

下蜀黄土中记录的氧同位素 3 阶段(MIS3) 特殊暖湿现象*

张茂恒^{1,2} 夏应菲¹ 孟景闻¹ 赖忠平³ 汪永进^{1,2}

(1 南京师范大学地理科学学院, 南京 210097)

(2 江苏省环境演变与生态建设重点实验室, 南京 210097)

(3 中国科学院黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710054)

摘 要 下蜀黄土在第四纪古气候研究上具有独有的区位特征,对南京李家岗下蜀黄土剖面上部的近 20m 进行野外观察和室内研究,划分出 5 层黄土和 5 层古土壤,按 5 cm 间距采集了 Rb/ Sr、色度、磁化率和粒度样品,并在剖面 and 可追索的相邻剖面上采集了 12 个光释光测年样品。通过气候代用指标与深海氧同位素及古里雅冰芯、马兰黄土等的对比,结合光释光测年,对南京李家岗下蜀黄土进行气候地层划分,对比结果将下蜀黄土划分出分别相当于 MIS2 ~ MIS5 的 4 个气候旋回。气候意义的分析表明,各代用指标具有良好的可对比性,显示了氧同位素 3 阶段明显的特殊暖湿特征,并且其所反映的气候变化过程和强度与青藏高原及西部黄土具有明显的差异。

关键词 氧同位素 3 阶段;暖湿现象;下蜀黄土

中图分类号 P588. 23;P595

文献标识码 A

中国大陆氧同位素 3 阶段(MIS3)的特殊暖湿现象得到了多种地质记录的支持,如青藏高原古里雅冰芯的 ^{18}O 指标和若尔盖盆地森林指标^[1~5],柴达木察尔汗盐湖中石盐包裹体^[6],黄土高原的碳同位素、磁化率和 Rb/ Sr 指标^[7,8]。这显示出中国大陆气候在季风强度、植被发育、降水等方面有别于全球的区域特征,其影响范围和时间、强度成为引人注目的话题。由于目前的记录多来自青藏高原及中国西部地区,因此,这一现象在中国东部第四纪地层中能否有很好的记录以及其具体的气候变化特征等自然受到关注^[9,10]。为此,我们选择了处于中国风成堆积物的南缘并在古气候学研究上有着独特区位优势的下蜀黄土进行系统的剖面观测和采样分析,采用 Rb/ Sr、色度、磁化率、粒度等气候代用指标,结合光释光测年,以期建立下蜀黄土的气候地层序列,并讨论其气候变化特点,为探讨晚第四纪东亚典型季风区气候变化的驱动机制提供参考。

1 剖面与研究方法

剖面所在的李家岗位于南京城东北约 20 km (图 1),地貌上属长江南岸二级阶地,高约 30 ~

40 m,下蜀黄土发育在白垩系葛村组石英砂岩之上,人工开挖的剖面出露良好,野外地层分辨清楚,通过野外观测和室内镜下观察,根据颜色和组份、结构特征划分出 5 个古土壤层和 5 个黄土层^[11]。按相关采样要求系统采集年代和环境气候样品,其中红外释光(TL 和 OSL)年代样品根据分层和间距情况共采集了 10 个,从自然断面处掘进 30 cm,用直径 3 cm、高 6 cm 的圆柱形铝质采样器采集柱状样,两头用镀铝金属薄膜封裹,加盖铝质圆盖,样品采集后连同采样盒用塑质纸封装,由印度物理研究所地球科学部热释光研究室 DAYBREAK 1150 TL/OSL 自动测量仪获得测年数据^[12];环境代用指标样品采集间距为 5 cm,其中粒度样品在去除后生结核及其他杂质后过筛,粗细组份分别用 RPS-75 型机械自动筛分仪和 SKC-2000 型光透式粒度仪测定。其余样品在自然风干并磨至 200 目后分样,色度测定采用日本 Nippon Denshoku Koryo 公司生产的 N-D-101DP 色度仪进行;磁化率测试采用 MS-2 型 Bartington 磁化率仪,Rb/ Sr 测定在南京大学现代分析中心进行,测试仪器为日本岛津公司生产的 VP-320 型 X 射线荧光光谱仪,测试结果经标样控制和对照试验,其相对误差和相对偏差均小于 2%。

