

南岭离子吸附型稀土矿床成矿规律研究新进展

赵芝,王登红,陈郑辉,陈振宇

国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室,中国地质科学院矿产资源研究所,北京,100037

内容提要:离子吸附型稀土矿是我国的优势资源,是全球重稀土的主要来源。20 世纪 80 年代我国对此类矿床的成矿规律开展过大量研究,但仍有诸多未解之谜。为了解目前离子吸附型稀土资源的分布特征和成矿规律,2011~2015 年中国地质科学院矿产资源所三稀项目组对 52 个离子吸附型稀土矿床进行了综合研究,本文介绍稀土成矿规律研究方面取得的一些新进展:①离子吸附型稀土矿床广泛分布在华南地区,以南岭最为发育,近些年在越南、老挝、泰国及美国也有发现。矿床主要产在花岗岩和酸性火山岩风化壳中,近几年也在变质岩和灰岩风化壳中有所发现,但花岗岩离子吸附型稀土矿床规模较大,品位较高,仍是最为重要的一类(亚类)稀土矿床;②成矿花岗岩的形成时代范围较宽,锆石 U-Pb 年龄集中在 461~384Ma、228~242Ma 和 189~94Ma 三个区间。相对于 LREE 型成矿花岗岩,HREE 型更加富硅,富 HREE,具有强烈的负 Eu 异常,普遍高 Rb,低 Ti、Zr、Hf、Nb、Ta、Ba、Sr 等微量元素,暗示 HREE 型成矿花岗岩岩浆经历了高度分异。值得注意的是,部分 LREE 型成矿花岗岩相对富集 HREE,特别是富集 Y,轻重稀土元素比值(LREE/HREE)多介于 1~3 之间,风化易形成 HREE 型风化壳,这很可能是今后重稀土资源的重要来源之一;③成矿花岗岩中稀土矿物的成因多样,有岩浆成因(如榍石、褐帘石、独居石、磷钇矿等)、流体交代成因(稀土氟碳酸盐类)和表生成因(水磷铈矿、水磷铈矿等),稀土元素的内生矿化很大程度上受流体交代作用影响;④发育完整的风化壳垂向剖面中稀土元素含量呈“弓背式”分布,即表土层和半风化层中含量低,全风化层中含量高,但受地形、地貌及地表水等因素的影响,稀土含量变化曲线呈多种形态。垂向上 LREE 和 HREE 可分层富集,即全风化层上部富集 LREE,下部富集 HREE,也可以同时富集在全风化层下部。华南大量成矿母岩和风化壳样品的化学风化蚀变指数(CIA)与稀土元素总量(Σ REE)之间存在明显的相关性,当 $CIA < 85\%$ 时,CIA 与 Σ REE 呈正相关,当 $85\% < CIA < 100\%$ 时,CIA 与 Σ REE 呈负相关;⑤表生过程中,母岩中易风化的稀土矿物不断释放出可交换性吸附态的稀土元素,酸性淋滤作用是稀土元素迁移的动力,黏土矿物是稀土元素赋存的载体,风化程度影响稀土元素的次生富集。

关键词:离子吸附型稀土矿;花岗岩;风化壳;稀土元素;稀土矿物;南岭

华南离子吸附型稀土矿床中稀土元素大部分呈交换性阳离子状态赋存于风化壳黏土中,并可通过 NaCl、 $(NH_4)_2SO_4$ 等电解质溶液提取出来(Wu Chengyu et al., 1989; Chi Ru'an et al., 2007)。与内蒙古白云鄂博、山东微山等传统的“稀土矿物相”矿床相比,此类矿床中稀土元素分布齐全,提取工艺简单,放射性低,是少有的优质稀土资源,尤其是含十分珍贵的重稀土资源。自 20 世纪 70~80 年代我国对赣南离子吸附型稀土矿床开展了一系列研究(Yang Yueqing et al., 1981; Song Yunhua et al., 1982, 1986; Huang Dianhao et al., 1988; Wu Chengyu et al., 1989, 1993; Chen Deqian et al., 1990)。上世纪 80 年代中期至 90 年代,研究区域逐渐扩展到广东、福建、广西、湖南和云南地区(Zhang Zuhai, 1990; Wang Jingbin et al., 1989),基本查明了稀土矿床的分布、成矿母岩的特征、风化壳中稀土元素的分布以及成矿机制。由于此类矿床的重要性,大量珍贵的研究资料并未公开发表。近些年日本对我国、老挝、泰国和印尼等国家的花岗岩及其风化壳进行了较详细的研究,试图解密此类矿床成因,并在东南亚国家积极寻找离子吸附型稀土矿床(Ishihara et al., 2008; Sanematsu et al., 2009,

注:本文为地质调查项目“华南重点矿集区稀有稀散和稀土矿产调查”(编号 DD20160056)、“我国离子吸附型稀土战略调查及研究”(编号 1212011220804),国家青年科学基金“江西某离子吸附型稀土矿床元素地球化学行为及成矿机理”(编号 41303035),中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金“赣南变质岩离子吸附型稀土矿成矿机理研究”(编号 K1506)联合资助的成果。
收稿日期:2016-07-01;改回日期:2016-10-25;责任编辑:黄敏。
作者简介:赵芝,女,1984 年生。博士,助理研究员。地球化学专业。通讯地址:100037,北京市西城区百万庄大街 26 号中国地质科学院矿产资源研究所。Email:zhaozhi_sun@163.com。

2013; Maulana et al., 2014)。虽然我国对离子吸附型稀土矿床开展过大量、深入的研究,但是仍有诸多未解之谜,如稀土矿物内生富集机制,离子相轻、重稀土元素的分布规律,影响稀土元素次生富集的因素等等。因此,离子吸附型稀土矿的成矿规律研究十分必要和迫切。2011~2015 年间,中国地质科学院矿产资源所三稀项目组独立完成了江西、福建、广东及广西省、自治区众多离子吸附型稀土矿床的野外调研及综合研究,取得了一些新的研究进展,本文是稀土成矿规律研究的部分成果,重点介绍:①离子吸附型稀土资源分布特征;②成矿花岗岩的锆石 U-Pb 年代学、地质学及地球化学特征;③成矿花岗岩中稀土矿物的富集机制;④风化壳中稀土元素的分布规律及影响稀土元素次生富集的主要因素;⑤离子吸附型稀土成矿规律。

1 离子吸附型稀土矿床的分布特征

1969 年离子吸附型稀土矿床首次在江西发现,

随后在广东、福建、广西、湖南及云南等地相继发现 (Zhang Zuhai,1990),近些年又有一批新的矿床被发现,也在越南、老挝、泰国及美国有新发现 (Ishihara et al., 2008; Sanematsu et al., 2009, 2013; Maulana et al., 2014; Bern et al., 2017),但离子吸附型稀土矿床仍以南岭地区最为发育(图 1)。矿床大多分布在花岗岩类和中酸性火山岩风化壳中,近年也在浅变质岩和灰岩风化壳中被发现 (Zhao Zhi et al., 2016; Huang Huagu et al., 2014)。但就目前发现的矿床来说,花岗岩离子吸附型稀土矿床数量多、规模较大、品位较高,仍是最重要的稀土矿床类型。华南显生宙岩浆活动强烈,形成了大面积、多期中性的中酸性岩浆岩 (Sun tao, 2006)。区内气候温暖潮湿,年平均气温在 18~22℃ 之间,年降水量为 1400~1800mm,地貌以低缓的丘陵为主,海拔多在 500m 以下。由于气温高、雨量足、植被发育,岩石的化学风化强烈,加上有利的地形地貌,形成并保存了大面积厚度较大的风化壳。

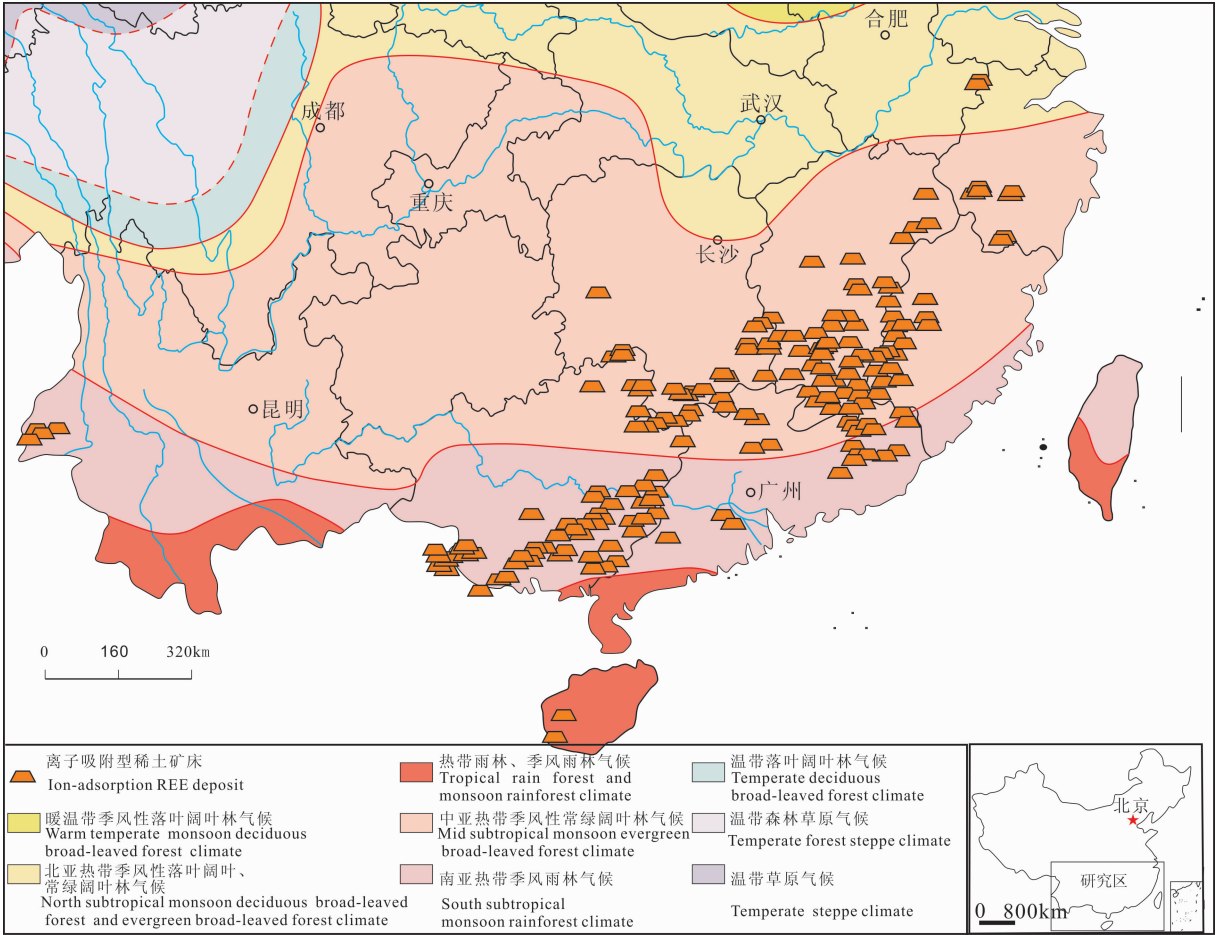


图 1 华南离子吸附型稀土矿床分布图(稀土矿床据袁忠信等,2012,气候分类底图据刘明光,2009)

