

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.

WANG Zhen, ZHAO Zhi, ZOU Xin-yong, et al. Petrogeochemical Characteristics and Metallogenetic Potential of Epimetamorphic Rocks in South Jiangxi Province[J]. Rock and Mineral Analysis, 2018, 37(1): 96 – 107.

【DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.201710160167】

赣南浅变质岩岩石地球化学特征及稀土成矿潜力研究

王臻¹, 赵芝¹, 邹新勇², 陈振宇^{1*}, 涂雪静³

- (1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;
2. 江西省地质矿产勘查开发局赣南地质调查大队, 江西 赣州 341000;
3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 赣南地区浅变质岩系分布广泛, 且风化壳发育, 查明浅变质岩的岩石学及地球化学特征对分析离子吸附型稀土矿床的成矿潜力具有重要作用, 而目前关于变质岩离子吸附型稀土矿的研究资料较少。本文对区内广泛发育的新元古代—寒武纪浅变质岩进行采样, 通过岩相学、岩石地球化学等方法对赣南浅变质岩进行分类研究。结果表明: 赣南浅变质岩时代跨度大, 从青白口系至泥盆系以及少量侏罗系均有出露, 以新元古代面积最广, 主要类型有变砂岩类、变质凝灰岩类、板岩类、千枚岩类及片岩类。其中, 变砂岩类和变质凝灰岩类的稀土含量高(Σ REEs 平均值分别为 302 $\mu\text{g/g}$ 和 246 $\mu\text{g/g}$), LREEs/HREEs = 2.68 ~ 5.43, 目前查明的稀土矿物主要为独居石和磷钇矿。区内变质凝灰岩类产出厚度较大, 稀土含量较高, 风化壳发育, 是良好的离子吸附型稀土矿的成矿母岩类型。千枚岩类和片岩类的平均稀土含量(Σ REEs > 224 $\mu\text{g/g}$) 次之, 但由于岩石风化难度较大, 形成稀土风化壳型矿体可能性偏低。本研究是对变质岩离子吸附型稀土矿成矿的初步探讨, 旨在为今后进一步的研究和找矿工作提供基础资料和依据。

关键词: 浅变质岩; 稀土元素; 风化壳; 离子吸附型稀土矿; X 射线荧光光谱法; 电感耦合等离子体质谱法

中图分类号: O614.33; O657.31; O657.63 **文献标识码:** A

离子吸附型稀土(iREE)矿床以稀土元素主要呈离子态赋存于风化壳黏土中为特征, 其稀土配分类型囊括了轻稀土、中重稀土和重稀土配分^[1], 几乎是世界上重稀土的唯一来源^[2], 是国际上备受关注的关键金属矿产^[3]。离子吸附型稀土矿床于 1969 年首次发现于我国江西龙南, 而后在我国华南地区相继被发现并确定了一批离子吸附型稀土矿, 近十几年, 在美国、老挝等地也不断发现离子吸附型稀土的存在^[2,4-6]。在研究的近半个世纪中, 国内外科技工作者在稀土元素富集规律、矿床分布、成矿机制以及找矿理论方面均积累了丰富的成果资料^[1,7-15]。国外离子吸附型稀土矿床的成矿母岩均为花岗岩, 我国离子吸附型稀土矿床的成矿母岩则类型多样, 有花岗岩、火山岩和混合岩^[16-19]。近几年, 在江西省宁都地区的浅变质岩风化壳中也发现了离子吸附型稀土矿床, 这类成矿母岩的发现丰富了成矿母岩的类型, 拓宽了找矿方向。目前对花岗岩和火山岩类成矿母岩及其风化壳的研究程度均较高, 而关于变质岩离子吸附型稀土矿的研究资料较少, 亟待丰富。

赣南变质岩分布广泛, 岩石类型多样: 中晚元古代变粒岩、片麻岩类主要分布于赣南南部; 寒武纪—新元古代变质砂岩、变质凝灰岩、板岩类、千枚岩类

收稿日期: 2017-10-16; 修回日期: 2017-12-14; 接受日期: 2018-01-02

基金项目: 中央级公益性科研院所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”(YYWF201527), “赣南变质岩离子吸附型稀土矿成矿机理研究”(K1506); 中国地质调查局地质调查项目“华南重点矿集区稀有稀散和稀土矿产调查”(DD20160056)

作者简介: 王臻, 硕士研究生, 研究方向为成因矿物学与找矿矿物学。E-mail: lopupve@qq.com。

通信作者: 陈振宇, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事矿物学和微束分析研究。E-mail: czy7803@126.com。

和片岩类等浅变质岩遍布全区;奥陶—泥盆系板岩类仅分布于赣南西部。在这些不同类型浅变质岩中,变质砂岩类和变质凝灰岩类的地层厚度普遍较大。不同类型浅变质岩的岩石特征、原岩类型、稀土含量、稀土配分特征以及风化强度都存在差异,它们能够在一定程度上反映出不同类型浅变质岩的成矿潜力区别,帮助判断哪类岩石风化壳更有利于稀土成矿。但是,这些具体特征及其所反映的成矿潜力目前不清楚。本文对赣南浅变质岩进行岩石学和地球化学特征分析,针对上述问题进行探究。

1 区域地质概况

赣南地处华南板块、南岭东西复杂构造带的东段^[1]。区内发育一套元古代中深变质岩结晶基底,之上沉积一套盖层。基底变质岩的出露较为局限,隘

高一鹤仔一定南一带出露桃溪岩组(Qb_2tx)变粒岩和片岩,中村—羊角一带出露园紫片岩($Ysch$)、新屋家变粒岩($Xgnt$)和破塘片麻岩(Pgn),版石—安远—孔田—寻乌一带则主要分布寻乌岩组(Qb_3x)变粒岩和片岩。这些中深变质岩通常被划归中晚元古代^[20],也有研究表明其原岩的形成年龄可能为新元古代^[21-22]。浅变质岩在区内广泛发育,其中新元古代和寒武纪浅变质岩的分布面积最大,由老到新依次包括:神山组(Qb_3s)、库里组(Qb_3k)、上施组(Nh_1s)、沙坝黄组($Nh_{2-3}s$)、洪山组(Nh/Zh)、坝里组(Z_1b)、下坊组(Z_1x)和老虎塘组(Z_2l),划归新元古代;牛角河组($\epsilon_{1-2}n$)、高滩组(ϵ_3g)和水石组(ϵ_3sh)则划归寒武系,它们除了在赣南东北部分布集中,其余地区多被中生代花岗岩穿插分割或被中生代以来的沉积岩覆盖,呈“零星”分布(图1)。奥陶—侏罗纪浅变质岩

