

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2020.04.002

引用格式:刘海波,陈斌锋,彭琳琳,等. 赣南江贝变质岩风化壳离子吸附型稀土矿床特征及成因[J]. 华东地质,2020,41(4): 315-324.

赣南江贝变质岩风化壳离子吸附型稀土矿床特征及成因

刘海波¹,陈斌锋¹,彭琳琳¹,赵 芝²,张兴文¹

(1.江西省地质矿产勘查开发局赣南地质调查大队,赣州 341000;

2.中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037)

摘要:通过对赣南江贝稀土矿床进行岩相学、矿床学和地球化学研究,表明该矿床成矿母岩主要为寻乌岩组变质岩,岩性有变粒岩、片岩和片麻岩,其中云母片岩稀土元素含量最高,是最有利的成矿母岩,属轻稀土富集型母岩,是近些年新发现的1处中深变质岩风化壳离子吸附型稀土矿。矿区呈低缓丘陵地貌,风化壳平均厚度12.33 m,矿体主要赋存于全风化层中,矿体平均厚度4.68 m, SRE_2O_3 品位0.035%~0.122%,属离子吸附型稀土矿。稀土主要来源于易风化的水磷酸盐类矿物和稀土氟碳酸盐类矿物,风化壳化学蚀变指数 $\text{CIA}>90\%$,表明了强烈的风化作用为矿床的形成创造了有利条件。会昌—安远—寻乌地区中深变质岩广泛分布,具有大型稀土矿成矿潜力。

关键词:赣南;中深变质岩;离子吸附型稀土矿;地质特征;矿床成因

中图分类号: P618.7

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2020)04-315-10

稀土具有特殊的光、电、磁等物理、化学特性,已成为国内外公认的战略性和关键性矿产资源^[1]。离子吸附型稀土矿因其富含高科技应用重稀土元素、综合利用价值高、提取工艺较为简单而尤显重要^[2]。赣南位于我国重要的南岭多金属成矿带和武夷成矿带交汇部位,是离子吸附型稀土矿的首次发现地和主要产地^[3-6]。离子吸附型稀土矿成矿母岩包括花岗岩、火山岩、混合岩和变质岩^[7]。受到宁都葛藤嘴矿区在浅变质岩风化壳中发现离子吸附型稀土矿的启发^[8-12],2016—2018年,赣南地质调查大队对寻乌江贝地区中深变质岩开展稀土矿调查,提交中型离子吸附型稀土矿1处^[13],并推测区域上该套稀土成矿母岩有良好的稀土矿找矿前景。本文通过对寻乌江贝稀土矿野外系统矿产评价和室内综合研究,总结分析了中深变质岩风化壳稀土矿的矿床地质特征及成因,为今后开展同类矿产调查提供参考。

1 区域地质背景

矿床位于江西省寻乌县城东北方向25 km处,行政区划属寻乌县澄江镇管辖,地理坐标为:115°40′16″~115°45′04″ E, 25°02′51″~25°06′23″ N,为中型离子吸附型稀土矿床。

研究区大地构造位置(图1(a))位于赣南变质岩区(Ⅱ)—武夷加里东造山带中深部区域变质岩带(Ⅱ₂)—南武夷变质岩小区(Ⅱ₂)—安远—寻乌断裂带动力热流变质岩区^[14]。该区以中元古代—新元古代变质岩地层、寒武纪牛角河组作为基底,白垩纪、第四纪地层作为盖层。变质岩地层为南华系—寒武系,早寒武世牛角河组变质程度很浅,南华纪—震旦纪地层变质作用极不均匀。中、深变质岩的岩性组合称为寻乌岩组,为1套片岩、变粒岩和片麻岩夹变余长石石英砂岩^[15]。

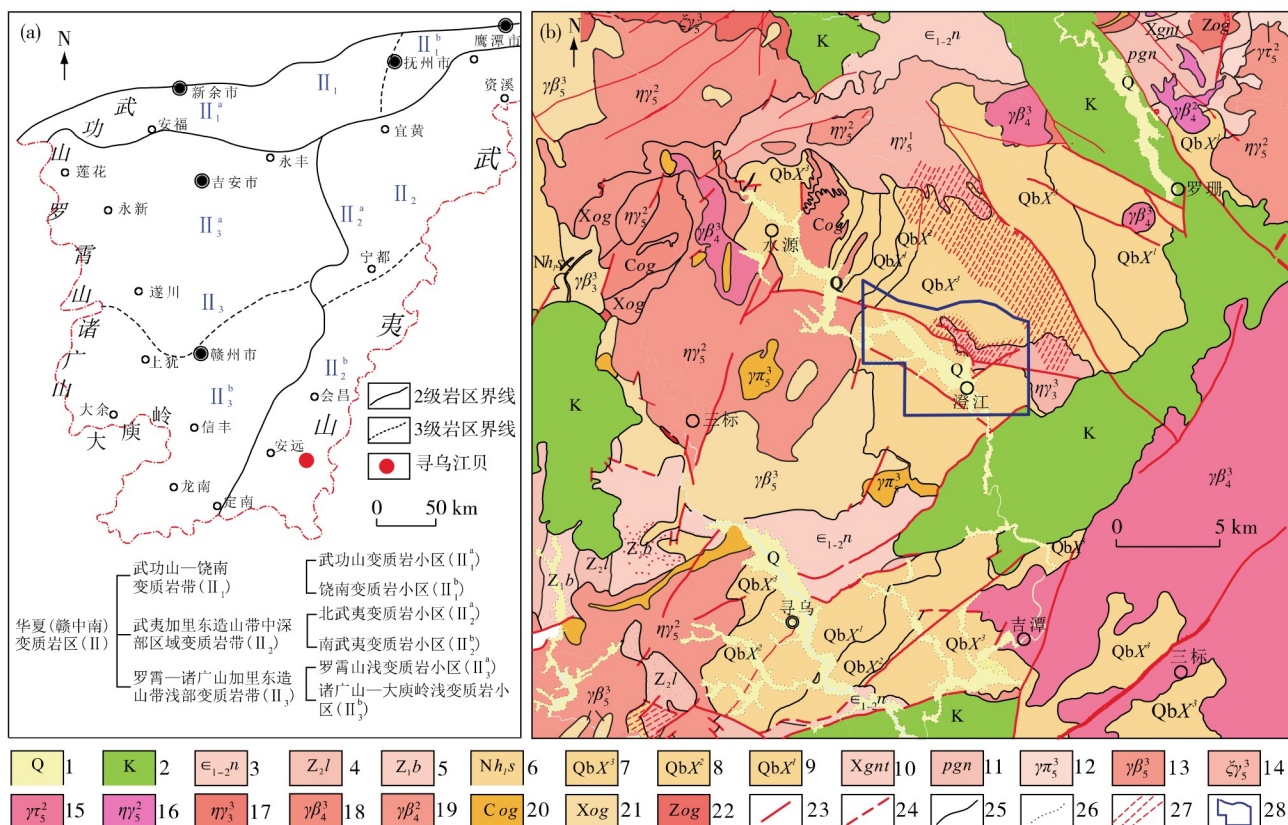
* 收稿日期:2020-05-18 修订日期:2020-07-24 责任编辑:叶海敏

