

黄土高原 260 万年以来东亚夏季风演变信号研究

薛根元^{1,3} 周锁铨¹ 陈 旻² 邴敏捷⁴ 陈红梅⁵ 全利红⁶

1 南京信息工程大学, 南京 210044

2 南京大学表生地球化学研究所成矿作用国家重点实验室, 南京 210009

3 浙江省气象局, 杭州 310002

4 浙江省杭州市气象局, 杭州 310008

5 浙江省绍兴市气象局, 绍兴 312000

6 中国科学院大气物理研究所, 北京 100081

摘 要 在研究黄土高原东亚季风地质时期周期演变中, 引入了用于定量检测周期的奇异谱分析方法, 结合小波分析, 对典型的黄土高原陕西省洛川黄土剖面、甘肃省灵台黄土剖面的磁化率中 2.6 MaB. P. 以来东亚季风的强信号进行了研究。结果表明: 2.6~1.0 MaB. P. 之间地质时期, 除在 1.87~1.37 MaB. P. 之间可能存在一个周期演变不明显的缺失时段外, 东亚季风演变的主导周期是 40 ka, 0.9~0.6 MaB. P. 是 40 ka 周期和 100 ka 周期的调整过渡期。0.6 MaB. P. 以来的主导周期是 100ka。研究还发现, 1.2 MaB. P. 前后没有明显的周期差异, 说明 1.2 MaB. P. 不是一次真正意义上的周期转型事件, 而是周期演变过程中的触发事件, 这一触发事件对 0.9 MaB. P. 以后出现的周期转型事件影响深刻。40 ka 周期从 1.2 MaB. P. 开始衰减, 至 0.9 MaB. P. 时 100 ka 周期逐渐建立。0.6 MaB. P. 开始东亚季风出现冷暖大幅振荡的 100 ka 演变周期, 因而 0.6 MaB. P. 具有气候振荡加剧的突变性质。

关键词 小波分析 奇异谱分析 黄土 磁化率 东亚季风

文章编号 1006-9585 (2007) 01-0063-11 **中图分类号** P532 **文献标识码** A

Significant Spectrum Evolution of the East Asian Summer Monsoon on the Loess Plateau During the Last 2.6 MaB. P.

XUE Gen-Yuan^{1,3}, ZHOU Suo-Quan¹, CHEN Yang², LI Min-Jie⁴,
CHEN Hong-Mei⁵, and QUAN Li-Hong⁶

1 *Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044*

2 *State Key Laboratory of Mineral Deposit Research, Institute of Surficial Geochemistry,
Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093*

3 *Meteorological Bureau of Zhejiang Province, Hangzhou 310002*

4 *Meteorological Bureau of Hangzhou in Zhejiang Province, Hangzhou 310008*

5 *Meteorological Bureau of Shaoxing in Zhejiang Province, Shaoxing 312000*

6 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100081*

Abstract The loess-paleosol sequence in central China is regarded as an excellent continental record of palaeoclimatic and palaeoenvironmental changes during the Late Cenozoic era. The alternation of paleosol and loess units is commonly interpreted as an indication of alternating waxings and wanings of the paleomonsoon in the East Asia,

收稿日期 2005-05-23 收到, 2006-09-16 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2004CB720204 和国家自然科学基金资助项目 40331001

作者简介 薛根元, 男, 1961 年出生, 硕士, 高级工程师, 主要从事天气与气候研究。E-mail: xgy0129@yahoo.com.cn

with the soil-forming periods corresponding to strengthened summer monsoon and loess deposition to strengthened winter monsoon. Previous studies investigated orbital cycles (100, 41, 21 and 19 ka) of the East Asian monsoon variation recorded in the loess-paleosol sequences, however, discrepancies persist about other non-orbital cycles (66, 57, 35 and 31 ka, etc), the time that 100-ka cycle appeared and the interval that 100-ka cycle dominated, due to different proxies used, different time scale models established and different spectral analyses applied.