Fig. 1 Distribution of ion-adsorption REE deposits in south China(REE deposits data after Yuan Zhongxin et al., 2012; Climate map after Liu Mingguang, 2009)

可见,华南之所以能形成丰富的离子吸附型稀土矿床,是具备特殊的地质条件和良好的表生风化条件。

2 样品及分析测试方法

研究样品包括花岗岩类及风化壳,采自华南 52 个稀土矿床,样品总数近千件。花岗岩类样品的主量、微量及稀土元素分析测试在国家地质实验测试中心完成,主量元素测试方法为 X 荧光光谱(XRF);微量和稀土元素测试方法为等离子质谱分析(ICP-MS),实验仪器为 X-Series 型电感耦合等离子体质谱仪(美国 Thermo 公司),分析误差小于 5%。成矿花岗岩中稀土矿物的电子探针分析由中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室完成,采用 JXA-8800R 电子探针分析仪和 Link ISI300 能谱仪,测试条件为加速电压 15kV 或 20kV,激发电流 20nA,电子束直径为 5 μ m。

3 成矿花岗岩类特征

华南花岗岩与 W、Sn、Nb、Ta、REE 和 U 矿床成因关系密切,备受关注(Ruan Daoyuan et al., 1985; Hua Renmin et al., 2007; Sun Li et al., 2016)。Wu Chengyu et al. (1990, 1992)对南岭花岗岩进行了深入研究,总结了 HREE 型花岗岩类的特征,分析了稀土元素的分馏和富集机制。Hua Renmin et al. (2007)总结了南岭稀土花岗岩的成矿特征。近十几年由于分析测试技术的快速发展,积累了一批花岗岩锆石 U-Pb 年代学和地球化学等方面的资料。Zhao Zhi et al. (2014)对南岭东段北部的 22 个成矿花岗岩的年代学、岩石学及地球化学特征进行了总结。本文简要介绍稀土成矿花岗岩的地质、成岩时代及地球化学方面的基本特征。

(1)从成岩时代看,南岭东段成矿花岗岩的锆石年龄集中分布在三个区间:461~384Ma、228~242Ma 和 189~94Ma(图 2),HREE 型和 LREE 型成矿花岗岩在成岩时代上并无规律性。

(2)从产出特征看,HREE 型成矿花岗岩多呈复式岩体的最晚期或边缘相产出,也独立产出(Wu Chengyu et al., 1990, 1992)。如江西定南寨背复式岩体早期侵入体岩相分带明显,由内部相、过渡相和边缘相组成,其中内部相和过渡相为 LREE 型花岗岩,边缘相则为 HREE 型花岗岩。

(3)从岩石类型看,HREE 型成矿花岗岩多为白云母钾长—碱长花岗岩、黑云母(二云母)钾长花岗岩、黑云母二长花岗岩、含石榴石二长花岗岩以及

黑云母似斑状花岗岩,最显著的特征是含一定量的白云母,多具有白(绢)云母化、萤石化、碳酸盐化和重稀土矿化。LREE 型成矿花岗岩岩石类型多样,有二长花岗岩、黑云母钾长花岗岩、花岗闪长岩、花岗斑岩等,显著的特征是具有钾长石化、绿泥石化、绿帘石化、碳酸岩化及轻稀土矿化。

(4)从岩石地球化学特征来看,HREE 型成矿花岗岩为岩浆高度分异演化的产物,具有较高的硅含量(74.87%~77.48%,21 件样品均值为 75%),富集 HREE,尤其是富集 Y(表 1)。稀土配分曲线呈明显的左倾式,具有显著的负铕异常(0.01~0.19)(图 3a,b)。微量元素普遍高 Rb,低 Ti、Zr、Hf、Nb、Ta、Ba 和 Sr,可以是岩浆经历强烈分离结晶或分离结晶—热重力扩散作用的产物,并叠加了较为强烈的自交代作用。相反,LREE 型成矿花岗岩的硅含量较低(60.38%~76.28%,67 件样品均值为 70.36%),相对富集 LREE,具有相对较高的 Zr、Hf、Nb、Ta、Ba 和 Sr 等元素含量。LREE 型花岗岩中有一部分岩石相对富集 HREE(占稀土总量的 26%~47%),轻、重稀土分馏程度低,LREE/HREE 比值介于 1.1~2.7,稀土配分曲线可以是“右倾式”,也可以是“海鸥”式(图 3c,d,图 4),可称为富 Y 的 LREE 型花岗岩。此类花岗岩风化后重稀土元素含量较高,很可能是今后重稀土资源的重要来源之一。

4 稀土矿物特征

与普通花岗岩相比,成矿花岗岩最显著的特征是稀土矿物相对富集,并且以易风化的稀土矿物为主。前人对成矿花岗岩中的稀土矿物进行了研究(Song Linhao et al., 1991; Ishihara et al., 2008; Sanematsu et al., 2009; Maulana et al., 2014),但南岭众多成矿岩体中稀土元素的赋存状态及稀土元素如何富集并不清楚。我们对南岭众多花岗岩的稀土矿物进行了电子探针分析(表 2),成矿花岗岩中发育一定比例的稀土独立矿物(稀土含量 $\geq 20\%$)和含稀土矿物(稀土含量 5%~20%),本文统称为稀土矿物。稀土矿物具有种类多、结构复杂、成分不均一及分布不均一的特征。除了表 2 中列出的稀土矿物外,还有大量被氧化的中间产物,稀土元素含量在 50%~70%之间。

(1)稀土矿物种类繁多。轻稀土型花岗岩中(如佛冈岩体、宁化岩体、寨背岩体等)稀土矿物有榍石、褐帘石(图 5a)、独居石(图 5b)、磷钇矿(图 5c)、钽石

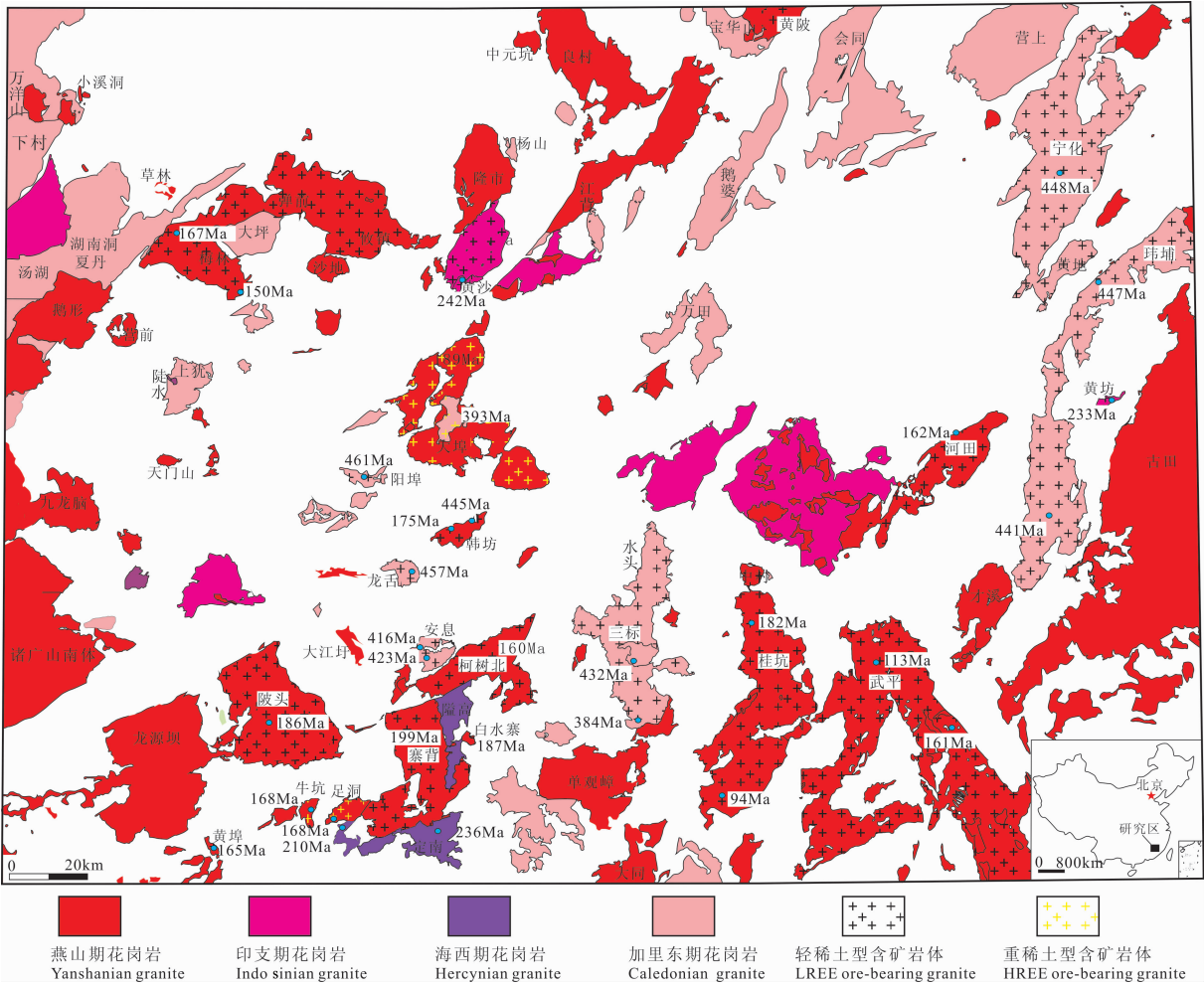


图 2 南岭东段北部稀土成矿花岗岩时空分布图

Fig. 2 Distribution of granites in the north-east section of the Nanling Mountains

