

毛龙江, 莫多闻, 周昆叔, 等. 2009 湖南澧阳平原黑褐色土的稀土元素地球化学特征及其环境意义 [J]. 环境科学学报, 29(7): 1561-1568
Mao L J, Mo D W, Zhou K S, *et al*. 2009 Rare earth elements in and the environmental significance of the dark brown soil in the Liyang Plain, Hunan Province, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 29(7): 1561-1568

湖南澧阳平原黑褐色土的稀土元素地球化学特征及其环境意义

毛龙江^{1,2,*}, 莫多闻², 周昆叔³, 郭伟民⁴, 贾耀锋⁵, 杨兢红⁶, 邓辉², 史辰羲², 贾敬禹²

1 南京信息工程大学 大气科学学院, 南京 210044

2 北京大学 城市与环境学院, 北京 100871

3 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

4 湖南省文物考古研究所, 长沙 410008

5 陕西师范大学 旅游与环境学院, 西安 710062

6 南京大学 地球科学系, 南京 210093

收稿日期: 2008-10-13 修回日期: 2009-02-19 录用日期: 2009-05-08

摘要: 通过对澧阳平原大量的野外考察、典型剖面玉成 (YC) 黑褐色土壤剖面的系统取样和室内粒度、稀土元素地球化学分析, 以及 OSL 和 AMS¹⁴C 年代测定, 探讨了黑褐色土的稀土地球化学特征, 揭示了黑褐色土的形成年代、形成过程与形成环境。研究结果表明, 黑褐色土层 Σ REE 变化范围分布在 184.63~264.26 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 其平均值为 207.93 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; 低于剖面的 Σ REE 总平均值 219.87 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 与洞庭盆地的红土 Σ REE 平均值 (211.6 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 大体相当, 但明显高于镇江下蜀黄土 (207.7 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 和黄土高原黄土 (159.2 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), 表明 YC 剖面黑褐色土上经过了相对较强的风化成壤作用。YC 剖面黑褐色土的稀土分布模式与该剖面黄土层、黄土高原黄土、镇江下蜀黄土和洞庭盆地风成红土等典型风成沉积物的分布模式具有一致性, 而与河流沉积物、湖泊沉积物和基岩风化红土在稀土的分布模式上具有明显差别。而且, YC 剖面沉积物粒度频率曲线呈明显的单峰分布, 与典型河流相的双峰粒度频率分布存在显著差异; YC 剖面位于澧阳平原中部台地上, 比周边高 5~10m, 不可能是洪水作用沉积物; 野外调查进一步表明, 沉积物无水流作用痕迹; OSL 和 AMS¹⁴C 年代测定表明, 黑褐色土层形成的年代对应于 23.8~10.6 ka BP, 此年代对应于末次冰期的晚期, 其形成于相对冷湿的气候环境。因此, 黑褐色土层及其上、下部的黄土层均为风成堆积物。

关键词: 澧阳平原; 黑褐色土; 稀土元素; 风尘堆积; 环境演变

文章编号: 0253-2468(2009)07-1561-08 中图分类号: X142 文献标识码: A

Rare earth elements in and the environmental significance of the dark brown soil in the Liyang Plain, Hunan Province, China

MAO Longjiang^{1,2,*}, MO Duowen², ZHOU Kunshu³, GUO Weimin⁴, JIA Yaofeng⁵, YANG Jinghong⁶, DENG Hui², SHI Chenxi², JIA Jingyu²

1 College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871

3 Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029

4 Hunan Provincial Institute of Cultural Relics and Archaeology, Changsha 410008

5 Department of Tourism and Environment, Shanxi Normal University, Xi'an 710062

6 Department of Earth Science, Nanjing University, Nanjing 210093

Received 13 October 2008 received in revised form 19 February 2009; accepted 8 May 2009

基金项目: 国家科技支撑计划项目课题 (No. 2006BAK21B02); 国家重点基础研究发展计划项目 (No. 2003CB415201); 国家自然科学基金 (No. 40671016)

Supported by the National Science and Technology Support Program (No. 2006BAK21B02), the National Basic Research Program of China (No. 2003CB415201) and the National Natural Science Foundation of China (No. 40671016)

作者简介: 毛龙江 (1976-), 男; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: mlj214@163.com

Biography: MAO Longjiang (1976-), male; * Corresponding author, E-mail: mlj214@163.com

Abstract The geochemical characteristics of the rare earth elements (REE) in the dark brown soil from the YC profile in the Liyang plain are discussed based on field surveys, sediment sampling and laboratory experiments such as grain size analysis, REE analysis and OSL and AMS14C dating. The time process and environment of the formation of the dark brown soil are also discussed in this paper. The Σ REE in the dark brown soil from the YC profile varies from $184.63 \mu\text{g g}^{-1}$ to $264.26 \mu\text{g g}^{-1}$. The average value of Σ REE in the dark brown soil ($207.93 \mu\text{g g}^{-1}$) is lower than that of the entire profile YC ($219.87 \mu\text{g g}^{-1}$), comparable to that of the red soil in the Dongting Basin ($211.6 \mu\text{g g}^{-1}$), and significantly higher than those of the Xiashu loess in Zhenjiang ($207.7 \mu\text{g g}^{-1}$) and the loess in the Loess Plateau ($159.2 \mu\text{g g}^{-1}$). The above results indicate that the dark brown soil from YC profile in the Liyang Plain has experienced relatively strong weathering pedogenesis. The REE distribution pattern of the dark brown soil from the YC profile is similar to that of the loess in the Loess Plateau, the Xiashu loess in Zhenjiang and the eolian red soil from the Dongting Basin. However, the REE distribution pattern of the dark brown soil is significantly different from that of fluvial sediments, lake sediments and the red soil from bedrock weathering. Moreover, the grain-size frequency curves of sediments along the YC profile have a unimodal distribution, which is different from the typical bimodal distribution of fluvial sediments. The YC profile is located on the tableland 5 to 10 m higher than the surrounding areas, and no trace of fluvial processes was found during the field survey. Thus the black brown soil is not diluvium. The results of the OSL and AMS14C dating indicate that the black brown soil formed between 23800 a BP and 10600 a BP during the last glaciation in a relatively cold and wet climate. Therefore, the black brown soil and its upper and lower layers of loess are eolian deposits.

