

# 最后 4 个冰期旋回中国黄土记录的东亚冬季风变化

孙有斌<sup>1,2</sup>, 安芷生<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地球环境研究所, 陕西西安 710075; 2. 中国科学院海洋研究所, 山东青岛 266071)

**摘要:** 开展高分辨率的黄土记录研究, 是揭示过去气候变迁和变率的主要途径. 选择黄土高原中部的灵台和赵家川剖面, 对 L5 以上的黄土—古土壤序列进行了石英颗粒的提取和粒度分析. 结果表明, 石英粗颗粒( $>43\ \mu\text{m}$ )体积分数变化揭示了最后 4 个冰期旋回东亚冬季风存在的快速变化特征, 并同深海氧同位素记录具有良好的对应关系; 然而, 在每一个冰期时段, 石英粗颗粒体积分数的变化幅度和频率存有较大差异, 可能意味着对应的冰期下垫面状况和气候系统内部的非线性响应机制并不相同. 值得注意的是由石英粗颗粒体积分数反映的东亚冬季风变化, 在某些时段不仅同磁化率记录的夏季风变化不协调, 而且同深海氧同位素记录存有明显差异. 深入研究这种由不同代用指标反映的古气候变化间的差异, 对理解黄土记录的全球性意义显得尤为重要.

**关键词:** 东亚冬季风; 快速变化; 最后 4 个冰期旋回; 中国黄土.

**中图分类号:** P53

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000—2383(2002)01—0019—06

**作者简介:** 孙有斌(1973—), 男, 博士后, 2000 年于中国科学院地球环境研究所获博士学位, 现在中国科学院海洋研究所从事海洋沉积与古环境研究. E-mail: sunyb@ms. qdio. ac. cn

随着全球干旱化的加剧、温室气体的增温效应及极端气候事件的频繁发生, 使得环境的改善成为当前亟待解决的重大问题. 为此, 国际社会启动了一系列的大型科学研究计划, 其中包括对过去气候的变迁和变率的研究(如 PAGES、CLIVAR 等), 旨在查明气候系统在短时间尺度上( $10^1 \sim 10^3\ \text{a}$ )发生不稳定性突变的规律、边界条件、影响因素、机制及其对未来气候变化的影响, 相应要求寻找高分辨率的古环境记录成为解决这些问题的关键<sup>[1,2]</sup>.

中国黄土高原的风尘堆积序列, 包括新第三纪的红粘土和第四纪的黄土—古土壤序列, 组成了一套厚约 170~300 m 不等的晚新生代陆相气候演化信息载体, 它连续且高分辨率地记录了东亚季风的形成和演化历史<sup>[3~5]</sup>. 大量的研究表明<sup>[6~11]</sup>, 高分辨率的黄土记录可用以揭示千年时间尺度的季风强度快速变化情况, 但过去的工作多集中于最后两个冰期旋回或第四纪的极端气候期. 本文选择黄土高原中部的赵家川和灵台两个剖面 L5 以上的黄土—古土壤序列为研究对象, 通过提取黄土中的石英颗

粒并进行粒度分析, 探讨了最后 4 个冰期旋回石英粗颗粒体积分数记录的东亚冬季风的快速变化特征.

## 1 样品和分析

灵台剖面位于甘肃省平凉地区灵台县以南约 13 km 的五星塬任家坡村( $35^{\circ}04'\text{N}$ ,  $107^{\circ}39'\text{E}$ ), 塬面平均海拔约 1 300~1 400 m, 该地区年均温  $8.8\ ^{\circ}\text{C}$ , 变化范围为  $-4.9 \sim 21.2\ ^{\circ}\text{C}$ , 年降水量为 650 mm, 雨季多集中在 7~9 月. 西峰剖面位于黄土高原现存面积最大的董志塬东缘, 距西峰市以东约 16 km 的胡家峡险村至赵家川村( $35^{\circ}45'\text{N}$ ,  $107^{\circ}49'\text{E}$ ), 塬面平均海拔约 1 200~1 300 m. 该地区年均温  $8.7\ ^{\circ}\text{C}$ , 变化范围为  $-22.4 \sim 35.1\ ^{\circ}\text{C}$ , 年均降水量为 555 mm, 雨季多集中于 6~9 月(剖面位置见图 1). 两剖面自上而下稳定而连续发育有现代耕作层、全新世黑垆土(S0)、马兰黄土(L1)、离石黄土、午城黄土及下伏的红粘土堆积. 文中仅对灵台和赵家川剖面 L5 以来的黄土—古土壤序列做一详细研究, 两剖面的研究厚度分别为 36 m 和 40 m(注: 赵家川剖面的 S0 几乎全部被人类活动所扰动).

