镇江下蜀黄土的稀土元素地球化学特征研究*

李徐生[1,2]　韩志勇[1]　杨达源[1]　陈曰友[3]

(1 南京大学城市与资源学系,南京　210093)

(2 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室,西安　710075)

(3 江苏省镇江市勘察测绘研究院,江苏镇江　212000)

摘　要　稀土元素(REE)作为示踪元素在各种岩石的成因、物源、演化及形成环境等方面均具有重要意义。对镇江大港下蜀黄土-古土壤剖面中稀土元素含量和分布特征的研究结果表明:镇江下蜀黄土-古土壤剖面 ∑REE 变化于 193.7～214.9 μg g^{-1}之间,平均值为 207.7 μg g^{-1}。下蜀黄土 REE 绝对丰度明显高于黄土高原黄土,这主要是由于下蜀黄土中粘粒组分含量较高,对 REE 特别是轻稀土元素(LREE)产生较强的吸附作用造成的。镇江下蜀黄土和黄土高原黄土的 REE 特征参数及配分模式具有很好的相似性,它们均与上陆壳(UCC)具有相近的 REE 组成;下蜀黄土剖面不同时代样品的 REE 分布模式几乎完全一致。这些特征为下蜀黄土的"风成说"提供了新的地球化学证据,并揭示了下蜀黄土的物质来源区可能是一个广泛而开放的空间范围,下蜀黄土粉尘颗粒在搬运过程中经过了高度的混合。镇江下蜀黄土的稀土元素特征主要继承了原始物质的特征,粉尘物质堆积后虽经过较强的风化成土作用,轻重稀土间的分馏强于黄土高原黄土,但总体来说化学风化对 REE 的分馏作用并不十分显著,古土壤层与黄土层样品的 REE 组成差异不大,没有产生明显的 Ce 和 Eu 再分馏。

关键词　稀土元素;下蜀黄土;镇江

中图分类号　P595　　**文献标识码**　A

稀土元素(Rare earth element, REE)作为示踪元素在各种岩石的成因、物源、演化及形成环境等方面均具有重要意义[1,2]。在黄土高原晚新生代风尘堆积地球化学研究中,稀土元素研究正日益为人们所关注。自 20 世纪 80 年代以来,有关的地质和地球化学工作者逐步开展了第四纪黄土以及晚第三纪红粘土的稀土元素研究,获得了许多有意义的成果[3～12]。下蜀黄土是长江中下游地区分布广泛的中更新世以来的重要沉积物,其中以宁镇地区分布最为典型。我们曾选择镇江地区的一个典型剖面——大港剖面为代表,对下蜀黄土的粒度和磁化率特征进行过分析和研究,从沉积学方面对下蜀黄土的成因及物源进行了初步的探索[13～15]。本文在以往研究的基础上,对该剖面下蜀黄土进行了 REE 分析测试,研究其稀土元素地球化学特征,为探讨下蜀黄土的成因及物源提供地球化学方面的新证据。

1　材料与方法

1.1　镇江大港剖面下蜀黄土地层

镇江大港位于宁镇山脉与茅山山脉交汇地段,北纬 32°12′,东经 119°39′。属北亚热带气候,年均气温为 15.4 ℃,年均降水量约 1 066 mm。剖面(钻孔)总厚度 59.5 m。剖面中黄土层与古土壤层交替出现共同构成了下蜀黄土-古土壤旋回序列[13～15]。我们对剖面上部两个样品所作的光释光年代测试结果分别为:L1 黄土层底部(深度 3.9 m)为 59.6 ±2.7 ka BP,L2 黄土层下部(深度 15.9 m)为 135.8 ±8.0 ka BP[13～15],这与黄土高原对应黄土层 L1 和 L2 的年龄基本吻合。我们对该剖面进行系统的磁化率测试,根据剖面中存在 7～8 个黄土-古土壤磁化率旋回,与黄土高原黄土地层以及深海氧同位素阶段(Marine Isotope Stage, MIS)对比,初步推测下蜀黄土堆积的下限年代约为 700～800 ka BP,即主要为中更新世以来的黄土堆积[14,15]。

* 国家自然科学基金项目(40401006)、黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金(SKLLQG0304)及南京大学测试基金项目资助

