶颗粒集合体）存在（图6C）。

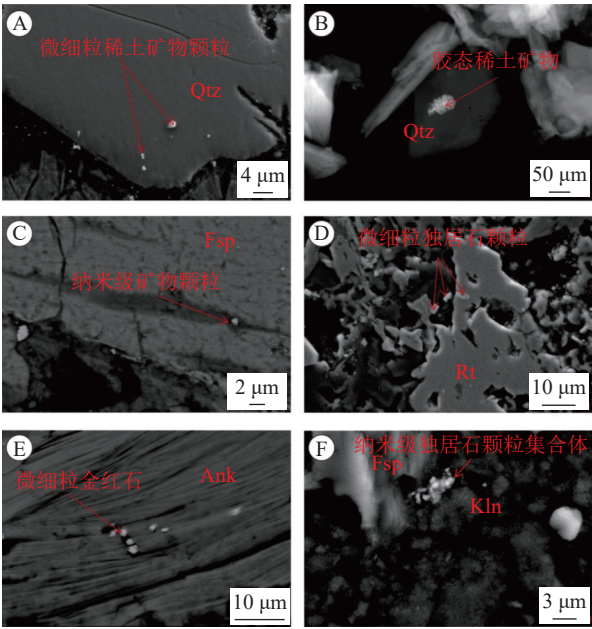


A—与金红石毗邻连生的独居石颗粒，B—在高岭石中呈浸染状分布的胶态稀土矿物，C—呈细脉浸染状分布的胶态稀土矿物（在边缘呈星点状分布），D—透射电子图像：由纳米级方钨石矿物颗粒（Rt-金红石、Kln-高岭石）

图5 缅北花岗岩风化壳 iREE 矿体中稀土独立矿物形态特征的 SEM 和 TEM

Fig.5 SEM and TEM of the morphological characteristics of rare earth independent minerals in iREE orebody of granite weathering crust in northern Myanmar

除了前述的几种稀土元素主要赋存状态，还存在稀土元素以类质同象赋存在其他矿物晶格中或以纳米级稀土矿物颗粒附着在碎屑矿物颗粒表面。这类型矿物主要有：石英、钾长石、云母、锆石、金红石、钛铁矿、赤铁矿和褐铁矿、硬锰



A—石英颗粒表面附着的微细粒独居石颗粒，B—透射电子图像：石英颗粒表面附着的纳米级胶态稀土，C—长石颗粒表面附着的微细粒的矿物颗粒，D—金红石颗粒表面附着的纳米级独居石颗粒，E—云母解理缝中夹杂的微细粒的金红石矿物颗粒，F—长石和高岭石颗粒间附着的纳米级独居石颗粒集合体。（Qtz-石英、Fsp-长石、Rt-金红石、Ank-铁白云母、Kln-高岭石）

图6 缅北花岗岩风化壳 iREE 矿体中其他矿物颗粒表面、颗粒的裂隙或颗粒粒间普遍附着的纳米级微细粒矿物

Fig.6 Nano fine-grained minerals generally attached on the surface of other mineral particles, cracks of particles or between particles in iREE ore body of granite weathering crust in northern Myanmar

矿、三水铝石和极微量的钍石（表5）。
用场发射扫描电镜和透射电镜 TEM 对矿物微

表5 缅北稀土矿稀土元素分布特征

Table 5 Distribution characteristics of rare earth elements in rare earth mines in northern Myanmar

矿物名称	化学成分式	实测ΣREO*/%	矿物含量/%
石英Quartz	SiO ₂	0.02~0.07	38.53
钾长石k-feldspar	KAlSi ₃ O ₈	0.05~0.08	25.05
斜长石Plagioclase	(Na,Ca)[Al ₂ Si ₂ O ₈]	0~0.01	0.10
黑云母Biotite	K(Mg,Fe) ₃ (Al,Fe)Si ₃ O ₁₀ (OH,F) ₂	0~0.15	5.51
锆石Zircon (含富铅锆石)	ZrSiO ₄	0~5.64	0.11
以类质同象存在其他矿物晶格中或以纳米级稀土矿物颗粒附着在碎屑矿物颗粒表面	金红石（含铈金红石）Rutile	TiO ₂ (Y ₂ O ₃ : 0~0.76)	0.98
	钛铁矿（含铈（钇）钛铁矿）Ilmenite	FeTiO ₃ (Y ₂ O ₃ : 0.17~0.63)	0.10
	赤铁矿Hematite	Fe ₂ O ₃	0~0.71
	褐铁矿Goethite	针铁矿标准化学式为2Fe ₂ O ₃ ·3H ₂ O	0~0.09
	硬锰矿Psilomelane		1.01~3.71
三水铝石Gibbsite	Al(OH) ₃	0~0.22	0.08
钍石Thorite	ThSiO ₄	0.26	0.001

实测 Σ REO*为能谱半定量测试结果。

区放大分析,在矿物颗粒表面、颗粒的裂隙或颗粒间普遍附着纳米级的微细粒矿物——包括纳米级的赤铁矿、金红石、钛铁矿和独居石等。

4 讨 论

4.1 矿床分类

20 世纪 80 年代末,前人通过对华南多地 iREE 矿床的研究,结合其地球化学性质将其划分为三类:①轻稀土矿床, iLRee (La→Eu) 占稀土总量的 70% 以上;②重稀土矿床, iHRee (Gd→Lu、Y) 占稀土总量的 70% 以上;③综合性矿床,轻重元素含量相近。结合成矿母岩类型对云南等地发现的 iREE 矿床进行系统的分析,可将其细分为以下 5 种类型^[20]:①产于花岗岩风化壳的离子吸附型轻稀土矿床 (iLREE);②产于花岗岩风化壳中的离子吸附型高铈中铈型重稀土矿床 (高 Eu, 中 Y, iHREE);③产于花岗岩风化壳中的离子吸附型富铈重稀土矿床 (富 Y, iHREE);④产于变质岩风化壳的离子吸附型中铈轻稀土矿床 (中 Y, iLRee);⑤产于玄武岩风化壳的离子吸附型富铈轻稀土矿床 (富 Eu, iLREE)。