基金项目:江西省地质调查基金“江西省寻乌县江贝稀土矿预查(编号:20160015)”和基本科研业务费专项基金“赣南变质岩离子吸附型稀土矿成矿规律与找矿方向研究(编号:YYWF201527)”项目联合资助。

第一作者简介:刘海波,1969年生,男,工程师,主要从事地质勘查与管理工作。Email:391486618@qq.com。

断裂以 NE 向为主,其次为 NEE 向、NW-NWW 向,具多期活动特征。该区岩浆活动频繁,主要有加里东期、海西期和燕山期岩体。加里东期岩体主要有白面石岩体、岐山独立岩体,海西期岩体

主要有桂坑岩体,燕山期岩体主要有三标岩体、帽子顶岩体、上甲独立岩体、水头岩体、帽子顶岩体和图岭岩体。以燕山期岩体数量最多,以酸性、中酸性花岗岩为主(图 1(b))。



1.第四系;2.白垩系;3.寒武纪牛角河组;4.震旦纪老虎塘组;5.震旦纪坝里组;6.南华纪上施组;7.青白口纪寻乌岩组三段;8.青白口纪寻乌岩组二段;9.青白口纪寻乌岩组一段;10.前震旦纪新屋家变粒岩;11.前震旦纪破塘片麻岩;12.燕山期图岭岩体;13.燕山期帽子顶岩体;14.燕山期水头岩体;15.燕山期大富足岩体;16.燕山期三标岩体;17.加里东期岐山岩体;18.加里东期白面石岩体;19.海西期桂坑岩体;20.长安片麻岩;21.细吼桥片麻岩;22.中村花岗质片麻岩;23.实测断层;24.推测断层;25.地质界线;26.第四系界线;27.韧性剪切带;28.研究区

图 1 赣中南变质岩区变质地质单元分布图(a)和寻乌江贝地区区域地质图(b)

Fig. 1 Metamorphic geological units (a) in metamorphic terrain of central-south Jiangxi and regional geological map (b) of Jiangbei area in Xunwu County

