

江西赣南风化淋滤型稀土矿床中的粘土矿物研究

范晨子¹, 张 誉², 陈郑辉³, 朱 云¹, 樊兴涛¹

(1. 国家地质实验测试中心, 北京 100037; 2. 中国地质大学 材料与化学学院, 湖北 武汉 430074;
3. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要: 对江西赣南6个地区风化淋滤型稀土矿中全风化层的粘土矿物进行了研究, 为进一步了解粘土矿物对该类型稀土矿中稀土元素分异的影响奠定了基础。X射线衍射自然定向片、甲酰胺片、饱和乙二醇片和加热片、红外光谱及扫描电镜观察结果表明该区粘土矿物以片状高岭石和针管状7 Å埃洛石为主, 其中坳背塘、长坑屋、上堡、杨村样品主体为高岭石, 足洞样品中发育大量埃洛石, 而石排样品中高岭石与埃洛石比例相当。电感耦合等离子体质谱分析表明稀土元素在粘土矿物中大量富集, 其稀土元素配分不仅受到原岩的影响, 而且受到粘土矿物本身性质的影响。Ce元素在足洞和石排样品的粘土矿物中表现出正异常, 而在其他样品粘土矿物中表现为负异常, 可能与其中发育的埃洛石密切相关。Ce元素可能以方铈矿胶膜的形式包裹在针状埃洛石中, 和/或以离子形式被选择性吸附于埃洛石表面。

关键词: 江西赣南; 稀土; 高岭石; 埃洛石; Ce异常

中图分类号: P579; P618.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2015)06-0803-08

The study of clay minerals from weathered crust rare earth ores in southern Jiangxi Province

FAN Chen-zi¹, ZHANG Yu², CHEN Zheng-hui³, ZHU Yun¹ and FAN Xing-tao¹

(1. National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China; 2. Faculty of Materials Science and Chemistry, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The clay minerals from the weathered crust rare earth ores of six areas in Jiangxi Province were studied for better understanding the effects of clay minerals on the rare earth fraction. The powder X-ray diffraction (XRD), infrared spectroscopy (IR) and scanning electron microscopy (SEM) results show that platy kaolinite and tubular 7 Å halloysite are predominant constitutions in clays. Kaolinite and 7 Å halloysite are dominant in ABT, CKW, SB, YC samples and ZD sample respectively, and both of them are abundant in SP sample. Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) analysis indicates that rare earth elements tend to be concentrated in clay minerals. The rare earth distribution patterns are influenced by both the original rock and the properties of clay minerals. A positive Ce-anomaly has been found in ZD and SP samples compared with a negative Ce-anomaly in other samples, which might be correlated to the well developed halloysite in these two samples. It is possible for Ce to be present as cerianite which is coating halloysite needles and/or be selectively absorbed by halloysite which has higher specific surface area and cation exchange capacity than kaolinite.

Key words: Jiangxi; rare earth; kaolinite; halloysite; Ce-anomaly

收稿日期: 2015-04-13; 修订日期: 2015-10-12

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41302030); 中国地质大调查项目(12120113015100); 科技支撑项目(2011BAB04B07); 深部探测与实验研究项目(201311165)

作者简介: 范晨子(1982-), 女, 助理研究员, 从事矿物学科研工作, E-mail: czfan2013@163.com

风化淋滤型稀土矿床是我国重要的稀土矿床种类,主要分布在江西、福建、广东、云南、湖南、广西、浙江等地,其中赣南地区是我国风化淋滤型稀土矿的矿集区(池汝安等, 2007; Chakhmouradian and Wall, 2012)。富含稀土矿物和副矿物的花岗岩原岩为稀土的来源提供了充分条件。原岩在温暖湿润的环境中经风化作用解离形成的粘土矿物成为了这类矿床最主要的稀土元素的载体(Kynicky *et al.*, 2012)。

粘土矿物的含量约占风化淋滤型稀土矿石的40%~70%,其形态和成分受母岩的岩性以及形成时的风化环境所控制,主要的种类有埃洛石、伊利石、高岭石、蒙脱石等。风化壳中的粘土矿物分布具有一定的规律性,腐殖层主要是高岭石和三水铝石;全风化层也是稀土富集最重要的风化壳剖面单元,以埃洛石、高岭石、蒙脱石为主;半风化层则含有较高比例的高岭石(杨志明, 1987; 池汝安等, 2012)。

绝大多数稀土以离子相的形式存在并以羟基水合或简单水合的形式吸附在粘土矿物上。粘土矿物有两种重要的吸附模式:层间的阳离子交换和层断面余键的化学吸附,高电荷/半径比值的稀土离子被优先选择性吸附,并在不断吸-脱附过程中分馏富集在粘土矿物上。不同粘土组分对于稀土元素的吸附能力有所差异,通常认为较多层间取代结构活性中心位(蒙脱石>埃洛石>高岭石)的粘土矿物吸附能力更强,但是这些粘土矿物对于不同稀土离子的吸附能力大小尚未有效证实(Bau, 1991; 池汝安等, 2012)。此外,风化淋滤型稀土矿的稀土配分具有明显的铈亏、富铊、分馏、钆断效应,尽管 Cullers 等(1975)有报道认为美国 Oklahoma 和 Kansas 页岩稀土含量的差异、铊异常是由于源区风化过程而不是粘土矿物组分的不同导致的,但是粘土矿物组分的变化是否为风化淋滤型稀土矿床中稀土分异的原因之一尚不明确(Cullers *et al.*, 1975; 池汝安等, 2012; 王登红等, 2013)。