(图 5d,f)、新奇钙铈矿(图 5e,f)、新奇钙钇矿(图 5e)、氟碳铈矿(图 5g)等。重稀土型花岗岩(如足洞)中,有铈钇矿、钇钇矿、褐钇铈矿、黑稀金矿、易解石、铈钇矿、新奇钙钇矿等(Huang Dianhao et al. , 1988)。有一些矿物仅见于个别岩体,如硅铈石(图 5j)见于上甲岩体,氟碳钇铈矿见于寨背花岗斑岩中,大埠岩体和武平岩体局部含石榴石。

(2)稀土矿物产出方式多样。有岩浆结晶矿物,如榍石、褐帘石、独居石和磷钇矿,它们具有完好的结晶形态,被流体交代。也有交代矿物,稀土氟碳酸盐类矿物是最常见的交代矿物。岩浆后期流体沿早期岩浆结晶矿物的粒间、裂隙、解理和双晶带或矿物的表面进行交代,形成新的稀土矿物,常具有典型的交代结构。如宁化花岗岩体中独居石被新奇钙铈矿沿边部和表面交代(图 5b),上甲花岗斑岩中硅铈石交代原生矿物表面(图 5j),形成不规则的矿物晶体;交代矿物有时呈组合出现,如拂冈岩体中新奇钙铈

矿—钽石共生(图 5f)。岩浆期后交代的新生矿物,岩浆后期的热液通常沿着裂隙充填,形成脉体,如宁化岩体方解石脉中发育独居石和新奇钙铈矿(图 5k),上甲花岗斑岩中也见热液型的独居石。还有表生稀土矿物,如水磷铈矿(图 5i)、水磷镧矿及水磷钇矿,呈不规则的细小颗粒分布在绿泥石、黑云母等矿物颗粒内部。

(3)稀土矿物的化学组成复杂。一些稀土矿物富集 LREE,如独居石、褐帘石及榍石;一些稀土矿物富集 HREE,如磷钇矿、新奇钙钇矿及富钇钽石等;还有一些稀土矿物中 LREE 和 HREE 均较富集,如氟碳钇铈矿,LREE/HREE 比值介于 1~2.6。通常,岩浆早期结晶的矿物富集 LREE,晚期结晶的矿物富集 HREE。交代成因的矿物中稀土含量受流体和母岩中稀土浓度影响,如富 F 的流体中相对富集 HREE(Rolland et al. ,2003; Papoutsas et al. , 2013)。

(4)稀土矿物较富集。成矿花岗岩体中交代作

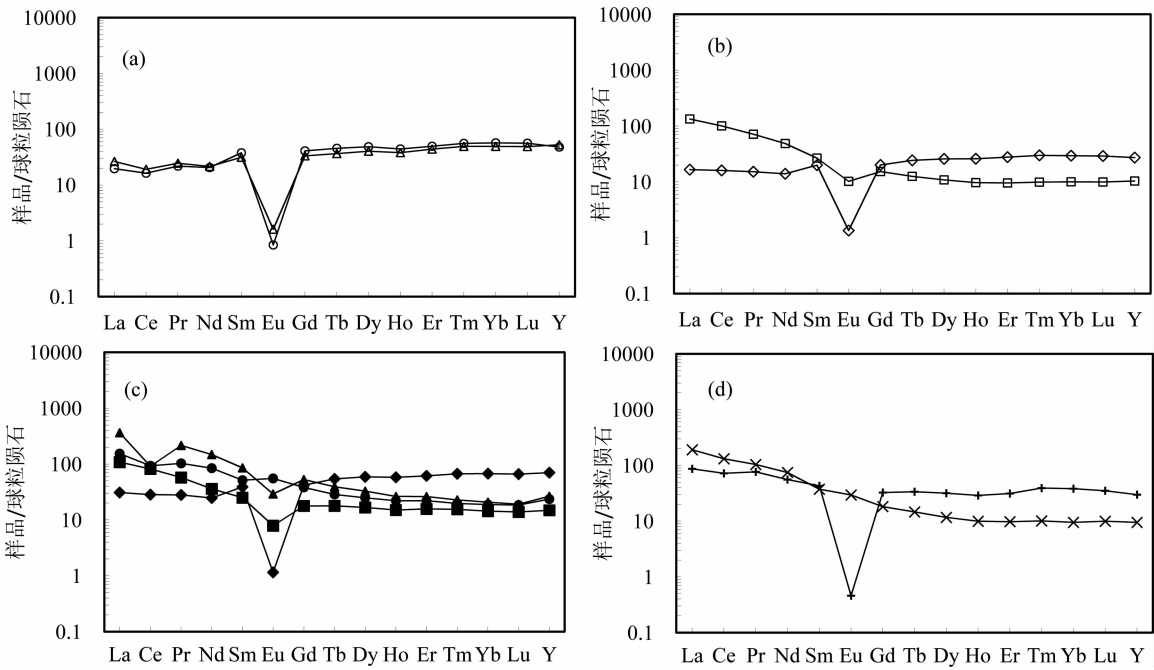


图 3 南岭代表性成矿花岗岩的球粒陨石标准化稀土配分曲线

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of the representative REE ore-bearing granites in the Nanling Mountains

(a)—足洞和大埠花岗岩,(b)—武平花岗岩(数据引自 Yu Jinghai et al.,2007),(c)—寨背花岗岩,(d)—水头花岗岩

(a)—the Dabuo and the Zudong granitic rocks; (b)—the Wuping granitic rocks(date from Yu Jinghai et al.,2007);

(c)—the Zhaibei granitic rocks; (d)—the Shuitou granitic rocks

○—足洞白云母碱长花岗岩,△—大埠二云母花岗岩,□—武平黑云母花岗岩,◇—武平含石榴石花岗岩,●—寨背角闪石英二长岩,▲—寨背黑云母钾长花岗岩,■—寨背富 Y 黑云母钾长花岗岩,◆—寨背白云母碱长花岗岩,+-水头白云母碱长花岗岩,×—水头花岗岩斑岩
○—the Zudong muscovite granites, △—the Dabuo two-mica granites, □—the Wuping biotite granites, ◇—the Wuping garnet-granites, ●—the Zhaibei hornblende quartz monzonites, ▲—the Zhaibei biotite granites, ■—the Zhaibei Y-riche biotite granites, ◆—the Zhaibei muscovite granites, +-the Shuitou muscovite granites, ×—the Shuitou granite porphyry

用普遍发育,这是稀土矿物富集的重要因素。但是各花岗岩体的交代作用类型和强度不同,即使同一个花岗岩体,不同部位交代作用的强度也不同,这也是为什么风化壳中稀土元素成矿强度不同的内因。

(5)稀土矿物风化程度不同。花岗岩风化过程中稀土矿物影响稀土元素的富集和分馏(Banfield et al.,1989;Braun et al.,1993; Hill et al.,1998; Harlavan et al.,2002)。风化过程中独居石、磷钇矿及褐钇铌矿等矿物稳定,残留在风化壳中,只有大量易于风化的稀土氟碳酸盐、硅酸盐矿物风化解体才能形成离子吸附型稀土矿床(Bao Zhiwei et al.,2008)。稀土矿物的种类决定了岩体中各稀土元素含量高低,如上甲岩体富集大量硅铈石,使原岩中Ce含量远大于La。稀土矿物的种类也很大程度上决定了风化壳中稀土元素的配分特征,如寨背花岗岩各相带中稀土氟碳酸盐类矿物发育,内部相和过渡相中以氟碳铈矿、褐帘石和楣石为主,岩石风化形成LREE型风化壳;边缘相的细粒似斑状黑云母花

岗岩中稀土含量偏低,稀土矿物以磷钇矿和变种锆石为主,不易形成离子吸附型稀土矿床,而白云母碱长花岗岩中含新奇钙钇矿和富钇钼石,风化形成HREE型风化壳。

5 风化壳中稀土元素的分布规律

5.1 风化壳中稀土元素的配分

稀土配分指单个稀土元素含量在稀土元素含量总和(不包括钪)所占的百分比,这种指标更适合矿床的工业评价。工业上离子吸附型稀土矿床分为LREE型(如江西河岭)和HREE型(如江西足洞)。我们通过对华南52个稀土矿床350件风化壳样品的分析,发现HREE型矿床富集重稀土,ΣY(Ho-Y)占41%~85%,ΣEu(Eu-Dy)占3%~17%(均值10%),ΣCe(La-Sm)占9%~49%;LREE型矿床中大部分富集轻稀土,ΣCe占62%~95%,ΣEu占0.6%~12%,ΣY占3%~30%。值得注意的是有一部分风化壳富集中稀土,ΣCe占23%~64%,

表 1 南岭代表性成矿花岗岩中稀土元素含量(×10⁻⁶)

Table 1 REE content in the representative REE ore-bearing granites in the Nanling Mountains(×10⁻⁶)