* 国家自然科学基金项目(40471135)、国家自然科学基金项目(40501075)资助

作者简介:张茂恒(1965~),男,博士,副教授,从事第四纪地质学研究。E-mail:zhangmaoheng@njnu.edu.cn

收稿日期:2006-12-27;收到修改稿日期:2007-07-01

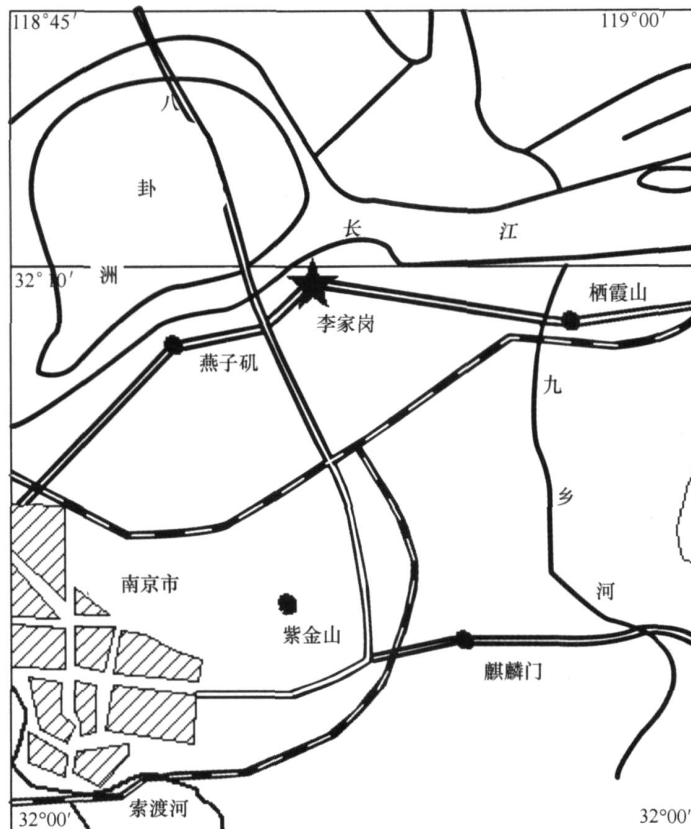


图 1 李家岗下蜀黄土剖面位置

Fig. 1 Location of the Lijiang Xiashu loess profile

2 年代及地层对比

依据再生法红外释光测年结果^[13],李家岗下蜀黄土中第一层黄土的上部(0.5 m 以上)的年代晚于 23.82 ka BP,和黄土高原 L₁₋₁对应,落于深海氧同位素 2 阶段;其下部与第二、三层黄土以及第一、二、三层古土壤(0.5 ~ 10.4 m)的年代在 69.9 ka ~ 23.82 ka BP 之间,与黄土高原 L₁₋₂ ~ L₁₋₄对比,落在深海氧同位素 3 阶段;而第三、第四两层古土壤之间的第四层黄土(10.4 ~ 11.8 m)则对应于黄土高原的 L₁₋₅,落于氧同位素 4 阶段^[14];第四层古土壤及以下(11.8 ~ 29.4 m)的年代大于 87.7 ka BP,落在末次间冰期内,可与黄土高原的 S₁对比,对应于深海氧同位素 5 阶段。

这一结果可以通过气候地层对比得到验证(图 2):李家岗下蜀黄土的第一黄土层上部与第四黄土层出现的 Rb/Sr 及色度变化曲线的低值段与古里雅冰芯氧同位素及马兰黄土剖面磁化率的两个低谷相对应,分别落于 MIS2 和 MIS4;而第一古土壤层至第

三古土壤层和第四古土壤层以下的两个高值段则与古里雅冰芯及马兰黄土剖面的两个峰相对应,落于 MIS3 和 MIS5。

3 气候地层及 MIS3 的特殊暖湿现象

3.1 微量元素 Rb、Sr 变化

已有的矿物学研究表明,风成黄土粒径的粗细变化不会引起 Rb 元素赋存的含钾矿物和 Sr 元素赋存的含钙矿物的显著分异^[15,16],因此,在影响黄土剖面 Rb/Sr 的因素中,粉尘堆积后的风化成壤作用起决定意义,在风化过程中,依存于含 K 矿物中的 Rb 抗风化能力强且易被黏土矿物吸附而保留在原地或近距离迁移,而依存于含 Na、Ca 矿物中的 Sr 易风化,主要以游离态形式被地表水或地下水带走,导致残留部分的 Rb/Sr 比值升高。因此,Rb/Sr 比值的高低可以直接指示土壤发育程度和气候条件(降水量和温度)^[17~19]。

