

文章编号: 1000-0240(2008)02-0259-07

# 青藏高原砂质表土样品稀土元素特征的初步探讨

张成龙<sup>1,2</sup>, 邬光剑<sup>1\*</sup>, 高少鹏<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 青藏高原研究所, 北京 100085; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

**摘 要:** 青藏高原上的高山作用(包括冰川研磨作用、山体剥蚀作用、山前冲洪积作用等)形成大量松散砂质物质就近分布于青藏高原及周边地区, 这成为亚洲粉尘的源区之一。通过对青藏高原部分典型砂质表土样品的稀土元素特征的初步分析, 结果表明: 青藏高原砂质表土稀土元素特征主要受原岩性质的控制, 同时在不同程度上受到风化作用的影响; 其稀土含量变化较大, 温暖湿润的藏南地区稀土含量较高, 气候寒冷干燥地区则相对偏低; 稀土元素的球粒陨石标准化分布模式与现代上地壳和中国黄土的稀土元素分布模式相似, 均表现为轻稀土富集, Eu相对亏损的模式。

**关键词:** 青藏高原; 表土; 亚洲粉尘; 稀土元素; 球粒陨石

**中图分类号:** P595 **文献标识码:** A

## 0 引言

稀土元素(Rare Earth Elements, REE)包括镧系元素的第57号元素La到第71号元素Lu, 以及和它们性质十分相似的第39号元素Y, 共计16种元素<sup>[1]</sup>。但是在实际研究中, 第61号元素Pm不存在稳定同位素, 在自然界中不能够长期稳定存在<sup>[2]</sup>, 所以真正用于研究的则是除Pm以外的15种稀土元素。根据我们的研究目的, 主要利用镧系元素进行研究。

稀土元素的化学性质非常相似, 在自然状态下, 主要以 $RE^{3+}$ 的形式存在。稀土元素离子半径变化范围很小( $0.85\text{\AA}\sim 1.13\text{\AA}$ ), 且随着原子序数的增加而递减, 这种反常现象就是所谓的镧系收缩。由于这一特性使各稀土元素之间的晶体化学性质非常相似, 在自然状态下, REE密切共生, 但在特定的环境下, 稀土元素又会发生元素之间分馏。

利用稀土元素这一特性, 对各类沉积物(河流沉积物<sup>[3-5]</sup>、湖泊沉积<sup>[6]</sup>、边缘海沉积<sup>[7]</sup>、黄土沉积及大气粉尘<sup>[8-11]</sup>)的物源区进行追溯研究, 并发

现稀土元素在风化、搬运、沉积过程及沉积成岩时组成变化较小, 沉积物稀土元素特征可以反映物源区的重要信息, 是一种较好示踪元素系统<sup>[4-12]</sup>。

亚洲粉尘的源区主要包括中国西部沙漠、中国北部沙漠以及青藏高原地区<sup>[10, 12-17]</sup>。青藏高原的高山作用(包括冰川研磨作用、山体剥蚀作用、山前冲洪积作用等)形成大量松散物质就近分布于青藏高原及周边地区<sup>[17]</sup>, 这成为亚洲粉尘的源区之一。稀土元素特征是砂质表土物理化学性质的重要组成部分, 同时又是稀土元素示踪系统的基础, 所以有必要对青藏高原地区表土物质的稀土元素特征进行研究。目前青藏高原表土稀土元素特征的研究相对缺乏, 鉴于其重要性, 选择青藏高原部分地区砂质表土作为研究对象, 探讨表土样品稀土元素的含量及其分布模式特征。

## 1 样品来源与实验分析

### 1.1 样品来源

在青藏高原的不同地区共采集8个砂质表土样品, 并在塔克拉玛干沙漠南缘采集2个沙漠砂样

收稿日期: 2007-07-12; 修订日期: 2007-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(40571038; 40121101); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目2005CB422004资助

作者简介: 张成龙(1982—), 男, 山东枣庄人, 2006年毕业于兰州大学, 现为硕士研究生。

\* 通讯联系人; E-mail: wugj@itpcas.ac.cn

品. 为了便于讨论将全部样品编号为: YCD(叶城东 35 km 流沙); QMX(且末县西 90 km 流沙); TSH(柴达木盆地托素湖岸沙堆); XDT(青海西大滩沙丘); PRG(普若岗日沙堆); QZX(青藏线南段第一沙堆); GZB(改则北的荒漠); DWH(达瓦湖北的高山草原上的沙丘); YJH(雅鲁藏布江河漫滩沙土); DRX(定日附件的沙堆). 采样点地理分布图如图 1 所示. 这些砂质表土主要是局地风沙活动堆积的, 后期风化较弱, 能够反映当地表土的综合状况.

