

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

洛川黄土记录的最近2500 ka 东亚 冬夏季风变化周期

鹿化煜 安芷生

(中国科学院黄土与第四纪地质国家重点实验室,西安,710054)

刘洪滨

杨文峰

(中国科学院地理研究所,北京,100101) (陕西省气象局,西安,710015)

张福青

(北卡罗来纳州立大学海洋、地球和大气科学系,NC27695-8208,美国)

内容提要 对厚约140 m的陕西洛川坡头村黄土剖面进行间距3~10 cm的系统采样,测量了全部样品的磁化率和粒度。选择 $>30 \mu\text{m}$ 颗粒百分含量和磁化率分别作为东亚冬、夏季风强度变化的替代性指标,以新建立的时间标尺为基础,分析了最近2500 ka以来东亚季风变化的周期特征。结果表明,第四纪东亚冬、夏季风变化时间序列包含有100 ka、41 ka和23 ka地球运动轨道要素变化的周期,同时包含有约80 ka、56 ka和30 ka的周期。季风变化周期表现为阶段性演化和在同一阶段冬、夏季风变化周期常常不同的特征。这些结果说明第四纪东亚季风变化既与地球轨道要素变化有关,也与季风系统内其它因素变化有关。

关键词 洛川黄土 东亚冬夏季风 最近2500 ka

中国黄土堆积记录了第四纪东亚季风变迁历史^[1],对黄土-古土壤序列记录的古气候演化分析表明,周期性地球运动轨道要素变化引起的地球表面接受太阳辐射量变化在黄土记录中留下了它们的印迹^[2~9]。但是,以前的研究结果之间存在一定的分歧,可能是因为各研究者所选用的古气候代用指标、时间标尺以及使用的谱分析方法存在不确定性,而正是这3个因素对黄土记录的万年尺度古气候演化周期有重要的影响。为了进一步认识第四纪东亚季风变化规律和为检验古气候的米兰柯维奇理论在大陆内部古气候演化中的适用性,笔者对经典的洛川坡头黄土剖面进行了较高分辨率和较深入的研究,取得了一些新的认识。

1 古季风代用指标的选择

对厚约140 m的洛川坡头村第四纪黄土剖面分别进行了两组采样和测试,一组以古土壤层3 cm、黄土层5 cm的间距采样,共获得样品3560个,全部样品在中国科学院黄土与第四纪地质国家重点实验室进行了磁化率测量;另一组以古土壤层5 cm、黄土层10 cm的间距采样,共获得样品1680个,全部样品在荷兰自由大学沉积实验室进行了粒度测量。众多的研究已经证明,黄土高原中部黄土磁化率可视为东亚夏季风强度一个较好的替代性指标^[10],虽然其机

注:本文为国家自然科学基金(编号49672140)、中国科学院“九五”重大项目基金和荷兰皇家科学院科学基金资助项目。
本文1997年1月收到,1998年2月改回,周健编辑。