作者简介:李徐生(1972～),男,博士,副教授,第四纪地质学专业。E-mail: lixusheng@263.net

收稿日期:2005-03-10;收到修改稿日期:2005-10-08

1.2 采样与测试

全剖面自上而下于不同层位共取得 9 块样品供 REE 测试(其中:黄土层样品 4 块,古土壤层样品 5 块)。样品在常温下自然风干后,将每块约 5 g 重的样品分别置于玛瑙研钵中研磨至过 200 目分析筛后供测试。测试方法采用等离子体发射光谱法(ICP-AES)[16],测试仪器为 J-A1100 电感耦合等离子光谱直读仪。全部样品测试由南京大学现代分析中心完成,所测结果经标样控制,相对标准偏差小于 10 %。另外,对这 9 块样品平行做了激光粒度测试和常量元素光谱分析,获得了 < 2 μm 粘粒组分含量和常量元素氧化物(包括 SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, FeO, K_2O, CaO, Na_2O, MgO 等)的含量(1),以便于进行 REE 影响因素的相关性分析。粒度测试在黄土与第四纪地质国家重点实验室完成,测试仪器为 Analysette22 型激光粒度仪;常量元素测试在南京大学现代分析中心完成,测试仪器为VF-320 X- 射线荧光光谱仪。

2 结 果

表 1 列出了镇江大港下蜀黄土剖面 9 块样品的 REE 分量和稀土元素总量(∑REE)。从表中可以看出,整个下蜀黄土剖面样品的 ∑REE 变化在193.7～214.9 μg g^{-1}之间,变化范围不大,含量彼此接近,平均值为 207.7 μg g^{-1},各样品的 REE 分量值也变化不大,全剖面样品 REE 各分量值的标准偏差均小于 4 μg g^{-1},变异系数基本上小于 6 %,表明 REE 含量在剖面上分布的均一性和稳定性。镇江下蜀黄土剖面中黄土层的 ∑REE平均丰度及各REE分量值(除

表 1 镇江下蜀黄土剖面及黄土高原马兰黄土[6]的稀土元素含量

Table 1 REE contents of the Xiashu Loess profile in Zhenjiang and the loess in Loess Plateau (μg g^{-1})

样品1) Samples	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	∑REE	∑Ce	∑Y
ZJ005 (S0)	45.31	86.23	10.53	39.81	7.55	1.54	6.60	0.85	6.61	1.30	3.48	0.52	3.15	0.46	35.37	213.9	191.0	58.34
ZJ210 (L1)	45.43	86.60	10.80	39.66	7.78	1.53	6.71	1.02	6.41	1.40	3.47	0.50	3.10	0.46	34.43	214.9	191.8	57.50
ZJ603 (S1)	41.34	88.10	10.15	35.53	7.11	1.29	5.80	0.90	5.70	1.24	3.24	0.47	3.00	0.45	31.08	204.3	183.5	51.88
ZJ1108 (L2)	44.76	85.74	10.68	39.23	7.62	1.51	6.55	0.90	6.40	1.37	3.48	0.52	3.16	0.48	34.70	212.4	189.5	57.56
ZJ1805 (S2)	42.84	81.96	10.53	37.05	7.44	1.47	6.40	0.99	6.18	1.35	3.36	0.47	2.86	0.42	33.20	203.3	181.3	55.23
ZJ2705 (L4)	45.66	86.48	10.55	41.48	7.63	1.54	6.39	0.76	6.79	1.25	3.58	0.52	3.29	0.49	36.67	216.4	193.3	59.74
ZJ3407 (S5)	44.38	83.28	10.62	38.52	7.59	1.50	6.59	1.01	6.53	1.37	3.62	0.51	3.24	0.48	35.78	209.2	185.9	59.13
ZJ4804 (S6)	41.03	77.47	10.00	36.00	7.00	1.40	6.07	0.83	5.86	1.23	3.14	0.45	2.82	0.41	31.75	193.7	172.9	52.56
ZJ5102 (L7)	42.60	80.50	9.81	37.79	7.14	1.46	6.23	0.81	6.33	1.25	3.38	0.49	3.06	0.45	34.76	201.3	179.3	56.76
剖面平均值 Profile average	43.71	84.04	10.41	38.34	7.43	1.47	6.37	0.90	6.31	1.31	3.42	0.49	3.08	0.46	34.19	207.7	185.4	56.52
标准偏差 SD	1.79	3.49	0.34	1.93	0.28	0.08	0.29	0.09	0.35	0.07	0.15	0.03	0.16	0.03	1.85	7.57	6.77	2.77
变异系数 CV (%)	4.10	4.15	3.25	5.04	3.72	5.55	4.59	10.40	5.54	5.09	4.52	5.27	5.19	5.92	5.40	3.64	3.65	4.90
黄土层平均值 Loess average	44.61	84.83	10.46	39.54	7.54	1.51	6.47	0.87	6.48	1.32	3.48	0.51	3.15	0.47	35.14	211.3	188.5	57.89
古土壤平均值 Paleosol average	42.98	83.41	10.37	37.38	7.34	1.44	6.29	0.92	6.18	1.3	3.37	0.48	3.01	0.44	33.44	204.9	182.9	55.43
黄土高原黄土[6] loess in Loess Plateau	32.96	66.92	6.74	28.15	5.74	1.14	4.87	0.84	4.62	0.95	2.68	0.43	2.74	0.43	25.01	159.2	141.7	42.57
砂黄土 Sandy loess	30.91	62.31	6.39	26.75	5.46	1.07	4.54	0.79	4.38	0.90	2.57	0.41	2.63	0.41	23.81	149.5	132.9	40.44
典型黄土 Typical loess	33.20	67.53	6.78	28.26	5.77	1.15	4.85	0.85	4.66	0.96	2.70	0.43	2.76	0.43	25.21	160.3	142.7	42.85
粘黄土 Clay loess	33.80	68.62	6.87	28.91	5.86	1.17	5.18	0.82	4.69	0.97	2.72	0.44	2.77	0.43	25.32	163.3	145.2	43.34