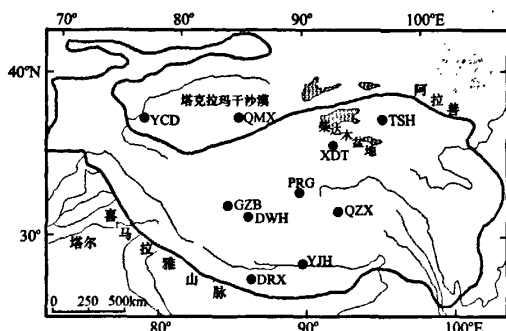


图 1 采样点地理分布

Fig. 1 Location of the sampling sites

## 1.2 实验方法

鉴于研究目的, 我们采用全样分析的方法对砂

质样品进行分析. 全部样品均在中国科学院青藏高原研究所电感耦合等离子质谱仪(X-7, 美国 Thermo-Elemental 公司)完成测试. 处理方法主要以文献[18]为基础. 根据实验需求对以上处理方法进行改进, 其具体的前处理步骤为:

(1) 将样品磨碎至 200 目左右, 置于 55 °C 烘箱中 12 h 烘干. 根据样品中待测物含量称取样品 20 ~ 30 mg 于 Teflon 容器中, 加少量超纯水润湿.

(2) 加 1 mL 硝酸和 1 mL 氢氟酸于 Teflon 容器中, 将该容器置于超声器中振荡 20 min, 于 150 °C 加热板上蒸至近干.

(3) 加 1 mL 硝酸和 1 mL 氢氟酸于 Teflon 容器中, 将该容器置于超声器中振荡 20 min, 放入不锈钢罐中, 拧紧后置于 190 °C 烘箱中消解 24 h 以上.

(4) 取出冷却后将 Teflon 容器取出置于 150 °C 加热板上蒸至近干, 加 1 mL 硝酸蒸至近干, 重复两次.

(5) 加 2 mL 硝酸和 3 mL 超纯水, 放入不锈钢罐中, 拧紧后置于 150 °C 烘箱中提取 24 h 以上.

(6) 取出定容至 50 mL, 然后进样测定.

为确保测定的准确性, 我们采用重复样与标样分析的方法. 所有样品的稀土元素的相对偏差均小于 5 %, 表明总体分析结果可靠, 测定结果如表 1 所示.

表 1 青藏高原及周边地区部分砂质表土样的 REE 含量( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )

Table 1 Rare earth elements contents in silt samples from the Tibetan Plateau and the surrounding regions( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )

编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	$\Sigma\text{REE}$	RSD/%
QMX	23.01	44.91	5.35	18.74	3.8	0.8	3.57	0.53	3	0.62	1.72	0.26	1.56	0.24	108.09	-26
YCD	26.72	52.07	6.23	22.28	4.44	0.94	4.02	0.67	3.72	0.78	2.13	0.32	2.04	0.32	126.67	-13
TSH	16.08	29.61	3.76	13.52	2.72	0.66	2.6	0.4	2.21	0.45	1.24	0.18	1.1	0.17	74.69	-49
XDT	24.18	49.78	6.03	22.32	4.74	1.07	4.82	0.78	4.61	0.95	2.61	0.38	2.24	0.33	124.83	-15
PRG	9.84	17.49	2.13	7.59	1.55	0.37	1.48	0.21	1.21	0.26	0.73	0.11	0.7	0.11	43.78	-70
GZB	18.65	38.96	4.53	15.97	3.02	0.57	2.72	0.37	2.02	0.41	1.13	0.17	1.03	0.16	89.71	-39
QZX	20.76	39.94	4.59	15.67	3.03	0.56	3.08	0.57	3.59	0.84	2.65	0.41	2.55	0.4	98.65	-33
DWH	21.21	39.33	4.64	16.01	3.08	0.59	2.92	0.43	2.58	0.56	1.61	0.24	1.59	0.25	95.05	-35
YJH	56.74	120.4	13.85	48.94	9.21	1.65	7.44	0.96	5.06	1	2.92	0.44	2.76	0.44	271.8	86
DRX	34.07	68.78	7.93	27.6	5.36	0.93	4.74	0.69	4.06	0.87	2.49	0.39	2.48	0.4	160.8	10
CHL	34	66.8	7.97	37.3	6.2	1.18	4.43	0.83	4.53	1.17	2.61	0.52	2.69	0.43	170.66	17
UCC	30	64	7.1	26	4.5	0.88	3.8	0.64	3.5	0.8	2.3	0.33	2.2	0.32	146.37	0

注: UCC 为现代上地壳, 其数据源于文献[19]; CHL 为中国黄土样品, 其数据源于文献[11]; RSD 为样品稀土含量相对现代上地壳相对偏差.

## 2 青藏高原及周边地区砂质表土稀土元素含量及分布模式

### 2.1 样品的 REE 含量

表 1 中, 青藏高原砂质表土样品的稀土含量变化较大, 变化范围:  $43.78 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  (PRG)  $\sim 271.77 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  (YJH). 藏南地区样品 (YJH ( $271.77 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 和 DRX ( $160.8 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )) 的含量高于现代上地壳 (UCC) 的稀土含量 ( $146.37 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )<sup>[19]</sup>, 其它表土样品的稀土含量相对较低 (均低于 UCC 的稀土含量). YJH 样品的稀土含量最高, 相对 UCC 偏差为 86%, 稀土元素相对 UCC 富集; PRG 样品的稀土含量最低 ( $43.78 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ), 远低于现代上地壳和中国黄土的稀土含量, 相对 UCC 偏差为 -70%, 表现为稀土元素相对亏损. 位于青藏高原北麓, 塔克拉玛干沙漠南缘的样品, 其稀土含量 (QMX ( $108.09 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 和 YCD ( $126.67 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )) 低于现代上地壳和中国黄土的稀土含量.