收稿日期: 2001—03—20

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G1999043401); 国家自然科学基金项目(No. 49823001, 49972056).

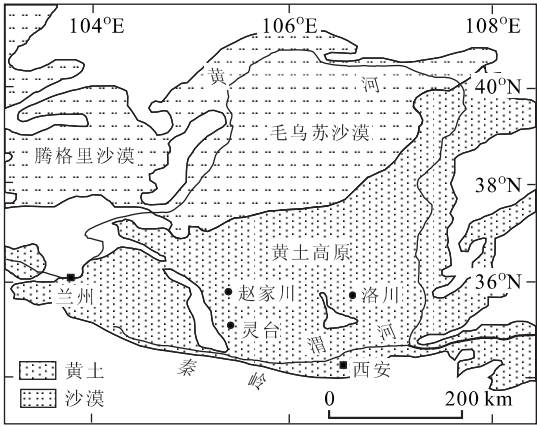


图 1 中国黄土的分布和剖面位置

Fig. 1 Map showing distribution of Chinese loess and locations of three loess-palaeosol profiles

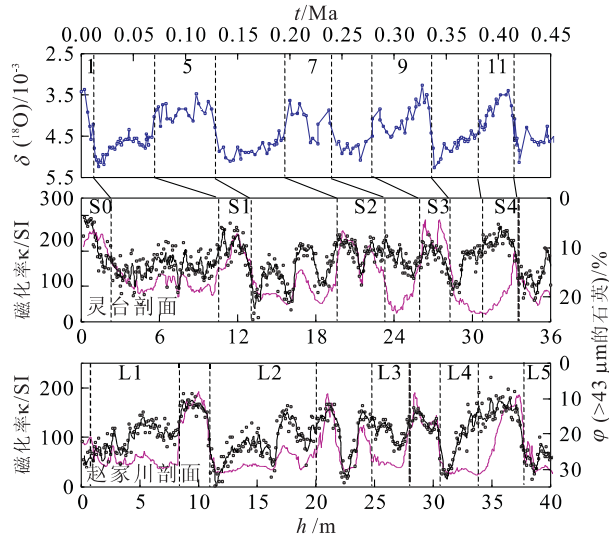


图 2 灵台和赵家川剖面的磁化率、石英粗颗粒体积分  
数随深度变化曲线及其与 ODP677 氧同位素记录  
对比

Fig. 2 Variations of magnetic susceptibility and coarse  
quartz volume fraction against depth and their  
correlation to oxygen isotope record of ODP site  
677

粒度曲线为 3 点滑动平均结果; L1—L5. 黄土层命名; S0—S4.  
古土壤层命名; 1, 5, 7, 9, 11. 深海氧同位素层数

对灵台和赵家川剖面分别以 4 cm 和 5 cm 分辨率进行了粉末样采集, 在室内用英制 Bartington MS2 磁化率仪进行了磁化率测量. 同时对灵台和赵家川剖面分别按 8 cm 和 10 cm 分辨率取风干样品 4 g, 加双氧水和盐酸除去有机质、碳酸盐和铁氧化物, 然后用焦硫酸盐熔融—氟硅酸浸泡法提取了所有样品中的单矿物石英<sup>[12, 13]</sup>. 所有石英颗粒的粒度分析

在英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer S 型激光粒度仪上测量完成, 该仪器的测量范围为 0. 05~880 μm, 测量精度为 0. 15 φ, 相对误差小于 3%. 获得的磁化率和石英粗颗粒体积分随深度变化曲线见图 2.