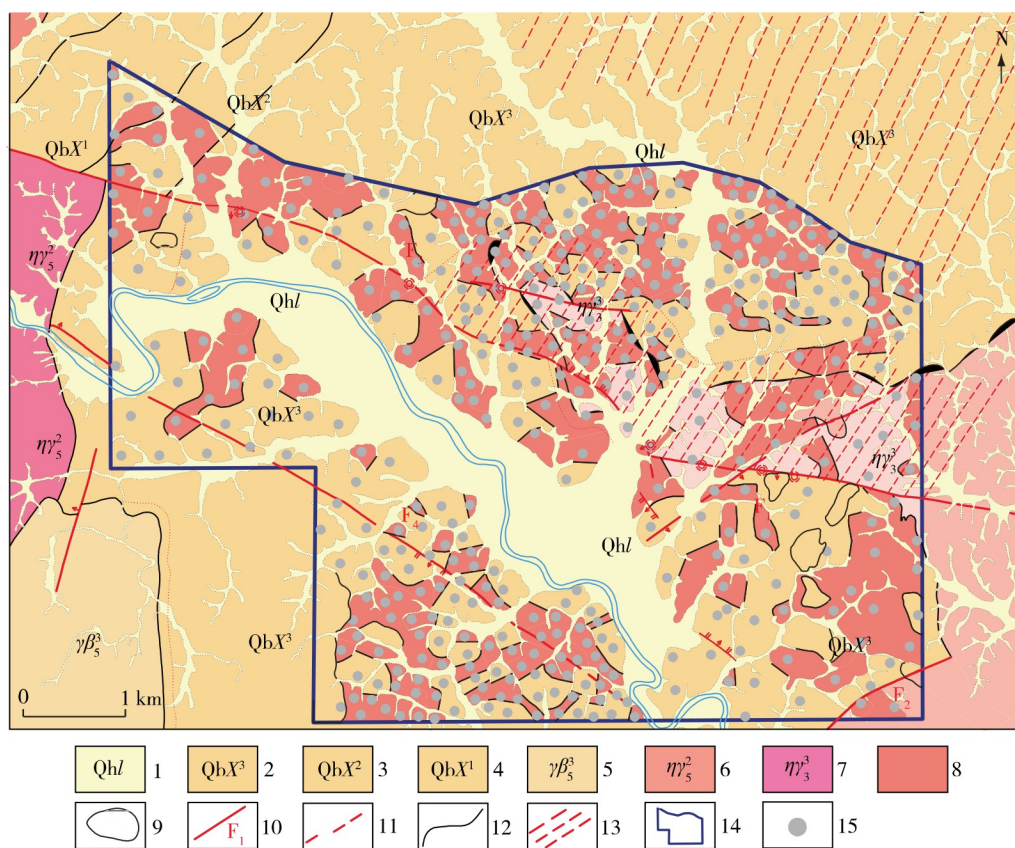
2 矿床地质概况

2.1 矿区地质特征

研究区出露地层为新元古代南华纪—震旦纪寻乌岩组变质岩系(图 2)。脆性断层发育,主要为 NE 向(F_1 、 F_2)和 NW 向(F_3 、 F_4)断裂,韧性剪切带伴随 NE 向断裂带展布,主要发育于寻乌岩组变质岩中,形成角闪岩相变质带、韧性剪切带、混合岩化带“三位一体”动力变质带。岩浆岩主要分布于矿

区中部以东,为加里东期岐山岩体。

矿床成矿母岩为新元古代寻乌岩组和加里东期岐山岩体,其中以寻乌岩组为主。寻乌岩组由一套面状构造广泛发育的片岩类、片麻岩类和变粒岩类等组成。它们呈单层型、夹层型和互层型在纵向上反复交替叠出,横向上产出稳定,完整性较好,混合岩化较弱,局部糜棱岩化。岩组内部根据变形强弱、变形组合复杂程度划分为 3 个岩性段(QbX^1 、 QbX^2 、 QbX^3),岩性段之间以韧性断层为界,区内



1.第四纪联圩组; 2.青白口纪寻乌岩组三段; 3.青白口纪寻乌岩组二段; 4.青白口纪寻乌岩组一段; 5.燕山期帽子顶岩体; 6.燕山期三标岩体; 7.加里东期岐山岩体; 8.稀土矿体; 9.基岩区; 10.实测断层及编号; 11.推测断层; 12.地质界线; 13.韧性剪切带; 14.研究区; 15.赣南钻探工程

图 2 寻乌县江贝稀土矿区地质简图

Fig. 2 Geological sketch map of Jiangbei REE orefield in Xunwu County

主要出露第三岩性段。

(1)一段(QbX¹)。主要表现为强应变带特征,原生矿物和结构构造无存,褶皱组合为相似、顺片掩卧褶皱,石英动态重结晶形成的多晶条带和透镜体广泛发育,定向排列。

(2)二段(QbX²)。主要表现为中等应变带特征,原生层理被片理置换,很少保留有残余砂屑。石英拔丝、透镜化和长石压力影常见。这些变形组构在纵向和横向上变化较大,连续性较差,反映了应变的局部性。

(3)三段(QbX³)。主要表现为弱应变带特征,岩石组合有变质程度较浅的千枚岩,地层内局部残留层理和砂屑。褶皱组合为牵引褶皱、相似褶皱。新生片理对原生层理置换较完全,这些变形组构在纵向和横向上变化不大。

2.2 风化壳地质特征

该区以山间盆地和丘陵地貌为主,区内海拔 296~530 m,风化壳出露标高 298~492 m,风化壳厚度 3.10~35.00 m,平均厚度 12.33 m。山形多呈不规则的浑圆状或馒头状(图 3),风化壳主要发育在平缓的山顶和山坡上,多为全覆盖式,次为裸脚式,极有利于离子吸附型稀土矿床的形成。风化壳自上而下划分为表土层、全风化层、半风化层、微风化层和基岩。表土层一般厚 0.20~2.10 m,多数不含矿,矿区 198 个赣南钻工程含有表土层,含矿样品为 41 个,占 20.71%。全风化层厚 3.10~35.00 m,呈褐红色、黄褐色和土黄色,少数呈灰白色,质地较均一,结构松散,造岩矿物解体,绢云母已风化,长石有的被高岭土所取代,呈土状产出,手搓具滑感;石英颗粒多为 0.05~1 mm,呈灰白色;黑云母多析出

铁质,部分蚀变为白云母。微裂隙较为发育,裂隙中往往被黏土矿物充填,黏土含量一般为35%~55%。该层具有在山头、山腰厚度大,山脚厚度小

的特点。 SRE_2O_3 (稀土浸出相) 品位一般为0.002%~0.207%,矿体主要赋存于该层位中部及上部。



(a) 矿区浑圆状、馒头状地表外貌



(b) 矿区地表陡坎风化壳

图3 寻乌江贝稀土矿区风化壳特征照片

Fig. 3 Photographs of weathering crusts in Jiangbei REE orefield, Xunwu County

2.3 矿体地质特征

2.3.1 矿体特征

矿体主要分布于寻乌岩组三段风化壳中,少量分布于寻乌岩组一段和二段风化壳中。矿体走向一般沿地层走向连续成片,一般长1 000~3 300 m,宽500~1 000 m,矿体厚1.00~18.30 m,平均厚4.68 m,91.32%的稀土矿体赋存在厚度<15 m的风化壳中上部。

矿体呈似层状沿全风化层分布,平面形态受风化壳控制,呈阔叶状随地形而变化,单矿体形态略为复杂,边界一般受沟谷展布的控制,多呈不规则多

边形及梅花状,山包呈椭圆状。矿体倾角较为平缓,山顶倾角一般为 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$,沿山坡倾角变陡为 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$,总体倾角较地形坡度略为平缓。矿区在265个含矿工程中有41个工程矿体出露地表,占15.47% (图4),说明该区由于遭受剥蚀作用较弱,矿体被剥蚀的较少,厚度较稳定。单工程 SRE_2O_3 品位0.035%~0.122%, TRE_2O_3 (稀土全相) 品位0.044%~0.168%。寻乌岩组矿石 ΣYO (重稀土元素总量) 占比39.13%, Y_2O_3 占比24.94%, Eu_2O_3 占比0.94%,表明矿床的配分类型为中铈高铕型轻稀土。