### 2.2 样品的 REE 参数特征分析

#### 2.2.1 常用 REE 研究方法及地球化学指标

稀土元素是一个地球化学性质很相似的“元素组”, 利用科里尔图解法可将稀土元素之间复杂的地球化学关系一目了然地表示出来, 通常还结合稀土元素多个地球化学指标进行分析<sup>[1]</sup>. 常用稀土元素地球化学指标包括:  $\Sigma \text{LREE} / \Sigma \text{HREE}$  比值、 $(\text{La}/\text{Yb})_N$  比值、 $(\text{La}/\text{Sm})_N$  比值、 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$  比值、 $\delta \text{Ce}$  值、 $\delta \text{Eu}$  值等地球化学指标.

科里尔图解: 在进行稀土元素含量—原子序数作图时, 将稀土元素含量利用标准化 (例如球粒陨石标准化) 的方法消除偶数规则而得到平滑的直线. 样品的稀土元素球粒陨石标准化图解应用最广, 对于揭示其地球化学性质差异及在成岩、成矿过程中的分异作用的用途较大, 同时也便于进行各种地球化学参数的计算.

$\Sigma \text{LREE} / \Sigma \text{HREE}$  比值: 用轻稀土的总含量 ( $\Sigma \text{LREE}$ ) 与重稀土的总含量 ( $\Sigma \text{HREE}$ ) 的相比得到:

$$\Sigma \text{LREE} / \Sigma \text{HREE} =$$

$$\frac{\Sigma (\text{La} + \text{Ce} + \text{Pr} + \text{Nd} + \text{Sm} + \text{Eu})}{\Sigma (\text{Gd} + \text{Tb} + \text{Dy} + \text{Ho} + \text{Er} + \text{Tm} + \text{Yb} + \text{Lu})} \quad (1)$$

用来反映轻重稀土元素之间的分馏程度, 当比值  $> 1$  时, 轻稀土元素富集; 当比值  $< 1$  时, 重稀土

元素富集. 其分馏程度主要受原岩的特征和风化作用因素的影响. 在风化作用过程中, 首先重稀土元素较轻稀土元素容易生成更稳定的可溶性无机和有机络合物, 常常优先淋失从而轻稀土元素在残留物中相对富集; 其次, 轻稀土元素较重稀土元素更容易吸附在粘土矿物中, 因此, 轻稀土元素在细颗粒物中相对富集<sup>[1, 20]</sup>.

$(\text{La}/\text{Yb})_N$  比值: 利用球粒陨石标准化后的 La 的值与 Yb 的值相比得到:

$$(\text{La}/\text{Yb})_N = (\text{La}_s/\text{La}_c) / (\text{Yb}_s/\text{Yb}_c) \quad (2)$$

式中: 小标 s 为样品; 小标 c 为球粒陨石.  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  是稀土元素球粒陨石标准化图解中分布曲线的斜率, 通常用来反映曲线的倾斜程度. 当  $(\text{La}/\text{Yb})_N > 1$  时, 曲线为右倾斜, 轻稀土元素富集;  $(\text{La}/\text{Yb})_N < 1$  时, 曲线左倾斜, 重稀土元素富集.

$(\text{La}/\text{Sm})_N$  比值: 反映轻稀土之间的分馏程度, 该值越大, 轻稀土越富集.

$(\text{Gd}/\text{Yb})_N$  比值: 反映重稀土之间的分馏程度, 该值越小, 重稀土越富集.

$\delta \text{Ce}$  值: 通过科里尔图解可以求得该比值为:

$$\delta \text{Ce} = \text{Ce}_N / \sqrt{\text{La}_N \times \text{Pr}_N} \quad (3)$$

$\delta \text{Ce}$  值表示 Ce 异常的程度,  $\delta \text{Ce} > 1.05$  为正异常,  $< 0.95$  为负异常. Ce 除三价状态外, 在氧化条件下可呈四价状态, 与其它稀土元素发生分离. 研究表明, 风化过程中  $\text{Ce}^{4+}$  特殊的水解和络合行为均能导致 Ce 源区与其它轻稀土元素的分离. 在弱酸性条件,  $\text{Ce}^{4+}$  极易水解生成不溶性氧化物而在原地保留下来; 在碱性条件下,  $\text{Ce}^{4+}$  较其它轻稀土容易生成更稳定的可溶性无机和有机络合物, 因此优先于其它轻稀土淋失从而元素 Ce 在残留物中相对亏损, 表现为负异常<sup>[1, 20-21]</sup>.