岩体	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Sc
大埠	二云母花岗岩 (HREE 型)	15.10	16.10	4.11	17.10	6.04	0.26	8.32	1.69	12.70	2.85	9.96	1.57	11.70	1.77	97.30	2.72
		6.77	16.90	2.36	10.20	4.33	0.08	6.65	1.46	11.60	2.72	9.82	1.59	11.40	1.74	96.90	4.47
		7.18	21.60	3.61	18.50	11.40	0.08	15.60	3.20	21.70	4.14	12.90	2.07	13.50	2.08	159.00	3.70
足洞	白云母碱长花岗岩 (HREE 型)	6.82	8.64	2.67	13.20	7.61	0.24	11.40	2.25	14.80	2.92	8.83	1.33	9.32	1.41	76.70	6.28
		3.17	3.86	1.36	6.69	4.17	0.03	6.84	1.65	12.30	2.58	9.10	1.57	12.30	1.85	60.30	5.92
		2.64	5.71	0.99	4.25	2.81	0.04	3.82	1.01	8.46	1.80	6.86	1.35	10.30	1.58	39.50	5.18
		6.56	65.70	2.91	13.40	8.00	0.04	10.80	2.55	19.40	4.04	14.30	2.58	19.20	3.05	121.00	6.39
		4.98	5.67	2.19	10.40	6.08	0.04	8.15	1.83	13.70	2.83	9.81	1.78	12.40	1.97	67.00	4.56
		2.03	2.31	0.78	4.35	3.17	0.04	6.78	1.56	12.00	2.72	8.80	1.29	8.52	1.28	96.00	1.67
		19.50	8.66	7.92	38.10	20.90	0.10	26.60	4.94	31.50	6.17	19.30	2.84	19.90	2.92	180.00	4.88
		8.91	15.20	4.09	21.60	14.20	0.06	21.20	4.43	30.00	5.83	18.30	2.73	17.80	2.70	192.00	4.11
水头	白云母钾长花岗岩 (LREE-(Y)型)	10.10	24.10	3.95	19.20	11.50	0.07	16.70	3.52	24.20	4.86	15.60	2.35	16.90	2.49	136.00	3.71
		31.90	68.90	10.50	39.70	9.94	<0.05	10.00	1.96	12.10	2.46	7.78	1.40	9.45	1.34	67.20	1.53
		69.90	126.00	14.20	53.10	8.64	2.57	5.59	0.85	4.46	0.85	2.44	0.36	2.36	0.38	21.40	11.50
寨背	粗粒角闪石英 二长岩(LREE 型)	56.50	89.20	14.10	59.90	11.90	4.80	11.70	1.65	9.46	1.88	5.51	0.71	4.67	0.70	52.90	16.50
寨背	中粒黑云母钾长 花岗岩(LREE 型)	204.00	111.00	46.20	164.00	31.60	3.83	26.10	3.61	20.60	3.74	10.80	1.36	8.64	1.20	98.90	5.43
		61.90	63.60	12.70	45.30	7.83	1.22	6.13	0.94	4.37	0.74	2.25	0.28	1.66	0.25	20.60	3.08
寨背	中粒黑云母 钾长花岗岩 (LREE-(Y)型)	33.20	52.90	6.65	23.00	5.61	0.72	5.33	0.97	5.75	1.12	3.35	0.47	3.27	0.49	26.10	3.68
		21.70	29.80	3.94	13.20	3.62	0.46	4.12	0.82	5.02	1.05	3.19	0.47	3.10	0.45	29.00	2.63
		64.00	152.00	13.00	40.70	8.07	0.87	6.87	1.31	8.35	1.66	5.23	0.73	4.30	0.64	45.30	4.62
寨背	中细粒白云母碱长 花岗岩(HREE 型)	11.30	27.10	3.84	17.60	8.97	0.10	12.80	3.13	22.40	4.93	15.30	2.41	16.70	2.51	158.00	5.28

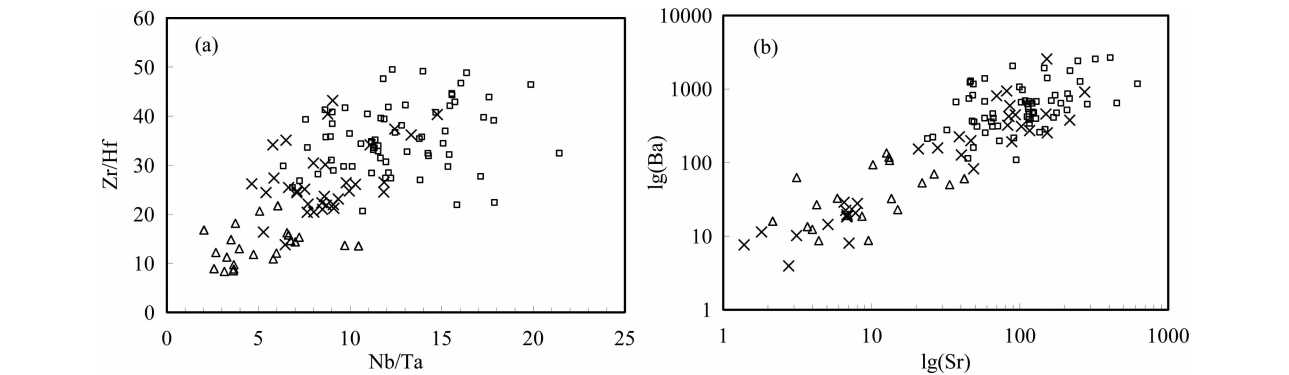


图 4 南岭成矿花岗岩中 Zr/Hf-Na/Ta(a),lgBa-lgSr(b)元素比值图

g. 4 Zr/Hf vs. Nb/Ta(a), lgBa vs lgSr(b) plots of the REE ore-bearing granites in the Nanling Mountains
□—LREE 型风化壳,△—HREE 型风化壳,×—富 Y 的 LREE 型风化壳
□—LREE-rich weathering crust, △—HREE-rich weathering crust, ×—Y and LREE-rich weathering crust

ΣEu 占 5%~14%,ΣY 28%~69%(图 6),风化壳垂向剖面上往往具有上部富集轻稀土,下部富集重稀土的成矿规律(图 7)。Eu、Dy、Tb 利用价值大、市场价格高,是比重稀土(ΣY)更为珍贵的稀土资源。而目前简单的轻、重稀土矿床分类并没有体现这类独特的稀土资源。

5.2 风化壳垂向剖面中稀土元素分布、迁移及富集规律

发育完整的风化壳剖面包括表土层(A)、全

风化层(B)、半风化层(C)和微风化层(D)。前人总结了风化壳中稀土元素的分布特征(Yang Yueqing et al. ,1981; Bao Zhiwei et al. ,2008; Chi Ru'an et al. ,2012),结合前人的研究结果, Wang Denghong et al. (2013)根据大量的钻孔资料总结了不同风化剥蚀程度的风化壳中稀土元素分布特征:发育完整的风化壳剖面中可交换性吸附态稀土元素含量呈“弓背式”(图 8),即表土层和半风化层中可交换性吸附态稀土含量低,全风化层含量高。研究表明,风

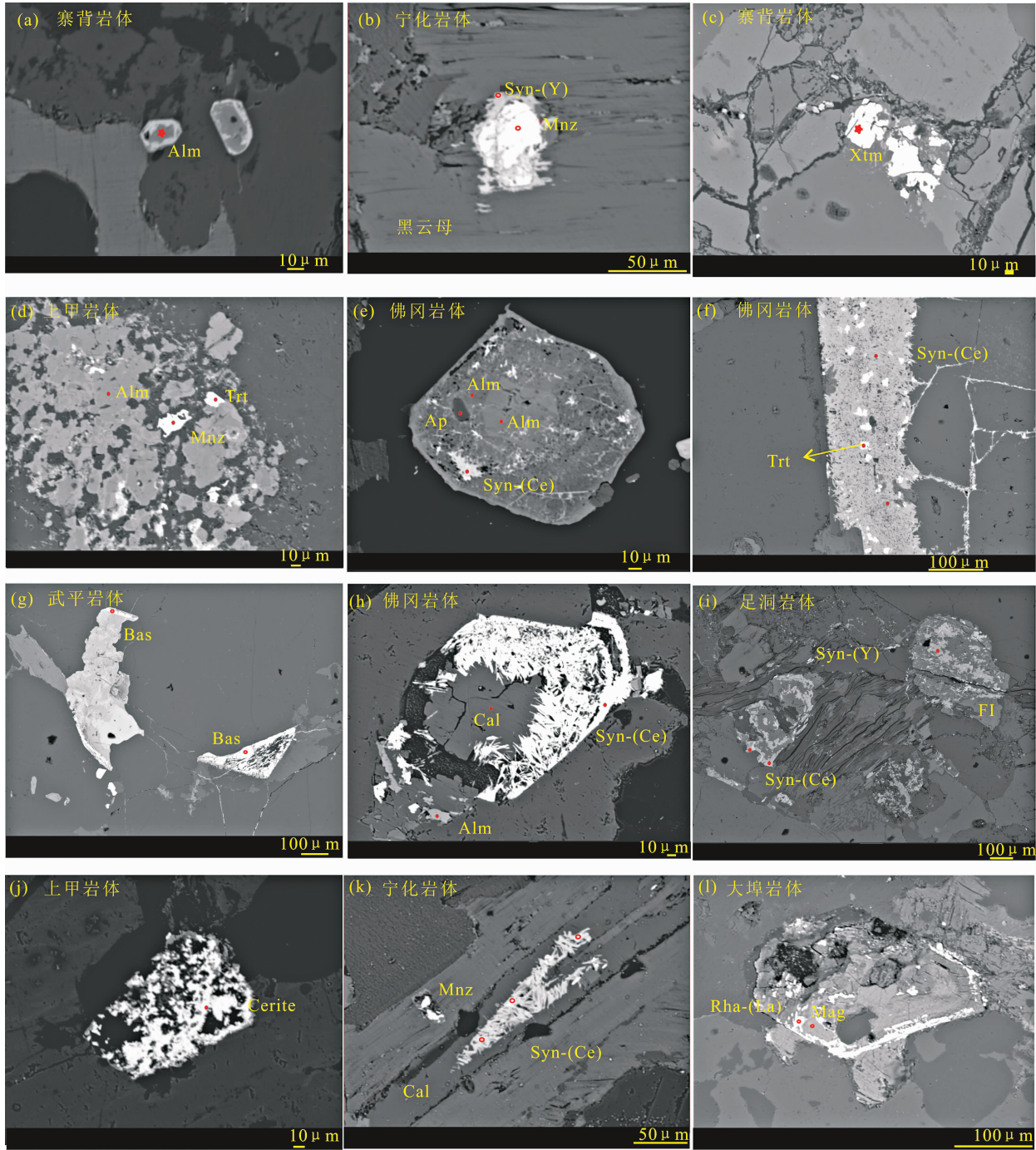


图 5 南岭成矿花岗岩中稀土矿物的背散射图像

Fig. 5 Back-scattered electron images of the rare earth element minerals in the
REE ore-bearing granites in the Nanling Mountains

