

# 风化壳离子吸附型稀土矿成矿作用及制约条件\*

杨岳清, 赵芝, 王成辉

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

**关键词:** 离子吸附型; 稀土; 风化壳; 成矿作用; 制约条件

风化壳离子吸附型稀土矿床是我国亚热带地区所特有的稀土资源, 它的发现是对传统矿产形成条件认识的一次革命, 是对稀土资源开发利用做出的重大贡献, 其采、选、冶的优越性远超越了其他稀土矿床, 它产品曾一度占据了世界稀土市场的绝对地位。该类矿床发现 40 多年来, 不少地质工作者对矿床形成过程, 稀土元素在矿床中的分布富集规律及控矿条件做了很多探讨, 但至今积累的系统成果还是较少, 作者拟在前人研究成果基础上, 结合目前工作对离子吸附型稀土矿床中稀土的成矿作用及制约因素做一较系统探讨。

## 1 母岩中稀土元素的分布对其后风化壳中的成矿作用有重要影响

对我国众多离子吸附型稀土矿床中稀土品位和母岩中稀土含量对比表明, 母岩中稀土氧化物总量一般在 0.02% 以上。从母岩到风化壳中稀土元素的次生富集, 虽然亚热带气候环境中天水和地下水对风化壳中稀土元素的淋积和粘土矿物的吸附作用有重要关系, 但母岩中稀土含量则仍然是基础, 偏低难以使稀土在上述表生作用中得到必要的富集。

在火成岩类中, 稀土氧化物含量能达到 0.02% 以上者, 主要是中酸性岩类, 比如花岗闪长岩、二长花岗岩, 正长花岗岩, 碱长花岗岩、花岗斑岩以及和上述侵入岩化学成分类似的火山岩类, 则是在亚热带区域中形成离子吸附型稀土矿床有利岩类。

目前在化学成分上和上述岩类类似的变质岩系风化壳中也发现了离子吸附型稀土矿床。

## 2 母岩中稀土元素的赋存特征

稀土元素的地球化学学习性决定了它在自然界多以离子化合物形式赋存在矿物晶格中, 并组成各种含氧酸盐。在华南风化壳离子吸附型稀土矿床母岩中, 目前已发现的稀土矿物种类达 20 余种, 它们总体可分成 4 类: ①磷酸盐: 独居石, 磷钇矿; ②氧化物: 褐钇铌矿, 黄钇钽矿, 褐钽铌矿, 黑稀金矿-复稀金矿, 易解石, 铈烧绿石, 铈钇矿, 钽钇矿; ③硅酸盐类矿物: 硅钽钇矿, 褐帘石, 钇榴石, 黑稀土矿; ④氟碳酸盐矿物: 氟碳铈矿, 氟碳钙钇矿, 菱氟钇钙矿, 新奇钙铈矿-新奇钙钇矿。另外还有铈钇矿和钇萤石等, 当然具体到某一矿床的母岩时, 所含的稀土矿物仅是其中的一部分。对华南诸多离子吸附型矿床的研究表明, 母岩中稀土氟碳酸盐类矿物发育时, 最有利于离子吸附性稀土矿床的形成。稀土磷酸盐矿物发育时一般不利。

稀土元素除了组成稀土矿物外, 同时还以类质同象形式参加到母岩的其他矿物中, 例如, 石英, 长石, 云母等造岩矿物和锆石、绿帘石、榴石, 磷灰石等副矿物中。在造岩矿物中含量最高的是黑云母, 最高可达 4000  $\mu\text{g/g}$ , 长石中以斜长石含量较高, 可达 95  $\mu\text{g/g}$ , 钾长石中的含量不足斜长石的 1/5, 石英中含量多数不足 1  $\mu\text{g/g}$ 。

稀土矿物中的稀土总量基本占到全岩的 70%~80%, 造岩矿物中稀土含量约占全岩的 20%~28%, 特别是斜长石在中酸性岩类中所占比例较大, 它对全岩稀土的贡献是不可忽视的。

\*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”, 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: 2016-07-10; 改回日期: 2016-09-20; 责任编辑: 刘志强。 Doi: 10.16509/j.georeview.2016.s1.208 作者简介: 杨岳清, 男, 1941 年生。研究员, 主要从事矿床地质、矿物和地球化学研究工作。Email: yangyueqing0@sina.com。

### 3 母岩的化学风化作用和风化壳的形成

在我国华南地区花岗岩类的风化壳,包括离子吸附型稀土矿床是典型的化学风化作用的产物,即在亚热带气候条件下,原岩在水溶液、空气和生物等影响下化学和矿物成分发生明显的变化,其主要方式有水化、水解、溶解、碳酸盐化、氧化和生物化学风化等作用。风化壳的化学、矿物组成与结构构造和母岩相比已发生了巨大变化,风化壳在几十米的范围内就可表现出很大差异。从下到上通常可分成微风化层;半风化层;全风化层;表土层。厚度较大的主要是全风化层。

微风化层:岩石已显示碎裂特征,沿微裂隙长石有粘土化,但总体还保留原岩结构。

半风化层:原岩的结构大部分已消失,呈现出碎裂特征,粘土矿物可达 10%~20%,斜长石呈少量残留物,钾长石碎屑多于斜长石,石英相对增多。

全风化层:原岩结构已不存在,岩石的松散程度明显,粘土矿物数量可达 40%~50%,斜长石已不存在,偶见少量钾长石碎屑。

表土层:黑褐-深黄褐,含大量植物根系和有机质,主要由针铁矿、粘土矿物和石英碎屑组成。

风化壳的化学成分与母岩相比,从下到上: $K_2O$ 、 $Na_2O$ 、 $CaO$  急剧减少; $Si_2O_5$ 、 $FeO$ 、 $MnO$ 、 $MgO$ 、 $P_2O_5$  变化不大; $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$ 、 $TiO_2$  有明显增高。