$\delta \text{Eu}$  值: 通过科里尔图解可以求得该比值为:

$$\delta \text{Eu} = \text{Eu}_N / \sqrt{\text{Sm}_N \times \text{Gd}_N} \quad (4)$$

$\delta \text{Eu}$  值表示 Eu 异常的程度, 通常作为原岩的特征指标. Eu 在自然界几乎不发生变价, 但在特殊强还原条件下, 也可呈二价, 与其它稀土元素发生分离. 然而这样的环境在地表过程中却很少存在, 因此地表物质的  $\delta \text{Eu}$  值反映原岩的信息<sup>[1]</sup>.

#### 2.2.2 样品 REE 分布模式特征

从表 2 可以看出, 高原表土样的  $\Sigma \text{LREE} / \Sigma \text{HREE}$  比值、 $(\text{La}/\text{Yb})_N$  比值均  $> 1$ , 这表明球粒陨石标准化后, 高原表土样轻重稀土分馏更加显

表 2 青藏高原及周边地区砂质表土样品 REE 指标对比  
Table 2 Comparison of REE index for silt samples from the Tibetan Plateau and the surrounding regions

编号	$\Sigma \text{LREE} / \Sigma \text{HREE}$	$(\text{La}/\text{Yb})_N$	$(\text{La}/\text{Sm})_N$	$(\text{Gd}/\text{Yb})_N$	$\delta \text{Ce}$	$\delta \text{Eu}$
QMX	8.41	9.96	3.81	1.85	0.97	0.66
YCD	8.05	8.83	3.79	1.59	0.97	0.68
TSH	7.96	9.85	3.72	1.91	0.92	0.76
XDT	6.47	7.28	3.21	1.74	0.99	0.68
PRG	8.11	9.49	4.00	1.71	0.92	0.76
GZB	10.20	12.16	3.88	2.13	1.02	0.61
QZX	6.00	5.49	4.30	0.97	0.98	0.56
DWH	8.34	9.00	4.33	1.48	0.95	0.61
YJH	11.94	13.88	3.88	2.18	1.03	0.61
DRX	8.97	9.27	4.00	1.54	1.01	0.57
UCC	9.54	9.19	4.19	1.39	1.06	0.65
CHL	8.92	8.52	3.45	1.33	0.98	0.69

注：采用文献[21]推荐的球粒陨石标准。

著，均为 LREE 相对 HREE 富集，分布模式如图 2 所示，所有曲线均表现为显著的右倾状。然而，样品之间又存在着一定的差异性，突出的表现在 YJH 和 GZB 两样品上，二者分馏程度明显大于现在上地壳及中国黄土分馏程度。

高原表土样的  $(\text{La}/\text{Sm})_N$  比值相近，均  $>1$ ，表明经过球粒陨石标准化后，高原表土的 LREE 部分的分馏相近，表现为轻稀土元素随着原子序数的递增而逐渐相对亏损。同样在  $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$  比值中，除

QZX 样品  $(0.97) < 1$ ，其它样品均  $> 1$ ，且小于相应的  $(\text{La}/\text{Sm})_N$  比值，表明重稀土部分的分馏程度小于轻稀土部分。

这在分布模式图 2 中可以清楚看到，轻稀土部分曲线相对较陡峭，重稀土部分曲线相对平缓。QZX 样品在重稀土部分表现不同的现象，呈现为逐渐富集的状态，如分布模式图 2 所示，表现为轻微的左倾状。

如图 2 球粒陨石标准化曲线反映出高原表土样中 Eu 元素明显亏损，Ce 元素无显著异常。表 2 中  $\delta \text{Eu}$ 、 $\delta \text{Ce}$  值表明，高原表土样的  $\delta \text{Eu}$  值  $(0.56 \sim 0.76)$  均显著  $< 0.95$ ，而  $\delta \text{Ce}$  值  $(0.92 \sim 1.03)$  主要分布在  $0.95 \sim 1.05$  的范围内，仅有 TSH  $(0.92)$  和 PRG  $(0.92)$  两样品  $< 0.95$ ，Ce 元素表现为微弱的亏损。

由此可以得出，高原表土的稀土元素特征与现在上地壳及中国黄土的稀土元素特征整体上表现为相似的特征：轻稀土元素相对重稀土元素富集，Eu 元素的相对亏损，Ce 元素无明显异常。

### 2.3 青藏高原砂质表土 REE 组成特征的制约因素

根据上面的分析，高原表土样品的稀土元素组成特征受到多种因素控制，结合表土样品所属地的气候条件、地形地貌、矿物组成等条件，对高原上典型表土样点的进行讨论。

YJH 样品稀土元素特征指标表现异常，稀土含量最高  $(271.8 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$ ，轻重稀土分馏最显著  $(\Sigma \text{LREE} / \Sigma \text{HREE} = 11.94; (\text{La}/\text{Yb})_N = 13.88)$ ，