2 时间标尺的建立

建立较为可靠的时间标尺是研究过去气候变化的前提和关键, 而关于中国黄土发育的时间标尺, 已有多种建立方法, 如磁化率模式<sup>[14]</sup>、轨道调谐法<sup>[15]</sup>、粒度年代模式<sup>[6, 16]</sup>和海陆对比法<sup>[17]</sup>. 建立时间标尺之前首先需要选择可靠的古气候代用指标. 中国黄土的粒度和磁化率被分别视为东亚冬、夏季风变迁的替代性指标由来已久<sup>[18~20]</sup>, 由两者高低值变化反映的冬、夏季风表现为相互消长的演化模式. 由图 2 明显看出, 在很多层位两者的高低变化并非完全对应(如 L4 和 L3 黄土层), 产生这种差异的原因可能是由于不同的代用指标对气候变化的响应存有差异, 但更可能是冬、夏季风演化的驱动机制不尽相同, 即东亚夏季风的演化同北半球高纬夏季的太阳辐射密切相关<sup>[19]</sup>, 而冬季风的变迁则更大程度上同北半球冰量变化关系密切<sup>[21]</sup>. 毫无疑问, 这种古气候代用指标变化的差异不仅会误导冰期—间冰期的划分, 而且影响用不同代用指标建立的时间标尺间的可比性. 相比而言, Heslop 等<sup>[17]</sup>基于轨道调谐和海陆对比相结合的方法, 建立了较为可靠的洛川黄土序列的年代标尺, 但其在古气候代用指标选择上依然没有统一.

图 2 同时显示了灵台和赵家川剖面的黄土—古土壤序列和深海氧同位素阶段的对比<sup>[22]</sup>, 结果表明古土壤层 S4, S3, S2, S1 和 S0 分别对应深海氧同位素阶段 11, 9, 7, 5 和 1, 而指示东亚冬季风强度的石英粗颗粒体积分同指示全球冰量变化的深海氧同位素记录则具有更好的可比性. 因此, 文中以石英粗颗粒质量分数作为冬季风强度的替代性指标, 基于海陆古气候记录在轨道时间尺度上的良好可比性, 选择氧同位素阶段的终止点年龄作为控制点, 对控制点间年龄应用粒度—年代模式线性内插<sup>[6]</sup>, 从而获得了 2 个剖面最近 0. 45 Ma 以来的石英粗颗粒体积分变化的时间序列(图 3).

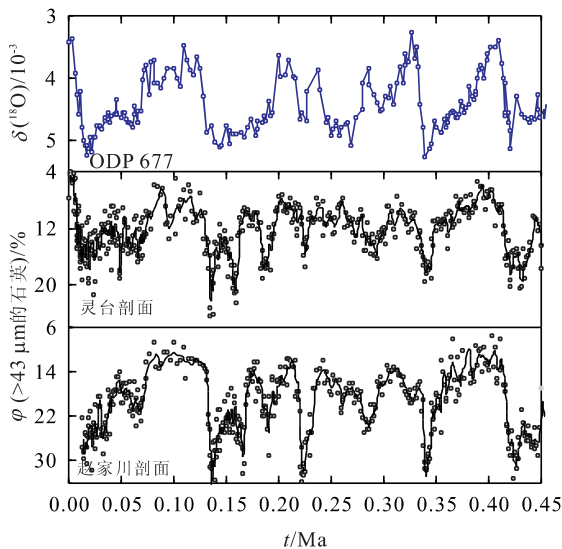


图 3 石英粗颗粒体积分数变化的时间序列与深海氧同位素曲线对比(粒度曲线为 3 点滑动平均结果)

Fig. 3 Time series of coarse quartz volume fraction and its comparison with marine  $\delta(^{18}\text{O})$  curve