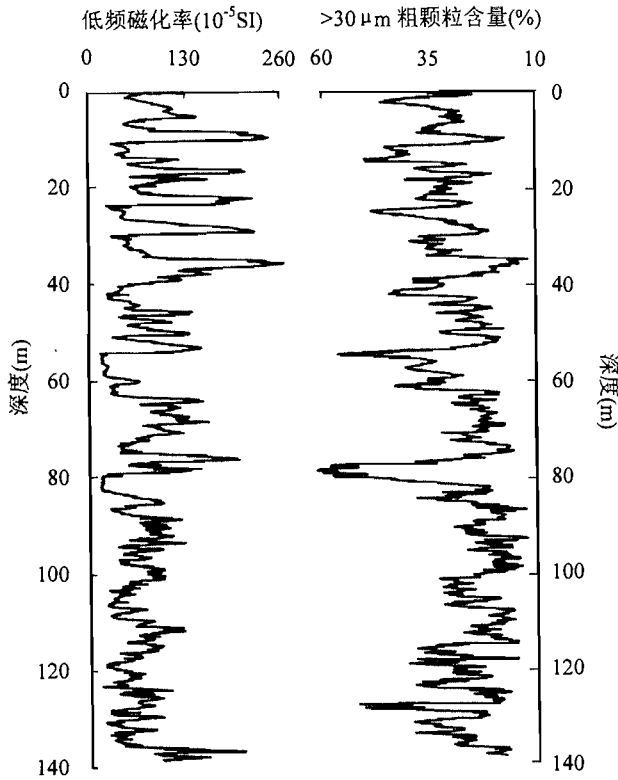


图1 洛川黄土序列磁化率和 $>30 \mu\text{m}$ 颗粒含量随深度的变化
 Fig.1 Magnetic susceptibility and $>30 \mu\text{m}$ grain size fraction variations with depth of the loess-paleosol sequence in Luochuan on the central Chinese loess plateau

制问题还有待进一步研究^[11]。黄土序列的粒度粗细变化反映东亚冬季风强度的变化,它可作为冬季风强度变化的直接替代性指标,但是,在粒度指标的选择上还存在着分歧。最近对洛川 S_2 古土壤层以上地层粒度变化深入研究发现, $>30 \mu\text{m}$ 的颗粒含量变化是较好的冬季风强度变化替代性指标^[12]。因此,笔者选择黄土磁化率作为夏季风变化的替代指标, $>30 \mu\text{m}$ 粗颗粒含量作为冬季风变化的替代指标(图1)。

2 时间标尺的建立

利用多种绝对测年方法以及古地磁极性倒转点定年方法已经建立了洛川黄土-古土壤序列的时间框架^[13],但是,已进行的¹⁴C和热释光(TL)测年只能测量相对年轻的黄土地层($<200 \text{ ka}$),古地磁极性定年也只能给出年龄控制点,这些方法不能给出较精确的黄土地层时间标尺。最近,根据黄土堆积及其记录的古气候演化的特点,利用沉积速率-粒度关系进行外推^[14]、内插^[15]和轨道调谐^[16]、与深海沉积物 $\delta^{18}\text{O}$ 时间序列对比^①等4种方法,

综合建立了一个新的洛川黄土序列的时间标尺^①。该时间标尺是对以上4种方法建立的4个时间标尺进行平均的结果,减少了每种方法的系统误差,可能更接近真实值。本文的时间序列周期分析以此时间标尺为基础(图2)。

3 周期分析方法与结果

考虑到数据样本序列长度较长,选用了连续功率谱分析的方法,该方法的优点是可以进行置信度检验,亦即对分析的周期作显著性检验,以区别于气候噪声。具体的计算步骤见文献^[17]。东亚冬、夏季风是季风环流系统中两个重要的因子,对它们分别进行周期分析可以更深入地认识东亚季风变化规律。同时,最近2500 ka以来东亚季风气候分别在约600 ka B P和1200 ka B P发生了重要的转型变化^{[1]①},因而对不同时段的古气候演化时间序列分别进行周期分析。由图3可以看出,轨道要素的100 ka、41 ka和23 ka的运动变化周期均在黄土记录有所

① 鹿化煜. 黄土记录的最近 2500 ka 东亚冬夏季风气候变化. 南京大学博士论文. 1996.