Keywords the Liyang Plain; black brown soil; REE; eolian deposition; environmental change

1 引言 (Introduction)

长江中游地区澧阳平原的鸡叫城、十里岗、八十垱和大坪遗址等考古遗址的地层中普遍存在一个黑褐色土层,在地层中曾取样作 AMS¹⁴C分析,发现其年代距今约 18000~16000年前,这个黑褐色土层中常有细小石器出现,属于澧阳平原旧石器文化向新石器演进过程中的普遍现象(郭伟民, 2005)。黑褐色土层上部叠压的是新石器时代的彭头山文化,这个时期亦有较多的细小石器。2006~2007年期间多次对澧阳平原及江汉平原的古遗址进行野外考察,发现这一特殊地层,此地层是承接新、旧石器文化的重要地层。而且,在澧阳平原中部有许多海拔高程为 40~50m,比周边高出 5~10m 的小岗地,许多遗址就分布小这些小岗地上。岗地剖面的基本沉积序列是黑褐色土层上、下部均为黄土层,剖面无任何水流作用的痕迹。弄清楚这层黑褐色土层的形成过程与形成环境,对于研究该区的新、旧石器文化及其兴衰规律具有重要的意义。

因此,本文在大量野外考察基础上,在澧阳平原大坪乡选取了玉成(YC)自然剖面(29°39′52″87″N, 111°39′55″67″E, 海拔高程 44m)作为研究地点,通过剖面的系统采样和室内稀土元素分析和沉积学分析,对澧阳平原黑褐色土进行了系统研究,以期探讨黑褐色土层的稀土元素化学特征及其形成过程与形成环境。

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 剖面特征与采样

在野外勘察基础上,选取了澧阳平原大坪乡玉

成村 YC剖面。经过修理后露出一个新鲜剖面,剖面中部是一层黑褐色土层发育。按照野外观察记录,可将剖面地层作以下划分,从上往下依次为: ① 0~20cm 为棕黄色土层,黏土质粉沙,记为 L₀; ② 20~88cm 为黑褐色土层,此层在澧阳平原广泛发育,用 S₀* 表示; ③ 88~114cm 为铁锰结核层,可见大量的铁锰结核和铁锰斑块,用 L_t* 表示; ④ 114~160cm 为棕黄色黄土层,其形成年代相当于黄土高原的马兰黄土,未见底,用 L₁表示(图 1)。对 YC剖面进行系统采样,自地表往下以 2cm 间隔连续采样,底部黄土层以 5cm 间隔取样,共采集样品 66 个。对 66 个样品进行粒度分析,从中选取 15 块样品进行稀土元素地球化学分析,从 L₀中选取样品 YC003、YC008, S₀* 中选取 YC013、YC018、YC023、YC028、YC033、YC038、YC043, L_t* 中选取 YC047、YC051、YC055, L₁中选取 YC058、YC062、YC066 并在剖面深度的 10~12cm、30~32cm、40~42cm 和 60~62cm 处采集沉积物 AMS¹⁴C 样品 4 个,在深度 90~100cm、105~115cm、130~140cm 和 150~160cm 处共采集释光年代样品(作 OSL 年代) 4 个。

2.2 测试方法

样品在常温下自然风干后,将每块约 5.0 g 重的样品分别置于玛瑙研钵中研磨,过 200 目分析筛后供实验处理。处理方法如下:首先称取 50mg 过 200 目分析筛的烘干样品粉末于 7mL Teflon 密闭溶样罐中,加入 1mL 的 HF,在 120℃电热板上加热以去除样品中的 SO₂,蒸至近干时,再加入 0.5mL HNO₃和 1mL HF,将溶样罐放入封紧的钢套内,在 180℃的烘箱中加热 96h 使样品完全溶解;然后取出密闭反应罐,在电热板上缓慢蒸发以去除 HF,蒸至

近干的样品冷却后, 加入 1.5 mL HNO₃ 和 18.2 MΩ 的去离子水, 并转移到 50 mL 容量瓶, 加入 1 mL 500 ng L⁻¹ 的 Rh (内标元素), 充分混合后, 定容到 50 mL, 即可在 Finnigan Mat Element II 质谱仪 (Thermo 公司, 德国) 上进行测定. 分析过程采用空白样及国家标准沉积样标样 SDO-1 进行全程监控, 各元素标准偏差 (RSD) 小于 5%, 相对误差小于 10%. 所有样品在南京大学壳幔演化与成矿作用国家重点实验室完成.

粒度分析使用 Mastersizer 2000 激光粒度仪分析完成, 测量范围为 0.01~2000 μm, 多次重复测试误差小于 1%. 前处理步骤如下: 加入过量浓度为 30% 的 H₂O₂ 去除样品中的有机物; 加去离子水至 100 mL, 煮沸使过量的 H₂O₂ 分解; 冷却后加入体积比为 1:3 的盐酸 5 mL 以去除样品中的碳酸钙, 并煮沸使其充分反应; 静止 24 h 后用虹吸法抽去清液, 反复 2~3 次至 pH 值中性; 加入 10 mL 浓度为 0.05 mol L⁻¹ 的偏磷酸钠分散剂, 添加去离子水至 150 mL 加热煮沸 5 min 以上, 冷却后上机测试.