从矿床地球化学性质来看,可将福建长汀 REE 按三分组划分,轻稀土占比 LREE (La-Nd) 平均为 67.91%,而缅北 REE 中轻稀土占比 LREE (La-Nd) 平均为 67.51%,其 REE 组分特点与长汀极为相近;综合考虑其成矿母岩类型,两地 iREE 皆属于产于花岗岩风化壳中的离子吸附型轻稀土矿床 (iLREE)。

4.2 iREE 成矿作用

风化壳型稀土矿床作为一种表生作用下的产物,受到不同表生地质作用的控制,包括风化作用、剥蚀作用和地下水迁移等。研究表明 iREE 成矿的海拔高度一般不超过 500 m,最适合于 200~400 m^[43],然而王登红^[35] (2017) 认为 iREE 也可以在高海拔地区形成,缅北在高原低山丘陵地貌下形成的花岗岩风化壳 iREE 矿床实例也证实了这一结论。

在风化壳型稀土矿床普遍出现的热带和亚热带地区,表生环境主要为多雨湿热的气候及起伏平缓的丘陵地势。福建长汀和缅北地区均属中亚热带季风气候,温暖湿润,雨量充沛,有利于岩石的风化作用。在地貌方面,华南地区和缅北地区大致受地壳抬升及剥蚀作用的准平衡状态所控

制^[43],形成中度起伏,上凸下凹的丘陵地貌,研究表明风化壳的厚度、风化程度与地形地貌关系密切,地壳抬升和地表剥蚀的增加所导致的风化壳中稀土含量的提升可能存有一个阈值,这对风化壳型稀土矿床成矿和矿体保存起重要的控制作用^[43],并且 Li 等^[38]发现坡顶强烈的物理侵蚀能有效增加母岩的暴露,但持续强烈的侵蚀又会导致风化物的丢失,不利于矿体的保存,故认为强弱侵蚀间歇交替对厚大矿体的形成也极为有利。福建长汀矿床海拔最高 486.6 m,最低 299.5 m,一般 350~400 m,高差小,植被稀少,矿体赋存在全风化层中,一般厚 5~10 m,最厚>20 m,一般位于山包、山脊之地势较缓,高差不大处。而缅北 iREE 矿床平均海拔 1 000 m 左右,相对高差 500 m,属构造侵蚀低山地貌区,矿区矿体形态受地形、地貌控制,多为近圆形山形态分布,通常山顶部位稀土品位高,矿层厚度大,山腰稀土矿层厚度中等,山脚稀土矿层厚度薄,花岗岩风化壳厚度一般 25~50 m,可以看出,虽然福建长汀全风化层 CIA 指数为 92.07%,其风化程度较缅北 (79.34%) 高,但缅北 iREE 矿体的保存厚度却更大,这可能是其地貌条件更有利于 iREE 的保存——缅北地区地壳抬升和地表剥蚀也可能更接近于阈值,又或者是其存在更合理的强弱侵蚀交替间隔,有待下一步深入的研究查明。

从地球化学的角度来看,花岗岩原岩中稀土赋存矿物的稳定性^[5,44-46]、迁移介质的 pH 值^[47-48]、风化壳黏土矿物的种类和吸附能力^[49-50]、风化程度及气候、地貌环境^[51-52]、生物作用^[53]以及岩体的规模、矿物颗粒大小等因素都会影响 REE 的风化迁移、分馏和富集。尽管许多因素会造成 REE 的分馏,但这些分馏作用不足以改变风化壳 REE 分布型式对原岩的继承性,原岩中的稀土配分特点决定了风化壳矿体中的稀土配分类型^[52,54-42]。可以反推出两地原岩的 REE 分配类型也应与风化壳的 REE 配分类型一致,都为左倾“V”字型,并且存在 Ce 明显的负异常,而 La、Pr、Nd 则明显的正异常, Eu 有轻微负异常。

从矿物学的角度来看,原岩中 (含) 稀土副矿物的种类对风化壳中稀土元素的分配特征也有重要影响——当原岩中富集榍石、褐帘石、磷灰石、独居石和氟碳铈矿等 (含) 稀土副矿物时,则更倾向于形成 iLRee 型风化壳^[45]。iREE 的成矿

经历了岩浆阶段-岩浆期后热液阶段-独立流体交代阶段-风化富集阶段^[41]REE在岩浆作用过程中的初步富集是形成 iREE 稀土矿床的前提，在风化壳中的再次富集则是成矿的关键条件。在原岩中，造岩矿物中 REE 的含量通常占全岩的 5%~50%，（含）稀土副矿物对全岩 REE 的贡献占举足轻重的地位^[33,55-58]，而富集在风化壳中的离子吸附相 REE 主要来源于原岩中的弱抗风化（含）稀土副矿物^[19,33,59-61]。如前所述，缅北和长汀矿区主要发育的均是黑云母二长花岗岩，原岩中对成矿有利的（含）稀土副矿物正是楣石、褐帘石、磷灰石、氟碳铈矿和独居石等矿物，除独居石外其他几种稀土矿物相对容易风化，且在风化后解离释放出大量的 Ree^{3+} ，通过运移、富集和存储等一系

列成矿作用，相对易于形成 iLREE 矿床。

4.3 两地花岗岩全风化层中 REE 赋存状态对比

稀土元素在 iREE 矿体中的赋存形式可分为矿物相、离子吸附相、胶体分散相和晶格杂质相，最新研究也表明，iREE 中稀土元素主要以三种赋存状态存在（1）粘土矿物吸附的离子相，黏土矿物的吸附稀土量和该吸附量占风化物稀土总量的比例也由地表向全风化层和半风化层的交界递增，然后随着深度增加而递减；（2）赋存在风化残余的稀土矿物中；（3）赋存在其他矿物中、铁锰氧化物和有机质中^[31]；按物质组成划分，稀土赋存状态可分为碎屑矿物、黏土矿物和稀土副矿物三类，而按回收提取难度划分，又可分易于回收、回收难度大、回收困难三类；见表 6。