反映,值得注意的是,黄土序列中还记录了显著的其它周期。

4 讨论

第四纪古气候万年尺度变化的米兰柯维奇理论经过众多的研究工作已经得到基本证实^[18,19],但是,不同地质记录对轨道要素变化引起太阳辐射变化诱导的冰期、间冰期旋回的响应以及100 ka周期的起因等问题还存在分歧^[20,21],因而,天文气候学一直是第四纪古气候研究的一个焦点。地球轨道运动要素变化存在95~136 ka(偏心率E的变化周期)、41 ka(黄赤交角T的变化周期)和19~23 ka(岁差P的变化周期)的一级周期,同时存在64 ka、56 ka、30 ka以及17 ka等次一级的周期。指示地球表面冰量变化的深海有孔虫氧同位素变化时间序列良好地记录了轨道要素变化一级周期,但在不同的区域有不同的形式。第四纪东亚季风变化既受到全球古气候变化的影响又有自己区域性特征。对最近2500 ka以来指示东亚冬、夏季风变化的黄土 $>30\ \mu\text{m}$ 粗颗粒含量和磁化率时间序列的谱分析表明,中国黄土堆积记录了地球轨道要素变化的周期特征(图3)。不仅100 ka、41 ka和23 ka(或19 ka)的一级变化周期较为显著,它们通过了95%的信度的检验。更有意义的是黄土记录中还检出80 ka、56 ka和30 ka等变化周期,它们也通过了95%信度的检验,并且在某一时段的显著性超过了一级周期。对这种现象可能的解释是:①在某一时段内地球轨道要素变化诱导的太阳辐射量变化,不是东亚季风变迁的主导因素,东亚季风系统边界条件起着重要的调节作用,太阳辐射量变化周期与其它因子变化周期叠加。②这种变化周期与地球轨道要素的变化无关,它可能是季风系统的非线性反馈作用的结果。研究已经证明,由于大气、海洋、冰川、陆地等的非线性反馈作用,第四纪冰期气候存在着多周期的特征^[22]。可以设想,第四纪东亚季风气候变化的80 ka、56 ka和30 ka周期是这种相互作用的结果。③由于时间标尺的不确定性,使一些周期特征失真和变化。

另外,冬季风和夏季风时间序列具有不同的周期特征:在0~2500 ka B P,冬、夏季风气候均有显著的约100 ka变化周期,但夏季风变化的41 ka周期显著而冬季风不显著。在0~600 ka B P,冬季风变化具有约100 ka和23 ka的主导周期;夏季风变化除了具有100 ka和41 ka的周

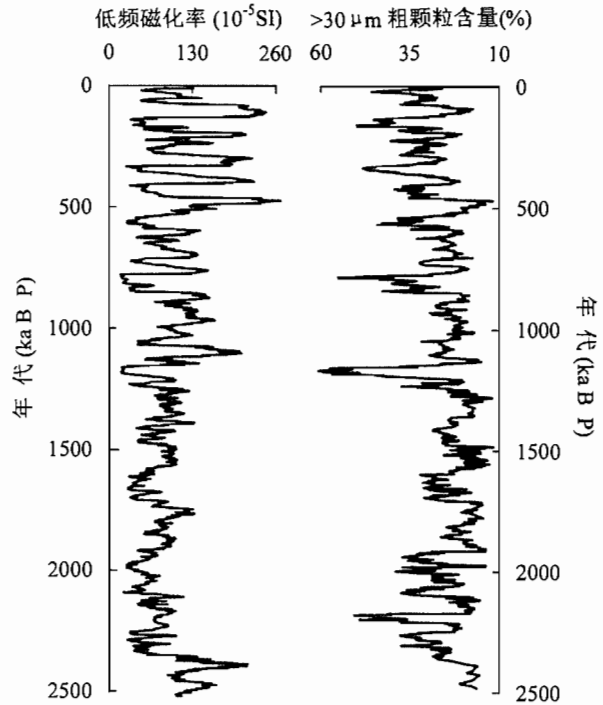


图2 洛川黄土序列磁化率和 $>30\ \mu\text{m}$ 颗粒含量随新的时间标尺变化

Fig. 2 Magnetic susceptibility and $>30\ \mu\text{m}$ grain size fraction variations of the loess-palaeosol sequence in Luochuan as a function of the new time scale