李家岗下蜀黄土剖面中,Rb/Sr 曲线的峰谷变化与黄土-古土壤序列基本对应,黄土层的 Rb/Sr 比

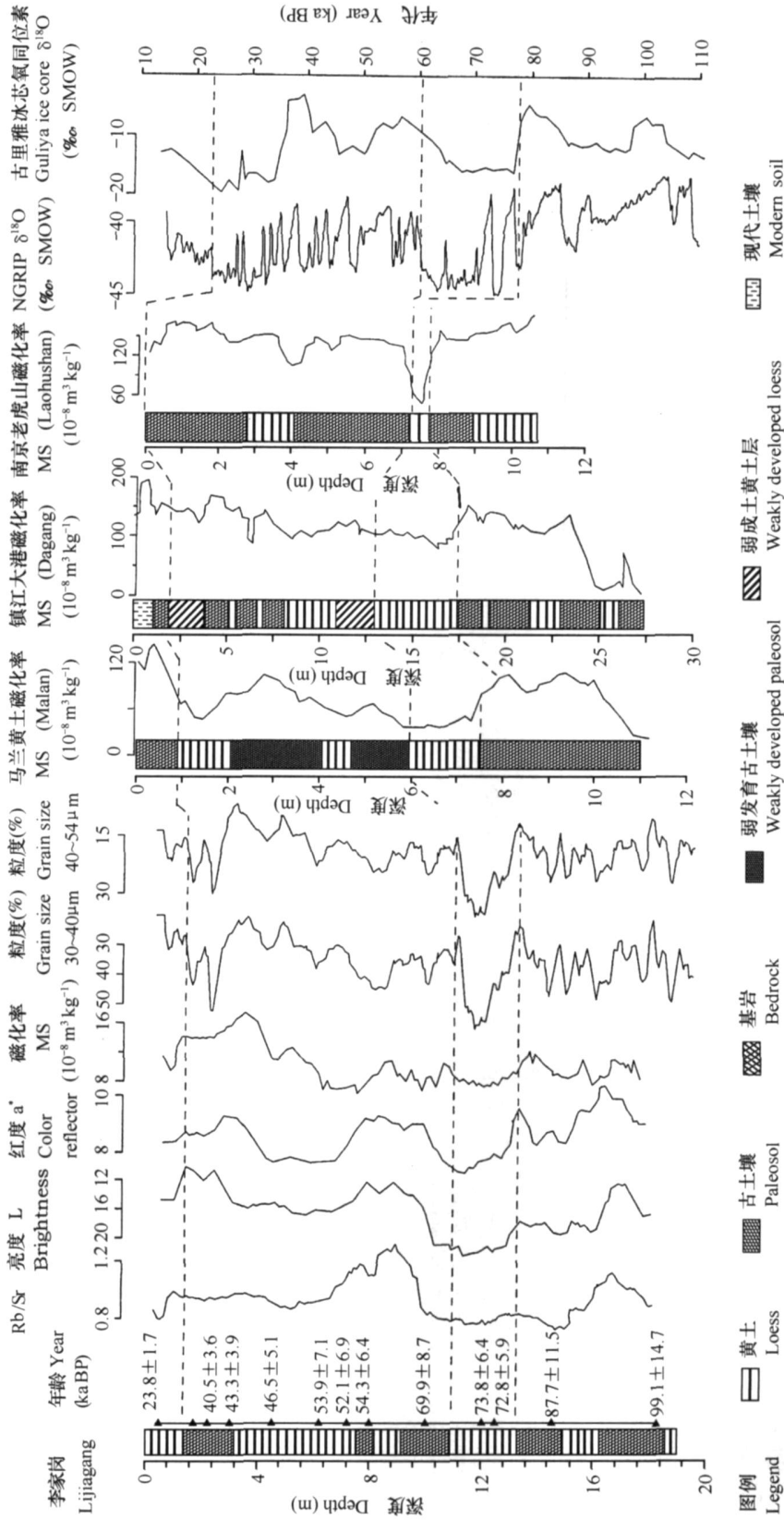


图 2 李家岗下蜀黄土剖面及年代、气候地层对比

Fig. 2 Comparison of proxies of Lijiangang Xiashu profile with other climate records

