

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2009.02123

第四纪加积型红土与下蜀黄土理化特征比较

伊继雪, 朱丽东, 姜永见, 叶玮, 袁双, 李凤全, 张明强, 冯义雄, 李建武

(浙江师范大学 地理过程实验室, 浙江金华 321004)

摘要: 加积型红土和下蜀黄土是我国亚热带地区常见的第四纪沉积物。测试了加积型红土的粒度、矿物与石英砂表面特征、磁化率、常量元素和稀土元素等理化指标, 并与下蜀黄土进行了对比分析, 结果表明, 加积型红土与下蜀黄土在理化特征上具有整体相似性, 显示风成特性, 但较下蜀黄土经历了更为强烈的化学风化作用。同一剖面自下而上为加积型红土至棕黄色下蜀土的沉积序列, 揭示了中更新世至晚更新世风化成壤强度减弱、气候由湿热向干凉转变的趋势; 北亚热带和中亚热带沉积年代相当的下蜀土风化特征差异反映了古环境变化的纬度效应。

关键词: 加积型红土; 下蜀黄土; 风化强度; 古气候; 第四纪

中图分类号: P534.63

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2009)02-0123-08

1 加积型红土和下蜀黄土的分布

中国南方以第四纪红土为载体的古环境演化已成为我国过去全球变化研究的重要内容之一。就现代红土的分布来看, 集中于 31°N 以南热带、亚热带地区500 m以下的低山山麓、丘陵岗地和河流高阶地上。然而, 第四纪古红土的分布界限随冰期和间冰期气候波动而发生南北移动, 暖湿的间冰期, 红土北界常常到达长江以北地区^[1]。下蜀黄土常见于长江中下游沿江两岸、长江三角洲平原乃至东海大陆架及岛屿上, 以宁镇山脉一线的低山、丘陵、岗地及河成阶地等地貌单元分布最为集中, 堆积厚度可达20余米。晚更新世以来, 青藏高原隆升加速, 冬季风强度增强, 末次冰期期间东部海平面大幅度下降, 长江中下游地区大陆度加剧, 风成下蜀黄土堆积南界可达长江中下游南岸的杭州湾以南地区^[2-3]。可见, 长江中下游地区是第四纪期间南方红土发育与北方黄土向南堆积的交锋地带。野外工作表明, 中亚热带普遍存在一类质地均一、富铝化程度高、厚达数米甚至数十米的第四纪红色土状沉积, 其剖面上部为均质红土, 下部为网纹红土, 可称之为加积型红土。网纹红土层之下或以一套河流砾石层与基岩不整合接触, 或直接与基岩不整合接触; 均质红土或网纹红土之上还往往覆盖一套棕黄色下蜀土沉积^[4-5], 网纹红土、均质红土和上覆棕黄色土在土体性状上

十分相似, 质地均匀, 不含砾, 无层理, 多裂隙, 柱状节理发育, 富含胶膜, 以至于有研究者将三者都划归为下蜀组, 分别称为下蜀黄土、下蜀红土和下蜀网纹红土^[6]。早期研究认为, 下蜀黄土为晚更新世风尘沉积, 对应于北方马兰黄土, 近年下蜀黄土沉积年代被认为始于中更新世中晚期^[7]。而中更新世中国南方气候湿热, 是红土发育的重要时期, 下蜀黄土常常覆盖于红土之上, 第四纪红土的形成时代则为1 13~0 10 MaBP不等^[8-10]。就同一剖面而言, 下蜀黄土比加积型红土年轻, 但不同剖面上, 部分下蜀黄土与部分加积型红土的时代可能接近。那么, 年代相近或年代不同的加积型红土和下蜀黄土之间是否存在一定的联系呢? 本文以安徽宣城、江西九江、浙江金华、安吉、江苏镇江、南京等地的第四纪加积型红土和下蜀黄土为研究对象(图1), 在实验和前人资料的基础上, 对两者理化特征进行对比, 探讨它们之间的联系。

2 加积型红土和下蜀黄土理化特征对比

2.1 粒度特征

对采自安徽宣城、江西九江、浙江安吉、金华等地的加积型红土及上覆棕黄色土样品的激光粒度测试表明(表1), 来自不同地点加积型红土的粒度组成相似, 均以粉砂($5\sim50 \mu\text{m}$)为优势粒级, 含量平均值为55.73%~65.23%; 黏粒($<5 \mu\text{m}$)次之, 含量平均值介于33.86%~42.62%之间; 砂($>50 \mu\text{m}$)

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(X506313, Y5080307)