目前对于我国风化淋滤型稀土矿床中粘土矿物学的系统研究较少,仅有江西龙南等区域风化壳粘土矿物的少量报道(宋云华等, 1982; 杨志明, 1987),并且对于粘土矿物的提取方法以及鉴定尚存在一些问题,比如区别 7 Å 埃洛石和高岭石最常用的甲酰胺柱撑 X 射线衍射方法对于自然界中有些不含水的埃洛石事实上是没有柱撑效果的

(Churchman *et al.*, 1984; Joussein *et al.*, 2005)。因此本文选择了江西赣南地区多个主要的稀土矿区全风化带的矿石样品进行了系统的粘土矿物组成的分析,并且探讨了与稀土富集的关系,为进一步了解粘土矿物对风化淋滤型稀土矿中稀土分异的影响奠定基础。

1 研究方法

1.1 地质概况及样品采集

赣南地区处于后加里东隆起区内,经历了加里东、海西-印支和燕山等多期构造运动,呈现出在东西向基底断裂构造基础上叠加北东向断裂构造的棋盘格式构造形迹。每一期构造运动都伴随有侵入岩浆活动,其中以燕山期最为强烈,岩体出露众多,岩性以酸性花岗岩类为主,稀土矿床多产于大基岩边部的舌状突出部位或复式岩体的补充侵入岩体风化壳中,呈现出沿北东向和东西向带状分布的规律(张恋等, 2015)。

本次实验采集了江西赣南 6 个地区全风化层的样品,分别为赣县吉埠镇上堡村(SB)、兴国县杨村(YC)、寻乌县石排村(SP)、定南县坳背塘(ABT)、定南县长坑屋(CKW)、龙南县足洞(ZD)的风化淋滤型稀土矿石。除龙南足洞为重稀土矿石之外,其余均为以轻稀土为主的矿石。

1.2 实验方法

粘土矿物的提取根据斯托克斯法则采用自然沉降法,分离上部 $< 2 \mu\text{m}$ 的粘土颗粒悬液,并将下部沉降的样品留用。将 40 mg 干样放入 10 mL 试管中,加入 0.7 mL 蒸馏水,搅匀并用超声充分分散后滴在载玻片上,制作自然风干定向片。用乙二醇蒸汽在 60°C 条件下将自然定向片恒温 9 h,冷却至室温,制作饱和乙二醇片。在 550°C 条件下将乙二醇饱和片恒温 2 h,冷却后制作加热片。采用喷壶将分析纯甲酰胺均匀喷到自然定向片上,饱和 20 min 后制作甲酰胺柱撑片,并直接上 X 射线衍射仪分析。

粘土矿物物相采用 RIGAKU-RA 型 X 射线衍射仪和 FTIR-650 型红外分光光谱仪进行分析。粘土矿物形貌采用 FEI Quanta 650 FEG 型扫描电子显微镜和 JEOL JEM 2010 型透射电子显微镜观察。稀土元素的含量采用密封溶样电感耦合等离子体质谱法测定。

2 结果与讨论

2.1 粘土矿物种属的判定

2.1.1 X 射线衍射分析

X 射线衍射分析结果(图 1)表明上述 6 个地区全风化层的稀土矿石中粘土矿物以埃洛石和高岭石

为主,二者的特征衍射峰集中为 7.30~7.45 Å、4.5~4.6 Å、3.58~3.60 Å 及 3.32~3.37 Å,并且在饱和乙二醇片中峰无明显变化,550℃ 加热后晶格被破坏,峰消失。样品中 7 Å 附近的衍射峰比高岭土标准卡片的峰(7.10~7.18 Å)偏大,反应了样品中可能含有一定的 7 Å 埃洛石。7 Å 埃洛石因其管状晶形、高度无序、小的晶粒以及层间的水合状态使得其