值一般在 0.7~0.9 之间,而古土壤的比值在 0.9~1.25 之间,最高甚至超过 1.30。这与宁镇地区其他地点的下蜀黄土剖面所获得的结果基本一致,高于洛川剖面黄土和古土壤的 Rb/Sr 比值(平均 0.53 和 0.79)^[20],反映出长江下游地区黄土-古土壤与西部黄土高原在化学风化强度上的差异。同时,不同古土壤层位的对比可以看出,李家岗剖面尽管发育五层古土壤,但各层古土壤的化学风化和成壤强度有明显的差异。其中,第二、三、五层古土壤所受到的风化程度最高,而第一层和第四层古土壤最低。第二、三层古土壤的峰态组合成一个强峰,代表了一个显著的暖湿阶段。第三、四层古土壤之间的黄土层所受到的风化作用最弱,代表了一个显著的干凉期。

从 Rb/Sr 变化的形态来看,下蜀黄土所记录的气候变化可以划分为三个阶段,其中包含两个显著的暖湿阶段和一个冷期,两个暖湿阶段为相当于 MIS3 的第一、二、三层古土壤和相当于 MIS5 的第四、五层古土壤;一个冷期为相当于 MIS4 的第三、第四两层古土壤之间的第四层黄土。

3.2 色度变化

黄土-古土壤序列的物质组成和其相对含量的变化是色度参数变化的主要原因。黄土中以浅色矿物为主,具有较高的光谱反射亮度值。而古土壤因相对富含有机质或水分而对反射光谱有较强的吸收能力,具有较低的光谱反射值。除有机质的含量和种类的变化外,对黄土-古土壤序列色调影响最大的是不同类型的氧化铁矿物。黄土的黄色主要由针铁矿引起,古土壤的红棕色则与其中的赤铁矿等红色调矿物有关。同时,古土壤是下伏黄土经过强烈风化作用而形成的,在温暖湿润的气候条件下,化学风化作用十分强烈,大量腐殖质、氧化铁等着色成分形成复合胶膜覆盖在矿物微粒、团聚体表面,使得反射光谱受到不同程度的吸收而减弱,而红色调得到加强。^[21]

李家岗下蜀黄土色度参数在剖面中的峰谷变化,良好地指示了地层序列中的黄土-古土壤旋回,黄土层位的光谱反射亮度值一般超过 15,其中第三层黄土的最高光谱反射亮度值达 22.8,古土壤的亮度值一般在 10~12.5。同样,各层古土壤的红度系数也与作为母质层的下伏黄土有显著的区别,古土壤的红度值大于 9,而黄土层除剖面底部因接近冲沟底部,长期受潜水浸染而出现异常高值外,一般在 7~7.5 之间变化。^[22]

与黄土高原的黄土-古土壤序列相比,李家岗下

蜀黄土中古土壤的红度值明显偏高。如西安段家坡黄土剖面中古土壤的红度值一般为 7.5 左右, S_2 中最高红度值达到 8;黄土高原中部洛川剖面中 S_1 的红度值达到 8.5。而在李家岗下蜀黄土剖面中,古土壤的红度值一般超过 9,其中第五层古土壤达到 10.5,而黄土的红度值在 8 左右,基本达到了黄土高原区古土壤的量值范围,这反映东部季风区更为强烈的风化、成壤作用和温湿的气候。从色度参数变化可以看出,第二、三层古土壤发育紧密,其间的黄土层仅能勉强区分,反映了该层黄土也经历了较强的风化作用;同时,李家岗剖面的五层古土壤的发育程度并不一致,如第四层古土壤的光谱反射亮度值较低,甚至弱于强风化的黄土层。

根据色度参数可以将下蜀黄土形成以来的古气候划分为 4 个主要阶段:第 1 阶段为第一黄土层上部,相当于 MIS2,其低的红度值和高亮度显示了极为干冷的气候;第 2 阶段包括第一古土壤层至第三古土壤层,相当于 MIS3,其色度特征显示了暖湿—干冷—暖湿的轨道尺度的气候变化旋回,从黄土较高的风化程度看,其温湿的特点相对于深海沉积记录及黄土高原更为明显;第 3 阶段为第四层黄土层,相当于 MIS4,其色度曲线表现出明显的干冷特征;第 5 阶段包括第四古土壤层及以下部分,相当于 MIS5,其较低的光谱反射亮度和较高的红度值显示末次间冰期的温湿气候。