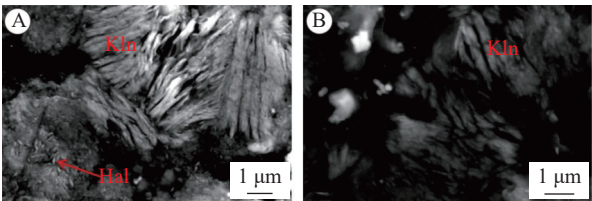
表 6 风化壳离子吸附型稀土矿石稀土元素赋存状态划分 ^[34]					
Table 6 Classification of rare earth elements occurrence state of ion adsorption rare earth ore in weathered crust					
赋存状态	相	态	主/次要	按物质组成划分	按回收提取难度
离子吸附态	离子吸附相	交换性吸附态	主要	黏土矿物	易于回收提取 提取难度较大
		专性吸附态	次要（个别矿床可为主要）		
风化残留的稀土矿物	胶体分散相	胶体吸附态 凝胶态	次要	稀土副矿物	回收提取困难
	独立矿物相	表生矿物态	主要	稀土副矿物	提取难度较大
		残留矿物态	主要		
赋存在其他矿物中、 铁锰氧化物和有机质中	晶格杂质相	类质同象态 内潜同晶态	次要	碎屑矿物	提取难度较大

目前对于稀土元素在黏土矿物上的赋存状态仍不清楚，在风化壳型稀土矿床中，高岭石和埃洛石为最主要的黏土矿物（图 7），但高岭石和埃洛石均为 1:1 型的黏土矿物，其吸附能力主要由层状结构中 Al 附能和 Si 附能键暴露在外界的 O 所带有的负电荷而形成的断面余键吸附活性中心所提供，最近的同步辐射研究显示，在日本的风化壳样品中钇很可能以水合自由离子的形态以

外层络合物的形式吸附在黏土矿物上^[31]。由于本文主要聚焦浸出工艺后将残留在矿体中的稀土元素的赋存状态（主要为独立稀土矿物相和晶格杂质相），故对黏土矿物中离子相吸附的 REE 赋存状态暂未做深入探讨。

长汀地区花岗岩全风化层中稀土元素的赋存状态主要为黏土矿物离子吸附相（其所占稀土元素配分比例为 67.76%），其次是碎屑矿物、稀土副矿物相，而缅北地区花岗岩全风化层中稀土元素的赋存状态主要也为黏土矿物离子吸附相（其所占稀土元素配分比例为 61.43%），其次是碎屑矿物、稀土副矿物相，两地 iREE 矿稀土元素配分对比见图 8。

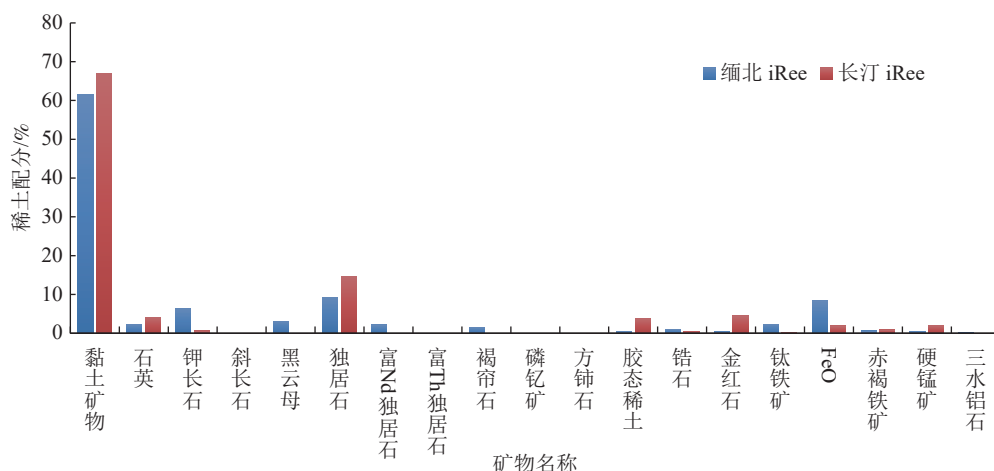
在缅北矿床中蚀变、交代作用普遍发育（图 9），其中可见次生交代独居石的金红石颗粒（图 9A），和蚀变残余的金红石骸晶中嵌布的独居石颗粒（图 9B）。长石碎屑主要为钾长石（微斜长石），受风化作用变得疏松易碎；斜长石强烈绢云母化



A—缅北书页状高岭石和埃洛石（棒状），B—长汀书页状高岭石（Kln-高岭石、Hal-埃洛石）

图 7 花岗岩风化壳 iREE 矿体中的高岭石形态的扫描电子图像

Fig.7 SEM of kaolinite morphology in iREE orebody of granite weathering crust

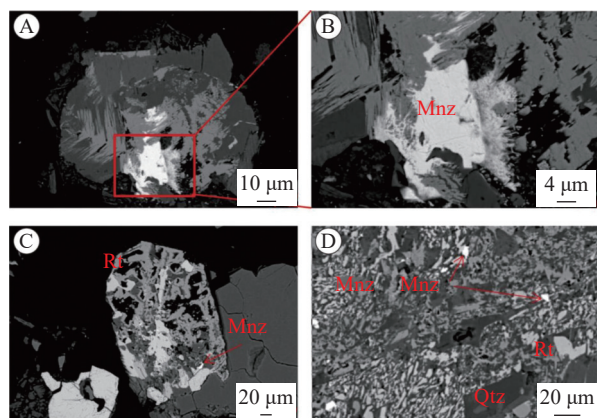


注：由于使用 AMICS 矿物参数自动定量分析系统进行样品的全矿物分析，其原理主要依靠矿物的背散射图像和能谱点分析数据来进行矿物的扫描和数据统计，而能谱分析无法准确的区分高岭石、地开石、埃洛石等黏土矿物，故在 AMICS 统计结果中并未区分黏土矿物的亚类。