Aln—褐帘石; Mnz—独居石; Syn-(Y)—新奇钙钇矿; Ap—磷灰石; Syn-(Ce)—新奇钙铈矿; Xtm—磷铈矿; Trt—钍石, Bas—氟碳铈矿;
Cal—方解石; FI—萤石; Rha-(La)—水磷铈矿; Mag—磁铁矿; Cer—硅铈石
Aln—Allanite; Mnz—Monazite; Syn-(Y)—Synchysite-(Y); Ap—Apatite; Syn-(Ce)—Synchysite-(Ce); Xtm—Xenotime;
Trt—Thorite; Bas—Bastnaesite; Cal—Calcite; FI—Fluorite; Rha-(La)—Rhabdophane-(La); Mag—Magnetite; Cer—Cerite

化壳剖面自上而下, pH 值逐渐增大, 黏土对稀土元素的吸附率随 pH 值的上升而增高, 全风化层中 pH 值利于稀土元素的沉淀 (Yang Yueqing et al., 1981; Chen Deqian et al., 1990)。长期的淋漓作用

和风化剥蚀作用, 使风化壳介质中的 pH 值不断改变, 可交换性吸附态稀土不断迁移、富集形成“弓背式”。然而, 受地形及地貌的影响, 区域上风化壳发育程度不一, 层状结构各异, 可交换性吸附态稀土含

表 2 南岭成矿花岗岩中稀土矿物的稀土元素特征

Table 2 REE geochemical characteristics in REE minerals from the REE ore-bearing granites in the Nanling Mountains							
中文	化学式	RE ₂ O ₃	LRE ₂ O ₃	HRE ₂ O ₃	Y/RE ₂ O ₃ *	Eu/RE ₂ O ₃ *	含量(%)
褐帘石	Fe(Al,Fe) ₂ [Si ₂ O ₇][SiO ₂]O(OH)	16(<i>n</i> =12)	13	3	0.58	0	1~5
硅铍钇矿	FeY ₂ [Ba ₂ Si ₂ O ₁₀]	56	0.99	55	63	0	0.1~1
富钇钇石	(Yh,Y)SiO ₄	11(<i>n</i> =26)	3	9	43	0.13	1~2
硅铈石	Ce ₉ Fe ³⁺ (SiO ₄) ₆ [SiO ₃ (OH)](OH) ₃	73(<i>n</i> =7)	56	17	10.2	0	1~2
石榴石	Fe ₃ Al ₂ [SiO ₄] ₃	19.99(<i>n</i> =2)	0.31	19.68	9.06	0.94	1~2
独居石	(Ce,La)PO ₄	65(<i>n</i> =24)	59	6.3	2.3	0	2~3
镧独居石	(La,Nd,Ce)PO ₄	65.2(<i>n</i> =2)	58.5	6.7	4.9	0	0.1~1
磷钇矿	YPO ₄	63(<i>n</i> =26)	2.1	61	65	0	2~3
水磷铈矿	(Ce,La)PO ₄ ·H ₂ O	53.5(<i>n</i> =6)	45	8.5	5.1	0	2~3
水磷镧矿	(La,Nd)PO ₄ ·H ₂ O	54.7(<i>n</i> =8)	42.1	12.6	11.2	0.7	2~3
水磷钇矿	YPO ₄ ·2H ₂ O	58.3(<i>n</i> =6)	8.5	49.7	44	0	2~3
氟碳铈矿	(Ce,La)(CO ₃)F	61.5(<i>n</i> =13)	52	9.5	5.6		2~3
氟碳镧矿	(La,Nd,Ce)(CO ₃)F	55(<i>n</i> =4)	39.6	15.6	8.2	0.3	2~3
氟碳镧铈矿		49(<i>n</i> =5)	40	8	7.3		2~3
氟碳钙铈矿	(Ce,La) ₂ Ca(CO ₃) ₃ F ₂	58			5	0.1	2~3
新奇钙铈矿	(Ce,La)Ca(CO ₃) ₂ F	43(<i>n</i> =27)	35	8	7.9		2~3
新奇钙钇矿	(Y,Dy)Ca(CO ₃) ₂ F	52(<i>n</i> =7)	10	42	45.3		2~2
氟碳钇铈矿	(Ce,Y)(CO ₃)F	61(<i>n</i> =15)	36	25	20.7		1~2
褐钇铈矿	YNbO ₄	42.79	2.71	40.08	59	0.03	0.1~1
黄钇钽矿①	YTaO ₄	33			49	0.1	0.1~1
钇钽矿①	(Y,U,Fe)(Ta,Nb)O ₄	33			47		0.1~1
黑稀金矿①	(Y,U)(Nb,Ta) ₂ O ₆	27			52	0.1	0.1~1
复稀金矿①	(Y,U,Th)(Ti,Nb) ₂ O ₆	33					0.1~1
易解石①	(Ce,Ca,Th)(Ti,Nb) ₂ O ₆	25			14	0.2	0.1~1
钇易解石①	(Y,Ca,U,Th)(Ti,Nb) ₂ O ₆	32			50	0.05	0.1~1
钛钇矿	(Y,Dy)(Ti,Nb) ₂ (O,OH) ₆	47	0.9	46	68	0	0.1~1
锆石变种	(Zr,Y)(Si,P)O ₄	21.83(<i>n</i> =5)	0.61	21.2	61	0	0.1~1

注:①白鸽等,1989。

表 3 江西 M 矿区 ZK3 钻孔风化壳样品中稀土元素含量(×10⁻⁶)

Table 3 REE content in the weathering profile of the M deposit in Jiangxi Province(×10 ⁻⁶)																
样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Sc
ZK2-1(0~3m)	658.0	221.0	128.0	456.0	72.5	10.5	23.0	4.5	17.0	3.2	10.8	1.4	9.6	1.5	55.5	13.9
ZK2-2(3~4m)	588.0	163.0	110.0	387.0	66.1	10.1	25.4	4.5	16.7	3.1	10.6	1.4	9.7	1.4	57.9	14.0
ZK2-3(4~5m)	610.0	184.0	108.0	381.0	68.6	10.9	34.7	5.5	22.5	4.1	12.9	1.7	11.5	1.7	78.1	12.4
ZK2-4(5~6m)	665.0	245.0	112.0	390.0	75.5	13.1	50.7	7.6	32.7	5.9	17.4	2.2	15.0	2.2	118.0	13.1
ZK2-5(6~7m)	596.0	206.0	97.4	337.0	67.7	12.5	56.6	9.3	43.5	7.8	22.5	2.8	17.4	2.6	173.0	10.7
ZK2-6(7~8m)	589.0	117.0	92.0	313.0	69.2	13.0	72.3	11.9	59.3	10.6	29.5	3.5	21.4	3.1	283.0	8.3
ZK2-7(8~9m)	334.0	233.0	56.0	192.0	44.5	9.5	58.0	9.8	51.7	9.2	25.3	3.1	19.5	2.7	231.0	8.8
ZK2-8(9~10m)	341.0	250.0	55.6	189.0	45.4	10.2	69.4	13.0	71.4	13.1	35.1	4.2	26.1	3.7	412.0	9.8
ZK2-9(10~11m)	325.0	55.7	53.9	185.0	42.5	9.4	63.9	12.3	68.8	12.6	34.5	4.1	24.7	3.5	410.0	10.4

量曲线也呈现多种分布型式。当表土层较厚时,可交换性吸附态稀土含量曲线呈“深潜式”,而当表土层较薄或不发育时,可交换性吸附态稀土含量曲线呈“浅伏式”或“表露式”(图 8)。微地形的不同会影响地表水下渗方向,山顶淋漓作用以垂向为主,山腰除了垂向的渗流外还会有侧向的渗流,稀土含量曲线多呈“波浪式”。

大量的钻孔资料显示,风化壳中 LREE 和 HREE 具有同层富集或分层富集的规律。江西 G

矿区钻孔 LJ001 孔深 18m,自表土层(0~3m)至全风化层(3~15m)至半风化层(17~19m),可交换性吸附态稀土含量曲线呈典型的“弓背式”,即 0~7m、17~19m 含量低,9~14m 可交换性吸附态稀土含量高,其中 LREE 相对富集在全风化层中部(12m 上下),HREE 富集在全风化层下部 16m 上下,显示 LREE 和 HREE 具有不同的迁移轨迹(图 9)。江西 M 矿区钻孔 ZK001 孔深 11m,自表土层(0~3m)至全风化层(3~10m)至半风化层(11m),稀土含量曲

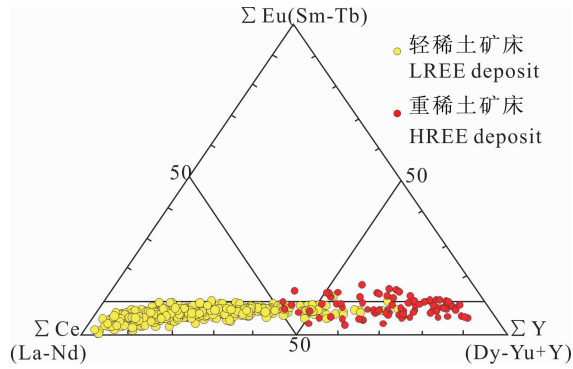


图 6 华南风化壳的 $\Sigma\text{Eu}-\Sigma\text{Ce}-\Sigma\text{Y}$ 三角图解

Fig. 6 Diagram of $\Sigma\text{Eu}-\Sigma\text{Ce}-\Sigma\text{Y}$ of the weathering crust in south China

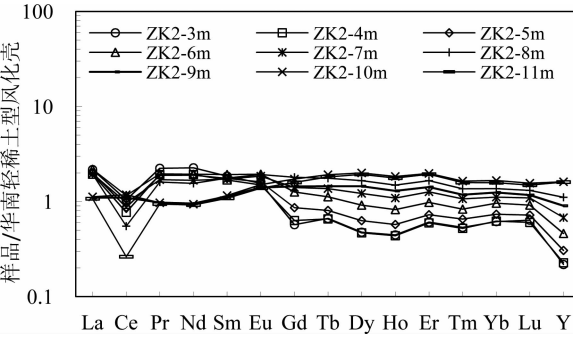


图 7 江西 M 矿床 ZK3 钻孔轻稀土型风化壳标准化的稀土配分曲线

Fig. 7 LREE-rich weathering crust-normalized REE patterns of the weathering crust in the M deposit in Jiangxi Province