1) L:黄土层样品 Loess sample;S:古土壤层样品 Paloesol sample

(1) 李徐生. 长江以南第四纪风尘堆积序列与环境记录. 南京大学博士学位论文,2001

Tb 外)均要略高于古土壤层平均值(表 1)。将下蜀黄土与吴明清、文启忠等[6]所获得的黄土高原黄土的 REE 数据进行比较可以发现,镇江下蜀黄土的 ∑REE以及 ∑Ce、∑Y 均高于黄土高原黄土,表明镇江下蜀黄土无论是轻稀土元素(LREE)还是重稀土元素(HREE)均较黄土高原黄土更为富集。进一步对比可以发现, ∑REE、∑Ce和 ∑Y 值从砂黄土带 → 黄土带 → 粘黄土带 → 镇江下蜀黄土均呈有规律的逐渐增加的变化趋势。

表 2 列出了镇江下蜀黄土剖面 REE 的特征参数及与黄土高原各带黄土的比较,从中可以了解它们各自的 REE 分馏情况。由表 2 可知,下蜀黄土古土壤层 LREE/ HREE、$(La/ Yb)_N$、$(La/Lu)_N$ 以及 $(Gd/ Yb)_N$分别略高于黄土层,表明古土壤层的轻重稀土元素间的分馏以及重稀土元素间的分馏均要更明显一些。$(La/ Sm)_N$ 则是古土壤层略低,轻稀土元素之间的分馏以黄土层更明显一些。同时,下蜀黄土的各 REE 特征参数与黄土高原黄土有着很大的相似性。仔细比较其差异可发现:LREE/ HREE、$(La/ Yb)_N$、$(La/Lu)_N$、$(La/ Sm)_N$ 和 $(Gd/ Yb)_N$ 等参数值均是下蜀黄土相应地高于黄土高原黄土,说明下蜀黄土无论是轻重稀土元素之间,还是 LREE 之间以及 HREE 之间的分馏均比黄土高原黄土更为显著,且分馏程度从砂黄土带 →黄土带 →粘黄土带 → 镇江下蜀黄土逐渐增强。镇江下蜀黄土的 δEu 和 δCe 参数值与黄土高原黄土相似,尤其是 δEu 值极为接近,均变化于 0.65～0.67。无论是黄土层还是古土壤层,下蜀黄土均表现出中度的 Eu 负异常和轻微的 Ce 负异常,而黄土高原黄土则呈中度的 Eu 负异常和轻微的 Ce 正异常。

表 2　镇江下蜀黄土与黄土高原黄土[6] REE 特征参数比较

Table 2　Comparison between Xiashu Loess of Zhenjiang and the loess of the Loess Plateau in REE characteristic parameters

样品 Sample	样品数 Sample No.	LR/ HR	δEu	δCe	$(La/ Yb)_N$	$(La/Lu)_N$	$(La/ Sm)_N$	$(Gd/ Yb)_N$
黄土高原黄土[6] Loess in Loess Plateau	147	8.067	0.659	1.081	8.110	7.962	3.612	1.434
砂黄土 Sandy loess	23	7.991	0.657	1.067	7.924	7.831	3.561	1.393
黄土 Typical loess	97	8.089	0.665	1.083	8.110	8.020	3.619	1.418
粘黄土 Clay loess	27	8.059	0.649	1.084	8.227	8.165	3.628	1.509
镇江下蜀黄土剖面 Xiashu Loess profile	9	8.308	0.654	0.949	9.589	9.980	3.701	1.674
黄土层 Loess layers	4	8.285	0.661	0.945	9.548	9.859	3.722	1.657
古土壤 Paleosol layers	5	8.318	0.648	0.951	9.627	10.146	3.683	1.686

注:黄土高原黄土的 REE 特征参数是根据文献[6]数据计算得到 Note: The REE characteristic parameters of the Loess in the Loess Plateau were calculated out of the data of Reference [6]