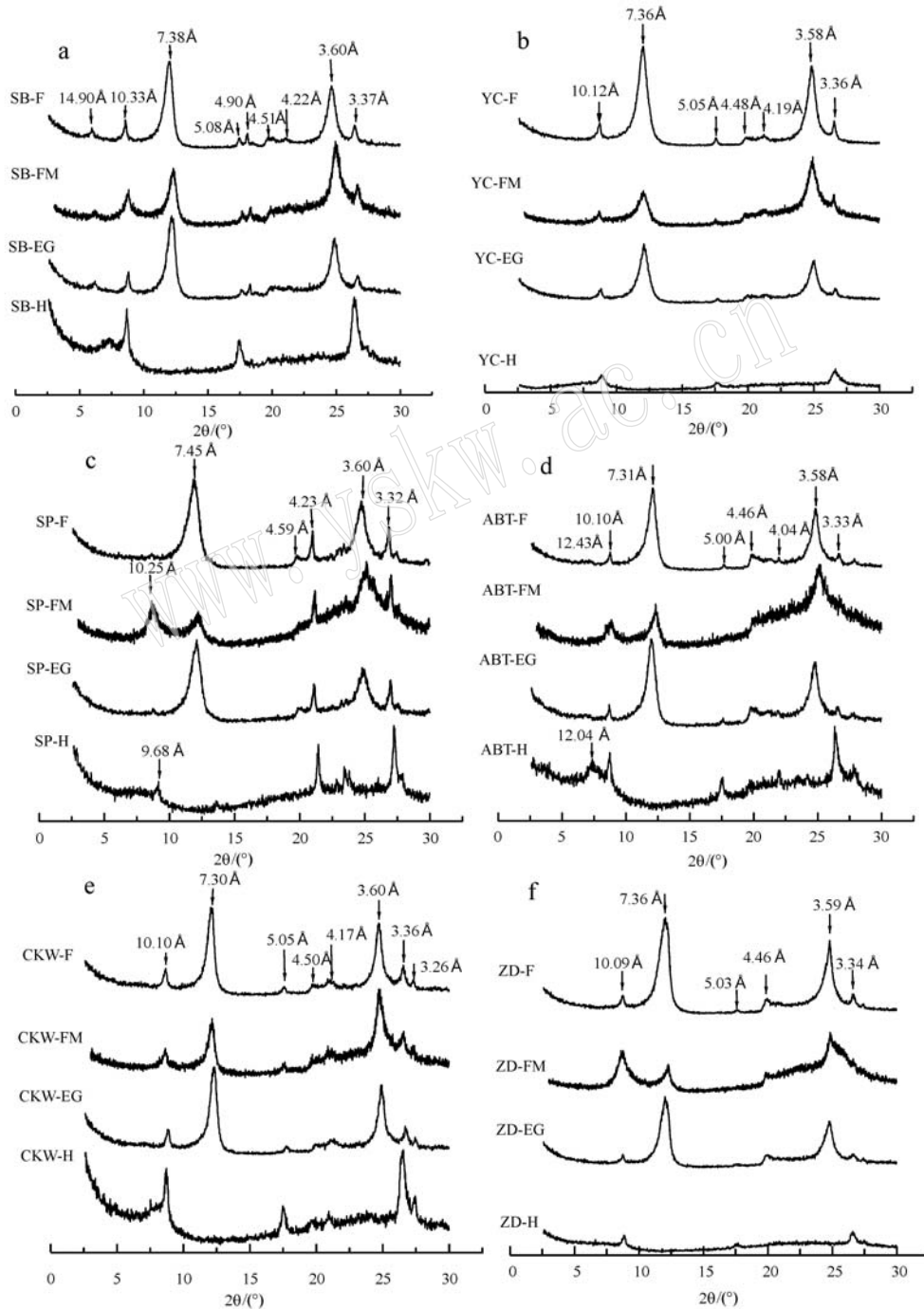


图 1 赣南稀土矿石中粘土矿物的自然定向片(F)、甲酰胺片(FM)、饱和乙二醇片(EG)、加热片(H)的 X 射线衍射图

Fig. 1 X ray diffraction patterns of clay minerals from rare earth deposits in Jiangxi

通常具有位于 $7.2 \sim 7.6 \text{ \AA}$ 的宽、弱衍射峰 (Brindley, 1980)。同时本文采用了甲酰胺柱撑实验来进一步区分 7 \AA 埃洛石和高岭石。由图 1 可见, SP 和 ZD 两个样品 10 \AA 峰出现明显增强, 7 \AA 峰显著减弱, 说明甲酰胺进入了 7 \AA 埃洛石的层内形成了夹层复合体, 继而使得埃洛石的 (001) 晶层间距膨胀。尽管其他样品的 7 \AA 峰也有一定程度的减弱, 但是 10 \AA 未见明显增强, 可能是由于样品中 7 \AA 埃洛石含量较低, 或是甲酰胺对这些不含水的埃洛石无柱撑效果导致的。 10 \AA 埃洛石在自然状态下十分不稳定, 容易脱水转化为 7 \AA 埃洛石, 因此自然定向片中 10 \AA 及 5 \AA 衍射峰更可能对应的是伊利石和/或白云母的衍射峰, 二者在饱和乙二醇片以及加热片中均无明显变化。此外, 本文采用饱和乙二醇柱撑实验以区分 14 \AA 绿泥石和蒙脱石。SB 样品中 14 \AA 的峰无明显变化, 并未向 17 \AA 附近偏移, 故而 SB 样品中还含有少量 14 \AA 的绿泥石。

提取粘土矿物后沉降的稀土矿石样品中除了部分未提取完全的高岭石、埃洛石、云母、伊利石等粘土矿物之外, 主要是以石英、微斜长石、钠长石、正长石为主 (图 2)。

2.1.2 红外光谱分析

红外光谱分析表明赣南稀土矿石中粘土矿物主要是高岭石与埃洛石 (图 3a), 这与 X 射线衍射结果基本一致。高岭石与埃洛石在中低频区有较为相似的红外吸收谱带, 在中频区 $1637 \sim 1645 \text{ cm}^{-1}$ 波数对应着吸附水的弯曲振动带, $1005 \sim 1032 \text{ cm}^{-1}$ 波数对应着 Si—O 键的伸缩振动带, $907 \sim 912 \text{ cm}^{-1}$ 波数对应着 OH 的弯曲振动带; 低频区出现了 694 、 754 、 796 cm^{-1} 波数附近的 OH—弯曲振动带以及 428 、 467 、 534 cm^{-1} 波数附近的 Si—O 键的弯曲振动带。然而有序高岭石与埃洛石在高频区 $3620 \sim 3695 \text{ cm}^{-1}$ 波数附近的 OH 伸缩振动带存在着一定的差别。有序高岭石具有 3700 、 3670 、 3650 和 3200 cm^{-1} 4 个吸收带, 而无序高岭石和埃洛石只有位于 3695 cm^{-1} 和 3620 cm^{-1} 波数附近 2 个 Al_2OH 伸缩振动带 (Farmer, 1998; Beauvais and Bertaux, 2002)。在本实验 6 组样品中, ABT、CKW、SB、YC 样品可以明显观察到除了 3695 cm^{-1} 和 3620 cm^{-1} 之外, 还有位于 3670 cm^{-1} 和 3650 cm^{-1} 两组较弱的吸收带; 这两组弱峰在 SP 样品中可以观察到, 但是较前 4 组样品不明显, 而在 ZD 样品中基本消失。说明了 ABT、CKW、SB、YC 样品以有序高岭石为主,