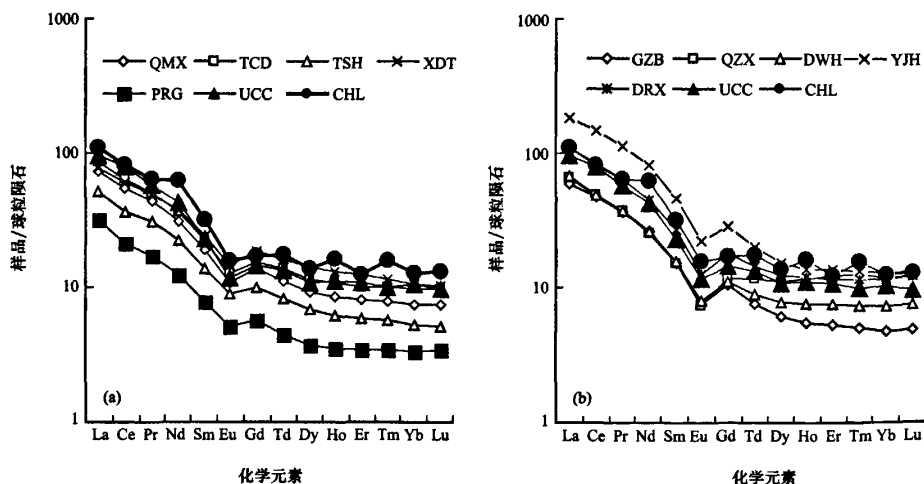


图 2 表土样品、中国黄土及上地壳稀土元素球粒陨石标准化分布模式

Fig. 2 Chondrite-normalized REE patterns of the samples from the Tibetan Plateau, loess and UCC

元素 Ce 却未表现异常( $\delta\text{Ce}=1.03$ )。该样品采自于青藏高原雅鲁藏布江河漫滩, 主要为砂质河流沉积物。采样地区气候温暖湿润, 风化作用明显, 河流作用较显著。河流沉积物稀土元素特征的控制因素主要是上游物源区的稀土元素特征和河流的风化作用, 包括河流搬运过程中的机械和重力分选作用以及稀土元素水解络合反应<sup>[3-5]</sup>。该样品稀土元素之间的分馏程度最大( $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=13.88$ ;  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}=2.18$ ), 明显高于中国黄土和现代上地壳的特征值, 这表明造成分馏程度加剧的主要是河流作用。首先, 当风化壳、土壤和沉积物的剥蚀物被河水搬运时, 剥蚀物受到机械的和重力的分选, 造成随颗粒物粒级有规律的沉积。研究发现稀土元素在自然界中易于吸附在粘土粒级的细颗粒物表面, 同时轻稀土较重稀土更易于吸附, 从而导致轻重稀土的分馏<sup>[1]</sup>。其次, 风化剥蚀物在河水搬运过程中, 重稀土元素较轻稀土元素容易生成更稳定的可溶性无机和有机络合物, 因此轻稀土优先淋失而河流沉积物相对富集轻稀土<sup>[1, 20]</sup>。大量研究表明, 细颗粒物有利于稀土元素的富集, 而该样品的稀土含量也最大, 轻重稀土元素分馏最大, 初步认为造成该样品稀土元素特征不同的主要还是河流的机械和重力分选作用。

GZB 样品的各稀土元素特征指标中, 除稀土含量( $89.71 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )相对较低外, 其它各项指标与 YJH 样品非常接近, 表现出显著的轻重稀土分馏( $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}=10.20$ ), 元素 Ce 未表现异常。综上推测, 该地区的表土样稀土特征的指标除受原岩特性控制外(稀土含量较低), 后期风化作用也作为重要的控制因素之一。该样品可能与 YJH 的状况相似, 主要受河流的机械和重力分选作用。但现在该地区以荒漠地貌为主, 可能后来的气候事件等原因导致河流干枯, 从而致使河流沉积物沉积区成为荒漠区。然而该地区与 YJH 的气候温暖, 降雨丰沛的气候条件有所不同, 该地区为改则北部的荒漠地区, 所处的地理环境寒冷干燥。在类似的气候条件下, 表土中稀土元素表生地球化学行为不活跃。

QZX 样品中,  $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$  比值和  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$  比值均较低, 表明该地区轻重稀土分馏程度最小。同时, 稀土含量相对 UCC 偏差为  $-33\%$ , 表明该地区稀土含量相对偏低, 没有明显的富集作用。从 Ce 和 Eu 值看, Ce 元素无异常, Eu 元素表现为强烈的负异常, 表明该地区表土的稀土元素特征主要受到原岩的稀土元素组成控制, 后期风化作

用非常微弱(稀土含量富集作用, 以及轻重稀土分馏加强作用, 及其 Ce 元素的异常作)。

PRG 样品稀土含量低( $47.38 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ), 相对 UCC 的偏差为  $-70\%$ , Ce 元素负异常( $\delta\text{Ce}=0.92$ ), 而 Eu 亏损程度相对较小( $\delta\text{Eu}=0.76$ ), 轻重稀土的分馏程度较强( $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}=8.11$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=9.49$ ), 表明该表土主要受原岩的性质控制, 后期风化作用引起 Ce 元素亏损。该样品采自于普若岗日冰原前缘的沙丘上, 以风化作用以机械粉碎作用的物理风化作用为主, 受到冰川融水的侵蚀作用,  $\text{Ce}^{4+}$  较其它稀土元素更容易生成稳定的可溶性无机和有机络合物, 因此 Ce 元素优先于其它稀土元素淋失, 导致残留物中元素 Ce 亏损及轻稀土元素相对富集。但是, 现在机械粉碎作用位于初步风化阶段, 因此表土稀土含量主要保留原岩的特征。目前对这样极端环境下的表土稀土元素的特征研究较少, 对该地区的研究可以补充稀土研究的空白。