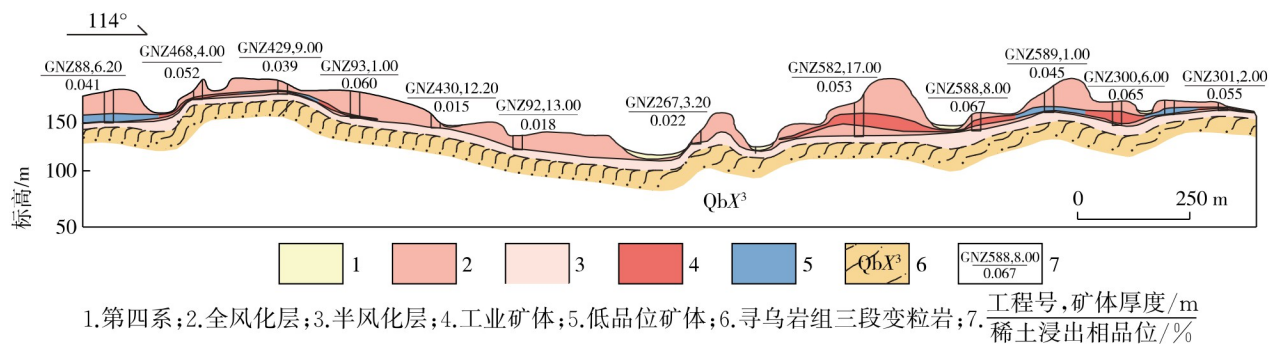


图4 寻乌江贝稀土矿区矿体剖面图

Fig. 4 Profile of orebody in Jiangbei REE orefield, Xunwu County

2.3.2 矿石特征

区内稀土矿体主要赋存于变质岩风化壳中,呈

松散砂土状,变质岩风化壳矿石矿物成分主要由黏土矿物(高岭石、埃洛石、水云母等,总含量为

15%~55%)、石英(20%~35%)、云母类矿物(~15%)、残余长石(5%~10%)组成,次为难风化分解的各种副矿物,如磁铁矿、钛铁矿、磷灰石等。

矿石化学成分的变化与稀土矿化富集过程紧密相关,表 1 中全风化层 CIA 值为 95.97~96.34,表明已达到风化晚期,岩石出现不同程度的脱硅富铝。变粒岩和云母片岩 SiO₂ 含量明显减少,片麻岩 SiO₂ 含

量增加,各岩石 Al₂O₃ 含量均明显增高,CaO、K₂O 和 Na₂O 含量减少,表明了长石矿物风化减少而黏土矿物风化增多。MnO 含量基本稳定,变粒岩 P₂O₅ 含量基本不变,云母片岩和片麻岩 P₂O₅ 含量明显降低,表明富含稀土的水磷酸盐类矿物风化解。3 种岩石烧失量随着变质岩风化,新加入的组分含量均增加,矿石的化学成分变化情况与矿物变化情况相吻合。

表 1 江贝稀土矿区成矿母岩、矿石主量元素含量测试结果

Table 1 Major element contents of metallogenic mother rocks and ores in Jiangbei REE orefield

岩性	类型	样品 编号	含量/%											
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量	CIA
变粒岩	全风化	Q1-1	43.22	32.46	8.12	1.28	0.12	0.52	0.08	0.08	1.17	0.12	13.47	96.06
	基岩	Q1-2	73.86	10.20	4.06	0.63	0.09	1.99	2.75	2.33	2.03	0.15	2.57	58.93
	全风化	Q2-1	43.24	32.69	7.93	1.23	0.12	0.53	0.08	0.07	1.09	0.12	13.46	96.36
	基岩	Q2-2	74.42	9.56	4.27	0.69	0.11	1.91	3.80	1.83	1.80	0.15	0.88	56.28
	全风化	Q3-1	43.57	32.37	7.83	1.26	0.10	0.50	0.04	0.06	1.26	0.11	13.43	95.98
	基岩	Q3-2	74.91	9.53	3.81	0.54	0.11	1.81	3.87	1.87	2.07	0.13	0.72	54.95
云母片岩	全风化	Q4-1	56.81	22.60	9.71	1.14	0.02	0.32	0.07	0.03	0.45	0.06	9.42	97.59
	基岩	Q4-2	52.17	21.83	9.58	0.88	0.03	3.74	0.21	0.51	5.83	0.14	4.77	76.93
	全风化	Q5-1	59.45	20.69	9.34	1.16	0.04	0.33	0.09	0.03	0.75	0.07	8.44	95.97
	基岩	Q5-2	55.25	20.08	8.97	0.84	0.03	3.71	0.17	0.42	5.37	0.16	4.47	77.10
	全风化	Q6-1	61.37	20.16	8.84	1.14	0.02	0.37	0.07	0.05	0.65	0.05	7.93	96.34
	基岩	Q6-2	54.40	20.77	9.14	0.86	0.03	3.79	0.13	0.41	5.60	0.11	4.52	77.19
片麻岩	全风化	Q7-1	70.21	19.08	2.69	0.39	0.04	0.19	0.06	0.06	0.65	0.02	7.18	96.14
	基岩	Q7-2	68.55	13.14	6.09	0.79	0.12	2.78	0.44	0.70	3.91	0.18	3.10	72.28
	全风化	Q8-1	69.38	19.77	2.60	0.37	0.03	0.19	0.09	0.07	0.65	0.02	7.39	96.06
	基岩	Q8-2	68.95	12.67	5.34	0.64	0.10	2.53	2.46	0.94	3.54	0.14	1.97	64.58
	全风化	Q9-1	70.97	18.77	2.57	0.36	0.11	0.18	0.06	0.06	0.62	0.02	6.98	96.22
	基岩	Q9-2	65.79	14.40	6.64	0.60	0.09	3.33	0.29	0.62	5.39	0.12	2.30	69.59