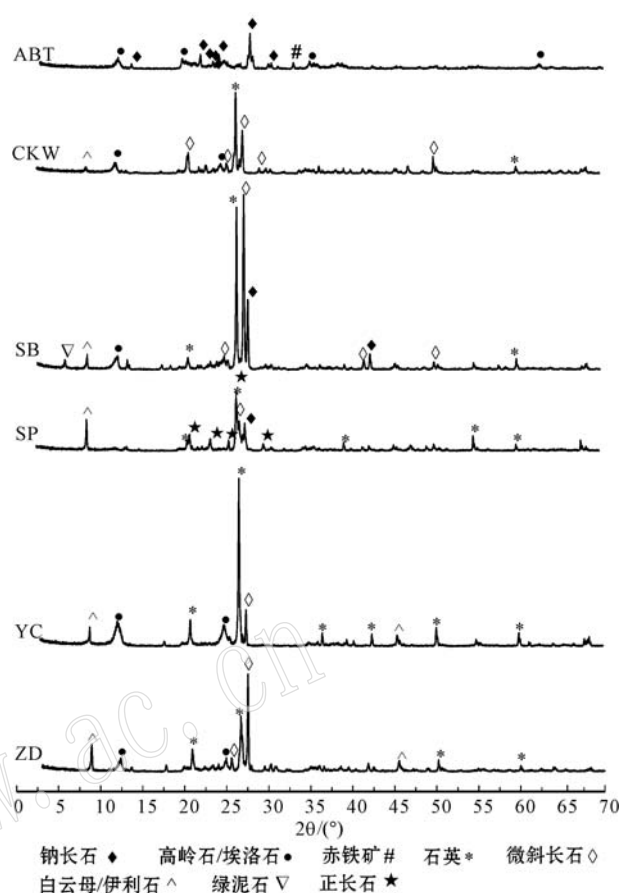


图 2 赣南稀土矿石中提取粘土矿物后残余样品的 X 射线衍射图

Fig. 2 X ray diffraction patterns of the residua after separation of clay minerals

SP 和 ZD 样品中存在更多的埃洛石或无序高岭石。ABT、CKW、SB、YC 样品在 $1000 \sim 1030 \text{ cm}^{-1}$ 波数附近具有 1005 cm^{-1} 和 1030 cm^{-1} 两个峰, 而 SP 和 ZD 样品只有位于 1030 cm^{-1} 附近的 1 个峰, 也有可能是高岭石与埃洛石的 Si—O 键伸缩振动带存在一定区别导致的。此外, ABT 样品在 2360 cm^{-1} 波数处的弱峰对应着 C=O 的振动, 可能为空气中二氧化碳的干扰峰。

2.1.3 扫描电镜观察

从扫描电镜图像 (图 4) 中可以观察到在 ZD 样品中发育有大量的短柱状、管状埃洛石; CKW、SB、YC 样品中以细小片状的高岭石为主, ABT 样品中具有叠层片状的高岭石, 偶见呈针管状的埃洛石。SP 样品中则具有比例相当的片状高岭石与管状埃洛石共生在一起。扫描电镜下观察到的结果与 X 射线衍射以及红外吸收光谱的结果基本吻合。