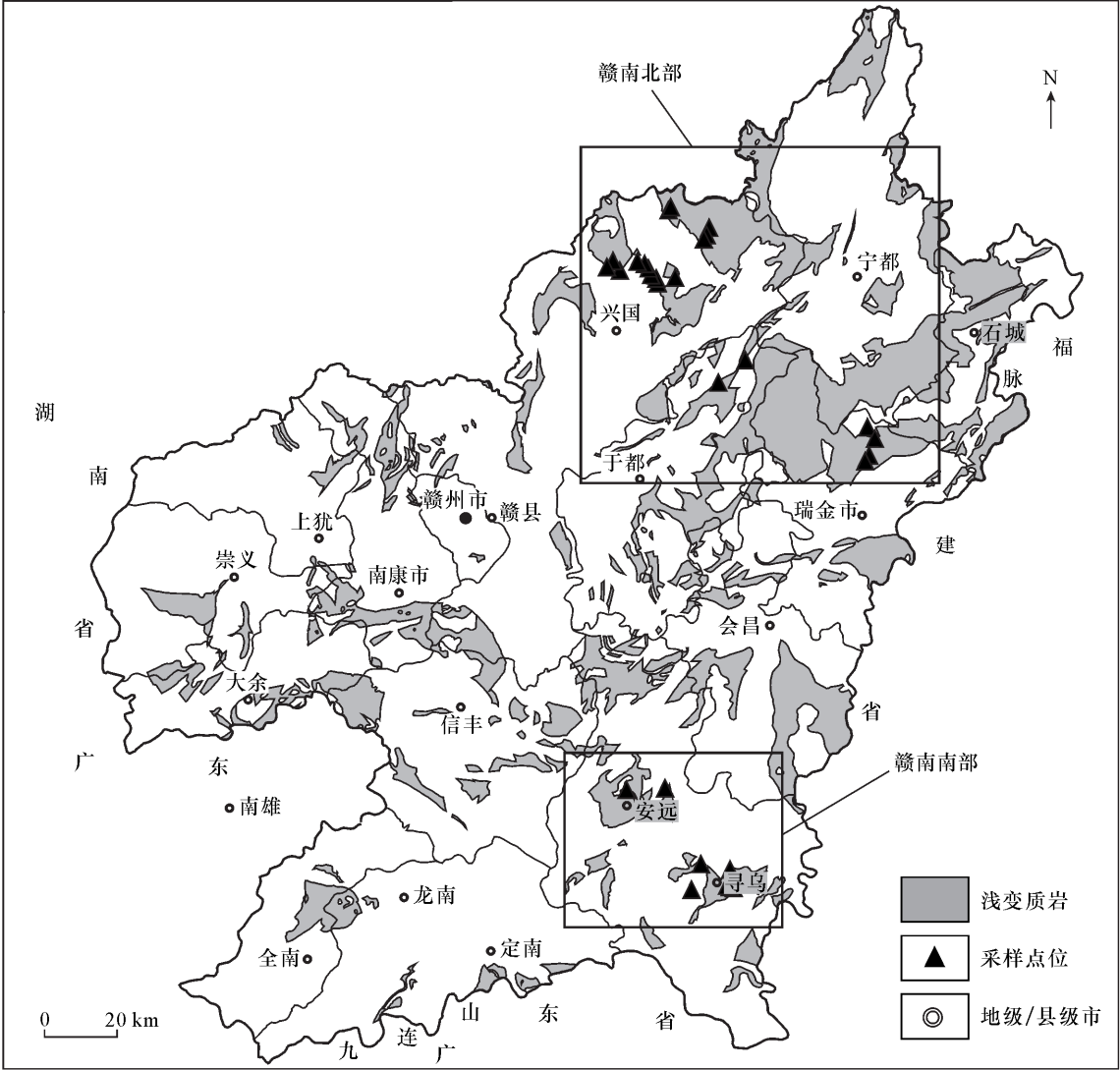


图1 赣南变质岩分布图及采样位置

Fig. 1 Distribution of epimetamorphic rocks in South Jiangxi Province and the sampling locations

则仅在赣南西部有少量出露,自上至下依次包括:爵山沟组(O_{1j})、七溪岭组(O_{1q})、茅坪组(O_{1m})、陇溪组(O_2l)、韩江组(O_2h)、对耳石组(O_{2-3d})、石口组(O_3s)、蒲龙组(O_3p)、丫山组(S_y)、云山组(D_2y)、陡水组(D_2d)、罗段组(D_2l)、樟崇组(D_3z)、三门滩组(D_3sn^2)、水头迳群第一岩组($J_{1-2sh}I^2$)。

为增加对赣南地区浅变质岩地层情况的直观了解,本文对大量江西 1:50000 地质调查资料加以总结,将赣南浅变质岩不同地层的具体岩石类型及相互接触关系列表,详见表 1。区域上浅变质岩的风化壳广泛发育,厚度不均一。目前已在江西宁都某地变质岩风化壳中发现稀土矿体,该矿体主要赋存于变质砂岩和变质沉凝灰岩风化壳中。

2 岩石类型

本文所研究的样品主要采自赣南地区的北部

(兴国—于都—瑞金)和南部(安远—寻乌)地区(图 1)。岩石类型主要有:变质凝灰岩类、变砂岩类、板岩类、千枚岩类和片岩类。

变质凝灰岩类:采集层位有 Qb 、 $\epsilon_{1-2}n$ 、 Z_1b 。呈土黄色致密块状,变余凝灰结构。晶屑和岩屑含量 $>25\%$,泥质基质。晶屑矿物主要由裂纹状、棱角状、凹面棱角状的石英组成,偶见斜长石(图 2a,b)。岩屑较晶屑量稍少,常呈椭圆状,内部具有霏细结构。金属矿物较少,含量 $<3\%$ 。

变砂岩类:岩石类型有变质长石石英细砂岩、变余二长细砂岩、变质岩屑细砂岩、片理化变质石英粉砂岩、变质绢云石英粉砂岩等,样品粒级以粉砂和细砂为主(粒径 $0.05 \sim 0.2\text{ mm}$),变质细砂岩的采集层位有 Nh_1s 、 $Nh_{2-3}s$ 、 Z_1b 、 Z_1d 、 Z_2l ,变质粉砂岩的采集层位为 Nh_1s 、 Qb_3x 、 Z_1x^2 、 Z_1sh^2 。变余砂状结构,部分具变余水平层理(图 2c,d)。以基质支撑为主,

表 1 赣南浅变质岩地层及其岩石类型

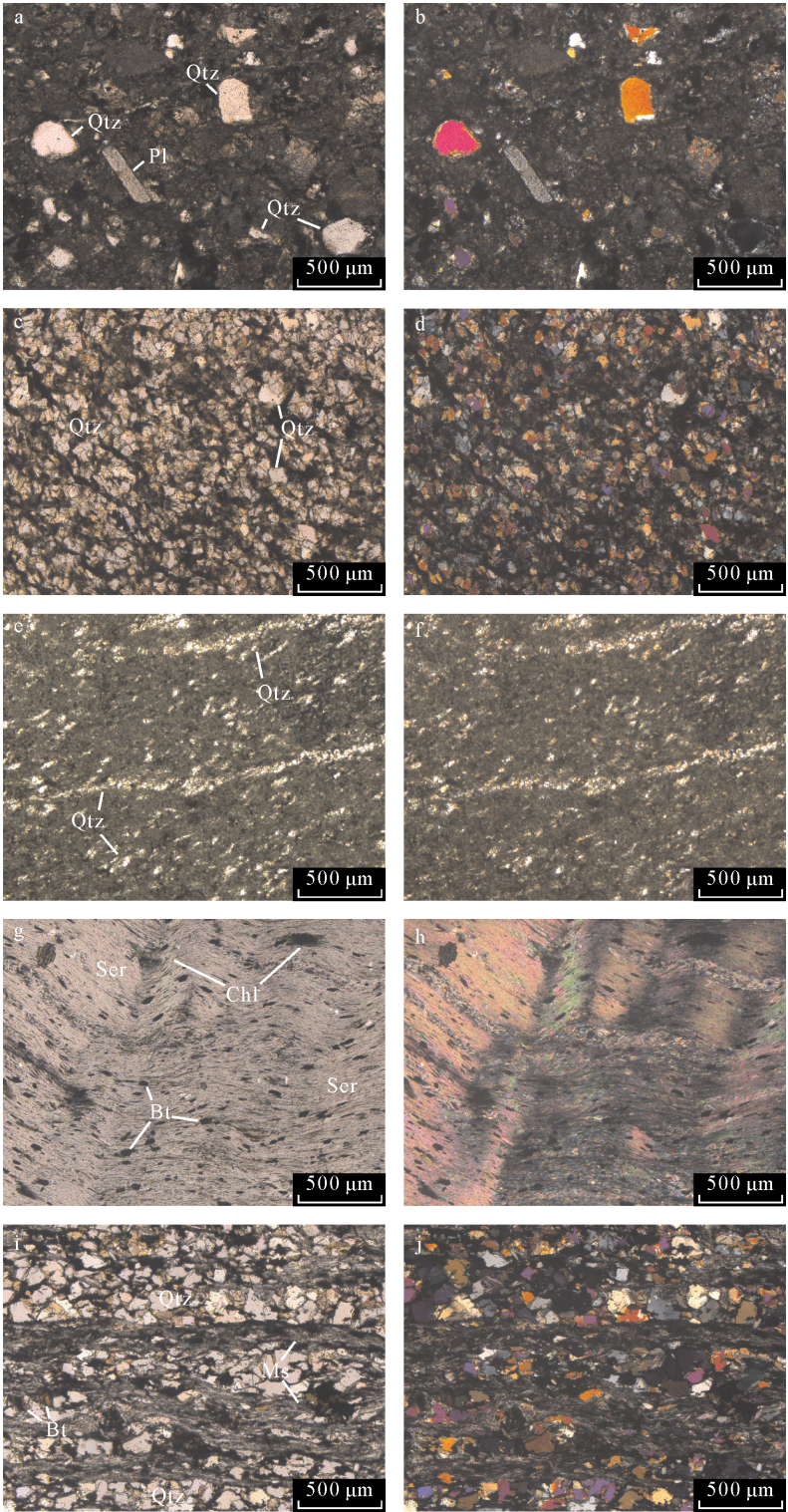
Table 1 Epimetamorphic rock strata and corresponding rock types in South Jiangxi Province