TSH 样品稀土含量低( $74.69$ ), 相对 UCC 的偏差为  $-49\%$ , Ce 元素负异常( $\delta\text{Ce}=0.92$ ), 而 Eu 亏损程度相对较小( $\delta\text{Eu}=0.76$ ), 轻重稀土的分馏程度较大( $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}=8.11$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=9.85$ )。该表土样品各稀土元素特征与 PRG 样品相一致, 表明该表土主要受原岩的性质控制, 后期风化作用主要引起 Ce 元素亏损。该表土样采于青藏高原的干极地区的托素湖岸沙堆, 气候干燥, 其物质的来源主要来自于湖岸周边高山的剥蚀产物。风化作用以初期的机械粉碎的物理风化为主, 同时受到湖泊作用的影响, 导致 Ce 元素相对亏损和轻稀土元素相对富集, 表土稀土含量主要保留原岩的特征。

QMS 和 YCD 两个样品所有地球化学指标及其分布模式曲线均无明显异常, 体现了沉积物的主要特点。受到后期物理分选和混合作用强烈。该地区位于青藏高原昆仑山北麓和塔里木盆地南缘交接地带。昆仑山脉的松散物质受到河流的侵蚀搬运作用, 形成大量的松散物质, 同时塔克拉玛干沙漠物质受到塔里木盆地低空东北风的风蚀搬运作用在该地区进行堆积。因此, 该地区的表土是由多个物源区的物质经历多次物理分选及混合作用生成, 故其稀土元素特征指标的平稳。

综上所述, 青藏高原表土稀土元素特征除受原岩的性质控制外, 后期风化作用对表土稀土元素特征的影响作用也不容忽视, 气候条件、地形地貌、

水流作用、矿物组成以及后期的物理分选及混合等多方面因素影响表土稀土元素的特征。

在青藏高原地区高寒高海拔地区,地理环境地域分异效应较明显。在温暖湿润地区譬如 YJH 藏南地区,雨水充沛,气温较高,风化作用强烈,河流机械和重力分选作用强烈,稀土元素的活性加强,因此该地区表土的稀土元素得到了富集,轻重稀土分馏程度加强。在气候寒冷的 PRG 冰缘地区以及气候干燥的 TSH 荒漠地区,PRG 地区虽然冰川融水充沛,但其气候寒冷,而 TSH 地区气候极端干旱,这两个地区以机械粉碎的初期物理风化作用为主,化学风化作用相对微弱,稀土元素特征主要体现为原岩的性质。

在以物理分选和混合作用为主的 QMS 和 YCD 地区,表土主要由多个物源区的物质经历多次物理分选及混合作用生成。其稀土元素特征被平均化了,测定出的结果主要为多个物源区的综合特征,这与中国黄土的稀土元素特征的形成过程具有一定相似性。

Ce 元素的异常值常用作风化程度指标。所有样品中两个极端环境条件下的 PRG 和 TSH 表土样品表现出 Ce 负异常,这可能是受到地表水的作用下,没有经过长距离的搬运,同时两地区都处于风化作用的初期,表土为微弱的碱性,  $Ce^{4+}$  较其它稀土元素更容易生成稳定的可溶性无机和有机络合物。因此, Ce 元素优先于其它稀土元素淋失,从而造成 Ce 元素的亏损。

### 3 结论

根据对青藏高原部分典型砂质表土样品稀土元素特征的分析与讨论,得到初步的结论:

(1) 青藏高原砂质表土稀土元素特征主要受原岩性质的控制,同时在不同程度上受到风化作用的影响。稀土元素特征受到气候条件、地形地貌、水流作用、矿物组成以及表土物质的物理分选和混合等多方面因素的影响。

(2) 青藏高原砂质表土样品稀土含量变化较大 ( $43.78 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  (PRG)  $\sim 271.77 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  (YJH)), 温暖湿润的藏南地区稀土含量较高,在寒冷的冰缘地区相对偏低。但青藏高原的表土稀土元素分布模式,并未受到稀土含量的影响,其球粒陨石标准化的分布曲线与现代上地壳标准化的分布曲线具有形态相似性,表现为轻稀土富集, Eu 相对亏损的模式。