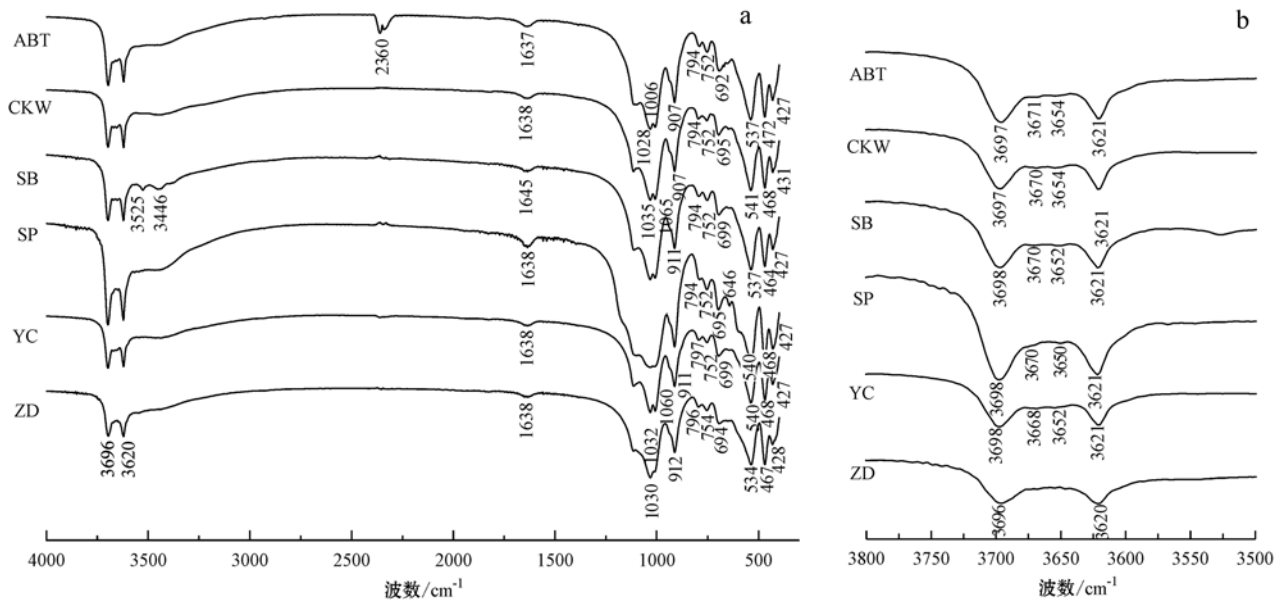


图 3 赣南稀土矿石中粘土矿物的 KBr 红外光谱分析
 Fig. 3 IR analyses of clay minerals from rare earth deposits in Jiangxi

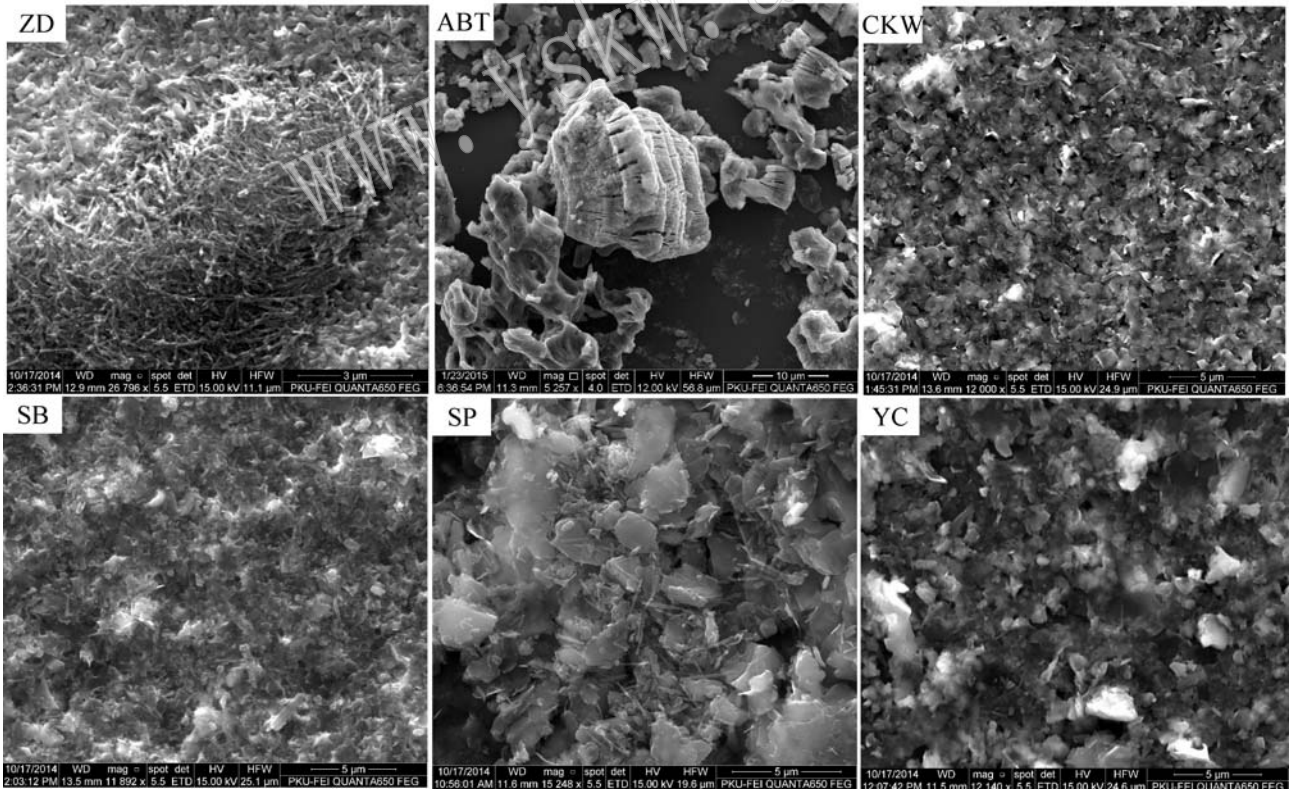


图 4 赣南稀土矿石中粘土矿物的扫描电镜图像
 Fig. 4 SEM images of clay minerals from rare earth deposits in Jiangxi

2.2 粘土矿物与稀土元素的富集关系

ICP-MS 分析结果(表 1)表明了稀土元素在粘土矿物中大量的富集,最多可比下部残余沉样稀土含量高上 10 余倍。图 5 对比了 6 个样品中粘土矿物与下沉残样的稀土配分关系。这种富集在粘土矿

物中的离子相稀土配分与产生风化壳淋滤型稀土矿原岩的稀土配分存在着一定的联系。龙南足洞稀土矿其原岩是燕山早期的白云母花岗岩和黑云母花岗岩,所含的独立稀土矿物主要为硅铍钇矿和氟碳钙钇矿,因此在风化淋滤后仍然保持了富钇重稀土的