界	系	组	代号	主要岩石类型
中生界	侏罗系	水头迳群第一岩组	$J_{1-2sh}I^2$	千枚状板岩
		三门滩组	D_3sn^2	石英粉砂岩夹粉砂质板岩
古生界	泥盆系	樟崇组	D_3z	细粒石英杂砂岩、粉砂岩、粉砂质板岩、绢云母板岩
		罗段组	D_2l	岩屑石英杂砂岩夹砂质绢云母板岩、页岩
		陡水组	D_2d	石英砂岩夹千枚状绢云母板岩、粉砂质二云母板岩
		云山组	D_2y	石英杂砂岩、粉砂质板岩、含砾石英砂岩
		丫山组	S_y	复成分砾岩、含砾砂岩、砂岩、板岩
	奥陶系	蒲龙组	O_3p	长石石英砂岩、岩屑石英杂砂岩、泥质板岩
		石口组	O_3s	长石石英砂岩、岩屑石英杂砂岩夹板岩
		对耳石组	O_{2-3d}	硅质板岩夹含炭质板岩
		韩江组	O_2h	炭质硅质板岩夹含炭质板岩,具有泥铁质结核
		陇溪组	O_2l	薄层含炭硅质板岩夹含炭板岩
		茅坪组	O_{1m}	薄层板岩、粉砂质板岩、含炭绢云板岩
		七溪岭组	O_{1q}	含炭质、硅质板岩夹绢云母板岩、炭质板岩
		爵山沟组	O_{1j}	绢云母板岩、粉砂质板岩夹含碳粉砂质板岩
	寒武系	水石组	ϵ_3sh	变余细粒长石石英砂岩、绢云母板岩、条带状板岩
		高滩组	ϵ_3g	巨厚变余长石石英砂岩,夹板岩、粉砂岩的韵律层
		牛角河组	$\epsilon_{1-2}n$	高炭质板岩、硅质板岩、粉砂质板岩及变质砂岩组成的砂板岩互层、变余凝灰质砂岩
新元古界	震旦系	老虎塘组	Z_2l	硅质岩、变余砂岩、凝灰质板岩、含碳绢云千枚岩、二云母千枚岩、含凝灰质石英杂砂岩
		下坊组	Z_1x	变余中细粒岩屑杂砂岩、黑云母石英片岩、绢云板岩、二云片岩、二云千枚岩
		坝里组	Z_1b	变余长石石英砂岩、凝灰质砂岩、粉砂岩、沉凝灰岩或砂质板岩、千枚岩等组成的韵律层
	南华系	洪山组	Nh/Zh	二云片岩、二云变粒岩等
		沙坝黄组	$Nh_{2-3}s/Z_1sh$	变余砂岩、砂砾岩、含砾砂岩,夹细砂岩、粉砂岩、板岩
		上施组	Nh_1s	变余细粒凝灰质砂岩、凝灰质粉砂岩、沉凝灰岩、凝灰质板岩组成的互层,偶夹炭质板岩
	青白口系	库里组	Qb_3k	青灰色变余杂砂岩、变沉凝灰岩、片岩
		神山组	Qb_3s	绢云千枚岩、黑色炭质或含碳千枚岩、粉砂质千枚岩或板岩、千枚状变沉凝灰岩
		寻乌岩组	Qb_3x	二云母片岩、石英二云片岩、黑云母变粒岩、含石榴石石英二云片岩、绿帘黑云变粒岩、黑云斜长片麻岩

~~~~~ 角度不整合接触      ——— 断层接触      ——— 整合/假整合接触

注:据江西省地质矿产开发局《1:50000 区调联测报告及地质图》(2001)。





a、b—变质凝灰岩(左:单偏光,右:正交偏光),可见棱角状石英岩屑;c、d—变质粉砂岩(左:单偏光,右:正交偏光);e、f—粉砂质板岩(左:单偏光,右:正交偏光),有少量新生矿物石英;g、h—绿泥石化绢英千枚岩(左:单偏光,右:正交偏光),绢云母呈半定向—定向排列形成千枚状构造;i、j—石英云母片岩(左:单偏光,右:正交偏光)。

图 2 典型变质岩样品镜下照片

Fig. 2 Photomicrographs of the representative metamorphic rock samples (left: under plane-polarized light; right: under crossed-polarized light)



有些重结晶程度较强的为颗粒支撑结构。常见矿物有石英、长石、黑云母、白云母、绿泥石、绢云母等。金属矿物含量在 2% ~ 10% 范围内变化,多为磁铁矿。部分样品中含有石英晶屑,呈不规则棱角状,残余结构较为清晰,其他样品中则多为石英变斑晶,变斑晶内常有包裹体。岩屑变砂岩中岩屑约占 10%,呈椭圆状均匀分布。部分样品中石英颗粒有压扁、拉长的现象,新生矿物(石英、白云母等)呈半定向排列,发生片理化,向千枚状构造过渡。

板岩类:主要为炭质板岩、粉砂质板岩及粉砂质泥质板岩,采集层位为  $Qb_3k^1$ 、 $Qb_{311}s$ 、 $Z_2l$ 。多呈灰黑色,具板状构造,变余泥状-粉砂泥状结构(图 2e, f)。新生矿物主要为石英,通常含量 > 10%。

千枚岩类:岩石类型有绢云千枚岩、绢云石英千枚岩、白云绢云千枚岩、绿泥绢英千枚岩,采集层位为  $Qbsh^1$ 、 $Qbsh^2$ 、 $Nh_{2-3}s$ 、 $Qbshn^2$ 、 $\epsilon_{1-2}n$ 。手标本丝绢光泽明显,镜下具有显微粒状片状变晶结构,主要由粒状石英和鳞片状绢云母组成,亦见有白云母、绿泥石等。金属矿物含量一般 < 3%,以钛铁矿为主。粒状石英发生重结晶,常呈条带状与绢云母互层,形成定向排列、具有微褶皱和扭折带的千枚状构造(图 2g, h)。

片岩类:有石英绢云片岩、黑云母石英片岩、二云石英片岩,采集层位为  $Qb_3k^2$ 、 $Qb_{3x}$ 、 $Z_1sh^3$ 、 $Z_1sh^1$ 、 $Z_1g$ 。主要矿物有石英、白云母和黑云母,亦见暗色矿物,片状、柱状矿物总量 > 30%。白云母常发生绢云母化,呈流动状定向排列(图 2i, j)。

镜下鉴定所用薄片为加厚探针片,所有显示的矿物干涉色均偏高。

### 3 实验部分

#### 3.1 样品采集

本文针对赣南北部兴国-于都-瑞金和南部安远-寻乌一带变质岩分布集中的地区进行采样,沿天然露头 and 修筑房屋或公路挖掘的人工剖面,共采集岩石样品 30 件。30 件样品共属五种岩石类型,分别是变砂岩类(变细砂岩 9 件,变粉砂岩 4 件)、板岩类(3 件)、千枚岩类(5 件)、片岩类(6 件)和变质凝灰岩类(3 件),原岩恢复结果显示它们的原岩可大致分为火山岩(3 件)和砂岩(27 件)两类。

#### 3.2 分析测试

对 30 件岩石样品进行了主次量、微量及稀土元素分析。测试工作由国家地质实验测试中心完成。主要分析步骤为:样品碎成 200 目以下的粉末。其

中主量元素( $N_2O$ 、 $MgO$ 、 $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$ 、 $P_2O_5$ 、 $K_2O$ 、 $CaO$ 、 $TiO_2$ 、 $MnO$ 、 $Fe_2O_3$ 、 $FeO$ 、 $H_2O^+$ 、 $CO_2$ 、LOI)采用波长色散 X 射线荧光光谱仪(3080E 型,日本理学公司)分析测试:称取 4.00 g 经 105℃ 烘干的样品,用低压聚乙烯镶边(也可采用铝杯或塑料环),并在 20 吨压力下压制成样品直径为 32 mm 的圆片,XRF 待测。测量时用国家级标准物质制作校准曲线。主次量元素用经验系数法校正基体效应,部分微量元素采用靶线的康普顿散射线或散射背景做内标校正基体效应,采用回归法计算基体校正系数和谱线重叠校正系数。本方法精密度 < 10%。

稀土元素和除 Sr、Ba 之外的微量元素采用电感耦合等离子体质谱仪(Exell 型)测定。主要分析步骤为:称取样品 50.0 mg 于封闭溶样器的聚四氟乙烯内罐中,加入 1 mL 氢氟酸和 0.5 mL 硝酸,盖上聚四氟乙烯上盖,装入钢套中,拧紧钢套盖。将溶样器放入烘箱中,于 190℃ 保温 24 h。取出,冷却后开盖,取出聚四氟乙烯内罐,在电热板上于 200℃ 蒸发至干。加入 0.5 mL 硝酸蒸发至干,此步骤再重复一次。加入 5 mL 硝酸,再次封闭于钢套中,于 130℃ 保温 3 h,取出,冷却后开盖,移至洁净塑料瓶中,用水定容至 50 mL,ICP-MS 待测。

采用以上两种方法测量主量、微量元素的精度为 2% ~ 5%,痕量元素的精度为 5% ~ 10%。

### 4 浅变质岩岩石化学及原岩恢复

浅变质岩在整体上具有富硅(均值 70.4%)、富铝(均值 12.6%)、低碱(< 4.3%)、低铁镁(< 4.3%)、低  $MnO$  (< 0.22%) 和低  $P_2O_5$  (< 0.12%) 的特征。稀土配分曲线均呈左高右低的轻稀土富集型,具有中等程度的  $\delta Eu$  亏损和不同程度的  $\delta Ce$  异常。

#### 4.1 地球化学特征

变质凝灰岩: $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、 $K_2O$ 、 $Na_2O$ 、 $CaO$ 、 $TFeO$ 、 $MgO$ 、 $TiO_2$ 、 $MnO$  和  $P_2O_5$  含量均值分别为 68.3%、15.4%、4.18%、3.41%、0.42%、3.64%、1.30%、0.49%、0.08% 和 0.09%;稀土元素总量在 206 ~ 299  $\mu g/g$ ,均值 246  $\mu g/g$ ;LREEs/HREEs 值在 3.50 ~ 5.26,均值 4.20,属轻稀土富集型;( $La/Yb$ )<sub>N</sub> 值介于 8.14 ~ 11.4,均值 9.45;稀土配分曲线呈右倾式(图 3), $\delta Eu$  值平均为 0.48,表现为负异常, $\delta Ce$  值平均为 1.08,异常不明显。