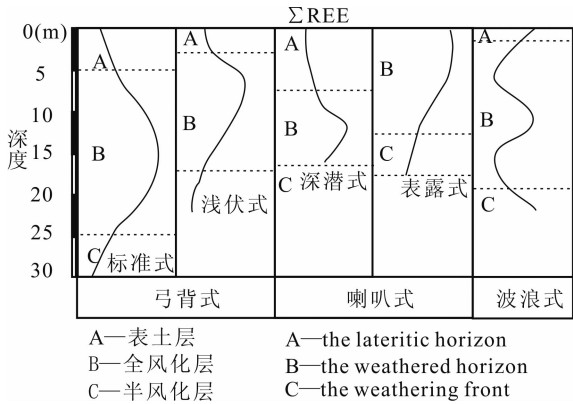


图 8 风化壳剖面中稀土元素的富集和贫化规律

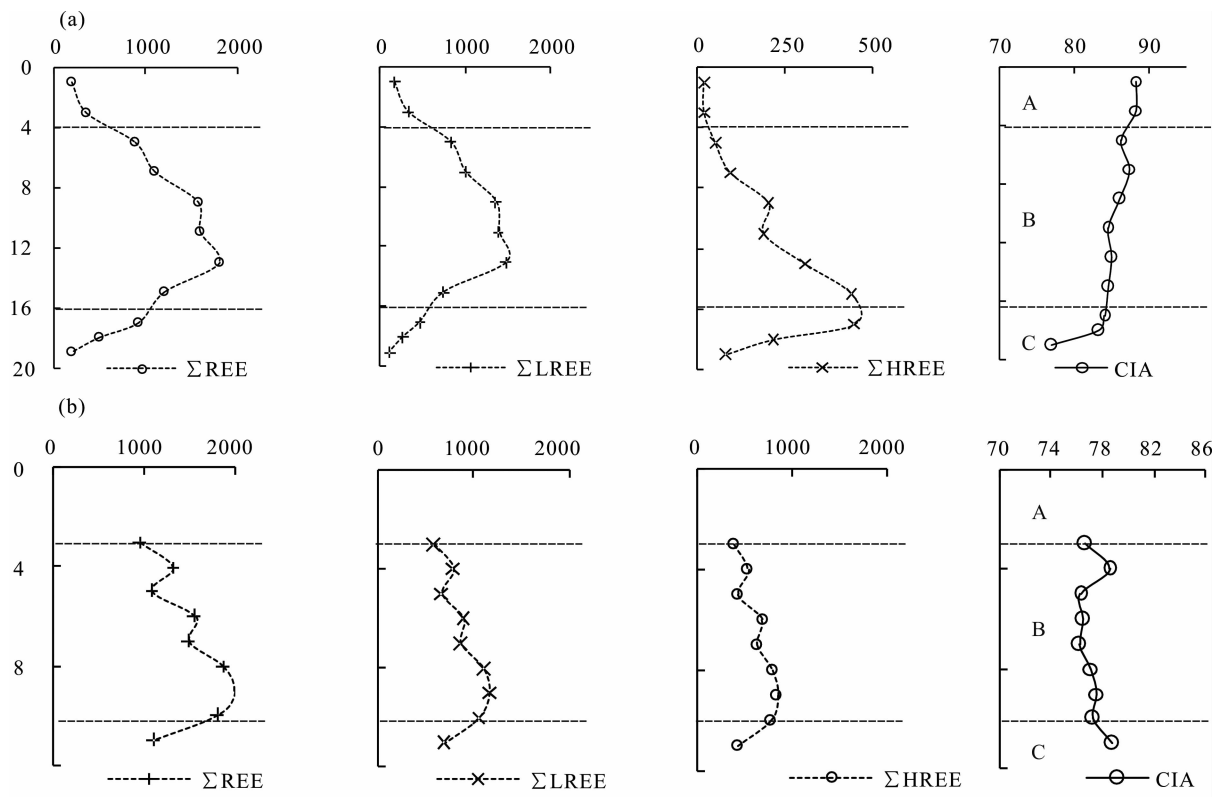
Fig. 8 Diagram showing ΣREE enrichment and differentiation with the weathering profiles

线呈“深潜式”,LREE 和 HREE 均富集在全风化层下部 8~10m,且具有相似的迁移轨迹(图 9)。即使同一个花岗岩岩体,不同地区的风化壳中 LREE 和 HREE 也具有这样的富集规律(Zhao Zhi et al, 2015)。研究认为各稀土元素的富集程度主要取决

于溶液中迁移出的该离子的浓度(Yang Yueqing et al.,1981),而相同浓度的 LREE 吸附能力大于 HREE,因此 LREE 易滞留在原地,HREE 易向下迁移(Chen Deqian et al.,1990)。岩石的风化是一个漫长的不断变化的地质过程,当风化壳上部 LREE 的浓度不断增加,达到一定程度时 LREE 的迁移能力克服吸附能力而缓慢向下迁移,与 HREE 一样逐渐富集在全风化层下部。钻孔 LJ001 中 LREE 浓度远高于 HREE,因此可以推测随着风化程度的进行,LREE 会逐渐向下迁移并富集,形成与钻孔 ZK001 相似的迁移轨迹。而钻孔 ZK001 随着风化壳上部的剥蚀,稀土元素持续迁移并富集。可见,稀土元素的浓度除了受控于母岩外,风化程度也极其重要。

5.3 风化壳中稀土元素的次生富集

母岩风化过程中稀土元素不断发生迁移、富集和流失。稀土元素的迁移、分馏和富集受花岗岩中稀土矿物的稳定性(Hill et al.,1998; Harlavan et al.,2002; Ma Yingjun et al.,2004; Galan et al.,2007; Yang Yueqing et al.,2016),风化壳介质的 pH 值(Wu Chengyu et al.,1989),风化程度(Sanematsu et al.,2009; Zhao Zhi et al,2015),气候、地貌、微生物(Chen Zhicheng et al.,1997)、稀土元素自身差异等众多因素的影响。对于离子吸附型稀土矿床,稀土元素的富集程度最为重要。富集程度除了与母岩的稀土含量有关外,主要受风化程度的制约。化学风化蚀变指数(CIA)用于判断岩石的风化程度,其值越大风化强度越大(Nesbitt et al.,1982)。Sanematsu et al.(2009)在对老挝花岗岩风化壳成矿潜力评价时,将南岭风化壳与老挝风化壳进行了对比研究,结果显示自母岩一半风化层—全风化层—表土层 CIA 增大,全风化层中稀土含量也最高,但老挝全风化层的风化程度高于南岭地区,成矿条件不佳。大数据显示,华南成矿花岗岩和 风化壳的 CIA 蚀变指数分别集中在 45%~60%和 65%~95%,且 CIA 与稀土含量具有明显的相关性(图 10a),当 CIA=65%~85%时,即化学风化作用的早期—中期阶段,稀土元素随风化程度的增高而快速升高;CIA=85%~98%,即化学风化作用的晚期阶段,稀土含量随风化程度的增高而快速降低。除了 CIA 指数,风化壳中 LOI 与稀土含量也具有一定的相关性,当 LOI=2%~6%时,LOI 与稀土含量呈正相关,当 LOI=6%~12%时,LOI 与稀土含量呈负相关(图 10b)。可见,LOI 也可以判断风化壳的风



A—表土层；B—全风化层；C—半风化层
A—the lateritic horizon; B—the weathered horizon; C—the weathering front

图 9 江西离子吸附型 G 矿区(a)和 M 矿区(b)风化壳剖面中稀土元素含量变化曲线
Fig. 9 Diagram showing depths versus ΣREE , ΣLREE , ΣHREE and CIA of the weathering profiles of the G deposit(a) and the M deposit(b)

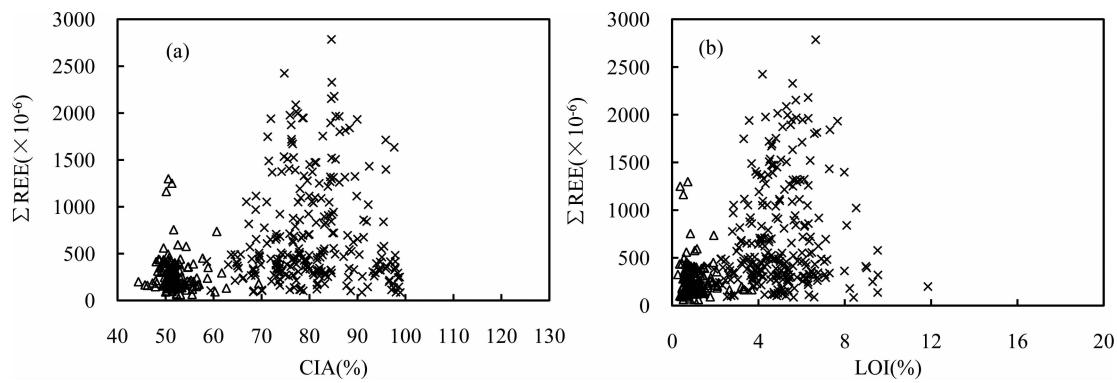


图 10 华南花岗岩及其风化壳中 ΣREE -CIA(a)及 ΣREE - LOI 图解(b)
Fig. 10 ΣREE vs. CIA(a) and ΣREE vs. LOI (b)plots of the REE ore-bearing granites and the weathering crust in south China

△—花岗岩；×—花岗岩风化壳
△—REE ore-bearing granites；×—weathering crust

化程度,且比 CIA 更加简单和便捷。

华南古老地壳经历了多次活化和重熔作用,岩浆演化形成 LREE 型花岗岩的同时也形成了 HREE 型花岗岩类 (Wu Chenyu et al., 1990, 1992),岩浆期后—后期流体交代使不同类型的稀土

矿物发生一定程度的富集。在第四纪新构造运动控制的丘陵区 and 亚热带气候条件下,加里东期—燕山期花岗岩风化并保留形成一定厚度的风化壳。表生作用中,易风化的稀土硅酸盐矿物和稀土氟碳酸盐类矿物释放出大量可交换性吸附态稀土元素,而难