致谢: 赵俊猛研究员帮助采集了部分样品,在此感谢。

### 参考文献(References):

- [1] Wang Zhonggang, Yu Xueyuan, Zhao Zhenhua, *et al.* Geochemistry of Rare Earth Elements [M]. Beijing: Science Press, 1983; 1-535. [王中刚, 于学元, 赵振华, 等. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1983; 1-535.]
- [2] Chen Jun, Wang Henian, Geochemical [M]. Beijing: Science Press, 2004; 1-418. [陈骏, 王鹤年. 地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2004; 1-418.]
- [3] Yang Shouye, Li Congxian. Research progress in REE tracer for sediment source [J]. Advance in Earth Science, 1999, 14 (2): 164-167. [杨守业, 李从先. REE 示踪沉积物物源研究进展[J]. 地球科学进展, 1999, 14(2): 164-167.]
- [4] Yang Shouye, Li Congxian. REE geochemistry and tracing application in the Yangtze River and the Yellow River sediments [J]. Geochimica, 1999, 28(4): 374-380. [杨守业, 李从先. 长江与黄河沉积物 REE 地球化学及示踪作用[J]. 地球化学, 1999, 28(4): 374-380.]
- [5] Yang Shouye, Li Congxian, Lee C B, *et al.* Rare earth elements geochemical of river and tracer for sediment source around Yellow Sea [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48 (11): 1233-1236.
- [6] Tanaka K, Akagawa F, Yamamoto K. Rare earth element geochemistry of Lake Baikal sediment; its implication for geochemical response to climate change during the Last Glacial/Interglacial transition [J]. Quaternary Science Reviews, 2007, 26(9-10): 1362-1368.
- [7] Wang Xianjue, Chen Yuwei, Lei Jianquan, *et al.* REE geochemistry in sea-floor sediments in the continental shelf of east china sea [J]. Geochemical, 1982, 1: 56-65. [王贤觉, 陈毓蔚, 雷剑泉, 等. 东海大陆架海底沉积物稀土元素地球化学研究[J]. 地球化学, 1982, 1: 56-65.]
- [8] Yang Xiaoping, Liu Yongsheng, Li Chaozhu, *et al.* Rare earth elements of aeolian deposits in North China and their implications for determining the provenance of dust storms in Beijing [J]. Geomorphology, 2007, 87: 365-377.
- [9] Yang Xiaoping, Zhu Bingqi, White P D. Provenance of aeolian sediment in the Taklamakan Desert of western China, inferred from REE and major-elemental data [J]. Quaternary International, 2007, 175: 71-85.
- [10] Zhang Xiaoye, Shen Zhibao, Zhang Guangyu, *et al.* The remote west wind particle at Tibetan Plateau and Loess deposition [J]. Science in China (Series D), 1996, 26(2): 147-153. [张小曳, 沈志宝, 张光宇, 等. 青藏高原远源西风粉尘与黄土堆积[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26(2): 147-153.]
- [11] Wen Qizhong, Yu Shuhua, Gu Xiongfei, *et al.* A preliminary study on rare earth elements in loess [J]. Geochemical, 1981, 10(2): 151-157. [文启忠, 余素华, 顾雄飞, 等. 黄土中稀土元素的初步探讨[J]. 地球化学, 1981, 10(2): 151-157.]
- [12] McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks influence of provenance and sedimentary processes [J]. Reviews in Mineralogy, 1989, 21: 169-200.
- [13] Rea D K. The Paleoclimatic record provided by eolian deposition in the deep sea; the geologic history of wind [J]. Geo-

- physics, 1994, **32**: 159–195.
- [14] Rea D K, Snoeckx H, Joseph L H. Late Cenozoic eolian deposition in the northern Pacific: Asian drying, Tibet uplift, and cooling of the Northern Hemisphere[J]. *Palaeoceanography*, 1998, **13**: 215–224.
- [15] Zhang Xiaoye. Source distributions, emission, transport, deposition of Asian dust and loess accumulation [J]. *Quaternary Sciences*, 2001, **21**(1): 29–40. [张小曳. 亚洲粉尘的源区分布、释放、输送、沉降与黄土堆积[J]. 第四纪研究, 2001, **21**(1): 29–40.]
- [16] Fang Xiaomin, Han Yongxiang, Ma Jinhui, *et al.* Dust storms and loess accumulation on the Tibetan Plateau: A case study of dust event on 4 March 2003 in Lhasa[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, **49**(9): 1084–1090. [方小敏, 韩永翔, 马金辉等. 青藏高原沙尘特征与高原黄土堆积: 以 2003-03-04 拉萨沙尘天气过程为例[J]. 科学通报, 2004, **49**(11): 1084–1090.]
- [17] Sun Jimin. Provenance, forming mechanism and transport of Loess in China [J]. *Quaternary Sciences*, 2004, **24**(2): 175–183. [孙继敏. 中国黄土的物质来源及其粉尘的产生机制与搬运过程[J]. 第四纪研究, 2004, **24**(2): 175–183.]
- [18] Liang Q, Jing H, Gregoire D C. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Talanta*, 2000, **51**: 507–513.
- [19] Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution* [M]. Oxford: Blackwell, 1985: 1–312.
- [20] Ma Yingjun, Huo Runke, Xu Zhifang, *et al.* REE behavior and influence factors during chemical weathering [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2004, **19**(1): 87–94. [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**(2): 87–94.]
- [21] Boynton W V. *Cosmochemistry of the rare earth elements, meteorite studies* [M]// *Rare Earth Element Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63–114.