变砂岩: $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、 $K_2O$ 、 $Na_2O$ 、 $CaO$ 、 $TFeO$ 、 $MgO$ 、 $TiO_2$ 、 $MnO$  和  $P_2O_5$  含量均值分别为 73.7%、

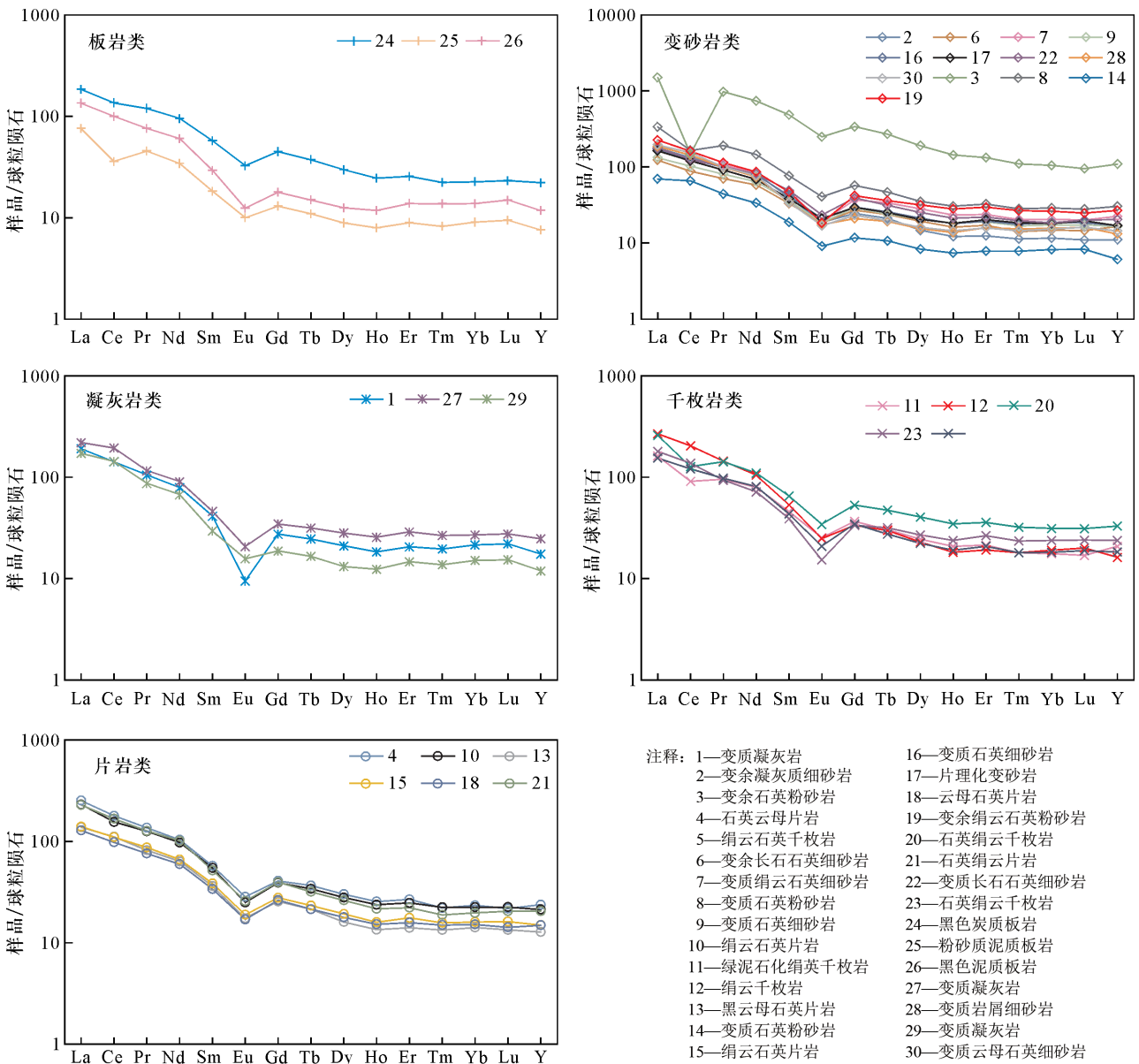


图 3 赣南地区不同类型变质岩的球粒陨石标准化稀土元素配分图

Fig. 3 Chondrite-normalized REEs patterns of different types of metamorphic rocks in South Jiangxi Province

11.7%、2.76%、1.97%、0.49%、3.89%、1.50%、0.62%、0.08%和0.10%；稀土总量（ $\Sigma$  REEs）在98.1~1320  $\mu\text{g/g}$ ，均值302  $\mu\text{g/g}$ ，在所有岩石类型中其 $\Sigma$  REEs值最高。其中，变质细砂岩的平均稀土含量为207  $\mu\text{g/g}$ ，变质粉砂岩中一件样品的稀土含量高达1320  $\mu\text{g/g}$ ，其余样品的稀土含量平均为249  $\mu\text{g/g}$ ；LREEs/HREEs值在2.75~5.52，均值3.54，属轻稀土富集型； $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值介于7.66~15.3，均值10.2，稀土配分曲线呈右倾式（图3）； $\delta\text{Eu}$ 值平均为0.57，呈负异常， $\delta\text{Ce}$ 值平均为0.77，呈负异常，而其中稀土含量最高样品的Ce具有最为明显的负

异常。

板岩： $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{TFeO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{MnO}$ 和 $\text{P}_2\text{O}_5$ 含量均值分别为69.8%、13.2%、3.72%、1.84%、0.22%、5.43%、1.46%、0.79%、0.08%和0.10%；稀土总量在84.9~257  $\mu\text{g/g}$ ，均值169  $\mu\text{g/g}$ ，稀土含量较低；LREEs/HREEs值在3.01~4.18，均值3.41，属轻稀土富集型； $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值介于8.14~9.74，均值8.75，稀土配分曲线呈右倾式，但相较其他岩石类型而言，板岩的稀土配分曲线的斜率低、最为平缓（图3）； $\delta\text{Eu}$ 值平均为0.60，呈负异常， $\delta\text{Ce}$ 值平均为0.81，呈负异常。

千枚岩:  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{TFeO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{MnO}$  和  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量均值分别为 66.6%、14.5%、3.51%、0.88%、0.94%、5.56%、1.58%、0.73%、0.07% 和 0.10%; 稀土总量在 205 ~ 308  $\mu\text{g/g}$ , 均值 255  $\mu\text{g/g}$ , 稀土含量较高;  $\text{LREEs/HREEs}$  值在 2.42 ~ 5.46, 均值 3.31, 属轻稀土富集型;  $(\text{La/Yb})_N$  值介于 7.56 ~ 14.1, 均值 9.52, 配分曲线呈右倾式(图3);  $\delta\text{Eu}$  值平均为 0.54, 呈负异常,  $\delta\text{Ce}$  值平均为 0.86, 呈负异常。

片岩:  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{TFeO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{MnO}$  和  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量均值分别为 67.9%、13.6%、3.04%、1.02%、1.23%、5.51%、2.06%、0.71%、0.08% 和 0.13%; 稀土元素总量在 172 ~ 306  $\mu\text{g/g}$ , 均值 234  $\mu\text{g/g}$ ;  $\text{LREEs/HREEs}$  值在 3.22 ~ 3.98, 均值 3.64, 属轻稀土富集型;  $(\text{La/Yb})_N$  值介于 8.46 ~ 11.6, 均值 9.93, 稀土配分模式为右倾式;  $\delta\text{Eu}$  值平均为 0.56 呈负异常,  $\delta\text{Ce}$  值平均为 0.95, 异常不明显(图3)。

#### 4.2 原岩恢复

变质岩原岩恢复的方法有很多种。变质程度较深、原岩结构和残余成分较少的变质岩, 其能够反映原始岩石成因特点的信息模糊甚至消失, 此时岩石化学方法较为适用, 即利用岩石化学成分数据、经验公式或图解来对原岩类型进行判别<sup>[23]</sup>, 如尼格里四面体图解、西蒙南图解以及 Shaw 的判别式计算。这类方法能够区分出正、副变质岩的基本原岩类型, 但对岩石化学资料的有效性要求高, 且不能准确判定落在界限附近的分析样品<sup>[24]</sup>。在变质程度较浅、原岩结构构造和残余成分易于辨认时, 利用野外资料和镜下观察, 便可以恢复原岩的基本类型。本文采集的样品均为中浅变质程度的变质岩, 受变质和变形作用影响较小, 大部分岩石的原岩结构和构造得以保存, 原生矿物成分残余较多, 易于恢复原岩; 而对板岩类、千枚岩类和片岩类样品同时配合了 DF 值计算<sup>[25]</sup>。不同类型变质岩鉴别特征及其原岩恢复结果见表2。

变质砂岩的变余砂状构造清楚, 部分发育变余水平层理, 其原岩为砂岩类; 变质凝灰岩变余构造显著, 易于确定其原岩为火山岩类; 板岩、千枚岩、片岩均以长英质为主, 后两者常见粒间杂基并缺乏岩浆矿物, 均有重结晶石英聚集呈条带状与绢云母互层现象, 结合野外地质特征, 认为原岩可能为砂岩类, 同时利用 Shaw 的判别式计算得到的 DF 均为负值, 也说明该变质岩为副变质岩。

## 5 浅变质岩成矿潜力分析

### 5.1 不同岩石类型的稀土含量

按照不同岩性对赣南变质岩进行归类研究可看出, 它们的稀土配分模式之间有相似性, 同时稀土含量及特征之间也存在差异。浅变质岩样品均属轻稀土富集型, 稀土配分模式均呈现右倾、重稀土元素配分曲线较为平坦、具不同程度  $\delta\text{Eu}$  亏损特征, 同时  $\delta\text{Ce}$  的异常极其微弱, 负、正异常都有, 以负异常为主。原岩的稀土配分与风化壳中的稀土配分存在联系, 通常风化壳的稀土配分模式继承自原岩。这些具有轻稀土富集型稀土配分的浅变质岩, 其所形成的风化壳的稀土配分模式很可能也属轻稀土富集型。

然而, 不同类型变质岩的稀土含量具有显著差异(图4)。稀土总量  $\Sigma\text{REEs}$  平均值由高到低依次为变质砂岩类(302  $\mu\text{g/g}$ )、千枚岩类(255  $\mu\text{g/g}$ )、凝灰岩类(246  $\mu\text{g/g}$ )、片岩类(234  $\mu\text{g/g}$ )和板岩类(169  $\mu\text{g/g}$ ), 其中除板岩类样品的稀土含量偏低外, 其余岩石类型的稀土含量都较高(均值 > 234  $\mu\text{g/g}$ )。除岩石类型外, 岩石稀土含量还显示出与粒径的相关关系, 变质粉砂岩样品的平均稀土含量(516  $\mu\text{g/g}$ )较变质细砂岩(207  $\mu\text{g/g}$ )更高。值得注意的是, 变质粉砂岩中有一件稀土含量高达 1319  $\mu\text{g/g}$  的样品出现, 指示着采样地点及其附近可能具有高稀土背景值。不同原岩类型变质岩的稀土含量也不同, 原岩为砂岩的浅变质岩平均  $\Sigma\text{REEs}$  (302  $\mu\text{g/g}$ ) 高于原岩为火山岩(246  $\mu\text{g/g}$ ), 与南岭地区花岗岩平均稀土含量 227  $\mu\text{g/g}$  相比<sup>[26]</sup>, 这两类原岩的浅变质岩在区域上均属高稀土丰度基岩。