### 3 石英粗颗粒体积分数记录的东亚冬季风的快速变化

石英的粗颗粒体积分数变化, 由于排除了后期成壤改造作用的影响而被视为更可信的冬季风强度代用指标, 尤其是在反映冬季风的快速变化上要较全样的粒度结果敏感<sup>[12,13]</sup>, 下面据此探讨最后 4 个冰期旋回的石英粗颗粒体积分数变化反映的东亚冬季风的快速变化. 图 4 显示了末次冰期的石英粗颗

粒体积分数和洛川剖面的石英中值粒径变化<sup>[12]</sup>, 发现 3 个剖面石英的粒度结果均明确地揭示了冬季风强度的多次快速增加, 良好地对应于北大西洋 V23—81 孔 *N. Pachyderma* (s.) 含量记录的表面水变凉事件<sup>[23]</sup>和 GISP II 冰心氧同位素记录的格陵兰地区的降温事件<sup>[24]</sup>. 考虑到黄土高原的古气候记录的区域性及时间标尺的不一致性, 暂不讨论北大西洋和格陵兰地区的降温事件和东亚冬季风多次快速加强的相位关系, 但灵台和赵家川剖面的石英粗颗粒体积分数值高值记录的东亚冬季风强度存有的高频变率特征, 确证了末次冰期东亚冬季风不稳定性的存在<sup>[6]</sup>.

图 5 给出了 0.13~0.45 Ma 时段石英粗颗粒体积分数和磁化率分别记录的冬、夏季风变化, 石英粗颗粒体积分数的高值记录了东亚冬季风在约 0.43, 0.34, 0.29, 0.22, 0.19, 0.16 和 0.14 Ma 存有 7 次显著加强. 在氧同位素阶段 6, 石英粗颗粒体积分数则记录了 2 个明显的间冰阶气候状况, 伴以 3 次冬季风的快速增加(时段分别距今为约 190~176 ka, 161~154 ka, 137~132 ka), 类似的冰阶—间冰阶波动在深海记录中并不明确(图 3). 对比最后两个冰期石英粗颗粒体积分数的变化可以看出, 倒数第二次冰期的冬季风强度明显受控于轨道要素的岁差周期, 更高频次的冬季风变化仅叠加在岁差周之上, 但变化幅度没有超过冰期—间冰期幅度的一半, 而末次冰期的石英粗颗粒体积分数变化的变化幅度大多超过了冰期—间冰期幅度的一半, 表现出明显的大幅度快速变化特征. 在氧同位素阶段 8, 石英粗颗粒体积分数同样表现出明显的快速变化, 但其变化的

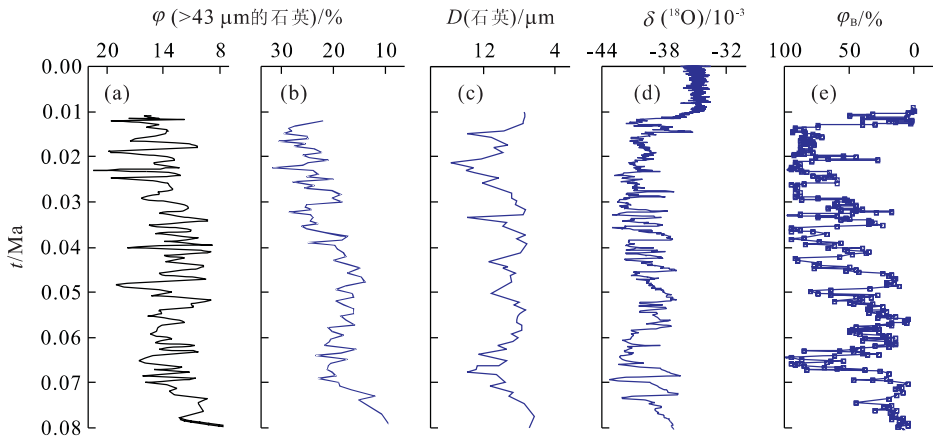


图 4 末次冰期石英粗颗粒体积分数记录的冬季风不稳定性及其与北大西洋和格陵兰冰心的古气候记录对比

Fig. 4 Winter monsoon instability recorded by coarse quartz volume fraction and their correlation with palaeoclimate records from the North Atlantic and Greenland ice core during the last glaciation