3.3 磁化率变化特征

李家岗下蜀黄土剖面的磁化率值变化于 70~210 之间。其中,黄土层变化于 70~150 之间,古土壤变化于 $120 (\times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}) \sim 220 (\times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1})$,磁化率的峰值基本与各层古土壤对应,这与南京老虎山、镇江大港及我国其他地区的黄土特征一致^[23,24](剖面底部黄土的磁化率值出现异常高值,可能受基岩风化和潜水浸染影响所致)。但其中第二层黄土的磁化率明显高于其他各黄土层,反映出较强的风化程度,这与野外观察的情况相吻合。特别引人注目的是,剖面中各古土壤层之间的磁化率值与其化学风化强度和土壤化程度并不能一一对应。相当于 MIS3 的第二、三层古土壤的土壤发育化程度虽然较高,但它们的磁化率值不仅未出现高峰值,甚至低于土壤发育程度较弱的第一、四层古土壤,这与黄土高原同层位的磁化率变化特征呈明显差异。

对土壤磁化率起重要贡献者主要是其中的磁铁矿和磁赤铁矿。一般情况下,受淋溶富集和新生矿

物的作用,土壤磁化率与土壤发育度、大气的温湿度呈正相关关系^[25~31]。但在高温、多雨的气候条件下,古土壤中的强磁性的磁铁矿极易向弱磁性的赤铁矿转化,或因水分充分饱和而被分解还原,因此应用于洛川 $S_0 \sim S_1$ 黄土地层并取得理想结果的四阶回归方程,在我国南方高温、多雨的气候条件下出现了逆转^[31]。即随着年均温、降雨量的增加,表层土壤磁化率呈显著非线性衰减。因此,第二、三层古土壤的磁化率信号衰减的现象显示了这一时期(MIS3)长江中下游区形成的粉尘堆积物遭受了强烈的风化成壤作用,其所处的气候条件应超出了磁化率随年均温、降雨量增加而增高的气候临界值:年均温 15 左右,降雨量 1 100 mm^[32]。

3.4 粒度变化

作为东亚季风变化最敏感的替代性指标之一,黄土-古土壤序列的粒度分布中较粗颗粒组份含量变化与冬季风强度有良好的正相关关系^[33]。但受物源、风力、湿度等多因素影响,其具体的参数选择在不同地区存在差异,在黄土高原中部的洛川,其值介于 26~63 μm 之间,环县地区在 44~63 μm 之间,西峰在 30~53 μm 之间^[34]。经过对南京下蜀黄土的众多粒级组份进行比较后发现,大于 54 μm 的组份受后期地表流水携入的影响明显,而小于 30 μm 的组份则对冬季风的敏感度相对不高,因此选择了 30~40 μm 和 40~54 μm 两组参数作为冬季风的代用指标进行讨论。

李家岗的粒度参数曲线出现了 4 次峰谷周期,分别为 22 ka ~ 45 ka BP、45 ka ~ 68 ka BP、68 ka ~ 91 ka BP 和 91 ka ~ 110 ka BP,表现出十分明显的 23 ka 的岁差变率,其中相当于 MIS3a 和 MIS3c 的粗颗粒组份明显呈现出两个低谷,显示了强烈的冬季风减弱信号。西部黄土和冰芯的材料揭示了晚第四纪以来冬夏季风的同相位、互为消长关系,即冬季风的减弱意味着夏季风的增强和气候的暖湿^[1,35]。尽管这一关系在中国东部地区是否同样适用,尚待进一步研究,但至少可以反映与深海氧同位素所记录的气候变化相比较,氧同位素 3 阶段中国东部季风区的气候具有明显的特殊性。

4 结 论

1) 红外释光年龄和气候地层对比的结果显示,李家岗下蜀黄土-古土壤序列的时代应归属于末次间冰期-冰期。磁化率、Rb/Sr、色度和粒度特征等代

用指标所反映的气候特征具有良好的可对比性,并且与黄土高原、青藏高原古里雅冰芯、东海陆架沉积等所反映的 MIS5 以来的气候变化趋势可以进行很好的对比。

2) 氧同位素 3 阶段(MIS3)下蜀黄土显示出强烈的风化、成壤作用加强,冬季风减弱的信号,表明在青藏高原及周围地区所记录的氧同位素 3 阶段异常暖湿效应,在中国东部季风区也同样有明显表现。