4 个光释光年代样品的测定根据标准方法进行样品前处理 (直径 4~11 μm) (Roberts *et al.*, 2003; Lu *et al.*, 2004), 即样品前处理均在柔和的红外灯 (波长大于 590 nm) 下进行. 首先将样品轻轻研磨, 然后经过过氧化氢在室温下处理 72 h 以除去有机物质; 再经盐酸在室温下处理约 24 h 以除去碳酸钙; 最后用蒸馏水将处理的残液洗滤至中性, 用蒸馏水沉淀法提取 4~11 μm 的沉淀物并沉淀在 9.8 mm 的不锈钢样碟上成为最后用于释光测定的样片. 样品预热、辐射和测定均使用 Risø TL/OSL DA-15 释光测定仪. 4 个 AMS¹⁴C 年代样品由北京大学考古文博学院加速器质谱仪上完成.

3 结果 (Results)

3.1 地层年代框架

澧阳平原 YC 自然剖面的年代深度模式如图 1 所示. 根据图 1 可以初步估算各层的沉积速率和各层的形成年代. 估算的大致过程是, 根据每 2 个年代的年代差和沉积厚度, 使用沉积厚度除以年代差即可得到沉积速率, 然后使用计算得到的沉积速率和每层的沉积厚度即可换算得到每层的形成年代. 估算结果表明, 黑褐色土层 (S₀^{*}) 的形成年代为 23.8~10.6 ka BP, 铁锰结核层 (L_t^{*}) 对应的年代是 31.8~23.8 ka BP, 下部黄土层 (L₁) 的对应年代是

56.0~31.8 ka BP, 而上部黄土层 (L₀) 的形成年代大致为 10.6~7.0 ka BP, 为全新世早期沉积物.

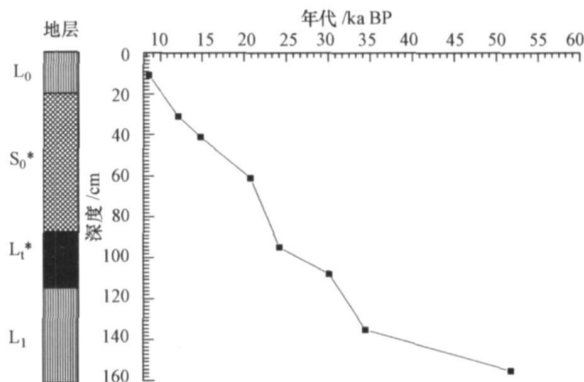


图 1 澧阳平原 YC 剖面年代深度模式图

Fig 1 Dating variations with the depth of the YC profile in the Liyang Plain

3.2 稀土元素含量与特征参数变化

表 1 列出了澧阳平原 YC 自然沉积剖面 15 块样品的 REE 分量和稀土元素总量 (Σ REE). 从表 1 中可以看出, YC 自然沉积剖面的稀土含量总量 (Σ REE) 变化范围在 152.23~338.86 $\mu\text{g g}^{-1}$ 之间. 其中, 黑褐色土层 S₀ (稀土含量的变化范围分布在 184.63~264.26 $\mu\text{g g}^{-1}$, 其平均值为 207.93 $\mu\text{g g}^{-1}$; 上覆的黄土层 L₀ 稀土含量的平均值为 292.29 $\mu\text{g g}^{-1}$; 铁锰膜层 L_t 层和下部黄土层 L₁ 的 Σ REE 分别为 180.01 和 199.25 $\mu\text{g g}^{-1}$. YC 剖面的 Σ REE 总平均值为 219.87 $\mu\text{g g}^{-1}$, 与洞庭盆地的红土 Σ REE 总平均值 (211.6 $\mu\text{g g}^{-1}$) 大体相当, 但要明显高于下蜀黄土 (207.7 $\mu\text{g g}^{-1}$) 和黄土高原黄土 (159.2 $\mu\text{g g}^{-1}$) 的稀土含量总量平均值 (表 1), 这表明了 YC 剖面沉积物总体上经过了强风化成壤作用.

表 2 列出了澧阳平原 YC 剖面沉积物 REE 的特征参数, 并与洞庭盆地红土、黄土高原黄土和镇江下蜀黄土进行比较, 从而可以清楚地得知它们各自的 REE 分馏特征. 从表 2 可以看出, YC 剖面沉积物轻稀土 (LREE) / 重稀土 (HREE)、(La/Yb)_N、(La/Lu)_N、(La/Sm)_N 以及 (Gd/Yb)_N 分别略低于洞庭盆地红土, 表明 YC 剖面沉积物轻重稀土元素间的分馏以及重稀土元素间的分馏均不如洞庭盆地红土明显. YC 剖面沉积物的 δEu 和 δCe 参数值与镇江下蜀黄土和黄土高原黄土相似, 其中, δEu 值为接近, 均变化于 0.62~0.67 范围之内. YC 剖面

沉积物表现为 Eu 的负异常和 Ce 的正异常, 下蜀黄土均表现出中度的 Eu 负异常和轻微的 Ce 负异常,

黄土高原黄土则呈中度 Eu 负异常和轻微的 Ce 正异常.