### 5.2 离子吸附型稀土成矿可能性

#### 5.2.1 外部条件

离子吸附型稀土矿床的成矿受到多种因素的影响, 其矿化的形成不仅需要适宜的气候和地貌条件, 还与原岩稀土元素含量、矿物组合及其风化程度密切相关<sup>[1,17,19,27]</sup>。赣南地处亚热带季风性湿润气候区, 化学风化作用强, 剥蚀强度低, 使得厚大的风化壳得以留存<sup>[11]</sup>。区域上风化壳介质物理化学条件基本相似, 除东部小面积(NE 向绍兴—鹰潭断裂及崇安—河源断裂以东)为中山中等切割区地貌外, 其余大面积区域为低山浅切割区地貌和丘陵地貌<sup>[1]</sup>, 具有相似的气候条件, 有利于离子吸附型稀土矿床的发育。



表 2 浅变质岩主要鉴别特征及其原岩恢复

Table 2 Protoliths reconstruction and main distinction characters of the epimetamorphic rocks

| 岩石类型       | 采集层位                                                                                                                     | 主要矿物及含量                                                                      | 风化程度                                       | 鉴别特征                                                      | 原岩恢复           |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------|
| 变质细砂岩      | Nh <sub>1</sub> s、Nh <sub>2-3</sub> s、<br>Z <sub>1</sub> b、Z <sub>1</sub> d、Z <sub>2</sub> l                             | 石英 30% ~ 70%<br>长石类 5% ~ 30%<br>黑云母 3% ~ 10%<br>白云母 3% ~ 12%                 | 长石黏土化<br>CIA = 0. 16 ~ 0. 82<br>(均值 0. 68) | 变余砂状结构;<br>变余水平层理                                         | 砂岩             |
| 变质粉砂岩      | Nh <sub>1</sub> s、Qb <sub>3</sub> x、Z <sub>1</sub> x <sup>2</sup> 、Z <sub>1</sub> sh <sup>2</sup>                        | 石英 30% ~ 60%<br>长石类 5% ~ 30%<br>黑云母 3% ~ 7%<br>白云母 3% ~ 10%                  | 长石黏土化<br>CIA = 0. 71 ~ 0. 80<br>(均值 0. 75) | 变余砂状结构;<br>变余水平层理                                         | 砂岩             |
| 板岩类        | Qbk <sup>1</sup> 、Qb <sub>3</sub> <sup>1b</sup> s、Z <sub>2</sub> l                                                       | 石英 + 长石类 70% ~ 90%                                                           | 长石黏土化<br>CIA = 0. 65 ~ 0. 76<br>(均值 0. 71) | 板状构造,变余泥状 - 粉砂<br>泥状结构;DF = - 11. 3                       | 粉砂 - 泥质<br>粉砂岩 |
| 千枚岩类       | Qbsh <sup>1</sup> 、Qbsh <sup>2</sup> 、Nh <sub>2-3</sub> s、<br>Qb <sub>3</sub> shn <sup>2</sup> 、Є <sub>1-2</sub> n       | 绢云母 10% ~ 60%<br>石英 5% ~ 40%<br>白云母 5% ~ 20%<br>黑云母 5% ~ 15%<br>绿泥石 0% ~ 10% | 长石黏土化<br>CIA = 0. 62 ~ 0. 80<br>(均值 0. 73) | 千枚状构造;发生重结晶的<br>粒状石英条带与鳞片状<br>绢云母互层,定向排列;<br>DF = - 11. 2 | 砂岩             |
| 片岩类        | Qbk <sup>2</sup> 、Qb <sub>3</sub> x、Z <sub>1</sub> sh <sup>3</sup> 、<br>Z <sub>1</sub> sh <sup>1</sup> 、Z <sub>1</sub> g | 石英 10% ~ 50%<br>绢云母 10% ~ 30%<br>白云母 5% ~ 20%<br>黑云母 5% ~ 10%                | 长石黏土化<br>CIA = 0. 66 ~ 0. 84<br>(均值 0. 74) | 片状构造;发生重结晶的<br>粒状石英定向排列;<br>DF = - 12. 4                  | 砂岩             |
| 变质凝灰<br>岩类 | Qb、Є <sub>1-2</sub> n、Z <sub>1</sub> b                                                                                   | 石英 10% ~ 30%                                                                 | 长石黏土化<br>CIA = 0. 66 ~ 0. 77(均值 0. 70)     | 不规则状石英晶屑;<br>岩屑具有霏细结构                                     | 火山岩            |

注: CIA 值为化学蚀变指数,用于判断岩石风化程度。

5.2.2 内部条件

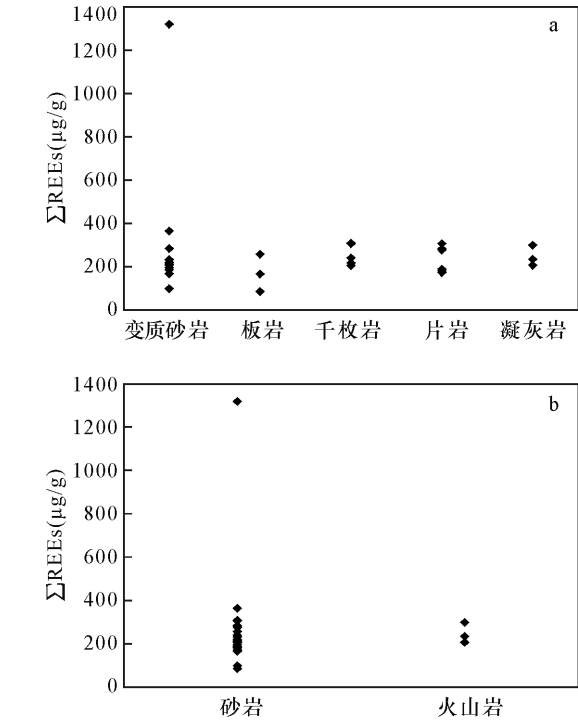
离子吸附型稀土矿床中的稀土元素继承自母岩,母岩中稀土载体矿物的含量和配分类型决定了成矿母岩的稀土含量和配分类型<sup>[19]</sup>,在风化过程中,母岩中的稀土载体矿物在风化作用下发生分解,释放出稀土元素,部分 REE 最终通过淋滤作用在风化壳中富集<sup>[26-29]</sup>。通常,基岩稀土丰度愈高、稀土载体矿物风化程度愈高,对成矿愈有利。

赣南地区由于风化壳厚度普遍较大,取得新鲜的基岩样品较为困难。本文的采样工作均在人工或天然的剖面或露头进行,样品具有不同程度的风化(表 2)。对这批浅变质岩样品进行的电子探针分析结果显示,岩石中所含的稀土矿物主要为独居石和磷钇矿,暂未见其他稀土副矿物,而区域上同层位钻孔取得的新鲜基岩样品中发现了稀土氟碳酸盐矿物。独居石和磷钇矿均属耐风化的稀土磷酸盐类,对离子吸附型稀土矿的成矿贡献小,易风化的稀土硅酸盐和稀土氟碳酸盐类才是对离子吸附型稀土矿

的成矿起到重要作用的矿物类型。推测很可能是由于所采浅变质岩样品已经遭受了风化作用,导致易风化的稀土硅酸盐或稀土磷酸盐矿物发生分解,从而使易风化的稀土副矿物难以被找到。因此,对赣南地区变质岩母岩成矿潜力进行评价时,岩石稀土丰度和岩石风化难易程度是需要首要考虑的因素。

5.2.3 成矿潜力

在赣南地区五种不同类型的变质岩样品中,变砂岩类的稀土含量最高,其次为千枚岩类和变质凝灰岩类,它们的平均稀土含量达到了 246 μg/g 以上(图 4a)。白鸽等<sup>[1]</sup>研究表明,在矿物组合易风化的条件下,南岭地区基岩稀土丰度大于 150 μg/g 就可形成离子吸附型稀土矿化。按照母岩稀土含量来看,这三种岩石类型均属于高稀土丰度基岩,都具有成矿潜力。片岩类的稀土丰度相对偏低,但仍在 234 μg/g 以上,亦具备一定成矿可能性。在所有岩石类型中,变质凝灰岩类多为泥质基质支撑,胶结硬度和变质变形程度最低,最易风化,结合稀土含量



a—岩石类型与ΣREEs的关系;b—原岩类型与ΣREEs的关系。

图4 岩石类型与ΣREEs的关系

Fig.4 Correlationship between rock types and REEs contents

特征,认为其风化壳成矿的可能性最大。虽然变质砂岩类具有很高的平均稀土含量,达到 302 μg/g,但以石英砂岩居多,风化难度较大。千枚岩类和片岩类的稀土含量亦较高,但它们的岩石结构和矿物特征决定了其难以风化,加之地层厚度较小,此二类岩石风化壳的成矿潜力偏低。板岩类以泥质板岩居多,虽然易风化,但稀土含量较低,故成矿可能性小。目前已知的变质岩离子吸附型稀土矿床——葛藤嘴稀土矿的矿体主要赋存于变质凝灰岩和变质砂岩风化壳中。