作者简介: 伊继雪(1986—), 女, 研究生, 从事环境变化研究。

E-mail: yijixue1986@163.com

收稿日期: 2008-12-09; 改回日期: 2009-03-02。文凤英编辑

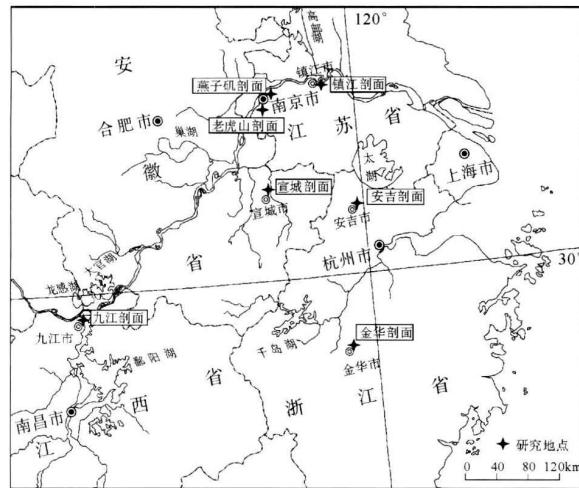


图1 研究地点地理位置分布

Fig. 1 Locations of the study sites

含量平均值为 $0.9\% \sim 2.84\%$ ，少数样品大于 4% 。所有被测样品的粉砂粒级中显著富集 $10 \sim 50 \mu\text{m}$ 组分，平均含量介于 $34.27\% \sim 46.22\%$ ，对应于风成黄土中的“风尘基本粒组”^[1]，有所差异的是黄土中此粒组含量多在 50% 以上。粒度频率曲线上，第一众数峰位于 $5 \sim 6 \Phi (30 \sim 15 \mu\text{m})$ 附近； $9 \Phi (2 \mu\text{m})$ 或 $10 \sim 11 \Phi (1 \sim 0.5 \mu\text{m})$ 附近出现黏粒峰拐点；部分样品略带粗尾，粗尾一般出现在 $2 \sim 3 \Phi (250 \sim 100 \mu\text{m})$ 之间。以上粒度特征表明中亚热带加积型红土的沉积环境较为一致，但分选具一定复杂性。其次，剖面上看，下段加积型红土与上覆棕黄色下蜀土粒度组成相似，均以粉砂和黏粒为主，棕黄色土粉砂含量为 $65.41\% \sim 69.01\%$ ，略高于加积型红土；黏粒含量为 $30.00\% \sim 32.80\%$ ，较加积型红土样品偏低，意味着下段加积型红土经历的风化成土作用更

强。剖面自下而上，矩值法粒度参数变化幅度较小（表1），也说明沿剖面粒度组成非常一致。第三，加积型红土与北亚热带地区典型下蜀黄土的粒度组成相似，均以粉砂为主，黏粒次之，砂含量较低。李徐生等^[12]对镇江下蜀黄土粒度特征研究表明，镇江下蜀黄土粉砂平均含量为 67.38% ，其中粗粉砂为 49.36% ，黏粒平均含量为 28.44% ，砂含量仅占 4.18% ；平均粒径 M_ϕ 和分选系数 σ 分别为 6.65Φ 、 1.75 ，与加积型红土相似性较好。

但镇江下蜀黄土的粉砂黏比 K_d 值^[1]（ 1.76 ）要比加积型红土高（ $0.81 \sim 1.4$ ），充分显示两者在风化程度上的差异。典型下蜀黄土或上覆于加积型红土之上的棕黄色土的粒度组成整体粗于加积型红土。黏粒、细粉砂（ $5 \sim 10 \mu\text{m}$ ）含量，镇江大港下蜀黄土^[12]为 28.44% 和 18.02% ；南京燕子矶下蜀黄土^[13]为 24.44% 和 15.82% ；南京泰山新村下蜀黄土^[13]为 24.73% 和 16.83% ，均低于加积型红土；相反，粗粉砂、粉砂和砂含量高于加积型红土，如镇江大港^[12]和南京燕子矶^[13]下蜀黄土的粗粉砂含量分别为 49.36% 和 50.30% ，平均粒径较加积型红土粗，分选程度略好于加积型红土。加积型红土粒度频率曲线上的拐点更多，粒度概率累积曲线上次生、挟持、空气易悬浮等组分之间的截点位置较下蜀黄土偏细，表明其所经历的后期风化改造更强^[14]；或沉积过程中近地面季风动力的搬运和沉积作用可能相对较弱，而高空远源搬运沉积可能相对显著^[15]。

2.2 矿物组成

加积型红土与下蜀黄土矿物组成相似，均以石英、长石、云母等轻矿物为主，重矿物比例不高，但类

表1 中国南方加积型红土的粒度组成及粒度参数(平均值)

Table 1 Grain-size distribution and parameters characteristic of red earth in southern China (average)

地点	层位	粒度组成/%					粒度参数			
		$< 5\mu\text{m}$	$5 \sim 10\mu\text{m}$	$10 \sim 50\mu\text{m}$	$5 \sim 50\mu\text{m}$	$> 50\mu\text{m}$	M_ϕ/Φ	σ	$S K_\phi$	K_g
安徽	棕黄色土	32.80	19.13	46.94	66.07	1.33	7.04	1.65	0.58	2.60
宣城	网纹红土	36.96	19.68	42.57	62.25	0.79	7.22	1.67	0.47	2.42
浙江	棕黄色土	30.00	19.30	49.71	69.01	1.00	6.95	1.61	0.67	2.77
安吉	网纹红土	36.44	18.82	43.90	62.72	0.84	7.22	1.75	0.55	2.47
江西	棕黄色土	30.85	18.58	46.83	65.41	3.74	6.85	1.72	0.51	2.59
九江	网纹红土	35.28	17.99	44.16	62.15	2.56	7.11	1.82	0.50	2.47
浙江	均质红土	41.99	22.00	35.01	57.01	1.00	7.47	1.71	0.35	2.70
金华	网纹红土	43.00	21.14	33.83	54.96	2.03	7.52	1.85	0.26	2.72