表 1 澧阳平原 YC 剖面稀土元素含量

Table 1 REE contents of sediments from the YC profile from the Liyang Plain

| 样品号 | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | ΣREE | LREE | HREE |
|---------------------|-------|--------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|--------|-------|
| YC003 | 48.58 | 136.95 | 10.51 | 40.49 | 7.60 | 1.58 | 6.95 | 0.93 | 6.21 | 1.33 | 3.82 | 0.57 | 3.52 | 0.56 | 269.61 | 245.72 | 23.89 |
| YC008 | 55.85 | 212.45 | 12.36 | 47.25 | 9.03 | 1.92 | 8.89 | 1.14 | 7.44 | 1.55 | 4.56 | 0.64 | 4.08 | 0.63 | 367.79 | 338.86 | 28.93 |
| YC013 | 60.28 | 101.93 | 11.94 | 45.06 | 7.75 | 1.67 | 7.73 | 0.99 | 6.65 | 1.45 | 4.16 | 0.60 | 3.72 | 0.60 | 254.52 | 228.63 | 25.89 |
| YC018 | 52.63 | 85.26 | 10.56 | 39.68 | 7.33 | 1.51 | 6.95 | 0.90 | 5.95 | 1.31 | 3.84 | 0.55 | 3.46 | 0.57 | 220.51 | 196.97 | 23.54 |
| YC023 | 44.23 | 86.84 | 9.52 | 35.85 | 6.82 | 1.36 | 6.54 | 0.85 | 5.78 | 1.25 | 3.58 | 0.53 | 3.32 | 0.52 | 206.99 | 184.63 | 22.36 |
| YC028 | 54.87 | 123.01 | 11.48 | 42.37 | 7.69 | 1.50 | 6.99 | 0.94 | 6.04 | 1.31 | 3.87 | 0.54 | 3.46 | 0.54 | 264.62 | 240.93 | 23.69 |
| YC033 | 47.95 | 92.73 | 10.22 | 38.97 | 7.32 | 1.47 | 6.73 | 0.89 | 5.67 | 1.23 | 3.63 | 0.51 | 3.40 | 0.53 | 221.25 | 198.65 | 22.59 |
| YC038 | 46.25 | 90.84 | 9.95 | 36.95 | 6.63 | 1.38 | 6.42 | 0.83 | 5.62 | 1.21 | 3.38 | 0.51 | 3.25 | 0.53 | 213.74 | 191.99 | 21.75 |
| YC043 | 45.61 | 115.80 | 9.30 | 35.36 | 6.39 | 1.26 | 5.76 | 0.75 | 5.02 | 1.10 | 3.08 | 0.47 | 3.01 | 0.47 | 233.38 | 213.73 | 19.65 |
| YC047 | 42.07 | 101.75 | 8.68 | 31.19 | 6.03 | 1.23 | 5.79 | 0.74 | 5.05 | 1.08 | 3.14 | 0.46 | 2.96 | 0.47 | 210.64 | 190.95 | 19.69 |
| YC051 | 33.77 | 76.74 | 7.54 | 28.30 | 4.90 | 0.97 | 4.32 | 0.61 | 4.14 | 0.93 | 2.83 | 0.43 | 2.61 | 0.42 | 168.52 | 152.23 | 16.29 |
| YC055 | 41.86 | 103.95 | 9.00 | 34.75 | 6.05 | 1.23 | 6.05 | 0.71 | 5.08 | 1.07 | 3.05 | 0.47 | 3.06 | 0.48 | 216.81 | 196.84 | 19.97 |
| YC058 | 41.44 | 90.38 | 8.91 | 33.91 | 5.84 | 1.20 | 5.62 | 0.75 | 5.06 | 1.15 | 3.25 | 0.49 | 3.02 | 0.49 | 201.50 | 181.68 | 19.82 |
| YC062 | 42.84 | 103.98 | 9.56 | 36.11 | 6.58 | 1.36 | 5.93 | 0.78 | 5.36 | 1.17 | 3.37 | 0.51 | 3.22 | 0.52 | 221.30 | 200.43 | 20.86 |
| YC066 | 49.34 | 108.13 | 10.91 | 39.24 | 6.75 | 1.29 | 5.91 | 0.74 | 5.01 | 1.15 | 3.23 | 0.49 | 3.09 | 0.49 | 235.76 | 215.65 | 20.11 |
| L ₀ | 52.22 | 174.70 | 11.44 | 43.87 | 8.32 | 1.75 | 7.92 | 1.04 | 6.82 | 1.44 | 4.19 | 0.60 | 3.80 | 0.59 | 318.70 | 292.29 | 26.41 |
| S ₀ * | 50.26 | 99.49 | 10.42 | 39.18 | 7.13 | 1.45 | 6.73 | 0.88 | 5.82 | 1.27 | 3.65 | 0.53 | 3.37 | 0.54 | 230.72 | 207.93 | 22.78 |
| L* | 39.23 | 94.15 | 8.41 | 31.41 | 5.66 | 1.14 | 5.39 | 0.69 | 4.76 | 1.03 | 3.00 | 0.45 | 2.88 | 0.46 | 198.66 | 180.01 | 18.65 |
| L ₁ | 44.54 | 100.83 | 9.79 | 36.42 | 6.39 | 1.28 | 5.82 | 0.76 | 5.14 | 1.16 | 3.28 | 0.50 | 3.11 | 0.50 | 219.52 | 199.25 | 20.26 |
| 总平均值 | 46.56 | 117.29 | 10.01 | 37.72 | 6.87 | 1.41 | 6.46 | 0.84 | 5.64 | 1.22 | 3.53 | 0.52 | 3.29 | 0.52 | 241.90 | 219.87 | 22.03 |
| 洞庭盆地红土 ^① | 46.2 | 100.8 | 8.5 | 31.4 | 5.3 | 1.0 | 4.8 | 0.9 | 4.7 | 1.0 | 3.1 | 0.4 | 3.1 | 0.5 | 211.6 | 193.2 | 47.3 |
| 镇江下蜀黄土 ^② | 43.7 | 84.0 | 10.4 | 38.3 | 7.43 | 1.47 | 6.37 | 0.90 | 6.31 | 1.31 | 3.42 | 0.49 | 3.08 | 0.46 | 207.7 | 185.4 | 56.52 |
| 黄土高原黄土 ^③ | 33.0 | 67.0 | 6.7 | 28.2 | 5.74 | 1.14 | 4.87 | 0.84 | 4.62 | 0.95 | 2.68 | 0.43 | 2.74 | 0.43 | 159.2 | 141.7 | 42.6 |

注: ①引自毛龙江等, 2008 ②引自李徐生等, 2006 ③引自吴明清等, 1991. LREE 为轻稀土, HREE 为重稀土.