赣南北部(兴国—于都—瑞金)和南部(安远—寻乌)两地区的变质岩类型和稀土元素特征有相似也有差别(表3)。北部地区以老虎塘组、沙坝黄组、下坊组、上施组、神山组为主,岩石类型有变质砂岩类、板岩类;南部地区则以牛角河组、老虎塘组、上施组、桃溪岩组和寻乌岩组为主,岩石类型有变质砂岩类、千枚岩类、片岩类。南部地区变质岩具有较高的平均稀土元素丰度(314 μg/g),显著高于北部地区(224 μg/g),可能指示着南部具有较大的成矿潜力。

5.3 浅变质岩时代对稀土成矿的影响

赣南地区浅变质岩从新元古代至奥陶纪均有分布,时代跨度大,岩石类型相近。离子吸附型稀土矿床以稀土元素赋存于风化壳中为特征,含矿风化壳均

表3 赣南不同地区变质岩分布情况及稀土含量特征

Table 3 Distribution of metamorphic rocks in different areas of South Jiangxi Province and corresponding REEs contents

| 赣南地区 | 岩石类型          | ΣREEs<br>(μg/g) | LREEs/<br>HREEs | δEu  | δCe  |
|------|---------------|-----------------|-----------------|------|------|
| 兴国   | 变质砂岩、板岩       | 219             | 3.52            | 0.56 | 0.92 |
| 赣南北部 | 于都 变质砂岩、变质凝灰岩 | 222             | 4.67            | 0.43 | 0.96 |
| 瑞金   | 变质砂岩、变质凝灰岩    | 230             | 4.28            | 0.60 | 0.83 |
| 赣南南部 | 安远 变质砂岩       | 274             | 3.17            | 0.59 | 0.79 |
| 寻乌   | 变质砂岩、千枚岩、片岩   | 446             | 2.93            | 0.57 | 0.70 |

自第四纪以来形成,风化壳的保留即气候、降雨量和剥蚀量等对离子吸附型稀土矿床至关重要<sup>[11]</sup>,而母岩的成岩年龄并非有关键作用。区域上不同时代的浅变质岩,其相同类型岩石之间的差异不明显,如:寒武系高滩组(Є<sub>3</sub>g)和水石组(Є<sub>3</sub>sh)均产出变余长石石英砂岩,南华系洪山组(Nh/Zh)和震旦系下坊组(Z<sub>1</sub>x)均产出二云片岩,这些不同时代、相同岩石类型的浅变质岩,其风化难易程度、岩石学和地球化学特征均具相似性,风化后稀土成矿的可能性亦相似。

6 结论

赣南浅变质岩分布广泛、时代跨度大且风化壳厚大,有利于离子吸附型稀土矿床的发育。研究表明,赣南北部、南部地区的新元古代—寒武纪浅变质岩主要类型有变砂岩类、板岩类、千枚岩类、片岩类和变质凝灰岩类,其原岩多为砂岩、粉砂岩等沉积岩类,仅变质凝灰岩的原岩为火山岩类。主要稀土矿物不同类型浅变质岩的稀土配分模式显示出相似性,均属轻稀土富集型,并具有不同程度的Eu、Ce亏损。通常,副变质岩比正变质岩的稀土含量要高,且变质砂岩类>千枚岩类>凝灰岩类>片岩类>板岩类。电子探针分析结果显示浅变质岩中的稀土矿物主要为独居石和磷钇矿,推测是由于岩石已遭受不同程度风化,使得易风化稀土矿物分解消失。综合以上特征认为,区内变质凝灰岩类产出厚度较大、岩石易风化、稀土含量高,是赣南地区浅变质岩中成矿潜力最大的岩石类型。

变质岩离子吸附型稀土矿床作为一种新类型离子吸附型稀土矿,研究尚为薄弱。本文从基础的岩石学和岩石化学角度,对赣南浅变质岩成矿潜力进行研究,为今后进一步研究以及找矿工作提供了基础资料和依据,具有重要的现实意义。

## 7 参考文献

- [1] 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. The Forming Condition and Distribution Law of Ionic Type Rare-Earth Ore Deposit in Nanling Region[R]. Beijing: Institute of Ore Deposit Geology, 1989.
- [2] Bern C R, Yesavage T, Foley N K. Ion-adsorption REEs in regolith of the Liberty Hill pluton, South Carolina, USA: An effect of hydrothermal alteration[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2017, 172: 29–40.
- [3] 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. A review of the achievements in the survey and study of ion-adsorption type REE in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38(3): 317–325.
- [4] Sanematsu K, Murakami H, Watanabe Y, et al. Enrichment of rare elements (REE) in granitic rocks and their weathered crusts in central and southern Laos [J]. Bulletin of the Geological Survey of Japan, 2009, 60(11/12): 527–558.
- [5] Foley N, Ayuso R. REE enrichment in granite-derived regolith deposits of the Southeastern United States: Prospective source rocks and accumulation processes [J]. British Columbia Geological Survey Paper, 2015, 3: 131–138.
- [6] Murakami H, Ishihara S. REE mineralization of weathered crust and clay sediment on granitic rocks in the Sanyo Belt, SW Japan and the Southern Jiangxi Province, China [J]. Resource Geology, 2008, 58(4): 373–401.
- [7] Ishihara S, Hua R, Hoshino M, et al. REE abundance and REE minerals in granitic rocks in the Nanling Range, Jiangxi Province, Southern China, and generation of the REE-rich weathered crust deposits [J]. Resource Geology, 2008, 58(4): 355–372.
- [8] Maulana A, Yonezu K, Watanabe K. Geochemistry of rare earth elements (REE) in the weathered crusts from the granitic rocks in Sulawesi Island, Indonesia [J]. Journal of Earth Science, 2014, 25(3): 460–472.
- [9] 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 Z S, Luo Z M. Geological characteristics of mineralization of rare earth deposits of the ion-adsorption type and their prospecting direction [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 1981: 102–118.
- [10] Bao Z W, Zhao Z H. Geochemistry of mineral with exchangeable REY in the weathering crusts of granitic rocks in South China [J]. Ore Geology Reviews, 2008, 33: 519–535.