注: CIA=[(Al₂O₃)/(Al₂O₃+CaO+Na₂O+K₂O)]×100

26 件矿石样品分析结果显示,研究区稀土氧化物 La₂O₃ 含量为 25.29%,CeO₂ 含量为 2.14%,Pr₆O₁₁ 含量为 5.86%,Nd₂O₃ 含量为 20.96%,Eu₂O₃ 含量为 0.96%,Tb₄O₇ 含量为 0.76%,Dy₂O₃ 含量为 3.87%,Lu₂O₃ 含量为 0.21%,ΣYO 含量为 40.22%,Pr、Nd、Tb、Dy 含量中等,属中镨钕铽镝轻稀土矿床。

3 样品特征及分析方法

为了解稀土成矿母岩及风化壳的主量元素及稀土元素含量情况,在研究区针对不同岩性母岩及

全风化层采集了 18 件样品,其中全风化层样品 9 件,基岩样品 9 件,样品重约 2 kg。测试项目为主量元素和稀土元素。采集的 18 件样品均在北京燕都中实测试技术有限公司完成加工与测试。

(1)硅酸盐分析测试流程。将岩石粉碎、粗碎至厘米级的块体,选取无蚀变及脉体穿插的新鲜样品用纯化水冲洗干净,烘干并粉碎至 200 目以备测试使用。

(2)主量元素测试流程。首先将粉末样品称量后加 Li₂B₄O₇ (1:8)助熔剂混合,并使用融样机加热至 1 150 ℃使其在金铂坩埚中熔融成均一玻璃片体,后使用 XRF(Zetium, PANalytical 或 Shimadzu XRF-

1800)测试。测试结果保证数据误差 $<1\%$ 。

(3)微量元素测试流程。将200目粉末样品称量并置放入聚四氟乙烯溶样罐并加入 $\text{HF} + \text{HNO}_3$,在干燥箱中将高压消解罐保持在 190°C ,72小时后取出经过赶酸并将溶液定容为稀溶液上机测试。测试使用ICP-MS(M90,analytikjena)完成,所测数据根据监控标样GSR-2显示误差 $<5\%$,部分挥发性元素及极低含量元素的分析误差 $<10\%$ 。

4 测试结果

由主量元素测试结果(表1)可知,3种岩性的主量元素差异较大:变粒岩原岩基本未风化(CIA值 $54.95 \sim 58.93$), SiO_2 含量较高($73.86\% \sim 74.91\%$), Al_2O_3 含量较低($9.53\% \sim 10.20\%$), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 $0.87 \sim 1.11$,全碱含量 $3.63\% \sim 4.36\%$,具有相对较低的($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$)含量($5.62\% \sim 6.18\%$);云母片岩属风化早期(CIA值 $76.93 \sim 77.19$), SiO_2 含量较低($52.17\% \sim 55.25\%$), Al_2O_3 含量($20.08\% \sim 21.83\%$)最高,与云母含量较高相关联, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为($11.4 \sim$

13.62),全碱含量为 $5.79\% \sim 6.34\%$,具有相对较高的($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$)含量($12.69\% \sim 13.31\%$);片麻岩属风化早期(CIA值 $64.58 \sim 72.28$), SiO_2 含量一般($65.79\% \sim 68.95\%$), Al_2O_3 含量较高($12.67\% \sim 14.40\%$), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值较高($3.78 \sim 8.73$),全碱含量为 $4.48\% \sim 6.0\%$,具有相对较高的($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$)含量($7.87\% \sim 9.97\%$)。

由稀土元素含量测试结果(表2)可知,寻乌岩组3种岩性的稀土元素含量存在差异,其中云母片岩 ΣREE 最高,为 $(231.81 \sim 306.85) \times 10^{-6}$,是最有利的成矿母岩,变粒岩次之(ΣREE 为 $(179.09 \sim 247.93) \times 10^{-6}$),片麻岩最低(ΣREE 为 $(96.24 \sim 147.51) \times 10^{-6}$)。 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 值为 $2.64 \sim 3.70$,属于轻稀土富集型, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 $5.90 \sim 10.15$,平均值为 8.17 , $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为 $3.35 \sim 4.49$,平均值为 3.93 ,显示轻稀土元素分馏明显。 $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 $0.77 \sim 1.57$,平均值为 1.38 ,显示重稀土元素分馏不明显。 δEu 值为 $0.51 \sim 0.69$,平均值为 0.58 ,Eu出现明显负异常,在球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图(图5)上,曲线形态显示不对称“V”型左陡右缓的特点。

表2 江贝稀土矿区成矿母岩稀土元素含量测试结果

Table 2 REE contents of metallogenic mother rocks in Jiangbei REE orefield

岩性	样品 编号	含量/ 10^{-6}														
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
变粒岩	Q1-2	40.21	72.68	9.11	32.94	6.38	1.11	5.82	1.01	5.42	1.02	2.95	0.50	2.99	0.48	27.67
	Q2-2	46.92	85.06	10.99	37.92	7.49	1.23	6.96	1.23	6.54	1.26	3.64	0.57	3.63	0.56	33.93
	Q3-2	32.99	60.41	7.16	27.89	5.28	1.07	4.96	0.94	4.93	0.97	2.76	0.46	2.67	0.44	26.16
云母片岩	Q4-2	58.60	111.35	13.33	46.75	8.22	1.52	8.16	1.44	8.06	1.50	4.34	0.67	4.23	0.61	38.05
	Q5-2	45.09	85.74	11.24	37.74	7.30	1.34	6.95	1.29	7.16	1.38	3.93	0.62	3.75	0.59	31.18
	Q6-2	43.56	82.85	10.97	37.07	6.78	1.26	6.45	1.15	6.22	1.21	3.46	0.59	3.41	0.53	26.30
片麻岩	Q7-2	26.05	54.07	5.85	21.66	3.96	0.66	3.76	0.67	3.79	0.77	2.38	0.43	2.55	0.44	20.45
	Q8-2	23.70	46.86	5.91	21.16	4.10	0.80	3.96	0.72	4.04	0.84	2.53	0.46	2.69	0.44	23.18
	Q9-2	11.77	45.88	2.88	10.64	2.21	0.50	2.15	0.43	2.46	0.52	1.64	0.34	2.26	0.34	12.22