表 2 澧阳平原 YC 剖面沉积物与洞庭盆地红土^①、镇江下蜀黄土^②、黄土高原黄土^③ REE 特征参数比较

Table 2 Comparison of the characteristic REE parameters from the reticulate red clay from Dongting basin and Xishu Loess in Zhenjiang and basin in the Loess Plateau

| 样品 | 样品个数 | LREE/HREE | δEu | δCe | (La/Lu) _N | (La/Yb) _N | (La/Sm) _N | (Gd/Yb) _N |
|---------------------|------|-----------|------|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| L ₀ | 2 | 11.07 | 0.67 | 1.55 | 9.05 | 8.33 | 3.45 | 1.67 |
| S ₀ * | 7 | 9.13 | 0.64 | 0.96 | 9.62 | 9.01 | 3.86 | 1.60 |
| L* | 3 | 9.65 | 0.64 | 1.13 | 8.84 | 8.24 | 3.80 | 1.50 |
| L ₁ | 3 | 9.83 | 0.65 | 1.06 | 9.26 | 8.69 | 3.82 | 1.51 |
| 总平均值 | 15 | 9.92 | 0.65 | 1.17 | 9.19 | 8.57 | 3.73 | 1.57 |
| 洞庭盆地红土 ^① | 4 | 10.47 | 0.64 | 1.11 | 9.64 | 9.10 | 4.81 | 1.25 |
| 镇江下蜀黄土 ^② | 9 | 8.31 | 0.65 | 0.95 | 9.59 | 9.98 | 3.70 | 1.67 |
| 黄土高原黄土 ^③ | 147 | 8.07 | 0.66 | 1.08 | 8.11 | 7.96 | 3.61 | 1.43 |

注: ①引自毛龙江等, 2008 ②引自李徐生等, 2006 ③引自吴明清等, 1991.

4 讨论 (Discussion)

4.1 稀土配分模式与土壤成因

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 (王中刚等, 1989). REE 主要以颗粒态搬运沉积, 在搬运、堆积和成岩过程 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, 因此, REE 可以作为一种重要的物源示踪物 (杨守业等, 1999); 而且, 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 (朱丽东, 2007). 因此, 通过沉积物与已知成因的沉积物分布模式进行比较, 就可以获得沉积物的成因类型. 球粒陨石被认为是地球的原始物质, 以其为标准, 可

以更清楚地反映样品相对于地球原始成分的分异程度. 用球粒陨石的稀土元素平均含量除各类样品中相对应的各稀土元素的含量, 取比值的对数为纵坐标, 以稀土元素原子序数由小到大排列为横坐标, 获得各类样品稀土元素的标准化曲线, 即沉积物的稀土分布模式 (文启忠, 1989).

图 2 为澧阳平原 YC 剖面各层沉积物样品的稀土分布模式. 从图 2 中可以看出, 剖面各层内部的稀土分布模式具有很好的一致性. 其中, L_1 为黄土层, 其年代大致相当于黄土高原的马兰早期, 而 L_1^* 层对应的是 MS3 晚期, S_0^* 层对应的末次冰期晚期沉积, L_0 为全新世黄土层. 稀土分布模式的一致性表明 YC 剖面沉积物在成因上具有一致性. 同时也表明黑褐色土层的形成与其上层黄土和下伏黄土在成因上具有一致性, 同为风尘成因.