图 8 两地 iREE 矿稀土元素配分对比

Fig.8 Comparison of the rare earth element fractions of iREE mines in two places

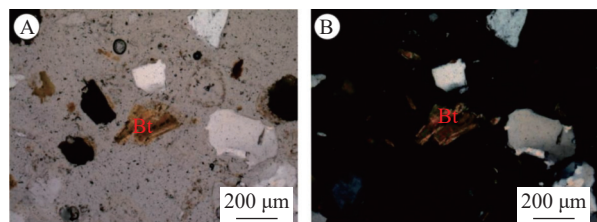
（水云母）化；云母多水化，失去弹性，两地均可见黑云母绿泥石化（图 10）。



A—被金红石次生交代的独居石颗粒，B—蚀变残余的金红石颗粒中包裹着微细粒的独居石，C—蠕虫状紧密嵌布的次生独居石和钛铁矿、金红石颗粒（Mnz-独居石、Rt-金红石、Qtz-石英）

图 9 缅北花岗岩风化壳 iREE 矿体中蚀变残余的矿物形态特征

Fig.9 Morphological characteristics of altered residual minerals in iREE ore body of granite weathering crust in Northern Myanmar

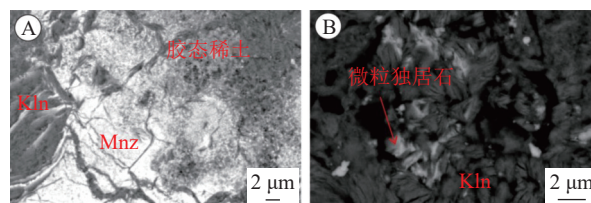


(Bt-黑云母)

图 10 缅北 iREE 矿床中多见黑云母绿泥石化（左 A 为单偏光，右 B 为正交偏光）

Fig.10 Biotite chloritization is common in iREE deposit in Northern Myanmar

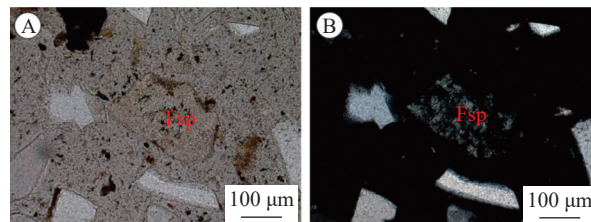
但在福建长汀矿床中，则更多的发育与硬锰矿和高岭石等粘土矿物紧密嵌布的胶态稀土（图 11），并且从图 8 也可以看出，长汀粘土矿物相中 REE 配分更高，根据 AMICS 统计结果，长汀粘土矿物含量也更多（约为 26.08%），这与长汀矿床风化程度更高，钾长石、云母等原岩矿物更多的被风化形成粘土矿物有一定关系（图 12）。



（Mnz-独居石、Kln-高岭石）A—在高岭石颗粒间嵌布的独居石颗粒和呈点状浸染分布的胶态稀土颗粒，B—风化残余的独居石颗粒嵌布于高岭石层间

图 11 长汀花岗岩风化壳 iREE 矿体中蚀变残余的矿物形态特征

Fig.11 Morphological characteristics of altered residual minerals in iREE ore body of weathering crust of Changting granite



(Fsp-长石)

图 12 长汀 iREE 矿床中多见的长石绢云母化等蚀变特征（左 A 为单偏光，右 B 为正交偏光）

Fig.12 Alteration characteristics such as feldspar sericitization commonly seen in Changting iREE deposit

4.4 花岗岩风化壳型 iREE 矿床综合利用

王登红等^[41]通过母岩和风化壳中的风化蚀变指数的“大数据处理”，并与稀土含量进行相关性分析，认为风化强度影响着稀土元素次生富集的程度，当风化蚀变指数 $CIA < 85\%$ 时，风化程度与稀土含量呈正相关性；当 $85\% < CIA < 100\%$ 时，风化程度与稀土含量则呈反相关。缅北的 CIA 指数为 79.34%，长汀的 CIA 指数为 92.07%，长汀风化程度继续加深，其稀土含量可能反而会降低，就两地 iREE 开采的迫切性来说，长汀应更早开采^[41]。

从表 2 可以看出，两地花岗岩风化壳中的 REE 赋存状态可按回收提取难度细分为三类：

（1）粘土矿物吸附的离子相：这种相态的稀土离子化学性质较稳定，不溶于水，可被 NaCl 、 HCl 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 等电解质溶液浸出，易于提取；

（2）胶态沉积相：胶态沉积相稀土用一般的物理选矿方法及离子交换法均不能将其提取，回收困难。（3）（除胶态沉积相外的）稀土独立矿物相和晶格杂质相：这种赋存状态的稀土结合能较高，提取难度较大。

从图 11 可以看出，两地 iREE 矿床中粘土吸附离子相是稀土元素主要的赋存状态，由 X 衍射分析结果可以看出，两地粘土矿物均以高岭石为主，在缅北矿床还存在少量的埃洛石和绿泥石，而长汀矿床则存在少量伊利石、蒙脱石和绿泥石。赋存在粘土矿物中的 REE 配分分别为 61.43% 和 67.76%，也是目前主要开采利用的对象，从综合利用的角度来看，福建长汀的 iREE 综合利用率将更高。