表 1 赣南稀土矿石粘土矿物(F)与沉降残余样品(C)中的稀土含量

$\omega_B/10^{-6}$

Table 1 The REE values in clay minerals (F) and residua (C) from rare earth deposits in Jiangxi

样品	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb
SB-F	125	468	865	100	372	45.9	4.84	37.6	6.51	29.7	4.40	12.5	1.45	9.66
SB-C	37.7	62.2	154	16.3	51.2	9.65	1.21	8.58	1.34	7.67	1.34	4.18	0.57	3.83
YC-F	136	302	320	49.1	230	28.3	9.40	28.9	3.64	24.9	3.98	11.1	1.29	7.92
YC-C	29.7	46.9	51.9	9.91	40.0	5.93	2.00	6.38	0.85	5.34	0.95	2.81	0.38	2.53
SP-F	155	483	1329	112	438	47.8	6.46	40.4	6.28	33.1	5.27	15.2	1.64	10.7
SP-C	35.2	135	247	25.7	80.5	13.4	2.70	11.8	1.83	8.63	1.42	4.22	0.49	3.36
ABT-F	508	1392	932	321	1267	155	27.8	155	22.0	106	17.3	48.7	5.66	36.5
ABT-C	428	972	281	230	885	113	20.5	119	17.5	79.3	13.2	37.8	4.63	29.8
CKW-F	121	283	287	50.2	173	28.3	5.81	30.2	<0.05	23.2	3.95	11.2	1.35	8.46
CKW-C	45.2	78.5	79.6	18.2	71.9	10.7	2.08	11.4	<0.05	9.61	1.72	5.03	0.64	4.06
ZD-F	789	52.5	242	23.4	97.7	55.0	0.46	90.3	19.7	126	24.1	68.8	10.5	73.9
ZD-C	647	28.5	21.6	13.5	67.9	33.3	0.27	59.1	14.5	96.4	18.6	58.3	9.02	64.1