Wavelet transform and Singular Spectrum Analysis (SSA) are powerful and quantitative methods of spectral analysis for time series, the former can provide flexible localized time-frequency information, and the latter can give estimates of statistical dimension and divide the time series into principle components. In this study, SSA and the wavelet analysis are used to determine the periodicity of the East Asian monsoon evolution on the Chinese loess plateau quantitatively. Magnetic susceptibility (MS), an indicator of the East Asian summer monsoon intensity, is determined in the loess-paleosol sequences over the last 2.6 Ma from the typical loess sections at Luochuan, Shaanxi province, and Lingtai, Gansu province, respectively. The time series of MS are established using the time scale model derived from relationship between Rb-concentration and sedimentation rate. Then the significant evolution cycles of the East Asian summer monsoon are extracted and can be verified within the two sections. The results show that:

(1) There are three stages of the evolution of the East Asian summer monsoon during the past 2.6 MaB. P. 1) 2.5—1.0 MaB. P., 40-ka cycle is dominant except that there may be no significant cycles during the 1.87—1.37 MaB. P. interval, reflecting orbital forcing on the summer monsoon variation; 2) 0.9—0.6 MaB. P., a transition period from 40-ka cycle to 100-ka cycle; 3) 0.6—0 MaB. P., 100-ka cycle is dominant, indicating possible influence from low-latitude oceans on the summer monsoon evolution through the adjustment from global carbon cycle or atmospheric CO₂ content.

(2) There is no obvious change of cycles around 1.2 MaB. P. It indicates that 1.2 MaB. P. is not a real transition time of climatic cycles, but a trigger time for the evolution of cycles in the summer monsoon. This trigger event may be driven by the Kulun-Yellow River movement occurring in 1.2 MaB. P. and affect greatly on the cycle transition between 0.9—0.6 MaB. P.

(3) Both wavelet analysis and SSA give the consistent results that 40-ka cycle begins to weaken from 1.2 MaB. P. and breaks down from 0.9 MaB. P. while 100-ka cycle has gradually generated since 0.9 MaB. P. The East Asian summer monsoon begins to evolve into greatly warm/cool fluctuations dominated by 100-ka cycle since 0.6 MaB. P. Therefore, 0.6 MaB. P. is the time that the summer monsoon climate has abrupt changes with large amplitude of fluctuations.

Key words wavelet analysis, singular spectrum analysis, loess plateau, magnetic susceptibility, evolution cycles of the East Asian summer monsoon

1 引言

气候变化使不同时期沉积的粉尘经历不同程度的风化成壤作用,在黄土高原形成了黄土-古土壤序列^[1]。连续的风尘沉积记录了古气候与古环境变化信息^[2,3],其中黄土代表了偏北冬季风优盛期粉尘堆积,与其相间的古土壤则形成于夏季风占优势、粉尘输入量相对减少时期,故黄土高原黄土-古土壤序列较完整记录了东亚古季风的变迁史^[2,4]。黄土-古土壤序列研究中,已建立若干古气候替代性指标,如磁化率^[3]、粒度^[5]、Rb/Sr值^[6,7]、白度^[8]、游离铁/全铁比值^[9]等,这些不同程度反映了地质时期东亚季风气候的演变^[10]。

研究表明,东亚季风变迁与地质时期中国的环境演化有密切联系。古季风变迁是控制东亚环境演化的直接驱动力^[11],与黄土相间的古土壤与携带水分的偏南夏季风密切相关。但现有的研究表明,对于黄土高原第四纪地质时期东亚季风的周期演变,不同的资料和研究方法常得出不同的研究结果,如在黄土-古土壤序列中检测到的周期成分存在差异,既有400、100、41、21和19 ka等地球轨道周期成分,也有200、66、57、35、31和27 ka等非轨道周期成分^[9,12,13],甚至还有半岁差(约10~14 ka)周期成分存在^[14]。而对于100 ka周期的出现及占主导时段研究结果也很不一致,如Ding等^[15]认为