5 矿床成因及控矿因素

5.1 矿床成因

该区中、深变质岩风化壳离子吸附型稀土矿与新元古代寻乌岩组密切相关,寻乌岩组变质岩在成岩过程中,沉积了1套富含稀土的地层,其中云母片岩稀土元素含量最高, ΣREE 为 $(231.81 \sim 306.85) \times$

10^{-6} ,是最有利的成矿母岩,变粒岩 ΣREE 为 $(179.09 \sim 247.93) \times 10^{-6}$,片麻岩 ΣREE 为 $(96.24 \sim 147.51) \times 10^{-6}$,母岩为稀土矿化提供了必备的条件。该区风化壳的化学蚀变指数CIA均 $>90\%$,与母岩相比,风化壳 Al_2O_3 含量急剧升高,全部 $>18\%$,其中变粒岩的 Al_2O_3 含量达 32.51% ,而 SiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 含量降低,表明在化学作用为主导的表生作用下,原岩矿石、矿物遭受不同程度的

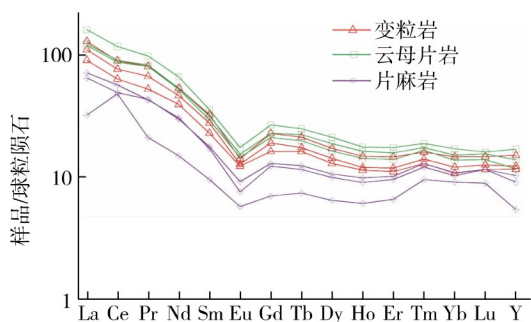


图 5 寻乌岩组球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of Xunwu rock Formation

破坏、分解,使硅铝酸盐矿物减少,黏土矿物增加,形成以高岭石、石英为主的松散风化壳,该区风化壳平均厚度 12.33 m。稀土元素也随着表生作用的进行和岩石矿物的分解,呈离子状态发生迁移,黏土矿物又具较强的吸附作用,使稀土元素在风化壳中发生次生富集而形成工业矿体,矿体主要集中分布于全风化层,矿体平均厚度达 4.68 m。在新近纪喜山运动造山作用下,地壳发生缓慢抬升,使原岩边剥蚀边风化,并且剥蚀速率与抬升速率大体持平,使风化壳稀土矿体得到完整保留。

5.2 控矿因素

风化壳离子吸附型稀土矿床的形成受内生条件(区域构造、母岩稀土含量、稀土赋存的易解离程度)和表生条件(气候、地形地貌)控制。其成矿机制表现为有利的成矿母岩与有利的气候、地貌条件相结合,使母岩矿物内的稀土在风化壳中大量转变为离子吸附态稀土,从而富集成矿。

(1)区域构造控制母岩分布。江贝中深变质岩风化壳离子吸附型稀土矿床处于武夷隆起南西部、河源—邵武区域性 NNE 向深大断裂与寻乌 EW 向断裂带的交接复合部位。EW 向构造与 NNE 向构造复合控制早期火山爆发、喷溢,导致深部熔浆上侵,矿区内地层发生韧性剪切变形、动力热流变质和混合岩化,控制了寻乌岩组的分布。

(2)母岩稀土含量是矿床形成的物质基础。该区变质岩原岩在沉积时富集了一套富含稀土元素的地层,其中云母片岩稀土元素总量最高,为 $(231.81 \sim 306.85) \times 10^{-6}$,变粒岩次之,稀土元素总量为 $(179.09 \sim 247.93) \times 10^{-6}$,片麻岩最低,稀土元素总量为 $(96.24 \sim 147.51) \times 10^{-6}$,稀土丰度值大于

赣南地区离子吸附型稀土矿的下限值 (120×10^{-6}) ,为稀土矿化提供了必备的物质条件。

(3)稀土元素载体矿物易解离程度是成矿的必要条件。同处武夷隆起南西部的葛藤嘴矿区浅变质岩类中主要的稀土独立矿物有新奇钙铈矿、独居石和磷钇矿^[16],电子探针分析结果显示,稀土元素主要赋存于稀土独立矿物中,其中新奇钙铈矿是最为重要的稀土矿物,可能是浅变质岩类风化壳中稀土的主要来源,因稀土氟碳酸盐类矿物具有易风化性,在矿区地表的基岩中很难保留^[16]。王臻等^[17]在该区开展了相应的稀土成矿成因研究工作,表明寻乌岩组地层稀土矿物类型有独居石、磷钇矿、水磷酸盐类矿物和磷铝酸盐类矿物。独居石和磷钇矿在不同类型变质岩中均有分布,但难风化,对稀土成矿基本没有贡献。水磷酸盐类矿物仅在变粒岩和云母片岩中发现,常与磷铝酸盐类共生,稀土含量高,易风化,稀土氟碳酸盐类矿物未见到,推断已风化水解,说明易风化的水磷酸盐类矿物和稀土氟碳酸盐类矿物是该区岩石主要的稀土物质来源。