两地 iREE 矿床中胶态相所占比例均较小，一般为 0.51%~3.78%，稀土独立矿物相配分为 12.98%~14.70%，且均不能通过原地浸矿提取出来，此外，矿床中还含有部分含 REE 的碎屑矿物，这部分矿物中的稀土元素可能是以微细粒稀土矿物颗粒的形式赋存，也可能是类质同像存在矿物的晶格中（这两种赋存状态对碎屑矿物的 REE 含量的贡献仍有待查明）。这部分独立稀土矿物和含稀土的碎屑矿物在浸出工艺后都将残留在 iREE 矿床中，将形成特殊的 iREE 尾矿。

iREE 稀土开采通常以电解质溶液渗浸法浸取稀土元素的方式为主，且方法很多种，目前在工业上得到应用的为池浸、堆浸和原地浸矿三种。因池浸和堆浸工艺损毁环境严重被逐渐淘汰，原

地浸矿因其较小的环境扰动量及较高的稀土浸取率，逐渐成为离子型稀土开采主流工艺。20 世纪 90 年代开始，原地浸矿工艺广泛用于中国南方稀土矿的开采，有效缓解了矿区地形、地貌和地表植被的破坏，降低了水土流失程度。

5 结 论

（1）结合矿床地球化学和成矿母岩性质分析，两地 iREE 皆属于产于花岗岩风化壳中的离子吸附型轻稀土矿床（iLREE）。iREE 的成矿经历了岩浆阶段-岩浆期后热液阶段-独立流体交代阶段-风化富集阶段，富集在风化壳中的可交换的 REE 主要来自赋存在原岩中的弱抗风化（含）稀土副矿物，缅北和长汀矿区主要发育的均是黑云母-二长花岗岩，原岩中对成矿有利的（含）稀土副矿物正是榍石、褐帘石、磷灰石和氟碳铈矿等矿物，由于这些矿物相对容易风化，风化后解离释放出大量的 REE^{3+} ，通过运移、富集和存储等一系列成矿作用，相对易于形成 iLREE 矿床。

（2）虽然两地 iREE 矿床类型相同，但其地理位置、海拔高度、构造背景、风化程度等各方面都存在明显的不同，导致两地矿床属性仍存在较大的差异：（1）长汀矿区的风化程度更高，CIA 指数高达 92.07%，这可能是造成长汀矿区存在更多粘土矿物的主要原因，也较缅北更容易发育与硬锰矿和高岭石等粘土矿物紧密嵌布的胶态稀土；（2）虽然缅北矿区风化程度较低，但缅北 iREE 矿体的保存厚度却更大，这可能是其地貌条件更有利于 iREE 的保存——缅北地区地壳抬升和地表剥蚀也可能更接近于阈值，又或者是其存在更合理的强弱侵蚀交替间隔。

参考文献：

- [1] 王盼盼,陈林,杨晓军,等. 四川典型轻稀土赋存状态[J]. [矿产综合利用](#), 2019(6):60-64.
- WANG P P, CHEN L, YANG X J, et al. Study on occurrence of rare earth in Dalucao, Dechang, Sichuan[J]. [Multipurpose Utilization of Mineral Resources](#), 2019(6):60-64.
- [2] Chen Z H. Global rare earth resources and scenarios of future rare earth industry[J]. [Journal of rare earths](#), 2011, 29(1):1-6
- [3] 程建忠,车丽萍. 中国稀土资源开采现状及发展趋势[J]. [稀土](#), 2010, 31(2):65-69.