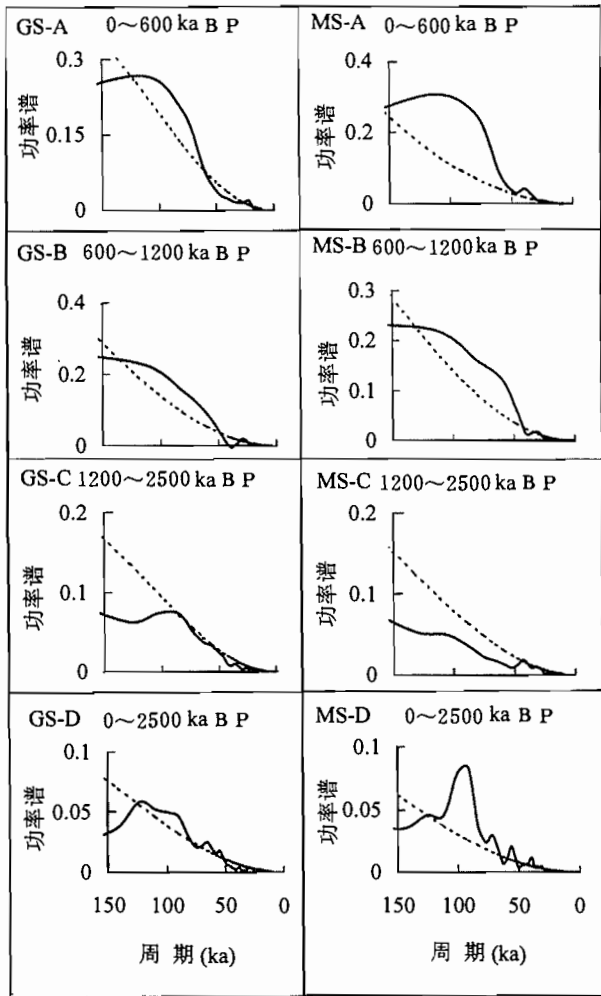


图3 最近2500 ka 东亚冬夏季风变化时间序列周期分析结果

Fig. 3 Spectral analysis of East Asian winter and summer monsoon time series during the past 2500 ka
 左边为不同阶段粒度时间序列变化周期,右边为不同阶段磁化率时间序列变化周期,虚线是0.95信度水平线

The left are the spectral results of grain size variations, the right are the results of magnetic susceptibility changes, the dashed lines are 0.95 confidence level

系统内部因子共同作用的结果。

(2)第四纪东亚冬季风和夏季风万年尺度的变化周期在不同的时间段不是完全相同的,证明了冬季风和夏季风相互关系的复杂性。

(3)不同阶段东亚季风万年尺度变化周期的演化说明东亚季风变化既与地球轨道要素变化相关,也与下垫面条件演化相关。

期外,还有30 ka 的变化周期。在600~1200 ka B P,冬、夏季风均具有约100 ka 和30 ka 显著的变化周期。在1200~2500 ka B P,夏季风气候变化的41 ka 和30 ka 周期显著,冬季风气候变化约100 ka 和21 ka 周期显著。这种变化周期的不同步性表明了东亚冬、夏季风变化特征是不同的。同时,东亚冬、夏季风在不同的时段周期特征也是不同的。由于至少最近2500 ka 以来地球轨道要素变化周期稳定变化^[23],因此,东亚冬、夏季风变化周期的阶段性转变可能反映了下垫面条件的变化。

洛川黄土堆积记录的最近2500 ka 东亚季风变化的周期特征反映了第四纪东亚季风演化的复杂性。不同时间段内变化周期的演化以及冬季风和夏季风变化周期的不同步性不仅与古季风变化的控制因素有关,与古季风变化代用指标的选择、时间标尺的建立也有关。本文尝试对第四纪东亚冬、夏季风的周期特征分别进行研究,许多方面值得进一步探讨。

5 结论

(1)最近2500 ka 指示东亚冬、夏季风变化的洛川黄土序列 $>30 \mu\text{m}$ 粗颗粒含量和黄土磁化率变化的时间序列均存在100 ka、41 ka 和23 ka 变化周期,反映了地球轨道要素变化引起的地球接受太阳辐射量变化对东亚季风变迁的影响。80 ka、56 ka 和30 ka 的变化周期可能是轨道要素和季风系

孙东怀副研究员、J. Vandenberghe 教授、G. Nugteren 博士和 M. Konert 先生给予野外和实验工作中以帮助,谨此致谢!