100 ka 从 0.8 MaB. P. 开始出现并成为主导周期；李力和安芷生^[12]发现 100 ka 周期在 3.1、1.2 和 0.65 MaB. P. 阶段性地出现并增强；Lu 等^[13]认为 2.6 MaB. P. 以来 100 ka 周期一直存在，且在 1.3 MaB. P. 逐渐增强并成为主导周期。

上述分歧主要由于研究时选取的气候代用指标、建立时间标尺的模式以及采用的频谱分析方法的不同而产生^[16]。本文采用小波分析和奇异谱分析方法相结合，选取黄土高原洛川和灵台黄土-古土壤剖面的磁化率作为气候代用指标并相互印证，试图定量研究 2.6 MaB. P. 以来东亚夏季风气候的周期演变特点。

2 代用指标时间序列的建立

本文选取经典的陕西省洛川黄土-古土壤剖面 (35°45'N, 109°25'E) 和甘肃省灵台黄土-古土壤剖面 (35°4'N, 107°33'E) 作为分析对象，其中洛川剖面总厚约 137 m，灵台剖面第四纪黄土厚约 175 m。采样从黑垆土底部 (S₀) 开始，向下连续采至上新世红粘土顶部，采样间距 20 cm。在洛川和灵台分别采集样品 681 块和 872 块。磁性地层及磁化率测量均在中国科学院西安黄土与第四纪地质国家重点实验室完成，见图 1。