- CHENG J Z, CHE L P. 2010. Current situation and development trend of rare earth resources exploitation in China[J]. *Chinese Rare Earth*, 2010, 31(2):65-69.
- [4] Minowa T. Rare earth magnets: Conservation of energy and the environment[J]. *Resource Geology*, 2008, 58:414-422.
- [5] 蒋晓丽, 龚大兴, 周家云, 等. 滇黔相邻区二叠系宣威组富稀土黏土岩综合研究进展[J]. *矿产综合利用*, 2022(1):32-41.
- JIANG X L, GONG D X, ZHOU J Y, et al. The Research progress and problems of rare earth elements of rare earth rich clay rock permian Xuanwei formation in the Yunnan-Guizhou border region[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(1):32-41.
- [6] 徐力, 曾令熙, 熊文良, 等. 西太平洋深海底泥中稀土元素赋存状态[J]. *矿产综合利用*, 2022(1):195-199.
- XU L, ZENG L X, XIONG W L, et al. Occurrence of rare earth elements in deep-sea mud from the Western Pacific ocean[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(1):195-199.
- [7] 王晓慧, 颜世强, 梁友伟, 等. 黔西北地区沉积型稀土资源回收稀土研究现状及选矿实验探讨[J]. *矿产综合利用*, 2022(2):135-141.
- WANG X H, YAN S Q, LIANG Y W, et al. Research status of rare earth recovery from sedimentary rare earth ore and discussion on beneficiation test in Northwest Guizhou[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(2):135-141.
- [8] 张惠, 康博文, 田春秋. 全球稀土二次资源回收利用进展[J]. *矿产综合利用*, 2022(3):86-94.
- ZHANG H, KANG B W, TIAN C Q. Analysis on recovery and utilization of global rare earth secondary resources[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(3):86-94.
- [9] 姚玉玲, 代力, 舒荣波, 等. 赣南某未开发离子型稀土矿区土壤环境质量评价[J]. *矿产综合利用*, 2022(4):152-156.
- YAO Y L, DAI L, SHU R B, et al. Soil environmental quality assessment around the undeveloped ion adsorption type rare earth ore in Southern Jiangxi[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(4):152-156.
- [10] Wang D H, Sun Y, Dai H Z, et al. Characteristics and exploitation of rare earth, rare metal and rare-scattered element minerals in China. *Engineering*, 2019, 21(1): 119-127.
- [11] 王登红, 王瑞江, 孙艳, 等. 2016. 我国三稀 (稀有稀土稀散) 矿产资源调查研究成果综述[J]. *地球学报*, 37(5): 587-598.
- WANG D H, WANG R J, SUN Y, et al. 2016. A summary of the research results of the three rare mineral resources in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 37(5): 587-598.
- [12] USGS. Mineral Commodity Summaries 2016[R]. Reston: Mineral Commodities Summaries, 2016..
- [13] 王瑞江, 王登红, 李建康, 等. 稀有稀土稀散矿产资源及其开发利用[M]. 北京: 地质出版社, 2015.
- WANG R J, WANG D H, LI J K, et al. Rare rare earth rare earth mineral resources and their development and utilization[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2015.
- [14] 王登红, 王瑞江, 李建康, 等. 中国三稀矿产资源战略调查研究进展综述[J]. *中国地质*, 2013, 40(2):361-370.
- WANG D H, WANG R J, LI J K, et al. Review on the progress of strategic investigation and research of three rare mineral resources in China[J]. *Geology in China*, 2013, 40(2):361-370.
- [15] 王登红, 赵芝, 于扬, 等. 离子吸附型稀土资源研究进展、存在问题及今后研究方向[J]. *岩矿测试*, 2013, 32(5): 796-802.
- WANG D H, ZHAO Z, YU Y, et al. Research progress, existing problems and future research direction of ion adsorption rare earth resources[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2013, 2(5): 796-802.
- [16] 丁嘉榆. 离子型稀土矿开发的历史回顾[J]. *有色金属科学与工程*, 2012, 3(4):14-19.
- DING J Y. 2012. Historical review of the development of ionic rare earth minerals[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2012, 3(4):14-19.
- [17] Bao Z W, Zhao Z H. Geochemistry of mineralization with exchangeable REY in the weathering crusts of granitic rocks in South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2008, 33:519-535.
- [18] 白鸽, 吴澄宇, 丁孝石, 等. 南岭地区离子型稀土矿床形成条件和分布规律[R]. 北京: 地质矿产部矿床地质研究所, 1989.
- BAI G, WU C Y, DING X S, et al. Formation conditions and distribution law of ionic rare earth deposits in Nanling area[R]. Beijing: Institute of deposit geology, Ministry of Geology and mineral resources, 1989.
- [19] 杨岳清, 胡淙声, 罗展明. 离子吸附型稀土矿床成矿地质特征及找矿方向[J]. *中国地质科学院院报矿床地质研究所分刊*, 1981: 102-118.
- YANG Y Q, HU C S, LUO Z M. Metallogenic geological characteristics and prospecting direction of ion adsorption rare earth deposits[J]. *Journal of Institute of deposit geology, Chinese Academy of Geological Sciences*, 1981: 102-118.
- [20] 周美夫, 李欣禧, 王振朝, 等. 风化壳型稀土和钽矿床成矿

过程的研究进展和展望[J]. 科学通报, 2020, 65(33):3809-3824.

ZHOU M F, LI X X, WANG Z C, et al. 2020. Research progress and prospect of metallogenic process of weathering crust rare earth and scandium deposits[J]. Scientific bulletin, 2020, 65(33):3809-3824.

[21] 李娜, 秦玉芳, 金海龙, 等. 高品位稀土精矿中稀土、铁、磷、钙元素赋存状态研究[J]. 矿产综合利用, 2022(6):193-200.

LI N, QIN Y F, JIN H L, et al. Occurrence of rare earth, iron, phosphorus and calcium in high grade rare earth concentrate[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(6):193-200.

[22] 李潇雨, 惠博, 熊文良. 白云鄂博稀土资源综合利用现状概述[J]. 矿产综合利用, 2021(5):17-24.

LI X Y, HUI B, XIONG W L. Overview of comprehensive utilization of rare earth resources in Bayan Obo[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(5):17-24.

[23] 王维维, 李二斗, 王其伟, 等. 白云鄂博微细粒稀土矿工艺矿物学及浮选实验研究[J]. 矿产综合利用, 2021(5):81-86.

WANG W W, LI E D, WANG Q W, et al. Study on process mineralogy and flotation test of the Bayan Obo fine-grained rare earth ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(5):81-86.

[24] 华仁民, 张文兰, 顾晟彦, 等. 南岭稀土花岗岩、钨锡花岗岩及其成矿作用对比[J]. 岩石学报, 2007, 23(10):2321-2328.

HUA R M, ZHANG W L, GU S Y, et al. 2007. Comparison of Nanling rare earth granite, tungsten tin granite and their mineralization[J]. Acta Petrol Sinica, 2007, 23(10):2321-2328.

[25] 吴澄宇, 白鸽, 黄典豪, 等. 南岭富重稀土花岗岩类的特征和意义[J]. 中国地质科学院院报, 1992(0):43-58+147.

WU C Y, BAI G, HUANG D H, et al. 1992. Characteristics and significance of Nanling heavy rare earth rich granitoids[J]. Proceedings of the Chinese Academy of Geological Sciences, 1992(0):43-58+147.

[26] 黄典豪, 吴澄宇, 韩久竹. 江西足洞和关西花岗岩的稀土元素地球化学及矿化特征[J]. 地质学报, 1988, 62(4):327-344.

HUANG D H, WU C Y, HAN J Z. REE geochemistry and mineralization characteristics of zudong and guanxi granites in Jiangxi[J]. Acta Geologica Sinica, 1988, 62(4):327-344.

[27] 贺伦燕, 王似男. 我国南方离子吸附型稀土矿[J]. 稀土, 1989, 10(1):39-44.

HE L Y, WANG S N. Ion adsorption rare earth ore in South

China[J]. Chinese Rare Earth, 1989, 10(1):39-44.

[28] Wang D H, Zhao Z, Yu Y, et al. A review of the achievements in the survey and study of ion-absorption type REE deposits in China. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38(3):317~325 (in Chinese with English abstract).