风化壳的矿物组成较母岩复杂,但核心矿物则是粘土矿物,它们是由母岩中长石和云母类矿物蚀变而来。长石蚀变的途径主要是 $\rightarrow$ 蒙脱石+伊利石 $\rightarrow$ 高岭石+伊利石 $\rightarrow$ 三水铝石,黑云母蚀变的途径是 $\rightarrow$ 蛭石+绿泥石 $\rightarrow$ 伊利石/绿泥石间层矿物+高岭石。但在不同风化壳中,因介质条件的差异,长石,云母蚀变演变途径不会遵循某一固定的模式。总体看,从风化壳底部到顶部,粘土矿物数量由少到多,粒度由粗到细,矿物种类由多趋少,在全风化层中主要是高岭石和伊利石,在一些矿床中可出现蒙脱石和三水铝石。值得关注的是粘土矿物的结构并非形成时就很完整,也是在风化壳从下到上的发育过程中趋于完整的,完整的结构对于发挥它的功能,特别是吸附和交换功能则有重要影响。

粘土矿物的晶体结构是沿 C 轴堆叠而成,结构层有 2 种,1:1 型和 2:1 型,最常见的是后者。它们有许多独特的性能,其中吸附和交换性能目前广泛被利用。粘土矿物的表面可分为基面和边缘面,两个面均可和外界发生吸附、交换作用,但基面的功能更强。

### 4 风化壳中稀土元素的分布富集规律

稀土元素在离子吸附型矿床中基本以阳离子状态存在,但它从母岩的稀土矿物及造岩矿物中释放出来还有一个过程。根据对风化壳底部微风化层及半风化层下部岩石矿物组成的研究,在这些部位稀土矿物仍然是较多的,但它们与母岩中的稀土矿物已产生较大差异,母岩中的稀土矿物基本是不含水的,即使有也基本是以“OH”形式参与矿物的晶格中,但在微风化层中明显是以吸附水形式出现。目前已发现有水磷钨矿 $[(La,Ce),PO_4 \cdot n(H_2O)]$ 、水磷铈矿 $[(Ce,La),PO_4 \cdot n(H_2O)]$ 、水磷钇矿 $(YPO_4 \cdot 2H_2O)$ 、水褐帘石 $(Ce,Ca)_2(Al,Fe)_3(SiO_4)_3(OH) \cdot nH_2O$ 、水褐钇铈矿 $(RENbO_4 \cdot nH_2O)$ 、水铈榴石 $(CaTiSiO_5 \cdot nH_2O)$ 等。在这些矿物中稀土元素含量明显低于相应无水的矿物,前人认为在表生环境中非常稳定的独居石、磷钇矿,看来也存在分解的可能。在全风化层,上述矿物基本不见,表明它们已彻底分解。长石、云母等造岩矿物中以类质同像存在的稀土元素也随着载体矿物的解离也转入到风化壳中。

在风化壳中稀土元素以  $RE^{3+}$  和  $Al^{3+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Fe^{3+}$  等离子以水合物或羟基水合物状态游离于微裂隙水中,因此在离子吸附型稀土矿床的径流中,稀土元素的含量明显高于矿床之外的水系,其中部分稀土元素也会随地表或地下水而流失,但保存于风化壳水系中的稀土元素随潜水向下迁移中,在全风化层则可被层状结构的粘土矿物所吸附,当含稀土潜水再向下渗透到半风化层时,一方面粘土矿物的数量减少了,另外,粘土矿物的硅铝酸盐层状结构并没有发育完整,影响了粘土矿物对稀土离子的吸附,所以,半风化层的中稀土的含量总体普遍低于全风化层。

池汝安等(1993,2012)通过量子化学模拟计算, $RE^{3+}$ 之所以能在  $Al^{3+}$ 、 $Ca^{2+}$  等大量存在的风

化壳水系中被粘土矿物所吸附, 这是由于它和粘土有更大的亲合力, 其顺序是  $RE^{3+} > Al^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > NH_4^+ > Na^+$ 。而对于稀土元素来说, 吸附力顺序是  $Sc^{3+} > La^{3+} > Ce^{3+} > Pr^{3+} > Nd^{3+} > Sm^{3+} > Eu^{3+} > Gd^{3+} > Tb^{3+} > Dy^{3+} > Ho^{3+} > Y^{3+} > Er^{3+} > Tm^{3+} > Yb^{3+} > Lu^{3+}$ 。但由于不同稀土离子之间的相互作用能差异较小, 所以粘土矿物对不同稀土离子的选择性并不大。所以风化壳离子吸附矿床中稀土元素组成比例对原岩有较强的继承性。

### 参 考 文 献 / References

池汝安, 王淀佐. 1993. 量子化学计算粘土矿物的吸附性能和富集稀

土的研究. 中国稀土学报, 11 (3): 199~203.

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.

### **YANG Yueqing, ZHAO Zhi, WANG Chenghui: Mineralization and Constraint of the Ion Absorption Type Rare Earth in Weathering Crust**

**Keywords: ion absorption type; rare earth;  
weathering crust; mineralization; constraint**