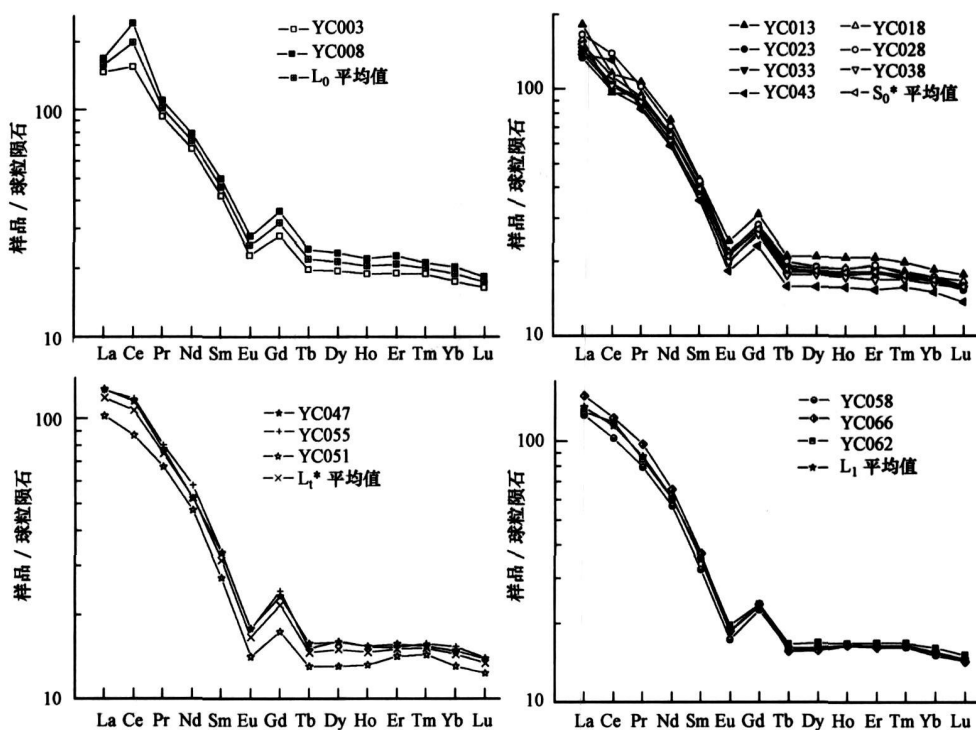


图 2 澧阳平原 YC 自然沉积剖面沉积物各层稀土分布模式

Fig. 2 The REE distribution pattern of different layers in the YC profile in the Liyang Plain

为了更好地证明土层的成因为风尘特征, 与已知成因的西北黄土高原黄土和镇江下蜀黄土进行分布模式比较 (图 3). 从各层沉积物样品稀土平均值分布模式及其与黄土高原黄土、镇江下蜀黄土和洞庭盆地网纹红土稀土分布模式的比较来看, 澧阳平原 YC 自然沉积剖面各层沉积物分布模式均表现为 LREE 的富集, HREE 相对平缓. 这与黄土高原黄

土的分布模式具有相同的特点, 表明澧阳平原 YC 自然剖面各层沉积物在成因上具有一致性, 而且与黄土高原黄土、镇江下蜀黄土和洞庭盆地网纹红土在成因上具有一致性, 同为风尘成因. 这同时也表明澧阳平原岗地上的黑褐色土层实质是风尘堆积的结果, 其形成是末次冰期晚期风尘堆积, 但是相对冷湿的气候条件使沉积物处于相对还原的条件,

从而表现为黑褐色。

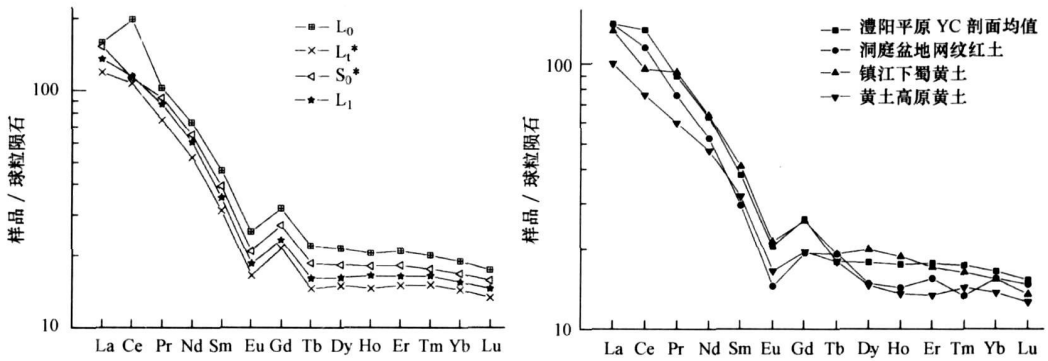


图 3 澧阳平原 YC自然沉积剖面各层沉积物及其与黄土高原黄土 (吴明清等, 1991)、镇江下蜀黄土 (李徐生等, 2006)、洞庭盆地红土 (毛龙江等, 2008) 稀土分布模式比较

Fig 3 Comparison of the REE distribution patterns in sediments from the YC profile in the Liyang Plain, red clay from Dongting basin and Xiaslu Loess in Zhenjiang and loess in the Loess Plateau

图 4 为澧阳平原 YC 剖面沉积物与河流沉积物、湖相沉积物和基岩风化红土的分布模式的比较. 从图 4 可以看出, 澧阳平原 YC 剖面沉积物表现为 LREE 的富集, HREE 相对平缓; 河流沉积物、湖泊沉积物表现为 LREE 的富集, HREE 的轻度亏损或中等亏损; 基岩风化型红土表现为 LREE 的富集, HREE 的重亏损. 因此, 澧阳平原 YC 剖面沉积物在成因上与河流相沉积、湖泊沉积和基岩风化红土存在明显差别.

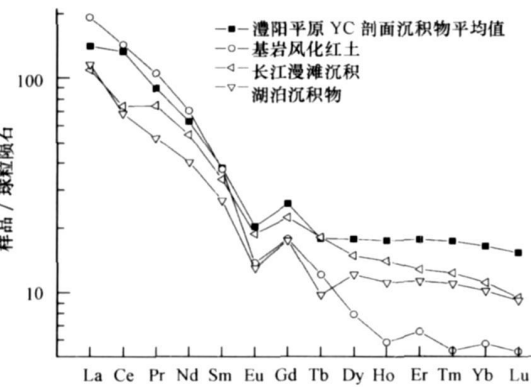


图 4 澧阳平原 YC 自然沉积物与河流沉积物 (杨守业等, 1999)、湖相沉积物 (中国环境监测总站, 1990) 和基岩风化红土的分布模式比较

Fig 4 Comparison of the REE distribution patterns in the sediments from the YC profile in the Liyang Plain, red clay from Dongting basin and Xiaslu Loess in Zhenjiang and loess in the Loess Plateau

图 5 为澧阳平原 YC 剖面沉积物 2 种代表性的粒度频率曲线. 从图 5 可以看出, YC 剖面沉积物粒

度频率曲线具有明显的单峰分布. 研究结果表明, 对于河流相沉积而言, 一般具有两个典型的峰值, 并且同一个样品中两个粗细不同且相互重叠较少的组分, 分别代表跃移和悬移, 这是河流沉积物的典型特征 (孙东怀, 2001). YC 剖面位于澧阳平原中部的台地上, 海拔高程 44m, 比周边高出 5~ 10m, 在如此地貌上不可能是河流作用. 从沉积物的年代来看, YC 剖面沉积物对应的是末次冰期, 此时期对应的是一个相对冷干的时期, 海平面下降, 河流下切, 冬季风加强, 风尘加剧. 因此, 综合沉积物的稀土分布特征、地貌特征、当时的气候特征和沉积物的粒度频率曲线等, 澧阳平原 YC 剖面沉积物的形成不可能是河流作用, 而是风尘成因.