对镇江大港剖面不同深度的 9 块样品的 REE 测试结果以 26 个球粒陨石的平均值归一化作图。图 1A 为镇江下蜀黄土剖面 9 块样品的稀土分布模式。可以看出,剖面各样品之间的稀土分馏情况是同步的,9 块样品的稀土分布模式曲线几乎重合。

将下蜀黄土与黄土高原马兰黄土以及洛川黄土剖面[9]相比,它们的稀土元素分布模式有着很好的相似性(图 1B)。球粒陨石标准化后 REE 的分布曲线彼此近于平行,形态相似,呈"V"型。分布特征是各元素分馏基本一致,分布曲线均为负斜率,La-Eu 曲线较陡,Eu-Lu 曲线较为平缓,均为 LREE 相对 HREE富集,Eu 呈较明显的负异常,Ce 异常不明显。

图 2 为经上陆壳(Upper Continent Crust,UCC)标准化后下蜀黄土与黄土高原黄土的 REE 分布模式。经 UCC 标准化两者均呈较平坦的直线型分布,表明两者均与 UCC 的 REE 组成相似。相对于 UCC,下蜀黄土 LREE 相对富集,HREE 则基本持平;黄土高原黄土 LREE 及 HREE 均相对亏损。

3　讨　论

3.1　REE 的富集及其制约因素

从以上结果来看,下蜀黄土与黄土高原黄土 REE 组成上最大的差异在于绝对含量明显较黄土高原黄土高,平均 LREE 和 HREE 分别较黄土高原黄土高出 31 %和 27 %, ∑REE 也高出 30 %,故相对于黄土高原黄土,下蜀黄土 REE 显示了明显的富集特征。吴明清、文启忠等[6]对黄土高原地区的黄土

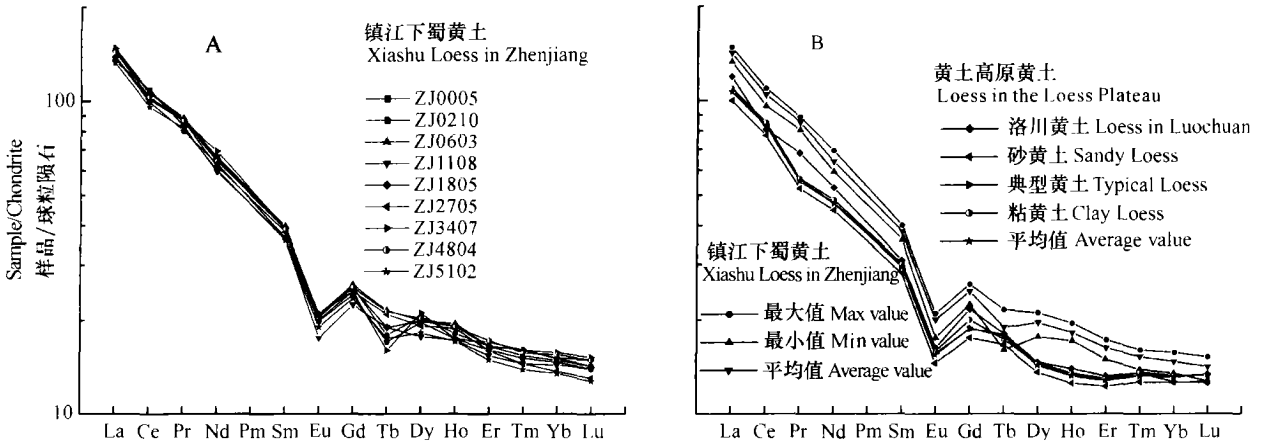


图 1 镇江下蜀黄土稀土元素分布模式(A)及与黄土高原黄土的比较(B)

Fig. 1 Comparison between Xiashu Loess in Zhenjiang (A) and the loess in the Loess Plateau in REE distribution pattern (B)

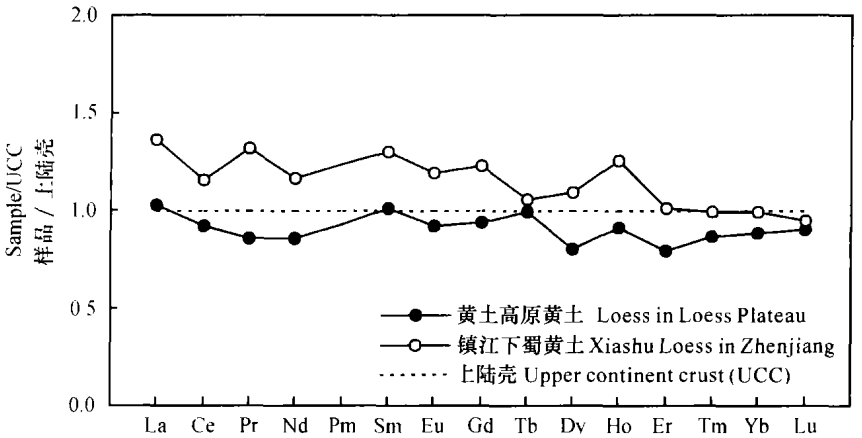


图 2 镇江下蜀黄土与黄土高原黄土 REE 的 UCC 标准化分布模式

Fig. 2 UCC-normalized REE distribution patterns of Xiashu Loess in Zhenjiang and the loess in the Loess Plateau