3) 李家岗下蜀黄土记录的气候过程表现出明显的轨道尺度变化,与青藏高原和黄土高原相比,其 MIS3 的增温增湿幅度更大,显示出明显的低纬驱动的信号。

参 考 文 献

- [1] 施雅风,李吉均,李炳元,等. 晚新生代青藏高原的隆升与东亚环境变化. 地理学报, 1999, 54(1): 16~17. Shi Y F, Li J J, Li B Y, et al. Uplift of the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and east Asia environmental change during late Cenozoic (In Chinese). Acta Geographica Sinica, 1999, 54(1): 16~17
- [2] 施雅风,刘晓东,李炳元,等. 距今 40~30 ka 青藏高原特强夏季风事件及其与岁差周期关系. 科学通报, 1999, 44(14): 1 475~1 480. Shi Y F, Liu X D, Li B Y, et al. A very strong summer monsoon event during 30~40 ka B P in the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau and its relation to precessional cycle (In Chinese). Chinese Science Bulletin, 1999, 44(14): 1 475~1 480
- [3] 姚檀栋,焦克勤,章新平,等. 古里雅冰帽冰川学研究. 冰川冻土, 1992, 14(3): 233~241. Yao T D, Jiao K Q, Zhang X P, et al. Glaciologic studies on Guliya ice cap (In Chinese). Journal of Glaciology and Geocryology, 1992, 14(3): 233~241
- [4] 姚檀栋, Thompson L G, 施雅风,等. 古里雅冰芯中末次间冰期以来气候变化记录研究. 中国科学 D 辑, 1997, 27(5): 447~452. Yao T D, Thompson L G, Shi Y F, et al. Climate variation since the Last Interglaciation recorded in the Guliya ice core (In Chinese). Science in China, Ser. D, 1997, 27(5): 447~452
- [5] 姚檀栋. 古里雅冰芯氧同位素地层学. 第四纪研究, 2000, 20(2): 165~170. Yao T D. Oxygen isotope stratigraphy of the Guliya ice core (In Chinese). Quaternary Sciences, 2000, 20(2): 165~170
- [6] 张彭熹,张保珍,洛温斯坦 T K,等. 古代异常钾盐蒸发岩的成因——以柴达木盆地察尔汗盐湖的成因为例. 北京: 科学出版社, 1993. 23~51. Zhang P X, Zhang B Z, Lowenstan T K, et al. On the Origin of Ancient Anomalous Evaporates: Evidenced from Ca Er Han Salt Lake in Qaidam Basin (In Chinese). Beijing: Science Press, 1993. 23~51
- [7] 李玉梅,刘东生,吴文祥,等. 黄土高原马兰黄土记录的 MIS3 温湿气候. 第四纪研究, 2003, 23(1): 69~76. Li Y M, Liu T S, Wu W X, et al. Paleoenvironment in Chinese Loess Plateau during MIS3: Evidence from Malan loess (In Chinese). Quaternary Sciences, 2003, 23(1): 69~76