- [11] Sanematsu K, Watanabe Y. Characteristics and Genesis of Ion Adsorption-type Rare Earth Element Deposits [C]//Verplanck P L, Hitzman M W. Reviews in Economic Geology Vol. 18. Society of Economic Geologists. 2016: 55–79.
- [12] 吴澄宇.风化壳稀土成矿作用——一种不平衡过程[J].矿床地质, 1989, 8(4): 85–90.  
Wu C Y. Rare earth mineralization in weathering crust—A nonequilibrium process [J]. Mineral Deposits, 1989, 8(4): 85–90.
- [13] 王登红,陈毓川,陈郑辉,等.南岭地区矿产资源形势分析和找矿方向研究[J].地质学报, 2007, 81(7): 882–890.  
Wang D H, Chen Y C, Chen Z H, et al. Assessment on mineral resource in Nanling region and suggestion for further prospecting [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(7): 882–890.
- [14] 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. Progress, problems and research orientation of ion-adsorption type rare earth resources [J]. Rock and Mineral Analysis, 2013, 32(5): 796–802.
- [15] 王登红,陈毓川,王瑞江,等.对南岭与找矿有关问题的探讨[J].矿床地质, 2013, 32(4): 854–863.  
Wang D H, Chen Y C, Wang R J. Discussion on some problems related to prospecting breakthrough in Nanling region [J]. Mineral Deposits, 2013, 32(4): 854–863.
- [16] 宋云华,沈丽璞.江西某酸性火山岩风化壳中粘土矿物及其形成条件的讨论[J].矿物学报, 1982(3): 207–212.  
Song Y H, Shen L P. Discussion of clay minerals and forming conditions in some acidic volcanic weathering crusts in Jiangxi Province [J]. Acta Mineralogica Sinica, 1982(3): 207–212.
- [17] 张祖海.华南风化壳离子吸附型稀土矿床[J].地质找矿论丛, 1990, 5(1): 57–71.  
Zhang Z H. A study on weathering crust ion adsorption type REE deposits, South China [J]. Contribution to Geology and Mineral Resource Research, 1990, 5(1): 57–71.
- [18] 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的对比[J].岩石学报, 2007, 23(10): 2321–2328.  
Hua R M, Zhang W L, Gu S Y, et al. Comparison between REE granite and W-Sn granite in the Nanling

- region, South China, and their mineralizations [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(10): 2321–2328.
- [19] 赵芝, 王登红, 陈振宇, 等. 南岭东段与稀土矿有关岩浆岩的成矿专属性特征[J]. *大地构造与成矿学*, 2014, 38(2): 255–263.
- Zhao Z, Wang D H, Chen Z Y, et al. Metallogenic specialization of rare earth mineralized igneous rocks in the Eastern Nanling Region [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2014, 38(2): 255–263.
- [20] 刘邦秀, 刘春根, 邱永泉. 江西南部鹤仔片麻状花岗岩类 Pb–Pb 同位素年龄及地质意义[J]. *火山地质与矿产*, 2001, 22(4): 264–268.
- Liu B X, Liu C G, Qiu Y Q. The Pb–Pb isotopic ages and geologic significance of gneissic granite in Hezi, Jiangxi [J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 2001, 22(4): 264–268.
- [21] 王丽娟, 于津海, O'Reilly S Y, 等. 华夏南部可能存在 Grenville 期造山作用: 来自基底变质岩中锆石 U–Pb 定年及 Lu–Hf 同位素信息[J]. *科学通报*, 2008, 53(14): 1680–1692.
- Wang L J, Yu J H, O'Reilly S Y, et al. Grenvillian orogeny in the Southern Cathaysia Block: Constraints from U–Pb ages and Lu–Hf isotopes in zircon from metamorphic basement [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(14): 1680–1692.
- [22] 于津海, 王丽娟, O'Reilly S Y, 等. 赣南存在古元古代基底: 来自上犹陡水煌斑岩中捕虏锆石的 U–Pb–Hf 同位素证据[J]. *科学通报*, 2009, 54(7): 898–905.
- Yu J H, Wang L J, O'Reilly S Y, et al. Paleoproterozoic basement beneath the Southern Jiangxi Province: Evidence from U–Pb ages and Lu–Hf isotopes in zircons from the Doushui lamprophyre [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(7): 898–905.
- [23] 靳松, 张利, 钟增球, 等. 浙闽地区华夏地块新元古代变沉积岩地球化学特征及其地质意义[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2008, 33(6): 764–774.
- Jin S, Zhang L, Zhong Z Q, et al. Geochemical characteristics and geological implications for the Neoproterozoic meta-sedimentary rocks of the Cathaysia block in Zhejiang and Fujian Province [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2008, 33(6): 764–774.
- [24] 王仁民, 贺高品, 陈珍珍, 等. 变质岩原岩图解判别法[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 1–51.
- Wang R M, He G P, Chen Z Z, et al. Graphic Method for Protolith Metamorphic Rocks [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 1–51.
- [25] Shaw D M. The origin of the Apsley gneiss, Ontario [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1972, 9: 18–35.