(4)中温、中湿的亚热带风化气候是形成稀土矿床的关键条件。通常认为,温暖湿润气候条件下稀土的活动能力更强,而且稀土元素间的分异程度也比干燥气候下更大。长期强烈的风化淋滤和生物地球化学作用,容易使稀土元素发生活化迁移,在风化剖面内重新分布,甚至随地表水而流失,且稀土元素之间的分异也较为明显^[18]。热带、亚热带湿润气候条件下的物理、化学、水文和生物条件通常都有利于风化壳的发育,所形成风化壳的化学风化程度较高。新近纪以来,赣南乃至南岭地区处于中等温度(年平均气温 20°C 左右),多雨(年降水量为 $1\,500 \sim 2\,000\text{ mm}$)的亚热带气候,成矿母岩以化学风化作用为主,该区风化壳的化学蚀变指数 CIA 均 $>90\%$, Al_2O_3 含量急剧升高,均表明了风化作用的强烈性,生成了大量含水硅酸盐、高岭石族黏土矿物,形成了该区特有的红色土壤,这为稀土离子的吸附、沉淀乃至离子吸附型稀土矿的形成创造了有利的环境。

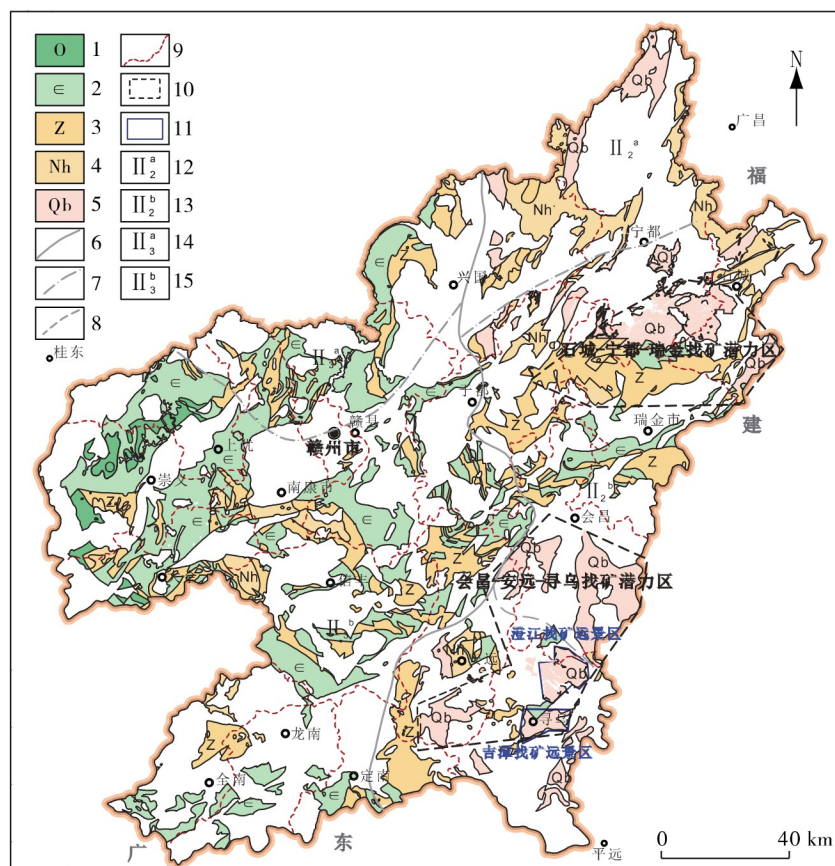
(5)地貌条件决定风化壳保留程度。只有风化壳的剥蚀速度小于或等于风化壳的形成速度,风化壳才得以发育和保存^[1]。赵芝等^[16]根据古夷平面与现代风化壳之间的高差,估计赣南地区的剥蚀速率为 $0.05 \sim 0.076\text{ mm/a}$,该速率与地壳上升速率十分接近。当地形切割过陡时,风化壳难以保留,

广泛的统计表明,低缓丘陵山区最有利于残积型风化壳的发育,大部分离子吸附型稀土矿床都分布在第Ⅱ类地貌单元中,仅少量小型矿床或矿点分布在第Ⅳ类、Ⅴ类地貌单元。该区以山间盆地和丘陵地貌为主,区内海拔 296~530 m,地势平缓,植被发育,地貌形态多呈不规则的浑圆状或馒头状。风化产物大量残留在原地,有利于风化壳的形成和保留,风化壳厚度 3.10~35.00 m,平均厚度 12.33 m,一般在平缓的山顶和山坡处风化壳较厚,有利于离子吸附型稀土矿床的形成。

6 区域找矿预测

根据江贝矿床特征,该区离子吸附型稀土矿化

与新元古代寻乌岩组关系密切,根据地层分布情况和前期 1:5 万远景调查的风化壳发育情况,在该区划分出 2 个稀土找矿远景区,即澄江变质岩找矿远景区和吉潭变质岩找矿远景区(图 6)。稀土成矿母岩岩性主要为片麻岩、片岩,新元古代寻乌岩组为已知的离子吸附型稀土矿成矿母岩,稀土元素含量普遍较高(200.71×10^{-6})。在球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图中,变粒岩、片麻及片岩类均具有相似的分布曲线,属轻稀土富集型。该区属会昌—安远—寻乌中深变质岩小区,地形低缓,主要发育馒头型山丘,风化壳较连续成片,广泛分布南华系上施组—寻乌岩组变质岩,成矿母岩面积达 300 km²,说明该区具有大型稀土矿成矿潜力。



1.奥陶系;2.寒武系;3.震旦系;4.南华系;5.青白口系;6.变质岩二级分区界线;7.变质岩三级分区界线;8.变质岩四级分区界线;9.县界;10.稀土潜力区;11.找矿远景区;12.北武夷中深变质岩小区;13.南武夷浅变质岩小区;14.罗霄山浅变质岩小区;15.诸广山—大庾岭浅变质岩小区

图6 赣南地区变质岩分布图(据 1:25 万赣南地区区域地质图修编)

Fig. 6 Distribution of metamorphic rocks in Southern Jiangxi (Modified from 1:250 000 regional geologic map of Southern Jiangxi)

7 结 论

(1)赣南地区中深变质岩风化壳离子吸附型稀土矿床母岩类型有变粒岩、片岩和片麻岩,主要赋存地层为青白口纪寻乌岩组。云母片岩稀土元素含量最高,是最有利的成矿母岩,变粒岩次之,片麻岩最低,均属轻稀土富集型。