- [8] 陈颢, 陈骏, 刘连文, 等. 最近 13 万年来黄土高原 Rb/ Sr 记录与夏季风时空变迁. 中国科学 D 辑, 2003, 33(6): 513 ~ 519. Chen Y, Chen J, Liu L W, *et al.* Spatial and temporal changes of summer monsoon on the Loess Plateau of Central China during the last 130 ka inferred from Rb/ Sr ratios (In Chinese). Science in China, Ser. D, 2003, 33(6): 513 ~ 519
- [9] 李双林, 李绍全, 杨文达, 等. 东海陆架 HY126 EA1 孔有孔虫壳体的氧、碳同位素记录. 海洋学报, 2002, 24(3): 81 ~ 87. Li S L, Li S Q, Yang W D, *et al.* Oxygen and carbon isotopic record of foraminiferal crusts from HY126EA1 hole in the continental shelf of the East China Sea (In Chinese). Acta Oceanologica Sinica, 2002, 24(3): 81 ~ 87
- [10] Wang YJ, Chen H, Edwards RL, *et al.* A high-resolution absolute-dated late pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. Science, 2001, 294: 2 345 ~ 2 348
- [11] 邓友军, 马毅杰. 下蜀黄土组成特征研究. 土壤, 1993, 25(1): 11 ~ 14. Deng YJ, Ma YJ. The composing characteristic of Xiashu loess (In Chinese). Soil, 1993, 25(1): 11 ~ 14
- [12] 赖忠平, 周杰, 夏应菲, 等. 南京下蜀黄土红外释光测年. 自然科学进展, 2001, (2): 203 ~ 207. Lai Z P, Zhou J, Xia Y F, *et al.* Luminescence Geochronology of Xiashu Loess near Nanjing (In Chinese). Progress in Natural Science, 2001, (2): 203 ~ 207
- [13] 张景昭, 赖忠平. 光释光测年: 黄土样品红外光释光信号的晒退实验. 核技术, 1997, 20(8): 485 ~ 488. Zhang J Z, Lai Z P. Optical dating: Bleaching experiment on IRSL signals from loess samples (In Chinese). Nuclear Techniques, 1997, 20(8): 485 ~ 488
- [14] Imbrie J, Hays J G, Martinson D S, *et al.* The orbital theory of Pleistocene climate: Support form a revised chronology of the marine ¹⁸O record. In: Berger A, Imbrie J, Hays J G, *et al.* eds. Milankovitch and Climate. Dordrecht (Holland): Reidel Publish Company, 1984. 269 ~ 305
- [15] 陈骏, 汪永进, 陈颢, 等. 中国黄土地层 Rb 和 Sr 地球化学特征及其古季风气候意义. 地质学报, 2001, 75(2): 259 ~ 266. Chen J, Wang YJ, Chen Y, *et al.* Rb and Sr Geochemical characterization of the Chinese Loess and its implications for palaeomonsoon climate (In Chinese). Acta Geologica Sinica, 2001, 75(2): 259 ~ 266
- [16] 刘连文, 陈骏, 陈颢, 等. 黄土的连续提取实验及 Rb/ Sr 值意义. 土壤学报, 2002, 39(1): 65 ~ 70. Liu L W, Chen J, Chen Y, *et al.* Sequential extraction procedure of loess and paleosol and the implications of Rb/ Sr ratios (In Chinese). Acta Geologica Sinica, 2002, 39(1): 65 ~ 70
- [17] 陈骏, 安芷生, 汪永进, 等. 最近 800 ka 洛川剖面中 Rb/ Sr 分布和古季风变迁. 中国科学 D 辑, 1998, 28(6): 498 ~ 504. Chen J, An Z S, Wang YJ, *et al.* Distribution of Rb and Sr in the Luochuan loess-paleosol sequence of China during the last 800 ka: Implications for paleomonsoon variations (In Chinese). Science in China, Ser. D, 1998, 28(6): 498 ~ 504
- [18] Gallet S, Jahn B M, Torii M. Geochemical characterization of the Luochuan loess-paleosol sequence, China, and paleoclimatic implications. Chemical Geology, 1996, 133: 67 ~ 88
- [19] 安芷生, 吴锡浩, 汪品先, 等. 最近 130 ka 中国的古季风. 古季风变迁. 中国科学 B 辑, 1991, (11): 1 209 ~ 1 215. An Z S, Wu X H, Wang P X, *et al.* Paleomonsoons of China over the last 130 000 years. Paleomonsoon records (In Chinese). Science in China, Ser. B, 1991, (11): 1 209 ~ 1 215
- [20] 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, (4): 47 ~ 52. Li F C, Xie C R, Pan G X. Paleoclimatic implication of distribution of Rb, Rb/ Sr and magnetic susceptibility in loess and paleosols from Laohushan profile, Nanjing (In Chinese). Marine Geology & Quaternary Geology, 2002, (4): 47 ~ 52
- [21] 徐彬彬, 季耿善. 土壤光谱反射特征与理化性状的相关分析. 土壤专报, 1987, 第 41 号: 66 ~ 76. Xu B B, Ji G S. The correlation analysis of spectral reflectance and physical-chemical characteristic of soil (In Chinese). Special Report of Soil, 1987, (41): 66 ~ 76
- [22] 夏应菲, 汪永进, 陈骏. 李家岗下蜀黄土剖面的反射光谱研究. 土壤学报, 2000, 37(4): 443 ~ 448. Xia Y F, Wang Y J, Chen J. Systematic study on reflectance spectrum of Xiashu Loess in Lijiagang, Nanjing (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(4): 443 ~ 448
- [23] 张建军, 杨达源, 季徐生. 长江中下游地区下蜀黄土磁化率曲线比较研究. 华东地质学院学报, 1999, (2): 124 ~ 129. Zhang J J, Yang D Y, Li X S. Comparative study on the magnetic susceptibility of the Xiashu loess in the middle and lower Changjiang River region (In Chinese). Journal of East China Geological Institute, 1999, (2): 124 ~ 129
- [24] 刘秀铭, 刘东生, Heller F, 等. 黄土频率磁化率与古气候冷暖变换. 第四纪研究, 1990, (1): 42 ~ 50. Liu X M, Liu T S, Heller F, *et al.* Frequency-dependent susceptibility of loess and Quaternary paleoclimate (In Chinese). Quaternary Sciences, 1990, (1): 42 ~ 50
- [25] Kukla G, Heller F, Liu X M, *et al.* Pleistocene climates in China dated by magnetic susceptibility. Geology, 1988 (16): 811 ~ 814
- [26] Maher B A, Taylor R H. Formation of ultrafine-grained magnetite in soils. Nature, 1989, 336: 336 ~ 370
- [27] Heller F, Liu T S. Magnetism of Chinese loess deposits. Geophys. J. R. Astron. Soc., 1984, 77: 125 ~ 141
- [28] 胡雪峰. “黄土-古土壤”序列中氧化铁和有机质对磁化率的影响. 土壤学报, 2004, 41(1): 7 ~ 12. Hu X F. Influences of iron oxides and organic matter on magnetic susceptibility in the “Loess-Paleosols sequence” (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(1): 7 ~ 12
- [29] 刘良梧, 茅昂江, 胡雪峰. 磁化率-沉积、成土作用环境的指示剂. 土壤, 2001, 23(2): 98 ~ 101. Liu L W, Mao A J, Hu X F. Susceptibility, the proxy of the process of depositing and maturing of soil (In Chinese). Soils, 2001, 23(2): 98 ~ 101
- [30] 孙继敏, 丁仲礼. 近 13 万年来黄土高原干湿气候的时空变迁. 第四纪研究, 1997, (2): 168 ~ 175. Sun J M, Ding Z L. Spatial and temporal changes of dry and wet climate during the last 130 000 years in the Loess Plateau (In Chinese). Quaternary Sciences, 1997, (2): 168 ~ 175
- [31] Liu F, Tan W F, He J Z. Changes of clay mineral association after