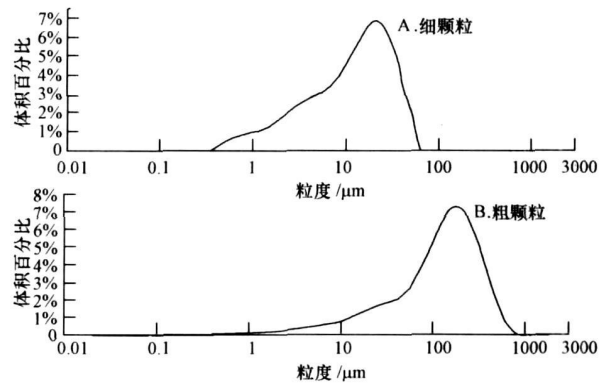


图 5 澧阳平原 YC 自然剖面沉积物粒度频率曲线

Fig 5 Frequency curves of sediment grain-sizes at the YC profile in the Liyang plain

4.2 REE 特征参数与土壤环境

土壤的稀土元素不仅与成土母质有关,而且与成土环境有密切关系。一般来说,在母质强烈风化成壤过程中,HREE较LREE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,而LREE则易被粘土吸附,这使轻、重稀土发生分异,导致轻稀土相对富集,重稀土亏损(Duddy, 1980; Huang *et al.*, 2001)。随着风化成土作用加强,LREE/HREE比值增大,高度风化强度的风化壳LREE和HREE分异十分明显(Braun *et al.* 1993)。因此,研究表生条件下土壤成土母质风化与土壤形成过程中稀土元素(REE)的分异、富集和迁移规律对于研究土壤REE特征,分析土壤的风化与成壤环境特征均有重要作用。

研究结果显示,洞庭盆地的红土形成的是一种相对暖湿的气候条件,其形成年代大致对应于中更新世(毛龙江等, 2008)。而YC剖面沉积物OSL和AMS¹⁴C年代测定结果表明,下部黄土层L₁的形成的年代是56.0~31.8 ka BP, L₁^{*}层形成于31.8~23.8 ka BP, 而黑褐色土层S₀^{*}对应的年代是23.8~10.6 ka BP, L₀层对应的年代是10.6~7.0 ka BP。因此, L₁层、L₁^{*}层和S₀^{*}对应的是末次冰期,而L₀层对应的全新世早期。YC剖面上部黄土层L₀的LREE/HREE、(La/Yb)_N、(La/Lu)_N、(La/Sm)_N以及(Gd/Yb)_N明显高于其他层位,说明全新世早期表现为增温增湿、风化强度增强的特征,从而使土壤中的轻、重稀土发生分离,土壤中的LREE则被粘土优先吸附,轻稀土相对富集,重稀土亏损,轻、重稀土发生明显的分异,因而表现为上部黄土层(L₀)中LREE/HREE比值较大(11.07)。而黑褐色土层(S₀^{*})的LREE/HREE、(La/Yb)_N、(La/Lu)_N、(La/Sm)_N以及(Gd/Yb)_N等值相对较低,说明黑褐色土层形成于一个相对寒冷的气候条件,其年代也刚好对应于末次冰期的极盛期。这表明黑褐色土层的风化强度不如其它层位明显。从与黄土高原黄土、镇江下蜀黄土和洞庭盆地红土稀土元素含量比较来看,澧阳平原YC剖面沉积物LREE/HREE(11.07)略高于洞庭盆地红土(10.47),但明显高于镇江下蜀黄土(8.31)和黄土高原黄土(8.07)(表2),这充分表明YC自然剖面沉积物发育于温暖湿润的长江中游地区,经历了相对强烈的化学风化、淋溶和淀积过程;而黄土高原地区降水稀少,物理风化占主导地位,对稀土元素(REE)一般不会产生

明显的分馏。

5 结论 (Conclusions)

1)黑褐色土层ΣREE变化范围分布在184.63~264.26 μg g⁻¹之间,其平均值为207.93 μg g⁻¹,低于剖面的ΣREE总平均值(219.87 μg g⁻¹),与洞庭盆地的红土ΣREE总平均值(211.6 μg g⁻¹)大体相当,明显高于镇江下蜀黄土(207.7 μg g⁻¹)和黄土高原黄土(159.2 μg g⁻¹)。YC剖面黑褐色土层上经过了相对较强的风化成壤作用。

2)澧阳平原的黑褐色土稀土分布模式与黄土高原黄土、镇江下蜀黄土和洞庭盆地风成红土等典型风成沉积物的分布模式具有一致性,而与河流沉积物、湖泊沉积物和基岩风化红土在稀土的分布模式上具有明显差别。YC剖面沉积物粒度频率曲线呈明显的单峰分布,与典型的河流相的双峰粒度频率分布存在显著差异;YC剖面沉积物无水流作用痕迹;YC剖面沉积物对应的于末次冰期。沉积学、地球化学和年代学等研究成果表明,黑褐色土层及其上、下部的黄土层均为风成堆积物。