$\varphi_B$ . *N. Pachyderma* (s.) 的体积分数. a. 灵台剖面; b. 赵家川剖面; c. 洛川剖面; d. GISP II 冰心; e. 北大西洋 V23—81 孔

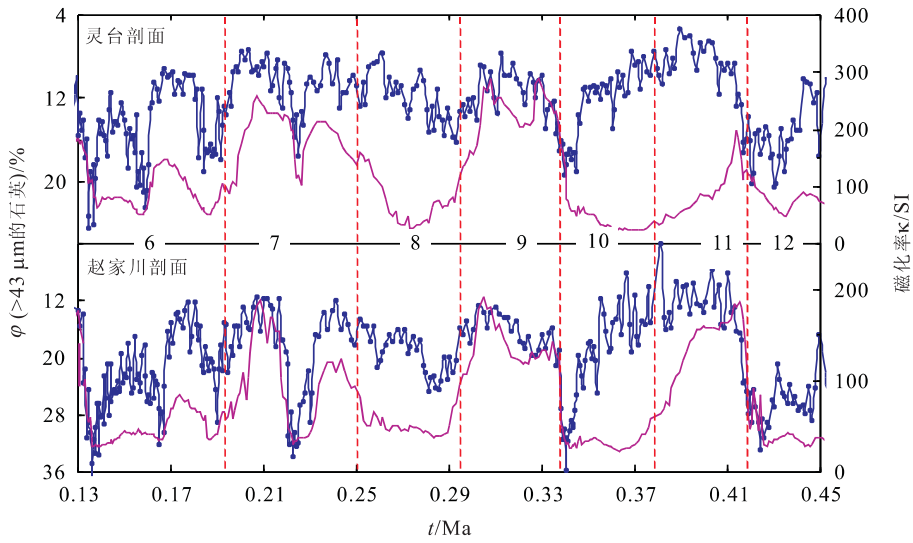


图 5 0.13~0.45 Ma 时段石英粗颗粒体积分数记录的东亚冬季风的变率

Fig. 5 Variability of the East Asian winter monsoon recorded by coarse quartz volume fraction in the interval of 0.13–0.45 Ma

趋势同磁化率记录存有较大差异,即该时段的低磁化率记录和石英粗颗粒体积分数低值记录了东亚夏季风和冬季风的同时减弱.同样的现象也存在于氧同位素阶段 10,由磁化率反映的夏季风强度减弱远早于石英粗颗粒体积分数变化指示的冬季风强度增加.上述石英粗颗粒体积分数记录的东亚冬季风强度在由冰期向间冰期过渡时,表现为快速减弱并同夏季风的突然增强相一致;但当由间冰期向冰期转换时,石英粗颗粒体积分数的逐渐增加指示了冬季风强度的逐渐增强,同磁化率记录的夏季风快速减弱并不一致(图 5).在最后 4 个冰期时段东亚冬季风具有显著不同的变化幅度和频次,可能意味着对应的冰期下垫面状况和气候系统内部的非线性响应机制并不相同,但其变化趋势同指示全球冰量变化的氧同位素记录基本一致,暗示了全球冰量对东亚冬季风变化的长期驱动.

4 讨论

近十几年,过去全球变化研究的重大发现是:揭示了在第四纪全球气候曾多次发生大幅度的变化,表现为在晚新生代总体变冷的背景下,全球气候在不同时间尺度上存有不同的变化周期和变化方式<sup>[25]</sup>.随着全球气候变化研究的不断深入,人们认识到这种包含着气候突变事件的气候环境系统的不稳定性,可能会对人类生存环境带来灾难性的影响,相应要求寻找高分辨率的古环境记录成为解决这些

问题的关键<sup>[2]</sup>.相比之下,中国北方的风尘堆积序列作为完整连续的陆相古气候记录,表现出不可替代的优势<sup>[5]</sup>.本文报道的石英粗颗粒体积分数变化,揭示出最后 4 个冰期旋回东亚冬季风存有的快速变化特征,但在每一个冰期时段石英粗颗粒体积分数的变化幅度和频率存有较大差异.因而,查明这种气候快速变化的规律和机制,仍是过去全球气候变化研究的关键.