① K_d 为 $10 \sim 50\mu\text{m}$ 粒度的百分含量与 $< 5\mu\text{m}$ 粒度的百分含量之比。

型丰富。从重矿物鉴定结果看, 九江、宣城、宜兴等地红土的重矿物种类有锐钛矿、锆石、金红石、电气石、榍石、石榴石、白钛矿、磁铁矿、赤褐铁矿、绿帘石等, 部分样品还有黄铁矿、辉石、角闪石、黑云母、透闪石、黝帘石、重晶石、磷灰石等^[16]; 下蜀黄土则以绿帘石、磁铁矿、钛铁矿、褐铁矿为主, 角闪石、石榴石、电气石、锆石、金红石、榍石、白钛石、磷灰石等次之^[17-18], 两者重矿物组成相似。相比之下, 下蜀黄土重矿物中的非稳定矿物(角闪石等)含量更高一些^[19]。九江、沙河、金华等地红土黏粒组分($<4\text{ }\mu\text{m}$)的X衍射分析结果显示, 含有较多石英、云母和高岭石, 其次为长石、赤铁矿和针铁矿, 部分样品含有绿泥石、伊利石和蒙脱石混层矿物^[20]。黏土和次生矿物方面, 红土中主要由高岭石、蛭石、针铁矿和赤铁矿组成^[21]; 下蜀黄土以伊利石和蛭石为主^[22], 高岭石含量较低, 未发现蒙脱石^[19], 前者的黏土矿物组合更显示潮湿温暖气候条件下较强的淋滤作用。

2.3 石英颗粒表面形态

石英硬度大, 化学稳定性强, 受搬运动力和沉积后环境塑造, 其表面具有不同的微形态特征。因此, 它可以记录沉积物来源、搬运营力、沉积环境变迁等信息。夏应菲等^[23]在扫描电镜下对安徽宣城红土剖面中167个石英颗粒进行了表面形态观察, 总体上颗粒形状变化多端, 以板状、圆状、不规则状、马鞍状为多; 表面形态复杂多样, 剖面底部近砾石层的第16层石英颗粒样品表面出现高能量的水流环境下形成的V形坑; 第16层以上样品则具麻面结构、阶梯状断面、贝壳状断口, 认为宣城红土先后为流水沉积和风尘沉积。同时石英颗粒表面相当发育溶蚀、刻蚀等化学结构, 表明红土经历了长期强烈的化学风化。胡雪峰等^[24]对九江PJ红土剖面石英颗粒表面观察的结果是, 剖面上部下蜀黄土石英颗粒表面较光滑, 化学溶蚀作用较弱, 呈毛玻璃状, 有许多小而密的麻坑, 可能是风力搬运过程中形成的; 剖面下部网纹红土石英颗粒表面溶蚀坑和溶蚀裂痕密布, 化学风化作用明显强于下蜀黄土, 红土形成时的外动力类型已难以区分。镇江大港典型下蜀黄土中石英颗粒多呈次棱或次圆状, 表面粗糙, 机械磨蚀和碰撞痕迹明显, 指示风力搬运。沟、坑等凹形部位有硅质磷片或硅质球等沉淀物, 体现一定程度的化学风化^[18]。可见, 两类沉积物具有类似的成因, 甚至可能具有物源联系, 但加积型红土显示更强的化学风化作用。

2.4 磁化率特征

近些年来, 磁化率已被用于红土古环境研究, 但红土磁性特征变化机理方面的研究尚不够深入。就我们对江西九江JL红土剖面920块样品的磁化率测试结果来看, 网纹红土层段磁化率较上覆黄棕色土整体偏小, 甚至偏小一个数量级。JL剖面磁化率变化范围为 $(4.79 \sim 133) \times 10^{-5}\text{ SI}$, 剖面均值为 $28.57 \times 10^{-5}\text{ SI}$ 。上段黄棕色土3个层组的磁化率均值在 $(36.20 \sim 67.42) \times 10^{-5}\text{ SI}$ 之间, 峰谷起伏特征典型, 变化类似于北方黄土, 磁化率高值对应于古土壤单元(最高值可达 $119.44 \times 10^{-5}\text{ SI}$); 下段5个层组网纹红土的磁化率均值在 $(11.71 \sim 41.81) \times 10^{-5}\text{ SI}$ 之间, 数值低, 峰谷起伏较小。就均值而言, 棕黄色土磁化率 $(50.27 \times 10^{-5}\text{ SI})$ 是网纹红土 $(21.59 \times 10^{-5}\text{ SI})$ 的2.33倍, 且网纹红土磁化率值有随埋藏深度增加而减小的趋势。这种风化更强的网纹红土^[25]其磁化率值反而更低的现象, 在皖南、赣北等地的红土磁化率研究中也有表现^[26-27]。与典型下蜀黄土相比, 网纹红土磁化率值亦偏低, 但类似于地下水位之下下蜀黄土磁化率偏低的现象^[28-29]。镇江大港剖面磁化率变化于 $(6.9 \sim 195.2) \times 10^{-8}\text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 地下水位之上下蜀黄土磁化率均值 $126 \times 10^{-8}\text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 是地下水位之下均值 $33 \times 10^{-8}\text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 的3.82倍, 两段数值也有一个数量级之差。浙江金华YYT红土剖面147个样品的磁化率数据还表明, 网纹红土磁化率值 $(22.84 \times 10^{-5}\text{ SI})$ 还低于均质红土 $(116.83 \times 10^{-5}\text{ SI})$ 。风化强度上看, 均质红土高于棕黄色土, 但与网纹红土接近^[25], 因此, 网纹红土磁化率偏低的原因可能与其沉积后多水^[30]并干湿交替^[31]环境下磁性矿物的分解、转化和淋失有关^[32]。正是由于红土磁化率物理机制上的复杂性, 使得磁化率是否可作为红土区气候代用指标的分歧依然存在^[26-27]。