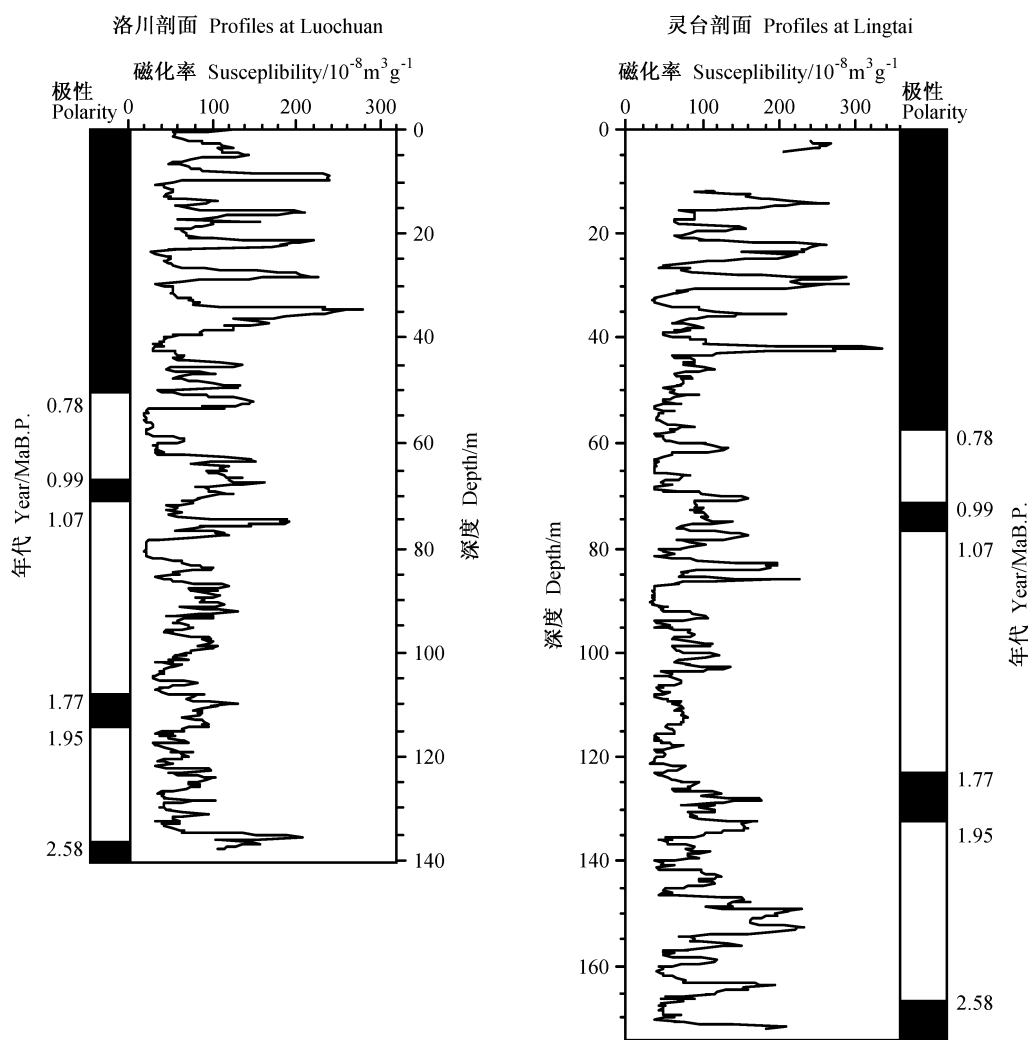


图1 洛川剖面和灵台剖面磁性地层和磁化率记录 (其中洛川磁性地层与磁化率数据来自 Lu 等^[17]；灵台磁性地层与磁化率数据来自孙东怀等^[18]。磁极性年表采用 Cande 和 Kent^[19])

Fig. 1 The magetostratigraphy and magnetic susceptibility of Luochuan and Lingtai sections (Luochuan data from Lu et al^[17], Lingtai data from Sun et al^[18]. Polarity time scale is adopted from Cande and Kent^[19])

研究发现^[20], 由于青藏高原隆升对中更新世中国北方大气环流转型的决定性作用, 最近 2.6 MaB. P. 洛川剖面粒度组分变化趋势表明, 西风环流对风尘沉积的贡献减小、强度减弱, 与此同步, 季风环流对风尘沉积的贡献增加、强度增大, 故可通过风尘沉积物来研究该时期的季风环流。沉积成壤过程产生较多的细粒级磁性矿物, 从而使磁化率增高, 故磁化率反映了长时间尺度的东亚夏季风气候变化^[3,21,22], 因此磁化率作为黄土高原季风气候演变的代用指标已为学术界广泛接受。为创建独立的时间标尺, 本文利用黄土中 Rb 含量与沉积速率之间的相关关系^[23], 根据以下模式建立洛川和灵台剖面磁化率的时间序列^[24]:

$$T_m = T_1 + (T_2 + T_1) \frac{\sum_{i=1}^m \frac{1}{S_{Ri}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{S_{Ri}}}, \quad (1)$$

式中, T_m 是第 m 点的年龄, T_1 和 T_2 分别为第 1、2 个控制点的年龄 (与深海氧同位素曲线对比获得, 详见文献^[24]); S_{Ri} 是沉积速率, 由 Rb 含量求得; m 和 n 分别是采样点数和总数。由此可以得到初始时间序列。

3 分析方法

3.1 序列插值

将原始序列进行样条插值, 插值间隔为 1 000 a, 得到等时间间隔的新序列。其中, 洛川剖面插值到 2.6 MaB. P., 灵台剖面插值到 2.7 MaB. P.。然后进行奇异谱分析^[25]和小波变换^[26]。

3.2 小波分析方法

一个信号或函数 $f(x) \in L^2(R)$ 的小波变换定义为

$$W_{a,b}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi_{a,b}^*(x) dx, \quad (2)$$

式中, ψ^* 是 ψ 的复共轭; a 为尺度参数; b 由平移参数构成, 它对应于信号或函数 $f(x) \in L^2(R)$ 在小波函数族 $\psi_{a,b}(x)$ 上的分解。 $\psi(x)$ 满足如下条件

$$C_\psi = \int_0^\infty \frac{|\Psi(\omega)|}{\omega} d\omega, \quad (3)$$

或

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) dx = 0, \quad (4)$$

$\Psi(\omega)$ 是 $\psi(x)$ 的 Fourier 变换。 C_ψ 对某一给定的小波而言是常数。函数 $\psi(x)$ 为一带通 Fourier 变换在 $\omega=0$ 滤波器的脉冲响应, 小波函数族 $\psi_{a,b}(x)$ 的 Fourier 变换构成一系列带宽与中心频率之比保持为常数的带通滤波器库