研究表明,稀土元素含量在区域分布上的差异与黄土在空间分布上的粒度分带性相一致,即自西北向东南,随着样品的粒径由粗到细,由砂黄土带过渡到黄土带再到粘黄土带,REE 总量有逐渐增加的趋势[6]。镇江下蜀黄土的稀土元素较黄土高原黄土更为富集,这一现象符合中国黄土稀土元素在空间区域上的基本分布规律。我们对镇江下蜀黄土进行的粒度研究表明,与粘黄土带黄土相比,镇江下蜀黄土的颗粒组成更细,并曾将下蜀黄土命名为细粘黄土带[13]。REE 绝对含量的差异可能主要受控于粒度的分选,下蜀黄土粘粒级组分含量明显较黄土高原黄土高,而粘土矿物吸附态是风化壳中稀土元素的主要存在形式[17]。一般认为,黄土沉积物中粘土矿物往往对 REE(尤其是 LREE)具有一定吸附作用,可以导致 REE 含量的明显增加[6]。下蜀黄土 9 块样品的 REE 与各样品中 < 2 μm 粘粒含量的相关性分析也证实了这一点(表 3):经相关性检验,下蜀黄土

表 3 下蜀黄土 REE 含量与粘粒含量、易溶元素组分含量以及 CIA 指数的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of the contents of REE with contents of < 2 μm clay and ($CaO + FeO + MgO + Na_2O + K_2O$) and CIA in Xiashu loess

项目 Items	粘粒 Clay (< 2 μm)	$CaO + FeO + MgO + Na_2O + K_2O$	CIA[1)]
∑REE	0.793 *	- 0.537	0.305
LREE	0.802 **	- 0.521	0.361
HREE	0.583	- 0.318	- 0.136

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; $n = 9$. 1) CIA: 化学蚀变指数,是反映风化壳风化强度的有效指标,计算公式为 $CIA = [Al_2O_3/(Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)] \times 100$, CIA 值越大,指示的风化强度越甚 Chemical index of alteration is an index indicating werthering intensity, and can be calculated by using the equation: $CIA = [Al_2O_3/(Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)] \times 100$. The larger the CIA value the higher the werthering intensity

< 2 μm 粘粒级组分含量与 ∑REE 呈一般正相关关系($p < 0.05$) ,与 LREE 则呈显著正相关($p < 0.01$) ,而与 HREE 相关性不明显($p > 0.05$) 。

黄土高原黄土剖面中,古土壤层和黄土层相比往往出现 REE 更为富集的特征。但研究注意到,下蜀黄土剖面中黄土层的 ∑REE 平均丰度及各 REE 分量值(Tb 除外) 均要略高于古土壤层平均值(表 1) 。刁桂仪、文启忠[11]曾对渭南黄土剖面中的稀土元素进行研究后认为,黄土高原黄土剖面中古土壤层较黄土层 REE 的表观丰度高主要是由于古土壤中碳酸盐遭到强烈淋滤而导致的相对富集,经 $CaCO_3$ 含量校正后,这一规律基本不存在,一些古土壤层的稀土含量反而较黄土层低,并据此认为成土过程中稀土元素可能有淋失。镇江下蜀黄土剖面的情况也验证了这一结论的正确性,下蜀黄土所处的纬度位置低于黄土高原黄土,堆积和成土过程中湿热程度都相对较高,无论是黄土层还是古土壤层中的易溶组分都经过了较强的淋滤并发生迁移,黄土层与古土壤层的易溶组分含量差异不明显,不会对 REE 的表观丰度造成较大影响。相关性分析证实,镇江下蜀黄土 REE 含量与易溶元素组分($CaO + FeO + MgO + Na_2O + K_2O$) 含量之间虽呈负相关,但显著性水平不高($p > 0.05$) ;而表征风化强度的化学蚀变指数(CIA)[18]与 REE 间的相关性显著水平则更低(表 3) 。由此看来,下蜀黄土剖面中黄土层 REE 丰度较古壤层略高可能与成土过程中 REE 本身发生了轻微的淋失作用有关,但风化作用显然不是控制下蜀黄土 REE 富集的主要因素(表 1) 。