- [26] 赵芝, 王登红, 刘新星, 等. 广西花山岩体不同风化阶段稀土元素特征及其影响因素[J]. *稀土*, 2015, 36(3): 14–20.
- Zhao Z, Wang D H, Liu X X, et al. Geochemical features of rare earth elements in different weathering stage of the Guangxi Huashan granite and its influence factors [J]. *Chinese Rare Earths*, 2015, 36(3): 14–20.
- [27] 池汝安, 田君, 罗仙平, 等. 风化淋积型稀土矿的基础研究[J]. *有色金属科学与工程*, 2012, 3(4): 1–13.
- Chi R A, Tian J, Luo X P, et al. The basic research on the weathered crust elution-deposited rare earth ores [J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2012, 3(4): 1–13.
- [28] 宋云华, 沈丽璞, 王贤觉. 某些岩石风化壳中稀土元素的初步探讨[J]. *科学通报*, 1987, 32(9): 695–698.
- Song Y H, Shen L P, Wang X J. Preliminary discussion of rare earth elements in some weathering crusts [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1987, 32(9): 695–698.
- [29] 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. A geochemical study of the granitoid weathering crust in Southeast China [J]. *Geochimica*, 1992(2): 166–174.

## Petrogeochemical Characteristics and Metallogenetic Potential of Epimetamorphic Rocks in South Jiangxi Province

WANG Zhen<sup>1</sup>, ZHAO Zhi<sup>1</sup>, ZOU Xin-yong<sup>2</sup>, CHEN Zhen-yu<sup>1\*</sup>, TU Xue-jing<sup>3</sup>

(1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences; Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, Ministry of Land and Resources, Beijing 100037, China;

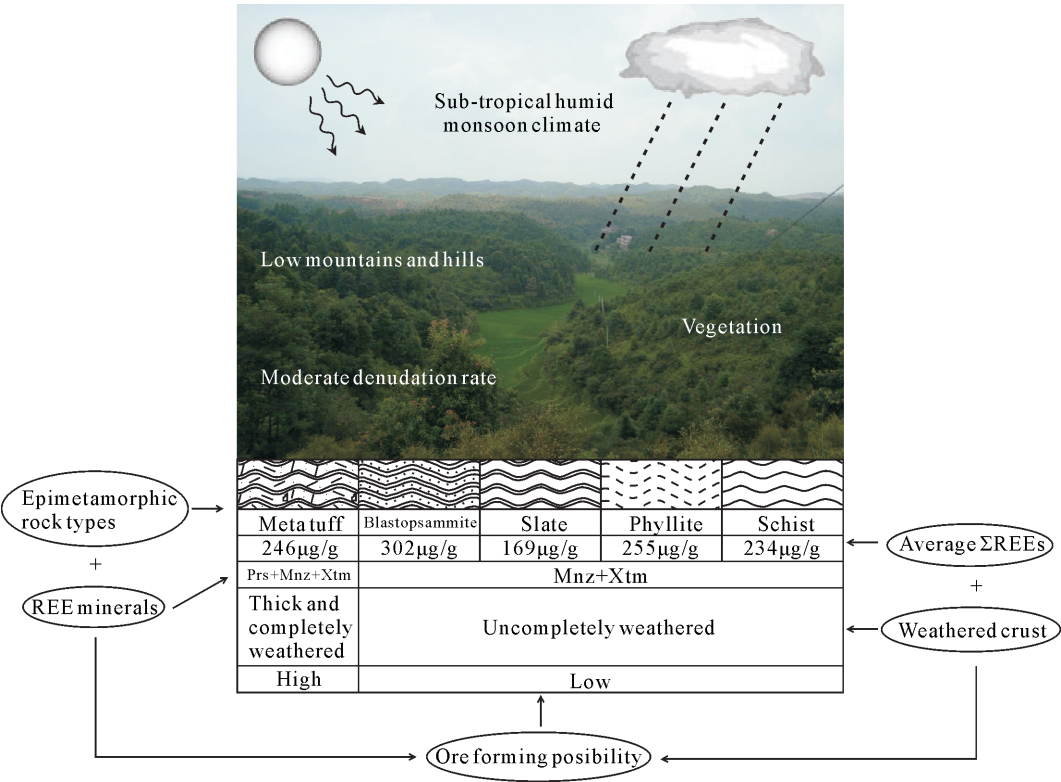
2. Geological Survey Team of Gannan, Jiangxi Bureau of Geology & Mineral Exploration and Development, Ganzhou 341000, China;

3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)



Highlights

- The epimetamorphic rocks widely distributed in South Jiangxi Province mainly include blastopsammite, metamorphic tuff, slate, phyllite, and schist.
- The epimetamorphic rocks are characteristic with generally siliceous, peraluminous, low-alkaline and have relatively high  $\Sigma$  REEs.
- Metamorphic tuff is the most likely potential parent rock type for ion-adsorption REEs deposits.



**Abstract:** Epimetamorphic rocks and related weathered crusts are widely distributed in South Jiangxi province. Identifying the petrological and geochemical characteristics of epimetamorphic rocks has a significant effect on the metallogenetic potential analysis on ion-adsorption REEs deposits. At present, there is little research about the metamorphic rock ion-adsorbed rare earth deposits. Epimetamorphic rocks of Neoproterozoic to Cambrian age are widely distributed in this region. Petrological and geochemical methods are used to classify these epimetamorphic rocks. Results show that the epimetamorphic rocks in this region have a large age span, ranging from Qingbaikou to Devonian. Minor epimetamorphic rocks also occur in Jurassic strata. Neoproterozoic epimetamorphic rocks are most widespread and mainly include blastopsammite, metamorphic tuff, slate, phyllite, and schist. Blastopsammite and metamorphic tuff have the highest REEs content with average contents of 302  $\mu\text{g/g}$  and 246  $\mu\text{g/g}$ , respectively, and show the LREE enrichment patterns with LREEs/HREEs of 2.68 – 5.43. Monazite and xenotime are the two most common rare earth minerals found in the epimetamorphic rocks so far. The metamorphic tuffs in the area have a large outcrop thickness, high REE content and well-weathered crusts, which are good metallogenetic parent rocks for ion-adsorbed rare earth deposits. Phyllite, schist and granulite have lower REE contents ( > 224  $\mu\text{g/g}$ , on average), but they are resistant to weathering and thus have a low potential in forming REE ore bodies. This study was a preliminary discussion of ion-adsorption rare earth deposits related to epimetamorphic parent rocks, which provides basic information and reference for further studies and prospecting.

**Key words:** epimetamorphic rock; rare earth elements; weathered crust; ion-adsorption REE deposit; X-ray Fluorescence Spectrometry; Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry