

文章编号: 1000-0550(2007)01-0116-08

# 中国东部中新世风尘沉积的发现及其研究意义<sup>①</sup>

张振克<sup>1,2</sup> 何华春<sup>1</sup> 李书恒<sup>1</sup> 田海涛<sup>1</sup> 王颖<sup>1</sup>

(1. 南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室 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 710054)

**摘要** 黄土高原红粘土古气候与古环境研究取得巨大进展。已知最老的红粘土时代达到 22 Ma 在亚洲晚新生代环境演变研究,特别是在指示亚洲内陆干旱荒漠化、高原隆升的环境效应等方面有重要意义。结合野外实地调查和室内粒度、磁化率、扫描电镜和地球化学实验分析结果,对南京附近灵岩山剖面的沉积特征与风尘沉积证据进行了探讨。在灵岩山剖面玄武岩下覆的松散沉积层中有厚度超过 4 m 的风尘沉积层,时代在 12 Ma 以前,为迄今中国东部发现的新生代最老的风尘沉积物,是中新世季风气候出现之后的产物,推测与秦安红土剖面记录的 15~13 Ma 快速强烈粉尘沉积阶段一致,并和南极冰盖 15 Ma 开始扩大造成的全球降温事件有关联。

**关键词** 中新世 风尘沉积 沉积特征 灵岩山 中国东部 环境变迁

**第一作者简介** 张振克 男 1963 年出生 教授 地貌与沉积环境 E-mail: zhangzk@nju.edu.cn

**中图分类号** P534.63 **文献标识码** A

## 1 引言

中国北方以黄土高原为核心地区的黄土—古土壤沉积序列古环境与古气候研究取得举世瞩目的研究成果,黄土与古土壤沉积序列与深海沉积、极地冰芯共同构成当代过去全球变化研究中古气候与古环境对比的经典自然记录。近十年来,黄土与古土壤沉积序列的下覆红色土状堆积层(又称“红层”或“红粘土”)的古气候与古环境研究取得巨大进展,红层沉积被认为是黄土—古土壤沉积序列的延伸,属风成成因<sup>[1]</sup>。中国北方红层沉积在亚洲晚新生代环境演变研究特别是在指示亚洲内陆干旱荒漠化、高原隆升的环境效应等方面重要意义<sup>[2,3]</sup>。

中国北方红粘土堆积的六盘山东部地区,红粘土上覆厚度不等的第四纪黄土,基底多与中新世河湖相地层或更老地层呈不整合接触,底界年龄 6.8~8.1 Ma BP 之间<sup>[4~9]</sup>。六盘山以西秦安县郭嘉红粘土剖面的最新底界年龄为 22 Ma BP,预示着晚新生代亚洲内陆干旱开始的时间<sup>[3]</sup>。

中国东部风尘沉积的研究主要涉及胶、辽半岛<sup>[10,11]</sup>、苏北盆地和长江三角洲<sup>[12~14]</sup>、江西九江与修水<sup>[15,16]</sup>、浙江沿海岛屿<sup>[17]</sup>和安徽宣城<sup>[18]</sup>等地,在研究的时段上多集中在中、晚更新世。然而,在中国

黄土高原西部中新世红层研究取得巨大进展的同时,我们不能不思考这样一些问题:中国东部有没有更老的风尘沉积?假若有更老的风尘沉积,与黄土高原红粘土有什么关系?对全球变化和亚洲重大环境的事件又是如何响应的?

作者近年来对南京附近长江北岸灵岩山剖面进行了详细野外调查和研究,认为在灵岩山剖面玄武岩下伏的一套土状沉积物当属风尘沉积,时代在 12 Ma 以前,为迄今中国东部最老的风尘沉积物。本文结合野外实地调查和室内粒度、磁化率、扫描电镜实验分析结果,对南京附近灵岩山剖面的沉积特征与环境意义进行初步探讨。

## 2 研究区位置和剖面沉积特征

本文研究的南京灵岩山地区位于长江以北,大地构造属于下扬子断块,是苏—皖褶皱隆起区向苏北断陷盆地过渡的地区,新近纪以来,区内以差异性升降运动为主的新构造运动明显,基性火山喷发频繁,造成了区内砂砾层的大量堆积及玄武岩分布<sup>[19,20]</sup>。灵岩山是南京附近玄武岩孤立丘陵的代表,周围还有瓜埠山、方山、横山等玄武岩丘陵,海拔高度通常数十米到 100 多米(图 1)。下蜀土在该区域广泛分布,覆盖在基岩丘陵与岗台地之上。

①国家自然科学基金(批准号:40471128 40271004)和中国科学院黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金项目(N. SKLLQG0405)、南京大学分析测试基金资助

收稿日期:2006-05-07 收修修改稿日期:2006-06-25

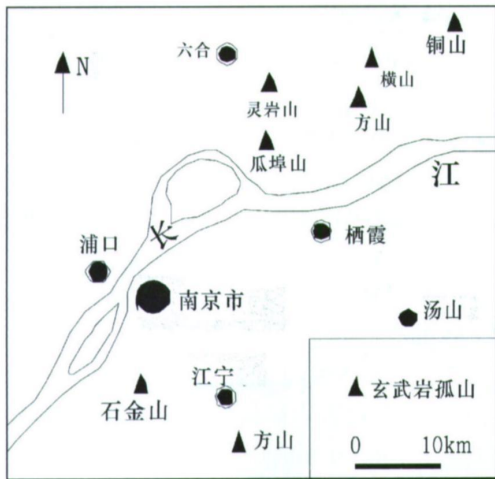


图 1 研究区地理位置

Fig 1 The location of the study area

南京附近的玄武岩丘陵多与新近纪砂砾石沉积伴生, 在玄武岩边缘的砂石矿坑露头常见玄武岩覆盖在新近纪黄土状土、砂砾石等松散沉积地层上(图版 I-1~3)。本文研究的灵岩山沉积剖面, 位于南京市六合区灵岩山南坡的一个废弃采沙场, 剖面上部为玄武岩, 剖面下部为厚度近 19 m 的松散沉积层。整个剖面可以粗略地划分 5 个亚层(图 2)。

**A 块状玄武岩层:** 深橄榄灰色, 玄武岩垂直节理发育, 含气孔, 为基性橄榄玄武岩, 剖面厚度 5~10 m。用 K-Ar 测定灵岩山玄武岩年代为 12.17 Ma, 横山玄武岩年代为 12.42 Ma, 六合北黄岗附近玄武岩 12.09 Ma, 小盘山玄武岩 10.58 Ma<sup>[20]</sup>, 均为中新世。

**B 玄武岩烘烤碎屑层夹棕黄色粘土质粉砂层:** 杂色, 上部为烘烤层, 下部为灰色的玄武岩碎屑和凝灰岩沉积, 中间为棕黄色粘土质粉砂夹层。层厚达到 1.8 m。

**C 黄土状粉砂层:** 棕黄色, 直立性强, 有垂直节理发育, 上部裂隙有板状碳酸钙沉积填充在裂隙中, 层厚 4.2 m, 其中上部 2.5 m, 下部 1.7 m 厚的粉砂层有浅灰黄色的斑块。均无层理发育, 外观类似第四纪黄土。

**D 粘土质粉砂与细砾、中粗砂互层:** 棕黄色的粉砂质粘土层与细砾、中粗砂沉积层交替出现, 单层厚度在 10~20 cm, 底部为砂砾石层, 厚度 2.0 m, 剖面自下向上砂砾粒度变细, 构成一个完整的正粒序沉积, 水平层理和交错层理发育, 总厚度为 7.3 m。

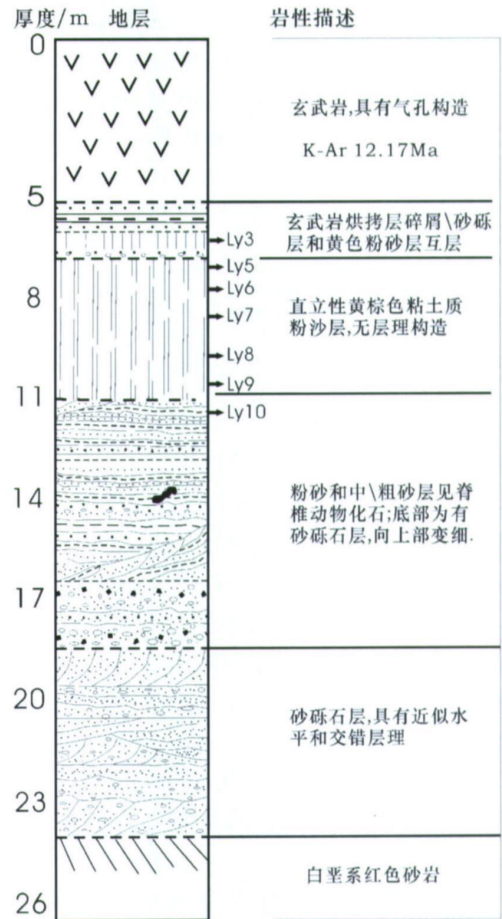


图 2 灵岩山剖面沉积特征

Fig 2 Sedimentary characteristics of the section at the Lingyanshan Hill

**E 砂砾石层:** 棕黄色砂砾石层, 该亚层的沉积物粒度呈下粗上细的特点, 交错层理十分发育, 有三个明显的交错层理层, 其间为近水平的砾石层, 该亚层总厚度为 5.4 m。根据对该砂砾石层随机选取的 100 个砾石个体形态的统计, 结果如表 1 所示, 砾石磨圆度较好, 多呈次圆状。

为了分析南京灵岩山剖面的沉积特征和环境意义, 玄武岩之下的松散沉积层共采集样品 35 个。本文主要分析剖面亚层 C, 共采集 LY5、LY6、LY7、LY8 和 LY9 五个样品。LY5 号样品位于玄武岩下 180 cm, LY6 深度为 260 cm, LY7 深度为 360 cm, LY8 深度为 480 cm, LY9 深度为 590 cm, 之下为砂层。5~9 号样品区间质地均匀, 没有层理, 呈直立状, 可见垂直节理, 外观上与黄土等风尘沉积物极为相似, 野外调查中发现在该层顶部的垂直节理裂隙中, 还发育有后期的板状碳酸钙沉积, 与稀盐酸反应有强烈气泡产生。

表 1 灵岩山剖面砾石形态统计

Table 1 The shape characteristics of the gravels in the section of Lingyan Hill

	长轴 /cm	短轴 /cm	厚度 /cm	最小内接圆 半径 km	扁平 系数	磨圆 系数
最小值	18	8	9	1	1.30	0.05
最大值	75	45	35	12	8.00	0.69
平均值	37.28	23.60	14.77	5.48	2.36	3.01

### 3 沉积物实验分析与结果

#### 3.1 扫描电镜分析

先将样品置于稀盐酸中煮沸 10 分钟,用蒸馏水充分清洗,后将样品放入 30% 的过氧化氢中煮沸 10 分钟,用蒸馏水冲洗干净,等样品干燥后将干燥后的样品过 63  $\mu\text{m}$  金属筛,随机抽取若干粒石英颗粒,用双面胶纸固定置于金属片上,再将样品托放入镀膜机中均匀地镀上金钼合金,最后在扫描电镜下进行观察、摄影。扫描电镜观察在南京大学现代分析中心进行,实验仪器日本 Hitachi 公司制造 X650 型扫描电镜,分辨率为 10 nm,放大倍数为 20 至 20 万倍。

扫描电镜 (SEM) 观察的详细程度远大于 TEM, 具有极高的分辨率,而且可以直接观察颗粒形态特征,石英硬度大,化学稳定性强,其颗粒形成的机理,搬运沉积的过程及沉淀后发生变化,这些表面特征比较稳定,不易消失,利用沉积物中石英颗粒的表面特征,可以结合沉积特征和其它环境指标分析沉积环境及沉积之后的环境变化<sup>[21~23]</sup>。

中国西部第四纪黄土和第三纪风尘沉积物中石英颗粒细小,多数颗粒具有不规则的棱角状、次棱角状,部分颗粒具有锋利的边缘和尖角,可见清晰的贝壳状断口,部分可见翻卷解理薄片<sup>[28,29]</sup>;灵岩山剖面样品扫描电镜分析与黄土中石英颗粒表面形态特征比较,可见灵岩山剖面样品与黄土有诸多相似之处,石英颗粒多呈次棱角状、棱角状,表面粗糙,具有翻卷的多组解理面,表现出风力搬运的形态特征;灵岩山剖面样品中部分石英颗粒表面有硅质覆盖或者溶蚀的微洞穴,光滑的表面上可见撞击的麻坑(图版 I-4~7)。

#### 3.2 粒度和磁化率

粒度是在南京大学海岸与海岛教育部重点实验室用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer2000 激光粒度分析仪测得,仪器测量范围为 0.02 ~ 2000  $\mu\text{m}$ ,重复测量误差小于 2%。

粒度分析前进行如下预处理:(1)将 1 g 左右的样品置于烧杯中,加水用玻璃棒搅拌后静置过夜,24 小时后将杯中清水洗去,再加清水,用玻璃棒搅拌,静置过夜,如此重复 3 次洗去样品中的盐分;(2)为除去钙质胶结物 ( $\text{CaCO}_3$ ),加 6% 的盐酸溶液如样品中,用玻璃棒搅拌后放置 24 小时,除去清液,再加盐酸反复至不再起泡为止,然后换加清水,静置过夜,吸去清液;(3)最后加 5% 的六偏磷酸钠进行分散,静置 24 小时后即可上机测量,测量前用超声波分散。根据灵岩山剖面 LY5、LY7 和 LY9 样品的粒度分析结果(表 1),以细颗粒为主的粉砂的含量超过 75%。平均粒径在  $5.7\Phi \sim 6.5\Phi$ , 中值粒径和平均粒径相当,在  $5.6\Phi \sim 6.6\Phi$  之间。

表 2 灵岩山剖面部分样品粒度及其与其它区域黄土粒度的比较<sup>①</sup>

Table 2 Grain size of Lingyan Hill section and comparison with that from other places

Sample	Median $\Phi$	Mean $\Phi$	Gravel %	Sand %	Silt %	Clay %
LY5	6.641	6.484	0	4.03	82.44	13.53
LY7	5.621	5.722	0	15.08	76.79	8.13
LY9	5.638	5.764	0	15.03	75.63	9.34
平均值	5.967	5.990	/	11.38	78.29	10.33
陕西马兰黄土	/	/	/	30.29	52.61	17.00
陕西离石午城黄土	/	/	/	22.09	53.49	24.47
镇江黄土	/	/	/	4.18	67.38	28.44
兰州特大尘暴	/	6.444	/	0.08	70.15	20.77
浙江嵊山	/	/	/	1.70	69.70	28.60

① 陕西马兰黄土和离石午城粒度平均值引自文献[33];镇江黄土平均粒度资料引自文献[14];兰州特大沙尘暴粒度引自文献[34];浙江嵊山黄土粒度数据由郑祥民教授提供。

南京附近灵岩山剖面 C 层中粒度组成以粉砂为主,占全部的 75% 以上,粉砂和粘土之和占总量的 85% 以上或更高,与陕西黄土、镇江大港黄土、浙江嵊山黄土的粒度组成有很大的相似性;灵岩山剖面 C 层粒度组成中粉砂的组成明显偏高,砂组份含量也略偏高,其原因尚待进一步探讨。黄土高原地区的黄土粒度组成的空间差异明显,存在一定的变幅<sup>[33,35]</sup>,总体上来看,灵岩山土状沉积物粒度与风尘黄土粒度组成有相似性。

自 20 世纪 70 年代 Oldfield F. 和 Thompson R. 创立环境磁学以来,磁化率作为一个重要的环境指标,得到了越来越广泛的应用。在风成黄土—古土壤序列过去全球变化研究中,磁化率记录可以作为反映气

候波动乃至古季风环流变迁的灵敏代用指标, 已成为中国北方地区大陆古气候演变的良好记录模式, 并与深海沉积氧同位素记录具有较好的对比性。将灵岩山剖面 C 层采集的 5 个沉积物样品风干, 以不破坏自然颗粒研磨之后, 过 50 目标标准筛、装入专用塑料盒, 用英国 Bartington 公司生产的 MS2 型磁化率仪测定, 结果如图 3 所示。

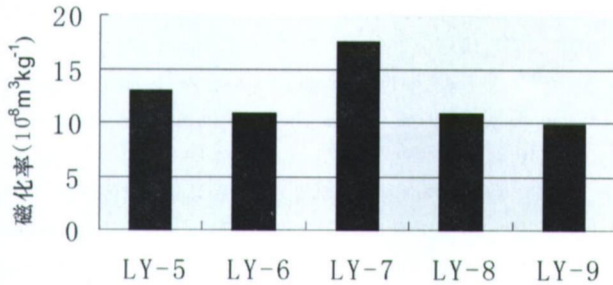


图 3 灵岩山剖面部分样品质量磁化率 ( $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ )

Fig 3 Magnetic susceptibility of some samples in Lingyanshan Hill section

灵岩山剖面粉砂层沉积物磁化率值变化范围在  $9.8 \times 10^{-8} \sim 17.6 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  之间, 与黄土高原黄土典型剖面黄土与古土壤序列的磁化率数值<sup>[31]</sup> 相比明显偏低, 也大大低于长江三角洲地区晚第四纪风尘沉积物的磁化率<sup>[14]</sup>, 但有意思的是与灵岩山时代相当的西北秦安中新世风尘沉积的磁化率和灵岩山剖面磁化率数值基本一致, 秦安剖面红层磁化率多在  $20 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  左右, 并呈小幅度波动变化<sup>[3]</sup>。灵岩山剖面 C 层粉砂样品磁化率变化也存在波动变化 (图 3)。

### 3.3 Rb/Sr 比值

Rb 和 Sr 是一对在地球化学行为方面具有明显差别的微量元素。在地表岩石和沉积物中 Rb 主要分散在含 K 的矿物中, 如钾长石等; 而 Sr 主要分散在含 Ca 的矿物中, 如斜长石等。由于在风化成壤作用中, 含 K 的矿物比含 Ca 的矿物的稳定性要高。因此, 在化学风化过程中 Sr 的活动性比 Rb 的强, 从而造成风化剖面中 Rb 和 Sr 的分离。Rb/Sr 值的变化主要是 Sr 含量的变化, 在风化成壤作用中, 碳酸盐的淋溶和含 Ca 硅酸盐矿物的分解, 引起 Sr 的淋失, 而 Rb 保持稳定。因此, Rb/Sr 值指示了黄土和古土壤遭受的淋溶程度, 反映了地区的降雨量, 是夏季风强度变化的替代性指标<sup>[24]</sup>。

灵岩山剖面 C 层样品的元素分析显示 Rb/Sr 比值较高, 远大于洛川黄土的 Rb/Sr 比值。洛川黄土

Rb/Sr 比值变化范围是 0.41~0.82 平均值是 0.53 洛川古土壤 Rb/Sr 变化于 0.45~1.20 之间, 平均值是 0.79 南京老虎山剖面黄土与古土壤 Rb/Sr 的平均值变化于 0.71~0.94 之间<sup>[25]</sup>。灵岩山剖面 Rb/Sr 变化于 1.141~1.404 之间, 平均值是 1.266 远大于洛川剖面和南京老虎洞剖面的值。证明此剖面沉积之后经历较长的地质历史, 化学风化作用强烈。

## 4 讨论

南京附近灵岩山玄武岩喷发时代为 12 Ma 其下伏中新世黄土风尘证据的研究具有十分重要的科学意义, 有利于把握中新世以来季风影响的空间格局和环境演化。影响季风强度的一个因素是海陆分布, 特别值得注意的是副特底斯海 (Paratethys) 30 Ma 前是一个覆盖欧亚大陆中部的陆表海, 到早中新世时退缩, 数值模拟表明, 特底斯海的退缩促使亚洲内地大陆化, 从而加强了季风环流, 这种海陆分布变化对季风强度的影响, 并不亚于青藏高原的隆升<sup>[26]</sup>。由于副特提斯海的退缩发生在渐新世到中晚中新世之间, 对东亚季风的影响也应当出现在 30~15 Ma 时段, 与同期中国大陆陆相沉积记录的行星风系退缩、气候湿润环境相一致<sup>[27]</sup>。南海深钻岩芯研究也证实在 15 Ma 之前, 季风特征已经相当明显<sup>[30-31]</sup>。南京灵岩山剖面的沉积特征与古季风在中新世明显加强是一致的, 玄武岩喷发之前气候环境异常湿润, 以巨厚的砂砾石层、河流相的砂-粉砂互层为证据。

中新世甘肃秦安红土剖面记录的粉尘沉积中 15~13 Ma 和 8~7 Ma 两个时段的沉积通量明显加大, 反映气候一度恶化<sup>[3]</sup>; Miller 根据 DSDP 钻孔沉积物底栖有孔虫建立了新生代氧同位素全球温度的变化, 对冰盖和海平面变化有明显的指示意义, 从全球冰盖变化来看, 15 Ma 左右南极冰盖有大幅度的增加, 全球气温下降明显<sup>[32]</sup>。南京附近灵岩山剖面黄土状风尘沉积层, 其时代应该与秦安红土剖面的 15~13 Ma 相当, 和中国乃至全球气候在中新世中期之后有明显降温气候变化趋势有一致性。

从野外沉积剖面特征看, 玄武岩下伏的土状沉积物非常类似黄土沉积, 没有层理、质地均一、垂直节理发育, 所以不可能是流水作用和坡面过程作用下的沉积物。对沉积物石英颗粒进行的扫描电镜影像也显示, 灵岩山玄武岩下伏沉积物具有明显的风尘沉积特征。粒度分析表明灵岩山剖面风尘沉积物与黄土高原黄土和长江三角洲地区的黄土有很大的相似性, 以

粉砂为主。灵岩山磁化率的变化和中新世秦安红粘土有很大相似性,明显低于第四纪黄土—古土壤序列的磁化率,其原因有待进一步研究。代表化学风化强度的  $Rb/Sr$  元素比值表明,  $Rb/Sr$  比值远大于第四纪黄土,反映灵岩山风尘沉积物在形成之后经历了较强烈的化学风化作用过程。总之,作者认为南京附近灵岩山下伏的土状沉积物应为风尘沉积,和相关区域中新世风尘沉积的对比研究有待进一步深入研究。

致谢 前后参加野外采样的有研究生王柳柱、毛龙江、郭伟等,在此一并致谢。

### 参考文献 (References)

- 张勇,李吉均,赵志军,等. 中国北方晚新生代红粘土研究的进展与问题. 中国沙漠, 2005 25(5): 722~730 [Zhang Yong Li Jijun Zhao Zhijun *et al* Advances in research of the Late Cenozoic Red Clay in North China Journal of Desert Research 2005 25(5): 722~730]
- An Z S Kutzbach J E Prell W R *et al* Evolution of Asian monsoon and phased uplift of the Himalaya Tibetan plateau since late Miocene times Nature 2001 411: 62~66
- Guo Z T Ruddiman W F Hao Q Z *et al* Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China Nature 2002 416: 159~163
- 陈宝群,孙东怀,安芷生. 蓝田白鹿原晚第三纪风成红粘土序列的古季风气候记录. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2001 29(4): 112~117 [Chen Baoqun Sun Donghuai An Zhisheng Paleoclimatic record from red clay sequence at Baihuyan of Lantian, Shaanxi province Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2001 29(4): 112~117]
- 宋友桂,方小敏,李吉均,等. 六盘山东麓朝那剖面红粘土年代及其构造意义. 第四纪研究, 2000 20(5): 457~463 [Song Yougui Fang Xiaomin Li Jijun *et al* Age of clay Chaona section near eastern Liupan Mountain and its tectonic significance Quaternary Sciences 2000 20(5): 457~463]
- 杨石岭,侯圣山,王旭,等. 泾川晚第三纪红粘土的磁性地层及其与灵台剖面的对比. 第四纪研究, 2000 20(5): 423~434 [Yang Shiling Hou Shengshan Wang Xu *et al* Completeness and continuity of the Late Tertiary red clay sequence in Northern China Evidence from the correlation of magnetostratigraphy and pedostratigraphy between Jingchuan and Lingtai Quaternary Sciences 2000 20(5): 423~434]
- 孙有斌,孙东怀,安芷生. 灵台红粘土—黄土—古土壤序列频率磁化率的气象意义. 高校地质学报, 2001 7(3): 300~306 [Sun Youbin Sun Donghuai An Zhisheng Paleoclimatic implication of frequency dependent magnetic susceptibility of Red Clay Loess Paleosol sequences in the Lingtai Profile Geological Journal of China Universities 2001 7(3): 300~306]
- 薛祥煦,赵景波. 陕西旬邑新近纪红粘土微形态特征及其意义. 沉积学报, 2001 21(3): 448~45 [Xue Xiangxu Zhao Jingbo Characteristic and significance of the Micromorphology of Neogene Red Clay of Xunyi, Shaanxi Province Acta Sedimentologica Sinica 2001 21(3): 448~45]
- 孙东怀,刘东生,陈明扬,等. 中国黄土高原红粘土序列的磁性地层与气候变化. 中国科学(D辑), 1997 (3): 265~270 [Sun Donghuai Liu Dongsheng Chen Mingyang *et al* Magnetostratigraphy and paleoclimate of red clay sequences from Chinese Loess Plateau Science in China (Series D) 1997 (3): 265~270]
- 李培英. 渤海海峡及胶辽两半岛海岸带黄土的分布特征. 黄渤海海洋, 1992 10(1): 25~33 [Li Peiying Distributive properties of Coastal Zone Loess in Bohai Strait Jiaodong Peninsula and Liaodong Peninsula Journal of Oceanography of Huanghai and Bohai Seas 1992 10(1): 25~33]
- 张祖陆. 渤海莱州湾南岸平原黄土地貌及其古地理意义. 地理学报, 1995 50(5): 465~470 [Zhang Zulu The paleogeographic implications of loess mound Laizhou Bay Plain Acta Geographica Sinica 1995 40(1): 93~94]
- 郑祥民,严钦尚. 末次冰期苏北平原和东延海区的风尘黄土沉积. 第四纪研究, 1995 (3): 258~266 [Zhen Xiangmin Yan Qingshan Aeolian Loess deposition during the Last Glacial Period in the Northern Jiangsu plain of the Yangtze delta and western areas of the Yellow Sea and the East China Sea Quaternary Sciences 1995 (3): 258~266]
- 郑祥民. 长江三角洲及海域风尘沉积与环境. 上海: 华东师范大学出版社, 1999 1~174 [Zhen Xiangmin Aeolian Sediments and Environment in the Yangtze River Delta and the Adjacent Coastal Ocean Shanghai East China Normal University Press 1999 1~174]
- 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. 海洋地质与第四纪地质, 2001 21(1): 25~32 [Li Xusheng Yang Dayuan Lu Huayu Grain size features and genesis of the Xiaoshu Loess in Zhengjiang Marine Geology and Quaternary Geology 2001 21(1): 25~32]
- 乔彦松,郭正堂,郝青振,等. 安徽宣城黄土堆积的磁性地层学与古环境意义. 地质力学学报, 2002 8(4): 369~37 [Qiao Yansong Guo Zhengtang Hao Qingzhen *et al* Magnetostratigraphy and paleoclimatic significance of an eolian sequence from the Xuancheng area Anhui Province Journal of Geomechanics 2002 8(4): 369~37]
- 蒋复初,吴锡浩,肖华国,等. 九江地区网纹红土的年代. 地质力学学报, 1997 3(4): 27~33 [Jiang Fuchu Wu Xihao Xiao Huaguo *et al* Age of the verticillated red soil in Jiujiang area Central China Journal of Geomechanics 1997 3(4): 27~33]
- 邹学勇. 赣江下游地区的风成沉积物. 中国沙漠, 2001 21(4): 340~345 [Zou Xueyong Aeolian sediment in down stream area of Ganjiang River China Journal of Desert Research 2001 21(4): 340~345]
- 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. 海洋地质与第四纪地质, 1991 11(2): 97~104 [Yang Dayuan Han Huiyou Zhou Xuanfu *et al* Eolian deposit and environmental change of middle-late Pleistocene in Xuancheng Anhui Province South of the lower reaches of the Changjiang River Marine



- Geology and Quaternary Geology 1991 11(2): 97~104]
- 19 张祥云, 刘志平, 范迪富, 等. 南京仪征地区新近纪地层层序及时代讨论. 中国地质, 2004 31(5): 179~185 [Zhang Xiangyun Liu Zhiping Fan Difufu *et al* Stratigraphic sequence and age of the Neogene in the Nanjing Yizheng area—a discussion. *Geology in China* 2004 31(5): 179~185]
- 20 邵家骥, 黄姜依, 杨忠元, 等. 南京地区新生代玄武岩的期次、层序及时代. 地质论评, 1989 35(2): 97~106 [Shao Jiayi Huang Jiangong Yang Zhongyuan *et al* The division and age of basalts in the Nanjing area. *Geological Review* 1989 35(2): 97~106]
- 21 夏应菲, 杨浩. 安徽宣城第四纪红土剖面石英颗粒扫描电镜研究. 南京师大学报(自然科学版), 1998 21(1): 120~124 [Xia Yingfei Yang Hào. SEM of quartz of the Quaternary red earth in Xuancheng. *Anhui Journal of Nanjing Normal University (Natural Science)*, 1998 21(1): 120~124]
- 22 孙有斌, 安芷生. 风尘堆积物中石英颗粒表面微结构特征及其沉积学指示. 沉积学报, 2000 18(4): 506~510 [Sun Youbin An Zhisheng. Sedimentary interpretation of surface textures of quartz grains from the eolian deposits. *Acta Sedimentologica Sinica* 2000 18(4): 506~510]
- 23 王颖, 迪纳瑞尔 B. 石英砂表面结构模式图集. 北京: 科学出版社, 1985 4~10 [Wang Ying and Bhan Deoname. Model atlas of surface textures of quartz sand. Beijing: Science Press, 1985. 4~10]
- 24 Chen Jun, An Zhisheng and Head J. Variation of Rb/Sr ratios in the loess paleosol sequences of central China during the last 130 000 years and their implications for monsoon paleoclimatology. *Quaternary Research* 1999 51: 215~219
- 25 李福春, 谢昌仁, 潘根兴. 南京老虎山黄土剖面的磁化率及 Rb 和 Rb/Sr 对古气候的指示意义. 海洋地质与第四纪地质, 2002 22(4): 47~52 [Li Fuchun Xie Changren Pan Genxing. Paleoclimatic implication of distribution of Rb, Rb/Sr and magnetic susceptibility in loess and paleosol from Laohushan profile. *Nanjing Marine Geology and Quaternary Geology* 2002 22(4): 47~52]
- 26 Ranstein G, Fluteau F, Besse J *et al* Effect of orogeny, plate motion and land-sea distribution on Eurasian climate change over the past 30 million years. *Nature* 1997 386: 788~795
- 27 汪品先. 新生代亚洲形变与海陆相互作用. 地球科学, 2005 30(1): 1~18 [Wang Pinxian. Cenozoic deformation and history of sea-land interactions in Asia. *Earth Sciences* 2005 30(1): 1~18]
- 28 刘进峰, 郭正堂, 乔彦松, 等. 秦安中新世黄土—古土壤序列石英颗粒形态特征、粒度分布及其对成因的指示意义. 科学通报, 2005 50(24): 2806~2809 [Liu Jinfeng Guo Zhengtang Qiao Yan Song *et al* Eolian origin of the Miocene loess soil sequence at Qin'an, China: Evidence of quartz morphology and quartz grain size. *Chinese Science Bulletin* 2006 51(1): 117~120]
- 29 Guo Z T, Peng S Z, Hao Q Z *et al* Origin of the Miocene Pliocene Red Earth Formation at Xi Feng in Northern China and implications for paleoenvironments. *Paleogeography Paleoclimatology Paleoecology* 2001 170: 11~26
- 30 Jia G D, Peng B, Zhao Q *et al* Changes in terrestrial ecosystem since 30 Ma in East Asia: stable isotope evidence from black carbon in the South China Sea. *Geology* 2003 31: 1093~1096
- 31 Clift P, Lee J I, Clark M K *et al* Erosional response of South China to arc rifting and monsoonal strengthening: a record from the South China Sea. *Marine Geology* 2002 184: 207~226
- 32 Miller K G, Fairbanks R G, Mountain G S. Tertiary oxygen isotope synthesis, sea level history, and continental margin erosion. *Paleoceanography* 1987 (2): 1~19
- 33 孙建中. 黄土学(上篇). 香港: 香港考古学会出版, 2005. 1~521 [Sun Jianzhong. *Loessology* (Vol 1). Hong Kong: Hong Kong Archaeological Society, 2005. 1~521]
- 34 戴雪荣, 师育新, 薛滨. 兰州现代特大尘暴沉积物粒度特征及其意义. 兰州大学学报(自然科学版), 1995 31(4): 168~174 [Dai Xuerong Shi Yuxin Xue Bin. Granulometric characteristics and significance of deposits from a recent extraordinary heavy dust storm in Lanzhou, Gansu, Northwest China. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 1995 31(4): 168~174]
- 35 徐树建, 潘保田, 李琼, 等. 陇西盆地末次冰期黄土粒度特征及其环境意义. 沉积学报, 2005 23(4): 702~708 [Xu Shujian Pan Baotian Li Qiong *et al* Environmental significance and characteristics of grain size of the Loess in Longxi Basin during the Last Glacial Period. *Acta Sedimentologica Sinica* 2005 23(4): 702~708]

## The Discovery of Miocene Aeolian Sediments and Its Paleoenvironmental Significance in East China

ZHANG Zhen ke<sup>1,2</sup> HE Hua-chun<sup>1</sup> LI Shu-heng<sup>1</sup> TIAN Hai-tao<sup>1</sup> WANG Ying<sup>1</sup>

(1. Laboratory of Coast & Island Development of MOE, Nanjing University, Nanjing 210093)