2.5 地球化学特征

江西九江、浙江安吉、金华3个地点111块加积型红土样品的XRF测试结果见表2。不同地点加积型红土具有相似的化学组成, 常量元素组成均以 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 为主, 三者总量超过88%。其中 SiO_2 含量最高, 平均含量为68.25%, TiFe_2O_3 平均含量6.93%, Al_2O_3 平均含量14.81%; K_2O 、 Na_2O 、 CaO 、 MgO 等易溶组分含量很低, 除 K_2O 含量略高于1%外, 其余组分多不足1%; TiO_2 在剖面中也呈累积特征, 含量介于0.92%~1.29%之间, 高于上

陆壳平均值 0.50% (Taylor, 1985 年标准)。同一剖面上, 上覆于加积型红土之上的棕黄色下蜀土其常量元素化学组成也与均质红土、网纹红土基本一致, 只是棕黄色土的 TiFe_2O_3 略低, 其 K_2O 、 Na_2O 、 MgO 等易溶组分含量略高。加积型红土与典型下蜀黄土也具较好的可比性, 李徐生等^[33] 对镇江下蜀黄土研究表明, 其 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 平均含量分别为 68.07%、5.3%、13.32%; 郑祥民等^[18] 对长江三角洲下蜀黄土研究表明, 其 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 平均含量分别为 67.32%、4.27%、14.39%; 杨守业等^[34] 研究表明南京燕子矶、泰山新村剖面下蜀黄土的 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 平均含量分别为 6.01%、14.01% 和 4.83%、11.60%, 整体上典型下蜀黄土 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 含量较加积型红土低, 而 K_2O 、 Na_2O 、 CaO 、 MgO 含量高于加积型红土, 多在 1% 以上, 其中 K_2O 平均含量超过 2%^[34]。可见, 加积型红土中碱金属的迁移量更大, 迁移更彻底。加积型红土的化学蚀变指数(CIA)多高于 80%, 浙江金华网纹红土 CIA 值可达 89% (表 2), 而镇江下蜀黄土 CIA 值在 66%~76% 之间, 平均值为 70.45%^[33], 明显小于加积型红土。

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指示意义。江西九江、沙河、浙江安吉、金华 4 个红土剖面 119 个样品的溶矿 ICP-MS 法 REE 测定结果表明, 各地加积型红土稀土元素组成基本一致, REE 总量变化于 127.7~275.4 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, 平均值为 176.5 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。对比网纹红土、均质红土和上覆棕黄色土平均值可以发现, REE 总量以棕黄色土最高, 为 209.1 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 均质红土次之, 为 179.1 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 网纹红土最小, 为 165.2 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 其原因可能与高强度风化淋溶条件下稀土元素迁移淋失有关^[35]。

上覆于红土之上的棕黄色土 $\sum \text{REE}$ 均值与镇江下蜀黄土 $\sum \text{REE}$ 均值 ($207.7 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) 最接近。就稀土元素分馏特征来看, 中亚热带加积型红土和下蜀黄土均表现为轻稀土富集特征, 红土轻重稀土之间的分馏程度高于下蜀黄土。网纹红土、均质红土、棕黄色土的 $\sum \text{LREE}/\sum \text{HREE}$ 比值分别为 11.0、11.7、11.9, 高于镇江下蜀黄土古土壤层的 8.32 及黄土层的 8.29^[36] 和南京老虎山下蜀黄土古土壤层的 8.71 及黄土层的 8.59^[37]。红土与下蜀黄土的稀土分布模式也非常一致(图 2), 均呈斜率为负值的 Eu 负异常分布模式, $\text{La}-\text{Eu}$ 段较陡, $\text{Eu}-\text{Lu}$ 段较为平缓。另外, 从表 3 可知, 指示物源区特征的 ΔEu 、 Eu/Sm 、 Sm/Nd 、 La/Nd 等稀土参数值两者几乎完全一致, 表明它们在物源区特征方面基本相似, 但指示后期风化过程中稀土分馏特征的 ΔCe 、 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 、 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 等参数值两者有差异, 红土 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值较高, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 值略低, Ce 呈正异常; 而下蜀黄土 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值较低, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 值略高, Ce 为轻微负异常。相比之下红土的轻稀土段内分馏更强, 重稀土段内分馏较弱。这些特征暗示中亚热带加积型红土显示风成相似性, 与下蜀黄土间可能存在物源联系^[38], 但经历了较下蜀黄土更为强烈的风化作用。

3 讨论与结论

中亚热带加积型红土在粒度组成、矿物组合、石英颗粒表面形态、化学组成、稀土配分模式等方面均与下蜀黄土有很大相似性, 粉砂为优势粒组, 富集风尘基本粒组; 石英砂表面具麻面结构、保留贝壳状断口和机械破碎阶面; 以轻矿物为主, 重矿物种类复杂; 化学组成以 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 为主; 斜率为负