3.2　REE 的分馏与物源示踪意义探讨

在表生条件下的风化作用过程中,虽然化学性质极为相近的稀土元素通常是作为一个整体而活动的,但由于它们性质上的微小差异也会发生一定分馏,而这种分馏特征主要受环境条件控制[11]。重稀土元素往往较轻稀土元素活泼,前者更易在溶液中形成重碳酸盐和有机络合物,优先被溶解迁移,后者则趋向于在风化残余物中富集[9,17]。镇江下蜀黄土古土壤层轻重稀土分馏程度比黄土层高,就显示了古土壤层遭受了更强的化学风化作用。干燥气候条件不利于稀土元素分馏作用进行,湿热气候条件下稀土元素可以被活化而进一步分异[2]。黄土高原地区以物理风化占主导地位,对 REE 一般不会产生明显的分馏,而长江中下游地区化学风化作用较强,土壤呈弱酸性,有利于轻重稀土间的分离[19],本文的研究结果也明确显示从黄土高原黄土到镇江下蜀黄土,自西北向东南随着化学风化程度的增加,轻重稀土的分馏程度也逐渐增强。

REE 单个元素中常呈异常的是 Eu 和 Ce,Eu 亏损主要是由于内生条件下 Eu^{2+} 与矿物中的 Ca^{2+} 置换造成,而在表生条件下 Eu 为 Eu^{3+},与其他稀土元素价态相同不会产生异常;Ce 在氧化条件下可呈 Ce^{4+} 存在,在酸性条件下发生迁移而与其他稀土分离出现负异常。所以,δEu 主要是由物源区原岩类型决定,不同的原岩类型由于不同的成岩过程 δEu 表现为不同的异常状况;而 δCe 因后期不同气候、不同环境介质变化而体现不同的异常状况。由表 2 可知,镇江下蜀黄土的 δEu 平均值与黄土高原各地黄土平均值高度一致,黄土层与古土壤层 δEu 平均值也相差不大,说明在下蜀黄土的风化成土过程中未出现明显的 Eu 再分馏,下蜀黄土 Eu 的中度负异常可能主要是继承了源区物质特征。δCe 与黄土高原黄土也较为相近,但表现出轻微的负异常(黄土高原黄土一般为轻微正异常) ,反映出下蜀黄土在酸性条件下,较强的化学风化过程中 Ce 有了进一步分馏,但分异并不明显。

因为 REE 主要以颗粒态搬运沉积,加之在风化、搬运、沉积及成岩时 REE 组成变化较小,其携带的物源区源岩信息一般不会丢失,物源往往成为控制沉积物中 REE 组成的最主要因素,因而可用 REE 作为一种重要的物源示踪物[20];另外,不同成因的岩石中稀土元素丰度、特征参数和分布模式也经常是不一样的。许多学者在比较了黄土高原不同地区黄土沉积与上地壳几种岩石的稀土模式后发现它们的稀土分布模式、分布曲线相一致,认为黄土是大范围内上地壳各类岩石风化物质的高度混合的产物,并指出黄土的稀土元素丰度可以用来代表上地壳(UCC) 的稀土元素丰度值。各地第四纪黄土稀土元素分布模式的一致性是黄土“风成说”的有力证据之一。从前文的分析和对比可以看出,一方面,大港剖面下蜀黄土不同时代各样品间的稀土元素特征参数和分布模式几乎完全一致;另一方面,下蜀黄土和典型的风尘堆积 ——黄土高原黄土的稀土元素特征参数和分布模式也有着很大的相似性,这既表明下蜀黄土组成具有显著的均匀性,又说明其与黄土高原黄土在成因上具有类似性。对比结果为下蜀黄土的“风成说”提供了新的地球化学证据;同时,也暗示了下蜀黄土与黄土高原黄土在物质来源上可能存在一定的继承性。下蜀黄土的物质来源区应当也是广泛而开放的空间范围,西北远源粉尘的直接搬运、黄土

高原黄土的二次扬尘输送以及近源的粉尘物质均有可能参与其物源组成[1],从而为下蜀黄土堆积提供众多的、复杂的颗粒物质,来自上陆壳不同源区的粉尘物质在风力搬运过程中经过高度混合,使得下蜀黄土的物质成分在几十万年的堆积时期内都能达到非常均匀的特性。下蜀黄土的稀土元素特征应当主要是继承了原始物质的特征,粉尘物质堆积后风化改造对稀土元素的分异作用并不十分显著,从而造成下蜀黄土剖面中的古土壤层样品与黄土层样品的稀土元素分布模式具有高度的相似性,这也表明古土壤与黄土的原始来源物质应当是一致的,尽管古土壤是在相对温湿的气候条件下形成,受到较强的风化成土作用,但仍保留了原始母质的稀土分布特征,在成壤作用中虽有 REE 的轻微淋失,但没有产生稀土元素的明显分馏。