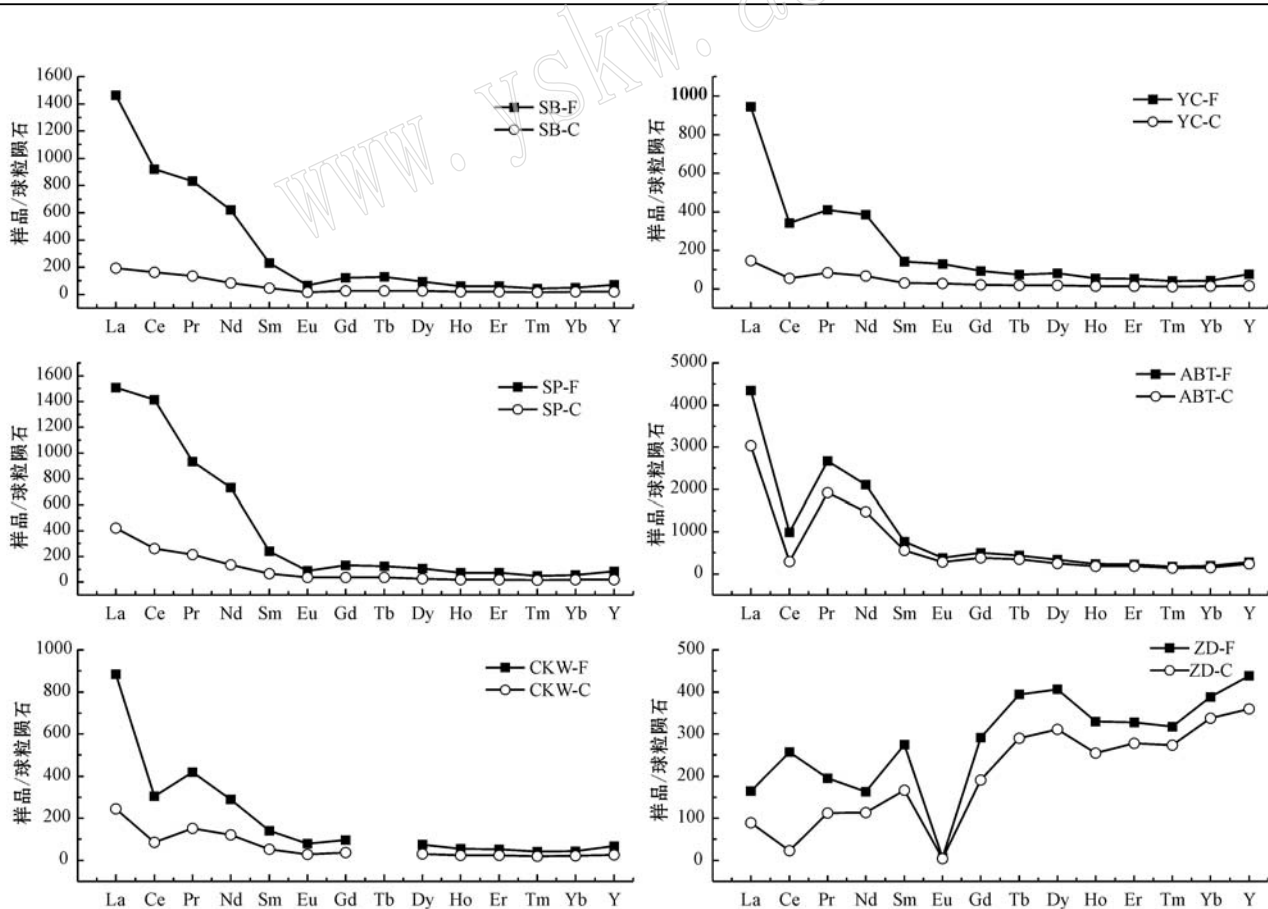


图 5 赣南稀土矿石中粘土矿物(F)与沉降残余样品(C)的稀土配分图

Fig. 5 REE content of clay minerals (F) and residua (C) relative to chondrites

特征;其余矿区均为轻稀土型,其原岩的主要稀土矿物为氟碳铈矿(池汝安等,2012;王登红等,2013)。值得注意的是Ce元素在SB、YC、ABT、CKW的粘土矿物中呈现负异常,而在SP和ZD粘土矿物中出现了正异常,特别是在ZD样品中,粘土矿物出现了Ce正异常,而下部沉降残样却为Ce负异常,说明了粘土矿物特别是埃洛石可能对Ce的分异存在着重要影响。

Ce是地壳中丰度最高的稀土元素,在大部分岩石中Ce也是丰度最高的稀土元素。在岩石风化过程中,Ce由于其特殊的电子结构从矿物晶格中解离出来成为 Ce^{3+} 离子,并容易被氧化形成四价铈,以胶态相 $Ce(OH)_4$ 或矿物相 CeO_2 方铈矿的形式存在,因此造成了溶液中Ce含量的偏低,继而导致了

吸附在粘土矿物中的离子相Ce偏低,在SB、YC、ABT、CKW样品中表现出Ce的负异常。然而ZD粘土矿物中却表现明显的Ce正异常,以及以轻稀土为主的SP粘土矿物中Ce也出现正向趋势,这可能与2个样品中具有较高的埃洛石含量密切相关。Braun等(1990)对4个红土剖面中的Ce正异常进行了研究,发现Ce是以方铈矿胶膜形式包裹在了针状埃洛石的表面导致了Ce的异常。尝试用透射电镜方法对足洞样品中的埃洛石进行观察,可以看到在埃洛石管中有似立方晶系的球状颗粒分布(图6),但是受实验条件的限制暂未观察到球状颗粒的面网间距并且能谱束斑较球状颗粒大,不能正确代表其稀土含量,因此尚不能确定该球状颗粒是否为方铈矿,需要开展进一步的研究。

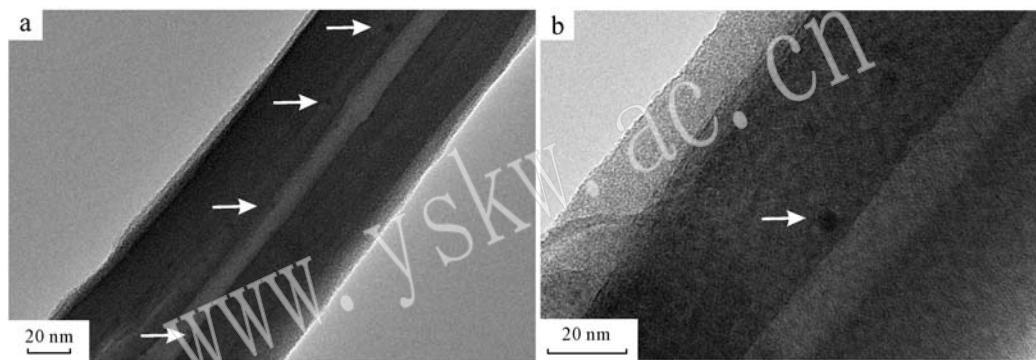


图6 管状埃洛石中的球状颗粒

Fig. 6 Spherical particles in tubular halloysite

另一方面,稀土元素在风化过程中的迁移富集也会受到粘土矿物吸附作用的影响,而埃洛石与高岭石结构上的差别也会导致其在稀土离子选择性吸附能力上的差别。埃洛石与高岭石均为1:1型二八面体高岭土系矿物,埃洛石区别于高岭石的主要性质为水化程度和层间含水量不同,铝氧八面体层与硅氧四面体层之间的空间不相匹配位错促使片状晶体卷曲成管,这种特殊的形貌也使得埃洛石具备良好的吸附、储存以及运输的功能(马智等,2012)。有数据表明埃洛石比高岭石具备更大的比表面积(SSA)以及离子交换容量(CEC),例如产自新西兰和澳大利亚的埃洛石SSA值约为 $50\sim 60\text{ m}^2/\text{g}$,而高岭石为 $5\sim 39\text{ m}^2/\text{g}$;埃洛石的CEC为 $2\sim 60\text{ cmolc}/\text{kg}$,高岭石的CEC为 $1\sim 15\text{ cmolc}/\text{kg}$ (Joussein *et al.*, 2005),这些都有利于埃洛石对稀土元素的吸附。但是目前高岭石尤其是埃洛石吸附稀土元素行

为和机理的研究较少。Laufer等(1984)认为Ce可以以单离子或聚合羟基阳离子的形式被高岭石吸附,吸附的离子与高岭石表面发生强键聚合被固定,并且不容易被硫酸解吸附。Coppin等(2002)则发现高岭石对稀土元素的吸附系数在pH值3~9的范围内随着pH值升高线性升高,并且在高离子强度时相对轻稀土元素会优先选择性吸附重稀土,但是也有文献认为高岭石与埃洛石会优先选择性吸附轻稀土(池汝安等,2012)。在风化环境中高岭石和埃洛石是否能像海底锰结核矿物一样引起轻、重稀土元素的分馏、从海水中Ce负异常到锰结核中Ce正异常的转变,这些都有待进一步的研究。