- high-gradient magnetic separation. *Pedosphere*, 1998, 8(1): 79 ~ 84
- [32] 吕厚远, 韩家懋, 吴乃琴, 等. 中国现代土壤磁化率分析及其古气候意义. *中国科学 B 辑*, 1994, 24(12): 1 290 ~ 1 297. Lu H Y, Han J M, Wu N Q, *et al.* The magnetic susceptibility characteristic and the paleoclimatic implication of modern soil in China (In Chinese). *Science in China, Ser. B*, 1994, 24 (12): 1 290 ~ 1 297
- [33] 孙有斌, 安芷生. 最后 4 个冰期旋回中国黄土记录的东亚冬季风变化. *地球科学*, 2002, (1): 19 ~ 24. Sun Y B, An Z S. Variation of the East Asian winter monsoon recorded by Chinese Loess during the Last Four Glacial-Interglacial Cycles (In Chinese). *Earth Science*, 2002, (1): 19 ~ 24
- [34] 鹿化煜, 安芷生. 黄土高原黄土粒度组成的古气候意义. *中国科学 D 辑*, 1998, (3): 278 ~ 283. Lu H Y, An Z S. Paleoclimatic significance of grain size of loess-palaeosol deposit in Chinese Loess Plateau (In Chinese). *Science in China, Ser. D*, 1998, (3): 278 ~ 283
- [35] Porter S C, An Z S. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation. *Nature*, 1995, 375: 305 ~ 308

THE ESPECIALLY WARM AND WET DURING MIS3 RECORDED BY XIASHU LOESS

Zhang Maoheng^{1,2} Xia Yingfei¹ Meng Jingwen¹ Lai Zhongping³ Wang Yongjin^{1,2}

(1 College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

(2 Jiangsu Key Laboratory of Environment Change and Ecological Construction, Nanjing 210097, China)

(3 State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710054, China)

Abstract The Lijiagang Xiashu profile in Nanjing is a unique area for Quaternary research. Samples were taken from the file with an interval of 5 cm for measuring geochemical proxy, brightness, color reflector, magnetic susceptibility and granularity. And the climate stratum during 20 ~ 120 ka BP was divided into 5 strata of loess and 5 strata of paleosol by comparison of its multi-climate proxies with other records, such as high resolution oxygen isotopic records of marine and Guliya ice core, magnetic susceptibility of Malan loess. Luminescence dating technique was also adopted in this study, distinguishing 4 climatic cycles, corresponding to the MIS2 ~ MIS5. And the stage corresponding to MIS3 was especially warm and wet, demonstrating its significant difference from the Tibet Plateau and the loess in West China in process and intensity of the climatic change. It's indicated that the ocean warming plays an important role on the East Asian monsoon area.

Key words Oxygen isotope stage 3(MIS3); Warm and wet phenomenon; Xiashu loess