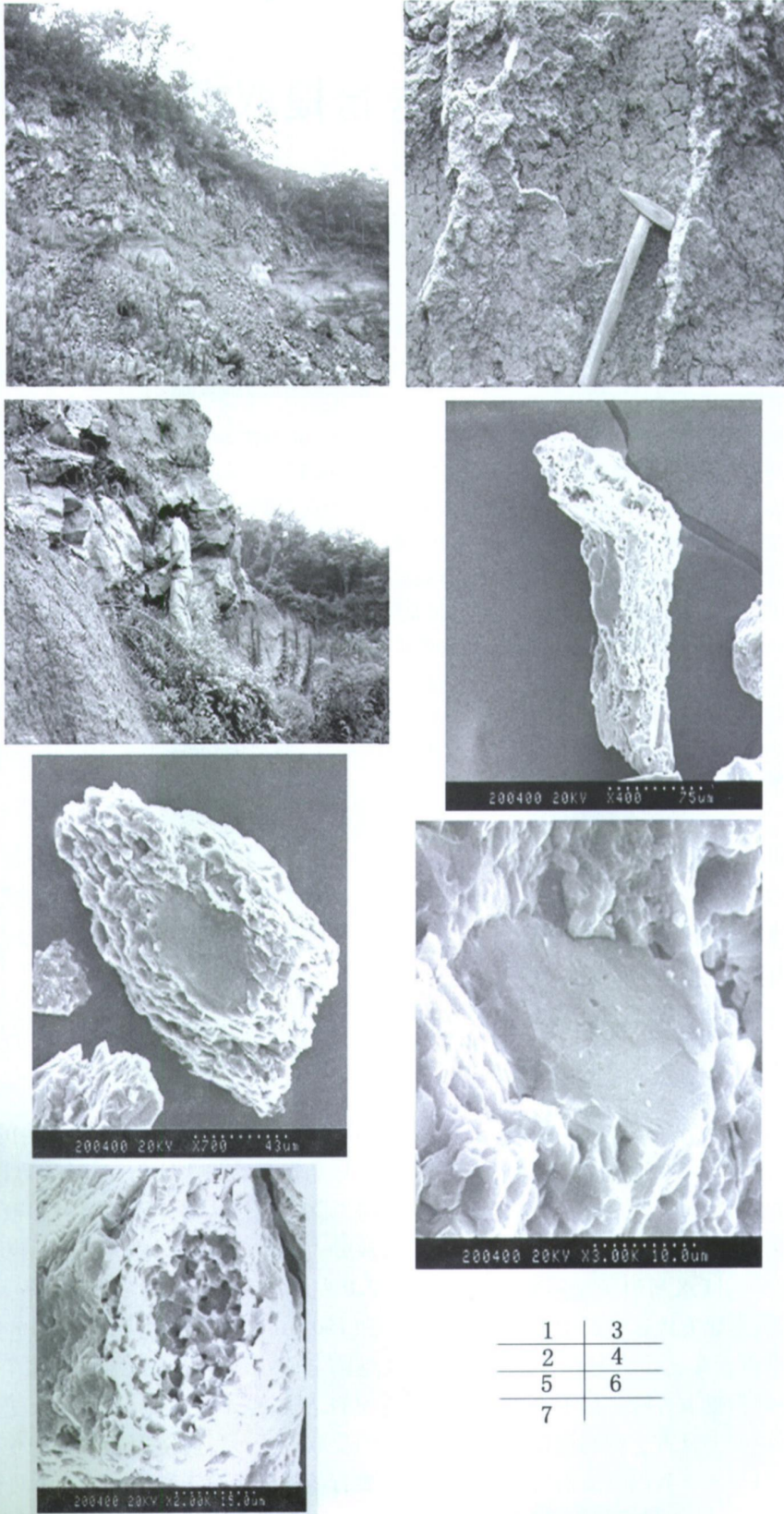
2. SKLLQG, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710054)

**Abstract** The researches on the paleoclimatology and paleoenvironment recorded by the red clay have made much progress in the region of China's loess plateau during the past decade. The earliest red clay in the western part of the loess plateau is about 22 Ma old. While in the eastern region to Lupanshan Mountain, the bottom part of the red clay sequences is no more than 9 Ma. Red clay was regarded as the result of aeolian sedimentation which is similar to the

loess paleosol sequences. Red clay records have important significance in the studies on Asian environmental evolution in the Era of Cenozoic, especially on the fields of inland desertification and the impacts of the Tibetan Uplifting. But no aeolian sediments older than the early time of Pleistocene has found in East China.

On the basis of field investigation in the northern suburb of Nanjing, East China, the section of Lingyan Hill was discovered and the loess-like sediment layer was covered by basalt layers with the age of 12–17 Ma. Field investigation and sampling was carried out and the whole sedimentary section was about 19 meters high, not including the covered basalt layers. Under the basalt layer was the loess-like sediments. A general analysis about the loess-like sediments was carried out on the proxies of grain size, magnetic susceptibility, quartz SEM and geochemical elements. According to the sedimentary characteristics of the sediments and the laboratory analysis results, the 4-metre thickness loess-like deposits in the section of Lingyan Hill was regarded as the aeolian sediments with the age of more than 12 Ma, which is the earliest aeolian deposits in East China. The deposit is the result of climatic event in the mid-Miocene, which was corresponding with the 15–13 Ma rapidly strong deposition of aeolian sediments in the Qin'an section in Loess Plateau and the enlargement of ice sheet in Antarctic after 15 Ma.

**Key words** Miocene, aeolian sediments, sedimentary characteristics, Lingyan Hill, environment changes



1	3
2	4
5	6
7	

图版 I 说明 1 灵岩山剖面: 上部玄武岩, 烘烤层下为黄土状土, 原为采砂场, 崩塌严重; 2 灵岩山剖面: 玄武岩下覆盖黄土状土。3. 灵岩山剖面局部: 黄土状土上部出现的板状钙质沉积, 沿垂直节理发育; 4 棱角状条形石英砂, 表面有很多微孔穴和解理面, 放大 400 倍; 5. 次棱角状石英砂, 翻卷的解理薄片和解理面, 表面粗糙, 放大 700 倍; 6 石英砂解理面上的撞击坑, 放大 3000 倍; 7. 石英砂溶蚀造成的微孔穴, 放大 2000 倍。