关于中国黄土的研究,一个值得注意的问题是黄土记录的古气候变化信息的全球性和区域性问题<sup>[26]</sup>.由石英粗颗粒体积分数反映的东亚冬季风变化的时间序列,同深海氧同位素记录在冰期—间冰期时间尺度上具有良好的可比性,无疑证明了中国黄土沉积蕴涵了过去全球气候变化的信号.然而,石英粗颗粒含量变化曲线同氧同位素记录在某些时段又存有显著差异,如氧同位素阶段 8 的石英粗颗粒含量不仅同深海氧同位素记录变化不匹配(图 3),而且同磁化率所反映的夏季风变化也不同步(图 5).过去的研究过多地关注了黄土记录的全球性意义,而忽略了这种由不同代用指标反映的古气候变化的差异.深入研究不同的古气候代用指标反映的古气候变化信息间的可比性,无疑会有助于我们理解黄土记录中所包含的全球性和区域性的气候变化信息.

参考文献:

[1] 张志强,孙成权. 全球变化研究十年新进展[J]. 科学通

- 报, 1999, 44(5): 467—477.
- Zhang Z Q, Sun C Q. Latest progresses of PAGES in the last 10 years [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(5): 467—477.
- [2] 汪品先, 翦知湣. 寻求高分辨率的古环境记录[J]. 第四纪研究, 1999, 19(1): 1—17.
- Wang P X, Jian Z M. Searching high-resolution paleo-environmental records: a review [J]. Quaternary Sciences, 1999, 19(1): 1—17.
- [3] 刘东生, 等. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985. 300—392.
- Liu D S, et al. Loess and the environment [M]. Beijing: Science Press, 1985. 300—392.
- [4] An Z S, Wang S M, Wu X H, et al. Eolian evidence from the Chinese loess plateau: the onset of the Late Cenozoic great glaciation in the northern hemisphere and Qinghai-Xizang plateau uplift forcing [J]. Science in China (Series D), 1999, 42 (3): 258—271.
- [5] An Z S. The history and variability of the East Asian palaeomonsoon climate [J]. Quaternary Science Reviews, 2000, 19: 171—187.
- [6] Porter S C, An Z S. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation [J]. Nature, 1995, 375: 305—308.
- [7] An Z S, Porter S C. Millennial-scale climatic oscillations during the last interglaciation in Central China [J]. Geology, 1997, 25(7): 603—606.
- [8] Guo Z T, Liu D S, Guiot J, et al. High frequency pulses of East Asian monsoon climate in the last two glaciations: link with the North Atlantic [J]. Climate Dynamics, 1996, 12: 701—709.
- [9] Chen F H, Bloemendal J, Wang J M, et al. High-resolution multi-proxy climate records from Chinese loess: evidence for rapid climatic changes over the last 75 kyr [J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 1997, 130: 323—335.
- [10] Lu H Y, Huissteden K V, An Z S, et al. East Asia winter monsoon variations on a millennial time-scale before the last glacial-interglacial cycle [J]. Journal of Quaternary Science, 1999, 14(2): 101—110.
- [11] Ding Z L, Ren J Z, Yang S L, et al. Climate instability during the penultimate glaciation: evidence from two high-resolution loess records in China [J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104 (B9): 20123 — 20132.
- [12] Xiao J L, Porter S C, An Z S, et al. Grain size of quartz as an indicator of winter monsoon strength on the Chinese loess plateau of central China during the last 130,000 yr [J]. Quaternary Research, 1995, 43: 22—29.
- [13] Sun Y B, Lu H Y, An Z S. Grain size distribution of quartz isolated from Chinese loess/paleosol [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(24): 2296—2298.
- [14] Kukla G, Heller F, Liu X M, et al. Pleistocene climate in China dated by magnetic susceptibility [J]. Geology, 1988, 16: 811—814.
- [15] Ding Z L, Yu Z W, Rutter N W, et al. Towards an orbital time scale for Chinese loess deposits [J]. Quaternary Science Reviews, 1994, 13: 39—70.
- [16] Vandenberghe J, An Z S, Nugteren G, et al. New absolute time scale for the Quaternary climate in the Chinese loess region by grain-size analysis [J]. Geology, 1997, 25(1): 35—38.
- [17] Heslop D, Langereis C G, Dekkers M J. A new astronomical timescale for the loess deposits of northern China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 184: 125—139.
- [18] An Z S, Liu D S, Lu Y C, et al. The long-term paleomonsoon variation recorded by the loess-paleosol sequence in central China [J]. Quaternary International, 1990, 7/8: 91—95.
- [19] An Z S, Kukla G J, Porter S C, et al. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the loess plateau of central China during the last 130 000 years [J]. Quaternary Research, 1991, 36: 29—36.
- [20] An Z S, Kukla G, Porter S C, et al. Late Quaternary dust flow on the Chinese loess plateau [J]. Catena, 1991, 18: 125—132.
- [21] Ding Z L, Liu D S, Rutter N W, et al. Ice-volume forcing of East Asian winter monsoon variations in the past 800 000 years [J]. Quaternary Research, 1995, 44: 149—159.
- [22] Shackleton N J, Berger A, Peltier W R. An alternative astronomical calibration of the lower Pleistocene timescale based on ODP site 677 [J]. Transactions of the Royal Society of Edinbergh: Earth Sciences, 1990, 81: 251—261.
- [23] Bond G, Broecker W S, Johnson S, et al. Correlation between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice [J]. Nature, 1993, 365: 143—147.
- [24] Grootes P M, Stuiver M, White J N C, et al. Comparison of oxygen isotope temperature records from GISP2 and GRIP Greenland ice cores [J]. Nature, 1993, 366: 552—554.