表 2 中国南方加积型红土常量元素组成

Table 2 Content of major elements for red earth in southern China

剖面	层位	SiO_2	Al_2O_3	TiFe_2O_3	K_2O	Na_2O	CaO	MgO	TiO_2	MnO	P_2O_5	%
浙江	棕黄色土	73.58	11.92	5.17	1.51	0.29	0.10	0.58	1.07	0.20	0.05	83.83
安吉	网纹红土	70.08	13.68	6.55	1.46	0.14	0.12	0.54	1.10	0.07	0.05	87.16
江西	棕黄色土	67.41	15.34	6.19	2.14	0.34	0.29	0.94	0.96	0.11	0.09	81.84
九江	网纹红土	69.19	14.25	6.99	1.41	0.14	0.26	0.52	1.07	0.04	0.06	86.46
浙江	均质红土	63.15	17.73	7.33	1.65	0.14	0.06	0.62	1.21	0.13	0.07	89.32
金华	网纹红土	60.85	19.03	8.21	1.74	0.15	0.07	0.60	1.28	0.06	0.07	89.41

注: TiFe_2O_3 为全铁; CIA = $[\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})] \times 100$ (式中: 均为氧化物分子摩尔数, 其中 CaO^* 为硅酸盐矿物中 CaO 的摩尔含量, 当 CaO 的摩尔数大于 Na_2O 时, $M_{\text{CaO}}^* = M_{\text{Na}_2\text{O}}$, 而小于 Na_2O 时则 $M_{\text{CaO}}^* = M_{\text{CaO}}$)

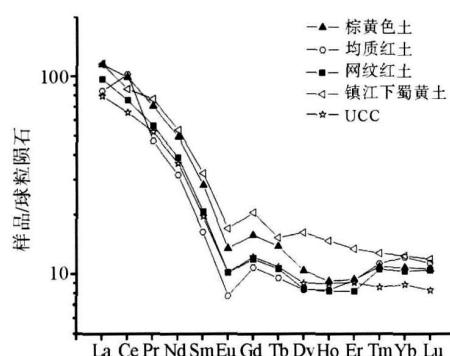


图2 加积型红土、下蜀黄土球粒陨石归一化稀土分布模式

Fig. 2 The chondrite normalized REE patterns of red earth and Xiashu loess

表3 加积型红土与下蜀黄土稀土特征参数比较(平均值)

Table 3 Comparison between red earth and Xiashu loess in REE parameters(average)

	δ_{Eu}	Eu/Sm	La/Nd	Sm/Nd	δ_{Ce}	$(\text{La}/\text{Sm})_N$	$(\text{Gd}/\text{Yb})_N$
网纹红土	0.65	0.19	1.32	0.17	1.02	4.71	1.16
均质红土	0.58	0.18	1.40	0.17	1.62	5.17	0.91
棕黄色土	0.64	0.18	1.23	0.18	1.11	4.11	1.46
镇江下蜀 黄土 ^[38]	0.66	0.20	1.14	0.19	0.92	3.58	1.66

注: $\delta_{\text{Eu}} = \text{Eu}_N / (\text{Sm}_N \times \text{Gd}_N)^{1/2}$; $\delta_{\text{Ce}} = \text{Ce}_N / (\text{La}_N \times \text{Pr}_N)^{1/2}$

值的负Eu型稀土分布模式等特征均显示该类红土的沉积母质经历过高度混合, 具有风成特性, 可能是与下蜀黄土成因类似的沉积物, 只是经历了更强的化学风化(图3)。

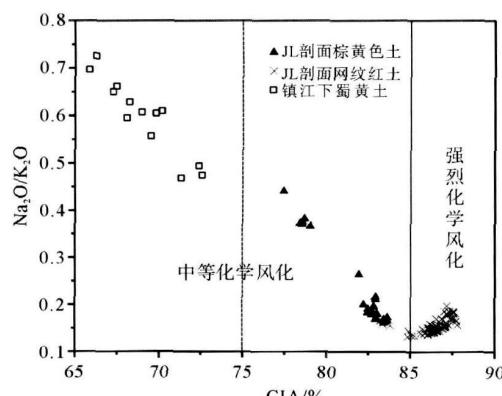


图3 加积型红土和下蜀黄土

CIA-Na₂O/K₂O 散点图
(镇江下蜀黄土数据引自文献[33])

Fig. 3 Scatter diagram of CIA-Na₂O/K₂O of red earth and Xiashu loess

同一剖面来看, 下蜀黄土覆盖于加积型红土之上, 沉积年代比红土年轻, 风化程度明显弱于均质红土及网纹红土, 但两者沉积物性状类似。按CIA值65%和85%作为弱/中、中/强风化强度的界限^[33], 九江JL剖面中下部网纹红土属强烈化学风化, 上部棕黄色土属中等风化强度(图3), 表明中亚热带地区自中更新世早期以来红土发育程度渐弱, 可能指示由湿热转向干凉的古环境演变趋势, 这也是该剖面自中更新世至晚更新世东亚冬季风不断增强的记录。