## A Preliminary Study of the Rare Earth Elements in Surface Soil on the Tibetan Plateau

ZHANG Cheng-long<sup>1,2</sup>, WU Guang-jian<sup>1</sup>, GAO Shao-peng<sup>1</sup>

(1. *Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

**Abstract:** Mountain processes (including glacial grinding, hill-slope erosion, and fluvial deposition) on the Tibetan Plateau produced amounts of sand- and silt-like materials that was thought to be the main source for Asian dust. In this paper, the preliminary study results are presented on the rare earth elements (REE) from surface sand soils sampled on the Tibetan Plateau and adjacent regions and their patterns are compared with the loess and upper continental crustal (UCC). REE content,

which is mainly caused by its parent rock and partly by weathering, varies largely in different sites, with the highest value in southern Tibetan Plateau where it is warm and humid. Chondrite-normalized REE distribution pattern, enrichment in LREE, and negative Eu anomaly closely resemble to those in loess regions and UCC showing that the Tibetan Plateau is a potential source area for Chinese loess deposition.

**Key words:** Tibetan Plateau; surface soil; Asian dust; rare earth elements; chondrite

作者: 张成龙, 郭光剑, 高少鹏, ZHANG Cheng-long, WU Guang-jian, GAO Shao-peng  
作者单位: 张成龙, ZHANG Cheng-long (中国科学院, 青藏高原研究所, 北京, 100085; 中国科学院, 研究生院, 北京, 100049), 郭光剑, 高少鹏, WU Guang-jian, GAO Shao-peng (中国科学院, 青藏高原研究所, 北京, 100085)  
刊名: 冰川冻土   
英文刊名: JOURNAL OF GLACIOLOGY AND GEOCRYOLOGY  
年, 卷(期): 2008, 30 (2)

参考文献 (21条)

1. 孙继敏 中国黄土的物质来源及其粉尘的产生机制与搬运过程[期刊论文]-第四纪研究 2004 (02)
2. 方小敏;韩永翔;马金辉 青藏高原沙尘特征与高原黄土堆积:以2003-03-04拉萨沙尘天气过程为例[期刊论文]-科学通报 2004 (11)
3. 张小曳 亚洲粉尘的源区分布、释放、输送、沉降与黄土堆积[期刊论文]-第四纪研究 2001 (01)
4. Yang Xiaoping;Zhu Bingqi;White P D Provenance of aeolian sediment in the Taklamakan Desert of western China, inferred from REE and major-elemental data[外文期刊] 2007 (dec)
5. Yang Xiaoping;Liu Yongsheng;Li Chaozhu Rare earth elements of aeolian deposits in North China and their implications for determining the provenance of dust storms in Beijing[外文期刊] 2007 (4)
6. 王贤觉;陈毓蔚;雷剑泉 东海大陆架海底沉积物稀土元素地球化学研究[期刊论文]-地球化学 1982 (01)
7. Tanaka K;Akagawa F;Yamamoto K Rare earth element geochemistry of Lake Baikal sediment:its implication for geochemical response to climate change during the Last Glacial/Interglacial transition[外文期刊] 2007 (9-10)
8. Yang Shouye;Li Congxian;Lee C B Rare earth elements geochemical of river and tracer for sediment source around Yellow Sea[期刊论文]-Chinese Science Bulletin 2003 (11)
9. 杨守业;李从先 长江与黄河沉积物REE 地球化学及示踪作用[期刊论文]-地球化学 1999 (04)
10. 杨守业;李从先 REE示踪沉积物物源研究进展[期刊论文]-地球科学进展 1999 (02)
11. 陈骏;王鹤年 地球化学 2004
12. Boynton W V Cosmochemistry of the rare earth elements:meteorite studies 1984
13. 马英军;霍润科;徐志方 化学风化作用中的稀土元素行为及其影响因素[期刊论文]-地球科学进展 2004 (02)
14. Taylor S R;McLennan SM The Continental Crust:Its Composition and Evolution 1985
15. Liang Q;Jing H;Gregoire D C Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry[外文期刊] 2000
16. Rea D K;Snoeckx H;Joseph L H Late Cenozoic eolian deposition in the northern Pacific:Asian drying, Tibet uplift, and cooling of the Northern Hemisphere[外文期刊] 1998
17. Rea D K The Paleoclimatic record provided by eolian deposition in the deep sea:the geologic history of wind 1994
18. McLennan S M Rare earth elements in sedimentary rocks influence of provenance and sedimentary processes 1989
19. 文启忠;余素华;顾雄飞 黄土中稀土元素的初步探讨[期刊论文]-地球化学 1981 (02)
20. 张小曳;沈志宝;张光宇 青藏高原远源西风粉尘与黄土堆积 1996 (02)



21. 王中刚;于学元;赵振华 稀土元素地球化学 1989

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_bcdt200802010.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_bcdt200802010.aspx)