$$\Psi_{a,b}(\omega) = a^{-1/2} \Psi(a\omega) e^{-ib\omega}, \quad (5)$$

因此小波变换式 (2) 可描述为函数 $f(x) \in L^2(R)$ 通过一带通滤波器的滤波, 可以用来分析序列的特定周期。本文所用小波函数为复值 Morlet 小波 $\psi(x) = e^{ikx} e^{-|x|^2/2}$ 。在 Fourier 空间 Morlet 小波为

$$\phi(k) = \begin{cases} (2\pi)^{-1/2} e^{-\frac{1}{2}(k-k_\psi)^2}, & k > 0 \\ 0, & k \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

3.3 奇异谱分析方法

奇异谱分析方法 SSA (Singular Spectrum Analysis) 是一种新颖的强化频率信号的广义功率谱分析方法^[27~29]。主要思想是将长度为 N 的零均值时间序列, 用一个最大后延 m (一般取序列长度的 1/3) 排列成 $n=N-m+1, m$ 的矩阵, 作时滞经验正交展开 TEOFs (Temporal Orthogonal Functions), 用 Jacobi 方法求出矩阵的特征值和特征向量, 特征值的平方根就是关于矩阵的奇异值, 矩阵的全体奇异值就是时间序列的奇异谱, 称对时间序列做的 TEOFs 运算为奇异谱分析。SSA 有明显的物理意义: 对于给定的最大时间后延 m , 其行向量中蕴含的波形信号被集中于各个特征向量之中, 而与其具有最大相关的这些波形信号的变动特征则被提取到它相应的时间主分量 TPC (Time Primary Component) 中, 也就是说如果存在时滞为 τ 的两个序列, 其时间主分量 TPC 的相关系数在所有其他后延 (1, 2, 3, ..., m) 的时间主分量中达到最大, 该相关系数通过统计检验, 那么可以认为原序列存在 4τ 的周期。在应用 SSA 方法时, 进行的两步信度检验是: 1) 对特征值统计信度的检验, 2) 对成对特征向量的准周期信号的统计信度检验。取综合结果最好的为显著周期。奇异谱分析方法最大特点是能定量准确地确定序列的周期, 因而在周期分析中有重要的意义。

4 结果与讨论

4.1 磁化率小波周期分析

洛川磁化率的小波分析如图 2 所示。洛川磁化率所指示的夏季风周期非常清晰，从图 2 中可以看到，2.6 MaB. P. 以来洛川磁化率所揭示的东亚季风的历史演变，可以分为 3 个阶段：从 2.6 MaB. P. 到 1.2 MaB. P. 为第一阶段，东亚季风主要以 40 ka 左右的短周期振荡为主。灵台的磁化率的小波分析所指示的东亚季风信息与洛川完全一致（图 3），这一阶段的振荡周期以 40 ka 为主，显示出这个时期主要是由于地球自转轨道与地球公转轨道面之间倾角的变化，导致太阳辐射的变化而产生的。地球轨道面在空间上的变动，致使地球的自转相对于地球的轨道面的夹角在 22° 到 $24^{\circ}30'$ 之间变化，结果黄道与赤道的倾角产生了 40 ka 周期变化。当黄赤夹角增加 1° 时，极地的年辐射量增加 4.02%，赤道减少 0.35%，使得行星季风带向北移动，因而地球轨道面的变化对地质时期东亚季风气候影响十分显著，导致了大陆