相比之下, 上覆于JL剖面红土之上的棕黄色土, 理化性状与典型下蜀黄土更相似。根据青岛海洋地质所年代学实验室测得的ESR数据, 九江JL剖面上部4.46 m厚的上覆棕黄色土底部(4.26 m处)沉积年代为0.365 MaBP^[39], 与南京老虎山(底部古土壤层TL年龄约为0.318 MaBP)^[7]、燕子矶(底部ESR年龄为0.56 MaBP)^[40]、镇江大港剖面30 m以上(约0.40 MaBP)^[28-29]下蜀黄土的沉积年代相当, 但纬度位置更偏南(图1), 可能属同时期不同纬度地带特征相似的风成堆积物。JL剖面上部的下蜀组棕黄色土与镇江剖面约0.40 MaBP以来下蜀黄土相比, 平均粒径偏细(前者6.85 Φ, 后者6.63 Φ), 风化程度也偏高(如图3, 前者CIA值75%~85%, 后者CIA值65%~75%), 可能指示古气候条件、季风环流的纬度效应和水平地带性。第四纪期间, 青藏高原经历多幕构造隆升, 东亚季风得以建立和发展, 原行星风系控制下的中国亚热带气候逐渐转为湿热, 夏季风增强时段更有利红土发育, 冬季风强盛时期黄土堆积界限南侵。亚热带地区第四纪期间的气候波动体现在冬、夏季风势力对比及其进退关系上。下蜀黄土分布南界南北移动呈现地带性, 时代相当的下蜀黄土沿东亚冬季风向南推进的方向堆积厚度变薄, 平均粒径变细。同时受纬度影响, 年代相当的下蜀土自北亚热带至中亚热带, 风化成壤程度逐渐增强, 体现中亚热带地区更为优越的水热条件, 从而造成北、中亚热带气候与成壤强度的地带性差异。

中国南方风尘沉积的时代和南界在红土研究中尚未有统一论, 本文通过比较研究推测, 风尘沉积南界在晚更新世之前就出现在杭州湾以南地区, 不同的沉积时代、不同的成土年龄和不同的纬度地带可能是造成加积型红土与下蜀黄土成因类似、风化又有明显差异的原因。加强加积型红土物源探讨, 结合年代学、磁学、地球化学、矿物学和微体古生物学等技术手段对其沉积区域差异、剖面纵向变化进

行细致深入地研究有助于全面了解其沉积特征及其古气候与环境意义。

参考文献(References)

- [1] 黄镇国, 张伟强, 陈俊鸿, 等. 中国红土与自然地带变迁[J]. 地理学报, 1999, 54(3): 193-203. [HUANG Zhenguo, ZHANG Weiqiang, CHEN Junhong, et al. The change of natural zones and the evolution of red earth in China [J]. Acta Geographica Sinica, 1999, 54(3): 193-203.]
- [2] 杨达源, 韩辉友, 周旅复, 等. 安徽宣城地区中晚更新世风成堆积与环境变迁[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1991, 11(2): 97-104. [YANG Dayuan, HAN Huiyou, ZHOU Lü-fu, et al. Eolian deposit and environmental change of Middle-Late Pleistocene in Xuancheng, Anhui Province south of the lower reaches of the Changjiang River [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1991, 11(2): 97-104.]
- [3] 潘保田, 李吉均, 陈发虎. 青藏高原: 全球气候变化的驱动机与放大器——I 新生代气候变化的基本特征[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 1995, 31(3): 120-128. [PAN Baotian, LI Jijun, CHEN Fahu. Qinghai-Tibetan Plateau: a driver and amplifier of global climatic changes—I basic characteristics of climatic changes in Cenozoic Era [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 1995, 31(3): 120-128.]
- [4] 李吉均, 张林源, 邓养鑫, 等. 庐山第四纪环境演变和地貌发育问题[J]. 中国科学 B 辑, 1983, 13(8): 734-745. [LI Jijun, ZHANG Linyuan, DENG Yangxin, et al. Quaternary environmental changes and geomorphic developmental problems in Lushan Area [J]. Science in China (Series B), 1983, 13(8): 734-745.]
- [5] 刘良梧, 龚子同. 宣城第四纪红色粘土剖面的发育特征[J]. 第四纪研究, 2000, 20(5): 464-468. [LIU Liangwu, GONG Zitong. Characteristics of development of Quaternary red clay in Xuancheng, Anhui Province [J]. Quaternary Sciences, 2000, 20(5): 464-468.]
- [6] 杨达源. 中国东部的第四纪风尘堆积与季风变迁[J]. 第四纪研究, 1991, 11(4): 20-24. [YANG Dayuan. The Quaternary dust-fall accumulation and the monsoon variability in eastern China [J]. Quaternary Sciences, 1991, 11(4): 20-24.]
- [7] 黄姜农, 方家骅, 邵家骥, 等. 南京下蜀黄土沉积时代的研究[J]. 地质评论, 1988, 34(3): 240-247. [HUANG Jiangnong, FANG Jiahua, SHAO Jiayi, et al. Study on the depositional age of the Xiaoshu Loess in Nanjing [J]. Geological Review, 1988, 34(3): 240-247.]
- [8] 蒋复初, 吴锡浩, 肖华国, 等. 九江地区网纹红土的时代[J]. 地质力学学报, 1997, 3(4): 27-33. [JIANG Fuchu, WU Xihao, XIAO Huagu, et al. Age of the vermiculated red soil in Jiujiang area, central China [J]. Journal of Geomechanics, 1997, 3(4): 27-33.]
- [9] 杨浩, 赵其国, 李小平, 等. 安徽宣城风成沉积-红土系列剖面 ESR 年代学研究[J]. 土壤学报, 1996, 33(3): 293-301. [YANG Hao, ZHAO Qiguo, LI Xiaoping, et al. ESR dating

of eolian sediment and red earth series from Xuancheng profile in Anhui Province [J]. Acta Pedologica Sinica, 1996, 33(3): 293-301.]