4 结 论

1) 镇江下蜀黄土-古土壤剖面 ∑REE 变化于 193.7～214.9 μg g^{-1}之间,平均值为 207.7 μg g^{-1}。下蜀黄土 REE 绝对丰度明显高于黄土高原黄土,这种差异主要是由于下蜀黄土中粘粒组分含量较高,对 REE(特别是 LREE)产生吸附作用造成的。

2) 镇江下蜀黄土和黄土高原黄土的 REE 特征参数及配分模式具有很好的相似性,均与上陆壳(UCC)具有相近的 REE 组成;下蜀黄土剖面不同时代样品的 REE 分布模式几乎完全一致,具有显著的均匀性。这些特征为下蜀黄土的"风成说"提供了新的地球化学证据,并揭示下蜀黄土的物质来源区可能是一个广泛而开放的空间范围,下蜀黄土粉尘颗粒在搬运过程中经过了高度的混合。

3) 镇江下蜀黄土的稀土元素特征主要继承了原始物质的特征,总体来说化学风化对 REE 的分异作用并不十分显著,古土壤层与黄土层样品的 REE 组成差异不大,也没有产生明显的 Ce 和 Eu 再分馏。

参 考 文 献

[1] Henderson P. General geochemical properties and abundances of the rare earth elements. New York: Henderson P. Elsevier, 1984. 1～30

[2] 王中刚. 稀土元素地球化学. 北京: 科学出版社, 1989. 133～219, 333～342. Wang Z G. Rare Earth Element Geochemistry (In Chinese). Beijing: Science Press, 1989. 133～219, 333～342

[3] 文启忠, 余素华, 顾雄飞, 等. 黄土中稀土元素的初步探讨. 地球化学, 1981, 10(2):151～157. Wen Q Z, Yu S H, Gu X F, *et al*. Preliminary study on the rare earth elements of the loess (In Chinese). Geochimica, 1981, 10(2):151～157

[4] 文启忠, 余素华, 孙福庆, 等. 陕西洛川剖面的稀土元素. 地球化学, 1984, 13(2):126～133. Wen Q Z, Yu S H, Sun F Q, *et al*. Rare earth elements of the loess in Luochuan section, Shaanxi Province (In Chinese). Geochimica, 1984, 13(2):126～133

[5] 文启忠. 中国黄土地球化学. 北京: 科学出版社, 1989. 95～114. Wen Q Z. Geochemistry of the Chinese Loess (In Chinese). Beijing: Science Press, 1989. 95～114

[6] 吴明清, 文启忠, 潘景瑜, 等. 黄河中游地区马兰黄土的稀土元素. 科学通报, 1991, 36(5):366～369. Wu M Q, Wen Q Z, Pan J Y, *et al*. Rare earth elements of the Malan Loess in the middle reaches of the Yellow River (In Chinese). Chinese Science Bulletin, 1991, 36(5):366～369

[7] 张虎才. 武都黄土剖面稀土元素研究. 地球化学, 1996, 25(6):545～550. Zhang H C. Study on the rare earth elements of the Wudu Loess section (In Chinese). Geochimica, 1996, 25(6):545～550

[8] 余素华. 我国第四纪沉积物中的稀土元素地球化学研究. 见: 刘东生主编. 中国第四纪地质与环境. 北京: 海洋出版社, 1997. 297～305. Yu S H. Study on the REE geochemistry of the Chinese Quaternary sediments (In Chinese). *In*: Liu D S. ed. Quaternary Geology and Environment of China. Beijing: Ocean Press, 1997. 297～305

[9] 陈骏, 王洪涛, 鹿化煜. 陕西洛川黄土沉积物中稀土元素及其他微量元素的化学淋滤研究. 地质学报, 1996, 70(1):61～72. Chen J, Wang H T, Lu H Y. Behaviors of REE and other trace elements during pedological weathering—Evidence from chemical leaching of loess and paleosol from the Luochuan section in central China (In Chinese). Acta Geologica Sinica, 1996, 70(1):61～72

[10] 彭淑贞, 郭正堂. 西峰地区晚第三纪红土稀土元素的初步研究. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(2):39～43. Peng S Z, Guo Z T. A preliminary study on REE of the late Tertiary laterite in Xifeng area (In Chinese). Marine Geology & Quaternary Geology, 2000, 20(2):39～43

[11] 刁桂仪, 文启忠. 渭南黄土剖面中的稀土元素. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(4):57～61. Diao G Y, Wen Q Z. Rare earth elements of the Weinan Loess sections (In Chinese). Marine Geology & Quaternary Geology, 2000, 20(4):57～61