[29] 叶亚康, 周家云, 曾令熙, 等. 格陵兰岛 Ilímaussaq 岩体异霞正长伟晶岩中稀土元素赋存状态研究[J]. 矿产综合利用, 2021(5):120-124.

YE Y K, ZHOU J Y, ZENG L X, et al. Occurrence of rare earth elements in Lujaurite-pegmatite in the Ilímaussaq complex, Greenland[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(5):120-124.

[30] 蒋晓丽, 周家云. 一种少见的稀土矿物: 斯坦硅石[J]. 矿产综合利用, 2021(5):125-128.

JIANG X L, ZHOU J Y. A scarce rare-earth mineral: steenstrupine[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(5):125-128.

[31] 易建春, 潘钢. 富含独居石稀土矿石中稀土元素测试的前处理方法比较[J]. 矿产综合利用, 2021(5):152-157.

YI J C, PAN G. Comparison of different pretreatment methods in determination of rare earth elements in rare earth ores enriched with monazite[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(5):152-157.

[32] Lu L, Wang D H, Wang C H, et al. Mineralization regularity of ion-adsorption type REE deposits on Lincang granite in Yunnan Province. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(6): 1466-1478 (in Chinese with English abstract).

[33] 张继龙, 郭明明, 郭丽敏. 风化煤中矿物质浮选性能的研究[J]. 矿产综合利用, 2019(5):61-65.

ZHANG J L, GUO M M, GUO L M. Study on feasibility of reverse flotation of weathered coal[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(5):61-65.

[34] DB 36-T 1158-2019. 风化壳离子吸附型稀土矿产地质勘察规范[S]. 江西省市场监督管理局, 2019.

DB 36-T 1158-2019. Specifications for weathered crust ion-absorbed rare earth mineral geological exploration[S]. Jiangxi Bureau of market supervision, 2019.

[35] 王登红, 赵芝, 于扬, 等. 我国离子吸附型稀土矿产科学研究和调查评价新进展[J]. 地球学报, 2017, 38(3):317-325.

WANG D H, ZHAO Z, YU Y, et al. New progress in scientific research, investigation and evaluation of ion adsorbed rare earth minerals in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38(3):317-325.

[36] Wang D H, Wang R J, Li J K, et al. The progress in the

strategic research and survey of rare earth, rare metal and rare-scattered elements mineral resources. *Geology in China*, 2013, 40(2):361-370.

[37] Wang D H, Zhao Z, Yu Y, et al. Progress, problems and research orientation of ion-adsorption type rare earth resources. *Rock and Mineral Analysis*, 2013b, 32(5): 796-802.

[38] Wang L C, Chen Z H, Wang C H, et al. New application of molybdenite in the study on ore deposits: Rare earth elements geochemistry. *Jilin Daxue Xuebao (Diqu kexue Ban/Journal of Jilin University (Earth Science Edition))*, 2012, 42(6):1467-1655.

[39] Wang D H, Chen Y C, Chen Z H, et al. Assessment on mineral resource in Nanling region and suggestion for further prospecting. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(7): 882-890.

[40] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[M]. *Developments in geochemistry*. Elsevier, 1984, 2: 63-114.

[41] 刘艳飞, 代涛. 全球稀土资源分布与我国稀土产业发展研究[N]. 中国稀土学会 2020 学术年会暨江西(赣州)稀土资源绿色开发与高效利用大会, 2020.

LIU Y F, DAI T. Research on the distribution of global rare earth resources and the development of China's rare earth industry [N]. 2020 academic annual meeting of China Rare Earth Society and Jiangxi (Ganzhou) rare earth resources green development and efficient utilization conference, 2020.

[42] 杨学明, 杨晓勇, 王奎仁, 等. 我国某些矽卡岩型矿床中石榴石的波谱学研究[J]. *安徽地质*, 1992(4):1-12.

YANG X M, YANG X Y, WANG K R, et al. 1992. Spectroscopic study of garnet in some skarn deposits in China[J]. *Geology of Anhui*, 1992(4):1-12.

[43] 陆蕾, 王登红, 王成辉, 等. 云南离子吸附型稀土矿成矿规律[J]. *地质学报*, 2020, 94(1):179-191.

LU L, WANG D H, WANG C H, et al. Metallogenic law of ion adsorption rare earth deposits in Yunnan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(1):179-191.

[44] 陈书, 舒荣波, 闵刚, 等. 南方稀土矿区隐伏断裂带高密度电法勘探实验[J]. *矿产综合利用*, 2022(1):68-73.

CHEN S, SHU R B, MIN G, et al. High-density electrical exploration test of Hidden fault zone in Southern rare earth mining area[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(1):68-73.

[45] Li Y H M, Zhao W W, Zhou M F. Nature of parent rocks, mineralization styles and ore genesis of regolith-hosted REE deposits in South China: An integrated genetic model. *J Asian Earth Sci*, 2017, 148: 65-95.

[46] 罗仙平, 翁存建, 徐晶, 等. 离子型稀土矿开发技术研究进

展及发展方向[J]. *金属矿山*, 2014, 456(6):83-90.

LUO X P, WENG C J, XU J, et al. 2014. Research progress and development direction of ionic rare earth ore development technology [j]. *metal mines*, 2014, 456 (6): 83-90.

[47] 吴澄宇. 风化壳稀土成矿作用-一种不平衡过程. *矿床地质*. 1989, 8(4): 85-90.

WU C Y. Weathering crust rare earth mineralization - an unbalanced process. *Mineral Deposit*. 1989, 8(4): 85-90.

[48] 邓志成. 赣南大田重稀土花岗岩的特征与成因[J]. *桂林冶金地质学院学报*, 1988(1):39-48.

DENG Z C. 1988. Characteristics and genesis of Datian heavy rare earth granite in southern Jiangxi[J]. *Journal of Guilin Institute of technology*, 1988(1):39-48.

[49] 包志伟. 华南花岗岩风化壳稀土元素地球化学研究[J]. *地球化学*, 1992(2):166-174.