- [10] 赵志中, 乔彦松, 王燕, 等. 成都平原红土堆积的磁性地层学及古环境记录[J]. 中国科学 D 辑, 2007, 37(3): 370-377. [ZHAO Zhizhong, QIAO Yansong, WANG Yan, et al. Magnetostatigraphic and paleoclimatic studies on the Red Earth Formation from the Chengdu Plain in Sichuan Province, China [J]. Science in China(Series D), 2007, 37(3): 370-377.]
- [11] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985. [LIU Tungsheng. Loess and Environment [M]. Beijing: Science Press, 1985.]
- [12] 李徐生, 杨达源, 鹿化煜. 镇江下蜀黄土粒度特征及其成因初探[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(1): 25-32. [LI Xu sheng, YANG Dayuan, LU Huayu. Grain-size features and genesis of the Xiaoshu Loess in Zhenjiang [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2001, 21(1): 25-32.]
- [13] 武春林, 朱诚, 鹿化煜, 等. 南京地区下蜀黄土磁性地层年代与古环境变化[J]. 地层学杂志, 2006, 30(2): 116-123. [WU Chunlin, ZHU Cheng, LU Huayu, et al. Magnetostatigraphical dating of the Xiaoshu Loess in Nanjing area and its paleoenvironmental interpretation [J]. Journal of Stratigraphy, 2006, 30(2): 116-123.]
- [14] 朱丽东, 叶玮, 周尚哲, 等. 中亚热带第四纪红粘土的粒度特征[J]. 地理科学, 2006, 26(5): 586-591. [ZHU Lidong, YE Wei, ZHOU Shangzhe, et al. Grain-size features of red earth in mid-subtropics [J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(5): 586-591.]
- [15] 杨立辉, 叶玮, 朱丽东, 等. 第四纪加积型红土与黄土的风成相似性探讨[J]. 干旱区地理, 2008, 31(3): 341-347. [YANG Lihui, YE Wei, ZHU Lidong, et al. Aeolian-genesis comparability of aggraded red earth in South China with loess in North China [J]. Arid Land Geography, 2008, 31(3): 341-347.]
- [16] 袁国栋, 龚子同. 第四纪红土的土壤发生及其古地理意义[J]. 土壤学报, 1990, 27(1): 54-62. [YUAN Guodong, GONG Zitong. Soil genesis of Quaternary red earth and its paleogeographic implication [J]. Acta Pedologica Sinica, 1990, 27(1): 54-62.]
- [17] 吴标云. 南京下蜀黄土沉积特征研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1985, 5(2): 114-124. [WU Biaoyun. On depositional characteristics of Xiaoshu Loess from Nanjing [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1985, 5(2): 114-124.]
- [18] 郑祥民. 长江三角洲及海域风尘沉积与环境[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1999. [ZHENG Xiangmin. Aeolian Loess Depositions and Environment in Yangtze Delta and Adjacent Continental Shelves [M]. Shanghai: East China Normal University Press, 1999.]
- [19] 于振江, 黄多成. 安徽省沿江地区网纹红土和下蜀土的形成环境及其年龄[J]. 安徽地质, 1996, 6(3): 48-56. [YU Zhenjiang, HUANG Duocheng. Formation environment of net-veined laerite and Xiaoshu loess and their ages in the area along