参 考 文 献

- 1 An Z S, Liu T S, Lu Y C, Porter S C, Kukla G, Wu X H, Hua Y M. The long-term palaeomonsoon variation recorded by the Chinese loess-paleosol sequence in central China. *Quaternary International*, 1990, 7/8:91~98.
- 2 卢演传. 黄土层中 CaCO_3 含量变化与更新世气候旋回. *地质科学*, 1981, (4):122~131.
- 3 刘友梅, 文启忠, 杨蔚华. 黄土元素组分演化的阶段性、周期性和古气候演化. *地球化学*, 1984, (4):381~388.
- 4 Kukla G, An Z S, Melice J L, Garin J, Xiao J L. Magnetic susceptibility record of Chinese loess. *Transaction of Royal Society of Edingburgh: Earth Sciences*. 1990, 81:263~288.
- 5 华英敏, 吴守贤, 安芷生, Kukla G, 肖举乐. 第四纪沉积序列的频谱分析. 黄土、第四纪地质、全球变化, 第二集. 北京: 科学出版社, 1990. 134~142页.
- 6 余志伟, 丁仲礼, 刘东生. 黄土记录的古气候周期性研究. *地质科学*, 1992, 增刊:270~278.
- 7 Xu T C, Liu T S. Implication of the magnetic susceptibility curve from the Chinese loess profile at Xifeng. *Quaternary Science Reviews*, 1993, 12:249~254.
- 8 Ding Z L, Yu Z W, Rutter N W, Liu T S. Towards an orbital time scale for the Chinese loess deposits. *Quaternary Science Reviews*, 1994, 13:39~70.
- 9 陈发虎, 郗秀书, 张宇田, 曹继秀. 兰州黄土记录与万年尺度气候变化周期. *科学通报*, 1992, 37(24):2263~2265.
- 10 An Z S, Kukla G, Porter S C, Xiao J L. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the loess plateau of central China during the last 130,000 years. *Quaternary Research*, 1991, 36:29~36.
- 11 Heller F, Evans M E. Loess magnetism. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33(2):211~240.
- 12 鹿化煜, 安芷生. 洛川黄土粒度组成的古气候意义. *科学通报*, 1997, 42(1):66~69.
- 13 刘东生等. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985.
- 14 Vandenberghe J, An Z S, Nugteren G, Lu H Y, Huissteden K V. New absolute time scale for the Quaternary climate in the Chinese loess region by grain size analysis. *Geology*, 1997, 25(1): 35~38.
- 15 鹿化煜, 安芷生, Vandenberghe J, Nugteren G, Mingaars N, Schwan J. 洛川黄土层定年的一个模式及其初步应用. *沉积学报*, 1997, 15(3):150~152.
- 16 鹿化煜, 安芷生, 杨文峰. 洛川黄土序列时间标尺的初步建立. *高校地质学报*, 1997, 2(2):230~236.
- 17 黄嘉佑. 气象统计分析方法与预报方法. 北京: 气象出版社, 1990. 301~333页.
- 18 Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J. Variation in the Earth's orbit: Pacemaker of the ice ages. *Science*, 1976, 194:1121~1132.
- 19 Imbrie J, Hays J D, Martinson D G. The orbital theory of pleistocene climate: Support from a revised chronology of the marine $\delta^{18}\text{O}$ record. In: Berger A, Imbrie J, Hays J, Kukla G, Saltzman B, eds. *Milancovitch and climate (part 1)*. Reidel, Dordrecht, 1984. 269~305.
- 20 Imbrie J, Berger A, Boyle E A, Clemens S C, Duffy A, Howard W R, Kukla G, Kutzbach J, Martinson D G, McIntyre A, Mix A C, Molfino B, Morley J J, Perterson C C, Pisias N G, Prell W G, Raymo M E, Shackleton N J, Toggweiler J R. On the structure and origin of major glaciation cycles, 2. The 100,000-year cycle. *Paleoceanography*, 1993, 8:699~735.
- 21 Moore T C, Pisias N G, Duun D A. Carbonate time series of the Quaternary and late Miocene sediment in the Pacific ocean: A spectral comparison. *Marine Geology*, 1982, 46:217~233.
- 22 Yiou P, Ghil M, Jousel J, Raillard D, Vautard R. Nonlinear variability of the climatic system from singular and power spectral of late Quaternary records. *Climatic Dynamic*, 1994, 9:371~389.
- 23 Berger A, Loutre M A. Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quaternary Science Reviews*, 1991, 10:297~317.