[12] 曹军骥, 张小曳, 王丹, 等. 晚新生代风尘沉积的稀土元素地球化学特征及其古气候意义. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(1):97～102. Cao J J, Zhang X Y, Wang D, *et al*. REE geochemistry of late Cenozoic eolian sediments and the paleoclimate significance (In Chinese). Marine Geology & Quaternary Geology, 2001, 21(1):97～102

[13] 李徐生, 杨达源, 鹿化煜. 镇江下蜀黄土的粒度特征及其成因初探. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(1):25～32. Li X S, Yang D Y, Lu H Y. Grain-size features and genesis of the Xiashu Loess in Zhenjiang (In Chinese). Marine Geology & Quaternary Geology, 2001, 21(1):25～32

[14] 李徐生, 杨达源. 镇江下蜀黄土-古土壤序列磁化率特征与

环境记录. 中国沙漠, 2002, 22(1):27～32. Li X S, Yang D Y. Magnetic susceptibility features and environmental records of the Xiashu Loess in Zhenjiang, Jiangsu Province (In Chinese). Journal of Desert Research, 2002, 22(1):27～32

[15] 李徐生, 杨达源. S2 以来下蜀黄土沉积序列磁化率记录与深海氧同位素记录的对比. 南京大学学报(自然科学版), 2001, 37(6):766～771. Li X S, Yang D Y. Magnetic susceptibility records of the Xiashu Loess since S2 and their comparisons with the Marine Oxygen Isotope records (In Chinese). Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2001, 37(6):766～771

[16] 陈骏, 季俊峰, 仇纲, 等. 陕西洛川黄土化学风化程度的地球化学研究. 中国科学(D 辑), 1997, 27(6):531～536. Chen J, Ji J F, Qiu G, *et al*. Geochemistry of the chemical weathering of the loess in Luochuan, Shaanxi Province (In Chinese). Science in China (Series D), 1997, 27(6):531～536

[17] 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. 地球科学进展, 2004, 19(1):87～93. Ma Y J, Huo R K, Xu Z F, *et al*. REE behavior and influence factors during chemical weathering (In Chinese). Advance in Earth Sciences, 2004, 19(1):87～93

[18] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motion inferred from major element chemistry of lutites. Nature, 1982, 299: 715～717

[19] 杨守业, 李从先. 长江和黄河沉积物 REE 地球化学及示踪作用. 地球化学, 1999, 28(4):374～380. Yang S Y, Li C X. REE geochemistry and tracing application in the Yangtze River and the Yellow River sediments (In Chinese). Geochimica, 1999, 28(4): 374～380

[20] 杨守业, 李从先. REE 示踪沉积物物源研究进展. 地球科学进展, 1999, 14(2):164～167 Yang S Y, Li C X. Research progress in REE tracer for sediment source (In Chinese). Advance in Earth Sciences, 1999, 14(2):164～167

REE GEOCHEMISTRY OF XIASHU LOESS IN ZHENJIANG, JIANGSU PROVINCE

Li Xusheng[1,2]　Han Zhiyong[1]　Yang Dayuan[1]　Chen Yueyou[3]

(1 Department of Urban and Resources Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

(2 State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, CAS, Xi'an 710075, China)

(3 Zhenjiang Prospecting and Mapping Institute of Jiangsu Province, Zhenjiang, Jiangsu 212000, China)

Abstract　Variation of Xiashu Loess-Paleosol of Zhenjiang in rare earth element (REE) composition was studied, and the findings show that ∑REE varied in the range from 193.7 to 214.9 μg g^{-1} with an average value of 207.7 μg g^{-1}. Compared with the Loess of the Loess Plateau, Xiashu Loess were significantly higher in REE absolute abundance, because of its higher content of clay that adsorbed REEs (especially LREEs). But they showed similar REE distribution patterns and characteristic parameters, and they were also quite similar to the upper continent crust (UCC) in REE composition. The REE distribution patterns of Xiashu Loess samples of different ages were almost identical, which displays uniformity of Xiashu Loess in material composition of the profile. The above-mentioned features provide new geochemical evidence of the aeolian origin theory for Xiashu Loess, and indicate that the materials of Xiashu Loess might come from an open and broad area and get highly mixed as aeolian dust during the process of transportation. The REE characteristics of Xiashu Loess are inherited mainly from its source materials. Even though the aeolian dusts has undergone stronger weathering and soil-forming process after they were settled and accumulated, the fractionation between LREE and HREE in Xiashu Loess is more apparent than in the loess of the Loess Plateau. On the whole, chemical weathering does not show any remarkable influence on REE fractionation, and the Paleosol does not vary much from the loess in REE composition or show any apparent Ce-depletion and Eu-depletion.

Key words　Rare earth element (REE); Xiashu Loess; Zhenjiang