- [29] 张建军, 杨达源, 李徐生. 长江中下游地区下蜀黄土磁化率曲线比较研究[J]. 华东地质学院学报, 1999, 22(2): 124-129. [ZHANG Jianjun, YANG Dayuan, LI Xusheng. Comparative study on the magnetic susceptibility of the Xiashu Loess in the middle and lower Changjiang River region [J]. Journal of East China Geological Institute, 1999, 22(2): 124-129.]
- [30] 尹秋珍, 郭正堂. 中国南方的网纹红土与东亚季风的异常强盛期[J]. 科学通报, 2006, 51(2): 186-193. [YIN Qizhen, GUO Zhengtang. The vermiculated red earth in South China and its implications for the extreme strength of East Asian monsoon [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(2): 186-193.]
- [31] 叶玮, 郑万乡, 李凤全等. 中亚热带红土与水稻土铁锰结核理化特性与形成环境对比[J]. 山地学报, 2008, 26(3): 293-299. [YE Wei, ZHENG Wanxiang, LI Fengquan, et al. The composition and depositing condition of ferro-manganese nodules developed in Quaternary red earth and paddy soil in mid-subtropical zone, China [J]. Journal of Mountain Science, 2008, 26(3): 293-299.]
- [32] 卢升高. 第四纪红土的磁性与氧化铁矿物学特征及其古环境意义[J]. 土壤学报, 2000, 37(2): 182-191. [LU Shenggao. Characterization of magnetism and iron oxide minerals of Quaternary red earth and its paleoenvironmental implications [J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(2): 182-191.]
- [33] 陈英勇, 李徐生, 汉志勇, 等. 江苏镇江下蜀黄土化学风化的地球化学特征[J]. 地球化学, 2008, 37(1): 341-352. [CHEN Yingyong, LI Xusheng, HAN Zhiyong, et al. Chemical weathering intensity and element migration features of the Xiashu loess profile in Zhenjiang, Jiangsu Province [J]. J. Geogr. Sci., 2008, 18: 341-352.]
- [34] 杨守业, 李从先, 李徐生, 等. 长江下游下蜀黄土化学风化的地球化学研究[J]. 地球化学, 2001, 30(4): 402-406. [YANG Shouye, LI Congxian, LI Xusheng, et al. Geochemical records of chemical weathering of the Xiashu Loess in the lower reaches of the Changjiang River [J]. Geochimica, 2001, 30(4): 402-406.]
- [35] 朱丽东, 周尚哲, 叶玮, 等. 南方更新世红土氧化物地球化学特征[J]. 地球化学, 2007, 36(3): 295-302. [ZHU Lidong, ZHOU Shangzhe, LI Fengquan, et al. Geochemical behavior of major elements of Pleistocene red earth in South China [J]. Geochimica, 2007, 36(3): 295-302.]
- [36] 李徐生, 韩志勇, 杨达源, 等. 皖南风尘堆积-古土壤序列磁化率初步研究[J]. 安徽师范大学报: 自然科学版, 1998, 21(1): 64-69. [LI Xusheng, YANG Dayuan, HAN Zhiyong, et al. A preliminary study on the magnetic susceptibility of aeolian dust deposition paleosol sequence in the south of Anhui Province [J]. Journal of Anhui Normal University: Natural Sciences, 1998, 21(1): 64-69.]
- [37] 胡雪峰, 程天凡, 巫和昕. 南方网纹红土内是否可能存在多个“沉积-成土”过程的旋回? [J]. 科学通报, 2003, 48(9): 969-975. [HU Xuefeng, CHENG Tianfan, WU Hexin. Do multiple cycles of aeolian deposit-pedogenesis exist in the reticulate red clay sections in southern China? [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(9): 969-975.]
- [38] 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[J]. 中国沙漠, 2002, 22(1): 27-32. [LI Xusheng, YANG Dayuan. Magnetic susceptibility features and environmental records of the Xiashu Loess in Zhenjiang, Jiangsu Province [J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(1): 27-32.]
- [39] 李福春, 潘根兴, 谢昌仁, 等. 南京下蜀黄土-古土壤剖面的不同粒组稀土元素地球化学分布[J]. 第四纪研究, 2004, 24(4): 477-479. [LI Fuchun, PAN Genxing, XIE Changren, et al. REE geochemical distribution of different grain fractions of a Xiashu loess-paleosol sequence [J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(4): 477-479.]
- [40] 叶玮, 杨立辉, 朱丽东, 等. 中亚热带网纹红土的稀土元素特征与成因分析[J]. 地理科学, 2008, 28(1): 40-44. [YE Wei, YANG Libei, ZHU Lidong, et al. Characteristics and genesis of the rare earth elements in the vermiculated red earth in the subtropical zone of China [J]. Geographical Sciences, 2008, 28(1): 40-44.]

- YANG Lihui, ZHU Lidong, et al. Characteristics and origin of rare earth elements of vermicular red earth in middle subtropic zone [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28(1): 40-44.]
- [39] 朱丽东. 中亚热带加积型红土及其所记录的第四纪环境变化探讨 [D]. 甘肃: 兰州大学, 2007. [ZHU Lidong. Aggradational red earth sediments in mid-subtropics of China and their recorded environmental changes during Quaternary [D]. Gan-
- [40] su: Lanzhou University, 2007.]
- 黎兴国, 何娟华, 李德生, 等. ESR 在下蜀黄土测年中的尝试 [J]. 南京师大学报: 自然科学版, 1993, 16(3): 86-91. [LI Xingguo, HE Juanhua, LI Desheng, et al. The primitive application of ESR dating on Xiashu Loess [J]. *Journal of Nanjing Normal University, Natural Science Edition*, 1993, 16(3): 86-91.]

COMPARATIVE STUDY ON QUATERNARY RED EARTH AND XIASHU LOESS IN PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS

YI Jixue, ZH U Lidong, JIANG Yongjian, YE Wei, YUAN Shuang,

LI Fengquan, ZHANG Mingqiang, FENG Yixiong, LI Jianwu

(Geography Process Lab, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

Abstract: As Quaternary sediments, aggradational red earth and Xiashu Loess are frequently seen in the subtropical zone in China. Grain-size, quartz surface characteristics, magnetic susceptibility, and REE of red earth are tested and compared with Xiashu Loess. The results show that, generally, the physical and chemical characteristics of red earth and Xiashu Loess are similar to each other, indicating aeolian characteristics. However, red earth shows stronger weathering properties. At the same section, the bottom-up sedimentary sequence from red earth to Xiashu Loess indicates gradually weak weathering, and a climatic transition from warm-humid to dry-cold during mid-Pleistocene and late Pleistocene. The differences of physical and chemical characteristics among Xiashu formation sediments, deposited in the same epoch but different areas, reflect the latitude effects of paleoenvironmental changes and horizontal zonality.

Key words: red earth; weathering intensity; paleo-climate; Quaternary; Xiashu Loess