作 者 简 介

鹿化煜,男,1968年生。1996年7月在南京大学大地海洋科学系获理学博士学位。现任中国科学院黄土与第四纪地质国家重点实验室助理研究员,从事第四纪环境演化的研究工作。通讯地址:710054,西安市西影路22-2号,中科院黄土室;E-mail: luhy@loess.llqg.ac.cn。

Periodicity of East Asian Winter and Summer Monsoon Variation during the Past 2500 ka Recorded by Loess Deposits at Luochuan on the Central Chinese Loess Plateau

Lu Huayu, An Zhisheng

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

Liu Hongbin

(Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, China)

Yang Wenfeng

(Institute of Meteorological Sciences, Meteorological Administration of Shaanxi Province, Xi'an, Shaanxi 710015, China)

Zhang Fuqing

(Department of Marine, Earth and Atmospheric Sciences, North Carolina State University, NC 27695-8208, USA)

Abstract

The typical loess profile at Potou on the central Chinese loess plateau was sampled at 3~10 cm intervals. All samples were measured for magnetic susceptibility and grain size. The magnetic susceptibility and percentage of the $>30 \mu\text{m}$ grain size fraction were used as indicators of summer and winter monsoon strengths respectively, and on the basis of a new reliable time scale, a time series of paleomonsoonal climate variation in East Asia was set up. Spectral analysis for the new time series presents the 100 ka, 41 ka and 23 ka cycles of variations of the orbital elements of the Earth movement. Meanwhile, other cycles such as 80 ka, 56 ka and 30 ka were also recorded in the loess-paleosol sequences unambiguously. The cycles of paleomonsoonal variations during the Quaternary evolved with time, and those of winter and summer monsoons were different in some stages. The variations of the orbital elements of the Earth were not the only dominant factor which triggered cycles of the East Asian monsoonal changes during the Pleistocene, and other factors within the monsoonal system were also important. In addition, the cycles of summer and winter monsoon variations during the past 2500 ka and relationships between them are multimodel.

Key words: loess deposit on the central Chinese loess plateau; East Asian summer and winter monsoons; the last 2500 ka

本刊编辑部启事

①本刊将在《书刊介绍》专栏中精选优秀地质类新书作扼要介绍,以促进地质专业新书的传播。欢迎著(编)者提供新书样本。也热忱欢迎作者提供《书刊评介》专栏的文稿。②本刊将在《通讯·资料》专栏中以最快速度摘要报道重要的项目研究进展和重大发现,欢迎投稿,限1000字以下,文责自负,本刊有权删改。同时热忱欢迎作者提供《消息报道》专栏的短稿。③上述4个专栏稿件不收版面费,也不付稿费。

另:本刊编辑部已上因特网,E-mail 地址为:geoview @public. bta. net. cn,欢迎专家学者通过这一网址投稿或与我编辑部联系。