[25] 刘东生. 第四纪环境[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 19—72.  
Liu D S. Quaternary environment [M]. Beijing: Science Press, 1997. 19—72.

2001, 21(4): 377—378.  
Liu D S. Some problems on the Quaternary research in China [J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(4): 377—378.

[26] 刘东生. 中国第四纪研究的若干问题[J]. 第四纪研究,

Variation of the East Asian Winter Monsoon Recorded by Chinese Loess during the Last Four Glacial-Interglacial Cycles

Sun Youbin<sup>1,2</sup>, An Zhisheng<sup>1</sup>

(1. Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China; 2. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** Study on the high-resolution loess record from the Chinese loess plateau is the main approach to reveal the past climatic change and variability. The undisturbed and continuous accumulation of the loess deposits has provided an opportunity to develop complete and high-resolution records of terrestrial climate changes over multiple glacial-interglacial cycles during the past 7 million years. In the present paper, Lingtai and Zhaojiachuan profiles from the central loess plateau were studied down to loess unit L5, formed during the last four glacial-interglacial cycles. Quartz grains were extracted by chemical methods for grain size analysis, and the grain size data indicate that coarse quartz volume fraction could be considered as the reliable proxy of the East Asian winter monsoon. Changes in the content of coarse quartz volume fraction have documented the high-frequency variability of winter monsoon during the last four glacial-interglacial cycles and can be well correlated to the marine  $\delta(^{18}\text{O})$  record, whereas the content of the coarse quartz volume fraction variation shows a different variability during every glacial period that may indicate the various underlying conditions and non-linear responses during the last four glaciations. It is worthwhile to note that in some cases the variation of coarse quartz volume fraction exhibits a disagreement with both magnetic susceptibility variation and the marine oxygen isotope curves. Such disparity of the past climate changes revealed by different proxy records is very important for understanding the global significance of Chinese loess and thus requires further investigation.

**Key words:** East Asian winter monsoon; variation; last four glacial-interglacial cycles; Chinese loess.