风化的稀土磷酸盐如独居石、磷钇矿等形成风化壳型砂矿。风化过程中,随地表水淋滤作用可交换性吸附态稀土元素发生迁移,风化早期—中期阶段,离子相的稀土含量随风化程度的增高而快速升高。晚期阶段,稀土含量随风化程度的增高而快速降低。发育完整的剖面中,从母岩—半风化层—全风化层—表土层风化程度增加,稀土迁移曲线呈“弓背式”,稀土元素最终赋存在 pH 值为 5.5~6.5 的全风化层中。通常,HREE 型母岩风化形成 HREE 型风化壳,LREE 型母岩风化形成 LREE 型风化壳,富 Y 的 LREE 型母岩风化也能形成 HREE 型风化壳。

6 结论

(1)华南离子吸附型稀土矿床分布广泛,主要产于花岗岩和中酸性火山岩风化壳中,亦产在浅变质岩及灰岩风化壳中。成矿花岗岩类的成岩年龄集中在三个区间:461~384Ma、228~242Ma 和 189~94Ma。HREE 型花岗岩富硅,铈异常显著,轻、重稀土分馏显著。富 Y 的 LREE 型花岗岩 LREE/HREE 比值介于 1~3 之间,风化易形成 HREE 型风化壳,是今后重要的重稀土资源之一。稀土矿物的显著富集是岩浆期后—后期流体交代作用的结果,稀土氟碳酸盐类矿物是最常见的交代矿物,它们为离子吸附型稀土矿床提供了重要的物质来源。

(2)华南稀土矿床中稀土元素分布齐全,发育完整的风化壳剖面中可交换性吸附态稀土呈典型的“弓背式”,但是随着地形地貌差异,曲线呈多种形态。表生过程中酸性淋滤作用是可交换性吸附态稀土元素迁移和富集的动力,黏土矿物是可交换性吸附态稀土元素赋存的载体,风化程度影响稀土元素的次生富集程度,风化程度又受气候、地形地貌等条件的约束。

致谢:感谢审稿专家提出的宝贵意见。本文是中国地质科学院矿产资源所三稀项目组五年的研究成果,五年来得到了袁忠信和杨岳清研究员的长期指导和帮助,年过七旬的杨岳清研究员更是亲自陪同作者考察了变质岩区的离子吸附型稀土矿床,在此深表感谢!野外地质调研中赣南地质调查大队邹新勇主任给予了大力帮助,并提供了珍贵的钻孔样品,中国地质大学(北京)硕士研究生张泳在大量风化壳样品前期处理和电子探针分析测试方面给予了热心帮助,在此一并感谢他们!袁忠信研究员于 2017 年 6 月 7 日 7:31 与世长辞,他为我国稀土、

稀有金属矿床研究作出了卓越贡献!谨以此文怀念袁先生!

References

- Banfield J F, Eggleton R A. 1989. Apatite replacement and rare earth mobilization, fractionation, and fixation during weathering. *Clays Clay Miner.* 37:113~127.
- Bao Zhiwei, Zhao Zhenhua. 2008. Geochemistry of Mineralization with Exchangeable REY in the Weathering Crusts of Granitic Rocks in South China. *Ore Geology Reviews*, 33(3~4): 519~535.
- Braun J J, Pagel M, Herbillon A, Rosin C. 1993. Mobilization and redistribution of REEs and thorium in a syenitic lateritic profile: A mass balance study. *Geochimica et Cosmochim Acta*, 57: 4419~4434.
- Bern C R, Yesavage T, Foley N K. 2017. Ion-adsorption REEs in regolith of the Liberty Hill pluton, South Carolina, USA: An effect of hydrothermal alteration. *Journal of Geochemical Exploration*, 172, 29~40.
- Chen Deqian, Wu Jingshu. 1990. The mineralization mechanism of ion-adsorbed REE deposit. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 8(2):175~179(in Chinese with English abstract).
- Chen Zhicheng, Yu Shoujun, Fu Qunce, Chen Binghui, Zhang Lijie. 1997. Study on the organic metallogenic mechanism of weathering crust REE deposit. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 15(3): 244~251 (in Chinese with English abstract).
- Chi Ru'an, Tian Jun. 2007. Review of weathered crust rare earth ore. *Journal of the Chinese Rare earth Society*, 25(6):641~650 (in Chinese with English abstract).
- Chi Ru'an, Tian Jun, Luo Xianping, Xu Zhigao, He Zhengyan. 2012. The basic research on the weathered crust elution-deposited rare earth ores. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 3(4):1~13(in Chinese with English abstract).
- Du Xiurong, Tang Jianjun. 2005. *Geographic atlas of China*. Beijing: China Map Publishing House(in Chinese).
- Galan E, Fernandez-Caliani J C, Miras A, Aparicio P, Marquez M G. 2007. Residence and fractionation of rare earth elements during kaolinization of alkaline peraluminous granites in NW Spain. *Clay Minerals*, 42:341~352.
- Harlavan Y, Erel Y. 2002. The release of Pb and REE from granitoids by the dissolution of accessory phases. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66:837~848.
- Hill S E, Rosenbaum M S. 1998. Assessing the significant factors in a rock weathering system. *Quarterly Journal of Engineering and Geology*, 31:85~94.
- Hua Renmin, Zhang Wenlan, Gu Shengyan, Chen Peirong. 2007. Comparison between REE granite and W-Sn granite in the Nanling Region, South China, and their mineralizations. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2321~2328 (in Chinese with English abstract).

- Huang Dianhao, Wu Chengyu, Han Jiuzhu. 1988. REE geochemistry and mineralization characteristics of the Zudong and Guanxi granites, Jiangxi Province. *Chinese Journal of Geology*, 4: 311~328 (in Chinese with English abstract).
- Huang Huagu, Hu Qifeng, Cheng Liangkai, Luo Zisheng. 2014. Discovery of a new type of weathering crust ion adsorption type rare-earth deposit in the Heshangtian ore district of Guangdong Province and its significance. *Geology and Exploration*, 50(5): 893~901 (in Chinese with English abstract).
- Ishihara S, Hua Renmin, Hoshino M, Murakami H. 2008. 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. *Resource Geology*, 58(4): 355~372.
- Ma Yingjun, Huo Runke, Xu Zhifang, Zhang Hui, Liu Congqiang. 2004. REE behavior and influence factors during chemical weathering. *Advance in Earth Sciences*, 19(1): 87~94 (in Chinese with English abstract).
- Maulana A, Yonezu K, Watanabe K. 2014. Geochemistry of rare earth elements (REE) in the weathered crusts from the granitic rocks in Sulawesi Island, Indonesia. *Journal of Earth Science*, 25(3): 460~472.
- Nesbitt H W, Yong G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major chemistry of lutites. *Nature*, 299: 715~717.
- Papoutsas A D, Pe-Piper G. 2013. The relationship between REE-Y-Nb-Th minerals and the evolution of an A-type granite, Wentworth Pluton, Nova Scotia. *American Mineralogist*, 98: 444~462.
- Rolland Y, Cox S, Boullier A-M, Pennacchioni G, Mancktelow N. 2003. Rare earth and trace element mobility in mid-crustal shear zones: Insights from the Mont Blanc Massif (Western Alps). *Earth and Planetary Science Letters*, 214: 203~219.
- Ruan Daoyuan, Zhu Yude, Cong Xiandong, Zhou Xiaoqi, Wang Jingbin. 1985. Preliminary study on magma evolution of REE igneous rocks in the east section of Nanling. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 3(4): 1~5 (in Chinese with English abstract).
- Sanematsu K, Murakami H, Watanabe Y, Duangsirigna S, Vilayhack S. 2009. Enrichment of rare earth elements (REE) in granitic rocks and their weathered crusts in central and southern Laos. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 60(11/12): 527~558.
- Sanematsu K, Yoshiaki K, Akira I, Koichiro W, Yasushi W. 2013. Geochemical and mineralogical characteristics of ion-adsorption type REE mineralization in Phuket, Thailand. *Mineralium Deposita*, 48: 437~451.
- Song Yunhua and Shen Lipu. 1982. Discussion on clay mineral occurring in the weathered crust of a certain acid volcanic rock in Jiangxi province and their formation conditions. *Acta Mineralogica Sinica*, (3): 207~212 (in Chinese with English abstract).
- Song Yunhua and Shen Lipu. 1986. REE geochemistry of the weathered crust of acid volcanic rocks—an experimental study. *Geochimica*, (3): 225~234 (in Chinese with English abstract).
- Song Linhao, Chen Chun, Liu Liwen. 1991. Characteristics of the rare earth element minerals from Guposhan granite in Hunan. *Hunan Geology*, 10(1): 43~51 (in Chinese with English abstract).
- Sun Tao. 2006. A new map showing the distribution of granites in South China and its explanatory notes. *Geological Bulletin of China*, 25(3): 332~335 (in Chinese with English abstract).
- Sun Li, Xiao Keyan, Xing Shunwen, Ding Jianhua. 2016. Characteristics and mineral potential of Nanling W-Sn-REE metallogenic belt. *Acta Geologica Sinica*, 90(7): 1589~1597 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jingbin, Ruan Daoyuan. 1989. Evolution and REE concentration of Heling-type REE acidic volcanic rock series. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 7(2): 68~72 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Zhao Zhi, Yu Yang, Zhao Ting, Li Jiang kang, Dai Jingjing, Liu Xinxing. 2013. Progress, problems and research orientation of ion-adsorption type rare earth resources. *Rock and Mineral Analysis*, 32(5): 796~802 (in Chinese with English abstract).
- Wu Chengyu, Huang Dianhao, Guo Zhongxun. 1989. REE geochemistry in the weathering process of granites in Longnan County, Jiangxi Province. *Acta Geologica Sinica*, 63(4): 349~362 (in Chinese with English abstract).
- Wu Chengyu, Huang Dianhao, Bai Ge, Ding Xiaoshi. 1990. Differentiation of rare earth elements and origin of granitic rocks, Nanling Mountain area. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 9(2): 106~116 (in Chinese with English abstract).
- Wu Chengyu, Bai Ge, Huang Dianhao, Zhu Zhengshu. 1992. Characteristics and significance of HREE-rich granitoids of the Nanling mountain area. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, (25): 43~58 (in Chinese with English abstract).
- Wu Chengyu, Lu Hailong, Xu Leiming, Hou Lei. 1993. A preliminary study on modes of occurrence of rare earth elements in the tropical subtropical weathering crust of Nanling region. *Mineral Deposits*, 12(4): 297~306 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yueqing, Hu Chongsheng, Luo Zhanming. 1981. Geological characteristic of mineralization of rare earth deposit of the ion-adsorption type and their prospecting direction. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 2(1): 102~118 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yueqing, Zhao Zhi, Wang Chenghui. 2016. Mineralization and constraint of the Ion-adsorption type rare earth in weathering crust. *Geological Review*, 62(B11): 429~431 (in Chinese).
- Yu Jinghai, Zhao Lei. 2007. Wuping granite. In: Zhou eds. *The*