BAO Z W. 1992. Study on REE geochemistry of granite weathering crust in South China[J]. *Geochimica*, 1992(2):166-174

[50] 陈德潜, 吴静淑. 离子吸附型稀土矿床的成矿机制. *中国稀土学报*, 1990, 8(2): 175-179.

CHEN D Q, WU J S. 1990. Metallogenic mechanism of ion adsorption rare earth deposits. *Journal of the Chinese Society of Rare Earth*, 1990, 8(2): 175-179.

[51] 池汝安, 徐景明, 何培炯, 等. 华南花岗岩风化壳中稀土元素地球化学及矿石性质研究[J]. *地球化学*, 1995(3):261-269.

CHI R A, XU J M, HE P J, et al. 1995. Study on REE geochemistry and ore properties of granite weathering crust in South China[J]. *Geochimica*, 1995(3):261-269.

[52] 林传仙, 郑作平. 风化壳淋积型稀土矿床成矿机理的实验研究[J]. *地球化学*, 1994(2):189-198.

LIN C X, ZHENG Z P. 1994. Experimental study on metallogenic mechanism of weathering crust leaching rare earth deposit[J]. *Geochimica*, 1994(2):189-198.

[53] 吴澄宇, 黄典豪, 郭中. 江西龙南地区花岗岩风化壳中稀土元素的地球化学研究[J]. *地质学报*, 1989(4):349-362.

WU C Y, HUANG D H, GUO Z. Geochemical study of rare earth elements in granite weathering crust in Longnan area, Jiangxi Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1989(4):349-362.

[54] 陈炳辉, 刘琥琥, 毋福海. 花岗岩风化壳中的微生物及其对稀土元素的浸出作用[J]. *地质论评*, 2001(1):88-94+8.

CHEN B H, LIU H H, WU F H. Microorganisms in granite weathering crust and their leaching of rare earth elements[J]. *Geological Review*, 2001(1):88-94+8.

[55] Yan Hei, Martin Li, Wen Winston Zhao, et al. Nature of parent rocks. mineralization styles and ore genesis of regolith-hosted REE deposits in South China: An integrated genetic

model. *Journal of Asian Earth Sciences*: 148(2017): 65-95.

[56] 黄典豪,吴澄宇,韩久竹. 江西足洞和关西花岗岩的岩石学、稀土元素地球化学及成岩机制. *中国地质科学院院报*, 1993, 第27、28号: 69-94.

HUANG D H, WU C Y, HAN J Z. 1993. Petrology, REE geochemistry and diagenetic mechanism of zudong and guanxi granites in Jiangxi. *Proceedings of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 1993, No. 27、28: 69-94.

[57] Wu C Y, Bai G, Huang D H, Zhu Z S. Characteristics and significance of HREE-rich granitoids of the Nanling mountain area. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 1992(25): 43-58.

[58] Yang Y Q, Hu C S, Luo Z M. Geological characteristic of mineralization of rare earth deposit of the ion-absorption type and their prospecting direction. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 1981p(1): 102-118.

[59] 李亚, 初静波, 王英凯, 等. 黑龙江某晶质石墨风化样分

选实验研究[J]. *矿产综合利用*, 2021(3):39-42.

LI Y, CHU J B, WANG Y K, et al. Experimental study on separation of weathering flake graphite ore in Heilongjiang province[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(3):39-42.

[60] 蒋英, 李波, 梁冬云, 等. 某风化粘土型钛矿工艺矿物学研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(6):31-36.

JIANG Y, LI B, LIANG D Y, et al. Study on process mineralogy for a weathered clay type titanium ore[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(6):31-36.

[61] 李美荣, 李波, 梁冬云, 等. 非洲某风化伟晶岩型钽铌矿石工艺矿物学及可选性研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(6):131-134.

LI M R, LI B, LIANG D Y, et al. Studies on process mineralogy and separability of a weathered pegmatite type tantalum-niobium ore from Africa[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(6):131-134.

Comparative Study on REE Occurrence Mode in Ion- adsorption Type REE Deposits from Changting, Fujian, and Northern Myanmar

LI Xiaoyu^{1,2}, XIONG Wenliang^{1,2}, ZHANG Lijun^{1,2}, CHEN Da^{1,2}, ZHU Zhimin^{1,2}

(1. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geology Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. Rare Earth Resources Application Technology Innovation Center of China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Taking the samples of granite weathering crust ion adsorption rare earth deposits in Changting area of Nanling, Fujian and a place in northern Myanmar as the research objects, the geochemical characteristics, mineral characteristics, composition and content changes of rare earth in iREE deposits in the two areas are compared. The bedrock of weathering crust in both places is biotite monzogranite. After comparative analysis, it is found that the iREE deposits in the two places are obviously different in geographical location, altitude, structural background, weathering degree and other aspects, resulting in great differences in deposit attributes between the two places. The weathering degree in Changting mining area is higher, and the CIA index is as high as 92.07%, which may be the main reason for more clay minerals in Changting mining area, it is also easier to develop colloidal rare earths closely embedded with clay minerals such as psilomelane and kaolinite than in northern Myanmar; Although the weathering degree of northern Myanmar mining area is low, the preservation thickness of iREE ore body in northern Myanmar is larger, which may be that its geomorphic conditions are more conducive to the preservation of iREE - crustal uplift and surface denudation in northern Myanmar may be closer to the threshold, or there may be a more reasonable alternating interval of strong and weak erosion; iREE tailings formed after leaching of iLREE deposit is generally a clay material with low REE and stable chemical properties. From the perspective of comprehensive utilization, it is an important direction in the future to strengthen the development and research on the rare earth recovery process of low-grade refractory iREE tailings and realize the sustainable utilization of ionic rare earth resources.

Keywords: granite weathering crust; ion adsorbable rare earth; occurrence state; comprehensive utilization