3 结论

江西赣南地区赣县上堡、兴国杨村、定南坳背

塘、定南长坑屋4个轻稀土矿区全风化层中的粘土矿物以高岭石为主,寻乌石排轻稀土矿区全风化层中具有比例相当的高岭石和7 Å埃洛石,而龙南足洞重稀土矿区全风化层中粘土矿物主体为7 Å埃洛石。该地区高岭石以细小片状以及叠层片状的形貌为主,埃洛石具有典型针、管状的形貌。稀土元素在粘土矿物中大量富集,其稀土配分不仅受到原岩的影响,而且受到粘土矿物本身性质的影响。Ce元素在石排和足洞粘土矿物中呈现正异常,而在其他样品粘土矿物中表现为负异常,可能与二者中大量发育的埃洛石密切相关。一方面Ce可能以方铈矿胶膜形式包裹在针状埃洛石中,另一方面比高岭石具有更大比表面积和离子交换容量的埃洛石可能有利于Ce元素的选择性吸附。

References

- Bau M. 1991. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium[J]. *Chemical Geology*, 93: 219~230.
- Beauvais A and Bertaux J. 2002. In situ characterization and differentiation of kaolinites in lateritic weathering profiles using infrared microspectroscopy[J]. *Clay and Clay Minerals*, 50(3): 314~330.
- Braun J J, Pagel M, Muller J P, *et al.* 1990. Cerium anomalies in lateritic profiles[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54: 781~795.
- Brindley G W. 1980. Order-disorder in the clay mineral structures[A]. *Crystal Structures of Clay Minerals and their X-ray Identification* [C]. London: Mineralogical Society, 125~196.
- Chakmouradian A R and Wall F. 2012. Rare earth elements: minerals, mines, magnets (and more) [J]. *Element*, 8: 333~340.
- Chi Ru'an and Tian Jun. 2007. Review of weathered crust rare earth ore [J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 25(6): 641~650 (in Chinese with English abstract).
- Chi Ru'an, Tian Jun, Luo Xianping, *et al.* 2012. The basic research on the weathered crust elution-deposited rare earth ores[J]. *Non-ferrous Metals Science and Engineering*, 3(4): 1~13 (in Chinese with English abstract).
- Churchman G J, Whitton J S and Claridge G G C. 1984. Intercalation method using formamide for differentiating halloysite from kaolinite [J]. *Clays and Clay Minerals*, 32(4): 241~248.
- Coppin F, Berger G, Bauer A, *et al.* 2002. Sorption of lanthanides on smectite and kaolinite[J]. *Chemical Geology*, 182: 57~68.
- Cullers R L, Chaudhuri S, Arnold B, *et al.* 1975. Rare earth distributions in clay minerals and in the clay-sized fraction of the Lower Permian Havensville and Eskridge shales of Kansas and Oklahoma[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39: 1691~1703.
- Farmer V C. 1998. Differing effects of particle size and shape in the infrared and Raman spectra of kaolinite[J]. *Clay Minerals*, 33: 601~604.
- Joussein E, Petit S, Churchman J, *et al.* 2005. Halloysite clay minerals—a review[J]. *Clay Minerals*, 40: 383~426.
- Kynicky J, Smith M P and Xu C. 2012. Diversity of rare earth deposits: the key example of China [J]. *Element*, 8: 361~367.
- Laufer F, Yariv S and Steinberg M. 1984. The adsorption of quadrivalent cerium by kaolinite[J]. *Clay Minerals*, 19: 137~149.
- Ma Zhi, Wang Jinye, Gao Xiang, *et al.* 2012. Application of halloysite nanotubes[J]. *Progress in Chemistry*, 24(2~3): 275~283 (in Chinese with English abstract).
- Song Yunhua and Shen Lipu. 1982. Discussion on clay minerals occurring in the weathered crust of a certain acid volcanic rock in Jiangxi province and their formation conditions[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 3: 207~212 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Zhao Zhi, Yu Yang, *et al.* 2013. Progress, problems and research orientation of ion-adsorption type rare earth resources [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 32(5): 796~802 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhuming. 1987. A study on clay minerals from the REE-rich weathered crust developed on the Longnan granite in Jiangxi[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1: 70~80 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lian, Wu Kaixing, Chen Lingfang, *et al.* 2015. Overview of metallogenic features of ionadsorption type REE deposits in southern Jiangxi province[J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 33(1): 10~17 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 池汝安, 田君. 2007. 风化壳淋积型稀土矿评述[J]. *中国稀土学报*, 25(6): 641~650.
- 池汝安, 田君, 罗仙平, 等. 2012. 风化壳淋积型稀土矿的基础研究[J]. *有色金属科学与工程*, 3(4): 1~13.
- 马智, 王金叶, 高祥, 等. 2012. 埃洛石纳米管的应用研究现状[J]. *化学进展*, 24(2~3): 275~283.
- 宋云华, 沈丽璞. 1982. 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*, 3: 207~212.
- 王登红, 赵芝, 于扬, 等. 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[J]. *岩矿测试*, 32(5): 796~802.
- 杨主明. 1987. 江西龙南花岗岩稀土风化壳中粘土矿物的研究[J]. *地质科学*, 1: 70~80.
- 张恋, 吴开兴, 陈陵康, 等. 2015. 赣南离子吸附型稀土矿床成矿特征概述[J]. *中国稀土学报*, 33(1): 10~17.