- genesis of the Mesozoic granite and the evolution trend of the lithosphere-asthenosphere system in Nanling. Being: The Science Publishing Company, 627~644.
- Zhang Zuhai. 1990. A study on weathering crust ion-adsorption type REE deposits, south China. Contribution to Geology and Mineral Resource Research, 5(1): 57~71 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhi, Wang Denghong, Chen Zhenyu, Chen Zhenghui, Zheng Guodong, Liu Xinxing. 2014a. Zircon U-Pb age, endogenic mineralization and petrogenesis of rare earth ore-bearing granite in Longnan, Jiangxi Province. Acta Geoscientia Sinica, 35(6): 719~725 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhi, Wang Denghong, Chen Zhenyu, GuoNaxin, Liu Xinxing, He Hanhan. 2014b. Metallogenic specialization of rare earth mineralized igneous rocks in the Eastern Nanling Region. Geotectonica et Metallogenia, 38(2): 255~263 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhi, Wang Denghong, Liu Xinxing, Zhang Qingwei, Yao Ming, GuWen'ao. 2015. Geochemical features of rare earth elements in different weathering stage of the Guangxi Huashan granite and its influence factors. Chinese Rare Earths, 36(3): 14~20 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhi, Wang Denghong, Zou Xinyong, Chen Zhenyu. 2016. Metallogenic model of the Getengzui Ion-adsorption type rare earth deposit in Ningdu Country of Jiangxi Provinve. Geological Review, 62(B11): 421~422 (in Chinese).
- ### 参 考 文 献
- 陈德潜, 吴静淑. 1990. 离子吸附型稀土矿床的成矿机制. 中国稀土学报, 8(2): 175~179.
- 陈志澄, 俞爱璠, 符群策, 陈炳辉, 张丽洁. 1997. 风化壳稀土矿有机成矿机理研究. 中国稀土学报, 15(3): 244~251.
- 池汝安, 田君, 罗仙平, 徐志高, 何正艳. 2012. 风化壳淋积型稀土矿的基础研究. 有色金属科学与工程, 3(4): 1~13.
- 池汝安, 田君. 2007. 风化壳淋积型稀土矿评述. 中国稀土学报, 25(6): 641~650.
- 华仁民, 张文兰, 顾晟彦, 陈培荣. 2007. 南岭稀土花岗岩、钨锡花岗岩及其成矿作用的对比. 岩石学报, 23(10): 2321~2328.
- 黄典豪, 吴澄宇, 韩久竹. 1988. 江西足洞和关西花岗岩的稀土元素地球化学及矿化特征. 地质学报, 4: 311~328.
- 黄华谷, 胡启锋, 程亮开, 罗子声. 2014. 广东和尚头田矿区新类型风化壳离子吸附型稀土矿的发现及意义. 地质与勘探, 50(5): 893~901.
- 刘明光. 2009. 中国自然地理图集第3版. 北京: 中国地图出版社.
- 马英军, 霍润科, 徐志方, 张辉, 刘丛强. 2004. 化学风化作用中的稀土元素行为及其影响因素. 地球科学进展, 19(1): 87~94.
- 阮道源, 朱余德, 从献东, 周小琪, 王京彬. 1985. 南岭东段稀土岩浆岩岩浆演化初探. 中国稀土学报, 3(4): 1~5.
- 宋林豪, 陈春, 刘力文. 1991. 湖南姑婆山花岗岩稀土矿物特征. 华南地质, 10(1): 43~51.
- 宋云华, 沈丽璞. 1982. 江西某酸性火山岩风化壳中黏土矿物及其形成条件的讨论. 矿物学报, (3): 207~213.
- 宋云华, 沈丽璞. 1986. 酸性火山岩类风化壳中稀土元素的地球化学实验研究. 地球化学, (3): 225~234.
- 孙莉, 肖克炎, 邢树文, 丁建华. 2016. 南岭钨锡稀土成矿带资源特征与潜力分析. 地质学报, 90(7): 1589~1597.
- 孙涛. 2006. 新编华南花岗岩分布图及其说明. 地质通报, 25(3): 332~335.
- 王登红, 赵芝, 于扬, 赵汀, 李建康, 代晶晶, 刘新星, 何哈哈. 2013. 离子吸附型稀土资源研究进展、存在问题及今后研究方向. 岩矿测试, 32(5): 792~802.
- 王京彬, 阮道源. 1989. 河岭式酸性稀土火山岩系的演化特征与稀土富集. 中国稀土学报, 7(2): 68~72.
- 吴澄宇, 白鸽, 黄典豪, 朱正书. 1992. 南岭富重稀土花岗岩类的特征和意义. 中国地质科学院院报, (25)43~58.
- 吴澄宇, 黄典豪, 白鸽, 丁孝石. 1990. 南岭花岗岩类起源与稀土元素的分馏. 岩石矿物学杂志, 6(2): 106~116.
- 吴澄宇, 黄典豪, 郭中勋. 1989. 江西龙南地区花岗岩风化壳中稀土元素的地球化学研究. 地质学报, 4: 349~362.
- 吴澄宇, 卢海龙, 徐磊明, 侯磊. 1993. 南岭热带—亚热带风化壳中稀土元素赋存形式的初步研究. 矿床地质, 12(4): 297~306.
- 杨岳清, 胡淙声, 罗展明. 1981. 离子吸附型稀土矿床成矿地质特征及找矿方向. 中国地质科学院院报矿床地质研究所分刊, 2(1): 102~118.
- 杨岳清, 赵芝, 王成辉. 2016. 风化壳离子吸附型稀土成矿作用及制约条件. 地质论评, 62(B11): 429~431.
- 于津海, 赵蕾. 2007. 武平岩体. 周新民主编. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化. 北京: 科学出版社, 627~644.
- 袁忠信, 李建康, 王登红, 郑国栋, 娄德波, 陈郑辉, 赵芝, 于扬. 2012. 中国稀土矿床成矿规律. 北京, 地质出版社, 1~116.
- 张祖海. 1990. 华南风化壳离子吸附型稀土矿床. 地质找矿论, 5(1): 57~71.
- 赵芝, 王登红, 陈振宇, 陈郑辉, 郑国栋, 刘新星. 2014. 江西龙南稀土花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、内生矿化特征及成因讨论. 地球学报, 35(6): 719~725.
- 赵芝, 王登红, 陈振宇, 郭娜欣, 刘新星, 何哈哈. 2014. 南岭东段与稀土矿有关岩浆岩的成矿专属性特征. 大地构造与成矿学, 38(2): 255~263.
- 赵芝, 王登红, 刘新星, 张青伟, 姚明, 顾文鳌. 2015. 广西花山岩体不同风化阶段稀土元素特征及影响因素. 稀土, 36(3): 14~20.
- 赵芝, 王登红, 邹新勇, 陈振宇. 2016. 江西宁都葛藤嘴离子吸附型稀土矿成矿模式. 地质论评, 62(增刊) 2(1): 421~422.

**Progress of Research on Metallogenic Regularity of Ion-adsorption
Type REE Deposit in the Nanling Range**

ZHAO Zhi, WANG Denghong, CHEN Zhenghui, CHEN Zhenyu

*Ministry of Land and Resources (MLR) Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment,
Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037, China*

Abstract

Ion-adsorption type REE deposit, which produces the majority of the world's heavy rare earth resources, is one of preponderant mineral resources in China. Although many significant research projects on the metallogenic regularity of this type deposits have been carried out in 1980s, a lot of fundamental problems still need to be investigated and solved. We have completed a comprehensive geology study on 52 Ion-adsorption type REE deposit in southern China from 2011 to 2015. This paper reports the research progress of metallogenic regularity of the REE deposits. Ion-adsorption type REE deposit are widely distributed in south China, particularly in the Nanling Mountains. They have also been identified in Vietnam, Laos, Thailand and the United States in recent years. Known the deposits of southern China occur in the weathering profiles of granitic rocks, acidic volcanic rocks, metamorphic rocks and limestone. The deposits in granite weathering showing high-grade large-scale are most important. The REE mineralized granitic rocks were formed in the Paleozoic and Mesozoic with the zircon age ranges of 461~384Ma, 228~242Ma and 189~94Ma. The HREE-rich parent rocks are more enriched in the SiO₂ and Rb, depleted in Ti, Zr, Hf, Nb, Ta, Ba and Sr, with the significant Eu anomaly, than the LREE-rich parent rocks, showing they formed from a highly fractionated magma. Remarkably, part of LREE-rich parent rocks with higher Y and low LREE/HREE ratio (1~3) tend to formed HREE orebody. REE minerals are common in the parent rocks with complex origins, which can be divided into magmatic (eg, allanite, monazite, xenotime, xenotime), hydrothermal (eg, bastnaesite, bastnaesite(Y), synchysite- (Y)), and hypergenic minerals (eg, rhabdophane-(Ce), rhabdophane-(La)). And the significant enrichment of REE resulted from deuteric activity. The total REE contents in a well-developed weathering profile that composed of the lateritic horizon (A), the weathered horizon (B) and the weathering front (C) from surface downwards are enriched in the B horizon, and are relatively low in A horizon and C horizon. Generally, LREE are enriched in upper part in B horizon while HREE are enriched in lower part in early weathering stage, HREE and LREE are all enriched in lower part in late weathering stage. The relationship of the chemical index of alteration (CIA) and the total REE content in the weathering samples shows when CIA<85%, CIA and $\sum$ REE have a positive correlation, when 85%<CIA<100%, CIA and $\sum$ REE have a negative correlation. Relatively soluble REE minerals are a major sources of REE in the Ion-adsorption type REE deposit, acidic leaching is attributed to the migration and concentration of REE in clay minerals, and the content of ion-adsorption REE is largely depend on the weathering degree during the weathering-leaching process.

Key words: ion-adsorption type REE deposit; granite; weathering crust; rare earth element (REE); REE minerals; the Nanling Range