3)澧阳平原黑褐色土层对应的是一个相对冷湿的气候环境,其年代对应于23.8~10.6 ka BP。YC剖面记录了56.0~7.0 ka BP以来的环境演变过程,56.0~23.8 ka BP为相对冷干的环境,23.8~10.6 ka BP为相对冷湿的环境,10.6~7.0 ka BP对应的全新世早期为相对暖湿的气候环境,表现为增温增湿的气候特点。9.0~8.0 ka BP的彭头山文化在此区兴起,此时的气候适宜人类生存。

致谢:北京大学考古文博学院潘岩老师完成AMS¹⁴C年代测定,加拿大Dahouse University季小梅博士帮助修改英文摘要,在此一并表示感谢。

参考文献 (References):

- Braun J J, Pagel M, Herbison A, *et al.* 1993. Mobilization and redistribution of REEs and thorium in asyenic lateritic profile: A mass balance study [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 57: 4419-4434
- Duddy IR. 1980. Redistribution and fractionation of rare earth and other elements in a weathering profile [J]. *Chemical Geology*, 30: 363-381
- 郭伟民. 2005. 平原则的考古学启示 [J]. *中原文物*, (6): 43-53
- Guo W M. 2005. Archaeology enlightenment in Liyang Plain [J]. *Cultural Relics of Central China* (6): 43-53 (in Chinese)
- Huang C M, Gong Z T. 2001. Geo-chemical implication of rare earth elements in process of soil development [J]. *Journal of Rare Earths*

- 19 (1): 57—62
- Lu H Y, Wang X Y, Ma H Z, *et al*. 2004. The Plateau Monsoon variation during the past 130 kyr revealed by loess deposit at northeast Qinghai Tibet (China) [J]. *Global and Planetary Change*, (41): 207—214
- 李徐生, 韩志勇, 杨达源, 等. 2006. 镇江下蜀黄土的稀土元素地球化学特征研究 [J]. *土壤学报*, 43(1): 1—7
- Li X S, Han Z Y, Yang D Y, *et al*. 2006. REE geochemistry of Xishu loess in Zhenjiang, Jiangsu Province [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 43(1): 1—7 (in Chinese)
- 毛龙江, 莫多闻, 杨兢红, 等. 2008. 环洞庭湖地区网纹红土稀土元素地球化学特征 [J]. *环境化学*, 27(2): 222—225
- Mao L J, Mo D W, Yang J H, *et al*. 2008. Rare earth element geochemistry of reticulate red clay around Dongting Lake [J]. *Environmental Chemistry*, 27(2): 222—225 (in Chinese)
- Roberts H M, Wintle A G. 2003. Neocence sensitivity changes of polyminerale fine grains during RSL and OSL measurements [J]. *Radiation Measurements* (37): 661—671
- 孙东怀, 安芷生, 苏瑞侠, 等. 2001. 古环境中沉积物组分分离的数学方法及其应用 [J]. *自然科学进展*, 11(3): 269—277
- Sun D H, An Z S, Su R X, *et al*. 2001. Mathematic methods and application of size depart of sediments in the paleo-environmental study [J]. *Progress in Natural Science*, 11(3): 269—277 (in Chinese)
- 中国环境监测总站. 1990. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 180—215
- The Chinese Center Station of Environment Monitoring. 1990. The Background Value of Soil Elements [M]. Beijing: Environmental Science Press in China, 180—215 (in Chinese)
- 王中刚, 于学元, 赵振华, 等. 1989. 土元素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社
- Wang Z G, Yu X Y, Zhao Z H, *et al*. 1989. Rare Earth Element Geochemistry [M]. Beijing: Science Press (in Chinese)
- 文启忠. 1989. 中国黄土地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 95—114
- Wen Q Z. 1989. Geochemistry of the Chinese Loess [M]. Beijing: Science Press, 95—114 (in Chinese)
- 吴明清, 文启忠, 潘景瑜, 等. 1991. 黄河中游地区马兰黄土的稀土元素 [J]. *科学通报*, 36(5): 366—369
- Wu M Q, Wen Q Z, Pan J Y, *et al*. 1991. Rare earth elements of the Ma Lan Loess in the middle reaches of the Yellow River [J]. *Chinese Science Bulletin*, 36(5): 366—369 (in Chinese)
- 杨守业, 李从先. 1999. REE示踪沉积物物源研究进展 [J]. *地球科学进展*, 14(2): 164—167
- Yang S Y, Li C X. 1999. Research progress in REE tracer for sediment source [J]. *Advance in Earth Sciences*, 14(2): 164—167 (in Chinese)
- 杨守业, 李从先. 1999. REE示踪沉积物物源研究进展 [J]. *自然科学进展*, 9(10): 931—937
- Yang S Y, Li C X. 1999. Geochemical compositions and tracing application of the surface sediments in the Yangtze River and the Yellow River [J]. *Progress in Physical Science*, 9(10): 931—937 (in Chinese)
- 中国环境监测总站. 1990. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 180—215
- Chinese Environmental Monitor Center Stations. 1990. Elemental Background Values of Soils in China [M]. Beijing: Environmental Science Press in China, 180—215 (in Chinese)
- 朱丽东, 周尚哲, 叶玮, 等. 2007. 网纹红土稀土元素地球化学特征的初步研究 [J]. *中国沙漠*, 27(2): 194—200
- Zhu L D, Zhou S Z, Ye W, *et al*. 2007. Preliminary study on geochemical behavior of REE of Plinthitic red earth in South China [J]. *Journal of Desert Research*, 27(2): 194—200 (in Chinese)