(2)赣南地区山形多呈不规则的浑圆状或馒头状外貌,风化壳多为全覆式,风化壳自上而下划分为表土层、全风化层、半风化层、微风化层和基岩。矿体集中分布于寻乌岩组三段风化壳中,矿石稀土配分为中铈高钕型轻稀土型。

(3)赣南江贝变质岩风化壳型离子吸附型稀土矿的稀土主要来源于易风化的水磷酸盐类矿物和稀土氟碳酸盐类矿物。该区风化壳化学蚀变指数 $CIA > 90\%$,风化壳 Al_2O_3 含量高,表明了风化作用的强烈性。该区红色土壤为稀土离子的吸附和沉淀乃至离子吸附型稀土矿的形成创造了有利条件和环境。

(4)会昌—安远—寻乌地区中深变质岩广泛分布,地形低缓,风化壳发育,具有大型稀土矿成矿潜力。江贝变质岩风化壳型离子吸附型稀土矿床的发现对指导该地区寻找离子吸附型稀土矿具有重要意义。

参考文献

- [1] 谢有炜,阙兴华,陈斌锋,龙南上黄湾稀土矿地质特征及成矿条件分析[J]. 矿产与地质, 2017, 31(2): 295-299.
- [2] 邓茂春,王登红,曾载淋,等. 风化壳离子吸附型稀土矿圈矿方法评价[J]. 岩矿测试, 2013, 32(5): 803-809.
- [3] 彭琳琳,陈斌锋,邹新勇,等. 地质因素对离子吸附型稀土矿床勘查类型的影响[J]. 矿物学报, 2019, 39(4): 455-463.
- [4] 袁忠信,李建康,王登红,等. 中国稀土矿床成矿规律[M]. 北京: 地质出版社, 2012.
- [5] 范飞鹏,肖惠良,陈乐柱,等. 南岭东段含稀土矿花岗岩体中暗色包体地质特征——以陂头岩体为例[J]. 华东地质, 2016, 37(1): 36-44.
- [6] 陈斌锋,邹新勇,彭琳琳,等. 清溪岩体稀土矿床地质特征及重稀土找矿潜力[J]. 稀土, 2019, 40(4): 20-31.
- [7] 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.
- [8] 赵芝,王登红,王成辉,等. 离子吸附型稀土找矿及研究新进展[J]. 地质学报, 2019, 93(6): 1454-1465.
- [9] 王臻,陈振宇,赵芝,等. 赣南新元古代变质岩稀土矿物及其地球化学特征[J]. 矿床地质, 2019, 38(4): 837-850.
- [10] 赵芝,王登红,邹新勇,等. 江西宁都葛藤嘴浅变质岩离子吸附型稀土矿成矿模式[J]. 地质论评, 2016, 62(增刊): 421-422.
- [11] 陈斌锋,邹新勇,彭琳琳,等. 赣南地区变质岩离子吸附型稀土矿床地质特征及找矿方向[J]. 华东地质, 2019, 40(2): 143-151.
- [12] 谢有炜,漆富勇,阙兴华,等. 浅谈离子吸附型稀土矿勘查的有关问题[J]. 稀土, 2018, 39(6): 122-128.
- [13] 郑云飞,卢国安,彭琳琳,等. 江西省寻乌县江贝稀土矿普查报告[R]. 赣州:江西省地质矿产勘查开发局赣南地质调查大队, 2018.
- [14] 杨明桂,祝平俊,王光辉. 论华南构造-成矿单元划分[J]. 上海国土资源, 2018, 39(4): 13-18.
- [15] 江西省地质矿产勘查开发局. 中国区域地质志·江西志[M]. 北京: 地质出版社, 2017. 691-748.
- [16] 赵芝,陈郑辉,邹新勇,等. 赣南某离子吸附型稀土矿床浅变质岩的矿化特征[J]. 地球科学, 2018, 43(10): 3652-3663.
- [17] 王臻,赵芝,邹新勇,等. 赣南浅变质岩岩石地球化学特征及稀土成矿潜力研究[J]. 岩矿测试, 2018, 37(1): 96-107.
- [18] 马英军,霍润科,徐志方,等. 化学风化作用中的稀土元素行为及其影响因素[J]. 地球科学进展, 2004, 19(1): 87-94.

Characteristics and genesis of the ion adsorption REE deposit in Jiangbei metamorphic weathering crust, Southern Jiangxi Province

LIU Hai-bo¹, CHEN Bin-feng¹, PENG Lin-lin¹, ZHAO Zhi², ZHANG Xing-wen¹

(1. Gannan Geological Survey Party, Bureau of Geology and Exploration and Development of Mineral Resources of Jiangxi Province, Ganzhou 341000, China;

2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Through the petrographic, geochemical and mineral deposit studies of Jiangbei rare earth deposit in Southern Jiangxi, the results show the metallogenic mother rocks are mainly the metamorphic rocks of Xunwu Formation complex, with the lithology of granulite, schist and gneiss, among which the mica schist with the highest content of REEs serves as the most favorable parent rock, belonging to the LREE-enriched parent rock. The orefield is a low hilly terrain with average weathering crust thickness of 12.33 m. The orebody is mainly occurred in the completely weathered layer with the average thickness of 4.68 m and SRE_2O_3 grade of 0.035%~0.122%, belonging the ion adsorption rare earth deposit. The rare earth mainly comes from easily weathered water phosphate minerals and rare earth fluorocarbon minerals, with the chemical alteration index of weathering crust $\text{CIA} > 90\%$, indicating that the strong weathering contributes to the formation of deposit. The Huichang-Anyuan-Xunwu area where the mesometamorphic rocks are widely distributed has metallogenic potential of large rare earth deposits.

Key words: Southern Jiangxi; mesometamorphic rock; ion-adsorption REE deposit; geological characteristics; genesis of deposit