上植被与大气降水时间尺度为 40 ka 左右的变化。

由图 2 可见，1.2 MaB. P. 处周期发生变化，东亚季风 100 ka 周期开始显现。1.2 MaB. P. 后仍有高频的 40 ka 周期存在，如 1.2 ~ 0.9 MaB. P. 之间，但 40 ka 周期受到 100 ka 周期的影响而出现减弱甚至崩溃，表明转型开始，如 0.9 ~ 0.6 MaB. P. 之间，40 ka 周期衰减，等值线变稀，振幅减小，表明东亚季风振荡减弱。由图 2 和图 3 看到，1.2 ~ 0.6 MaB. P. 间 100 ka 周期还不够显著和稳定，特别是 0.8 ~ 0.6 MaB. P. 间没有明显的周期迹象，表明这两个周期间的转型有一个过渡期，以便不同主导周期间相适应。但在 1.2 MaB. P. 附近（1.25 ~ 1.1 MaB. P.），小波分析图上等值线密集，时间周期跨越 40 ~ 100 ka，表明东亚季风的周期振荡十分强烈，40 ka 的周期仍然存在，显示出东亚季风多时间尺度的周期演变的特点，可见在 1.2 MaB. P. 显现的 100 ka 更像是某种触发事件，表示由于地球轨道偏心率产生的作用对东亚季风的演变开始起重要的作用，而由黄赤夹角引起 40 ka 的季风周期变化将居次要地位，因此 1.2 MaB. P. 应该是一个东亚季

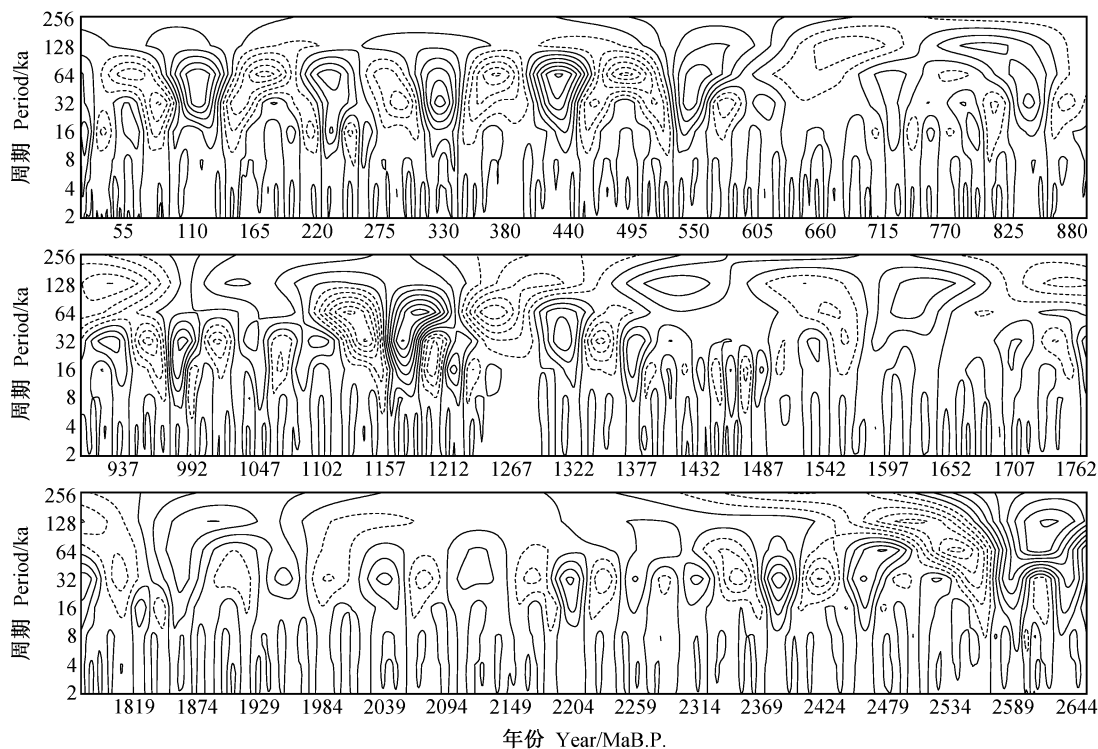


图 2 洛川磁化率的小波分析

Fig. 2 The wavelet analysis of magnetic susceptibility at Luochuan

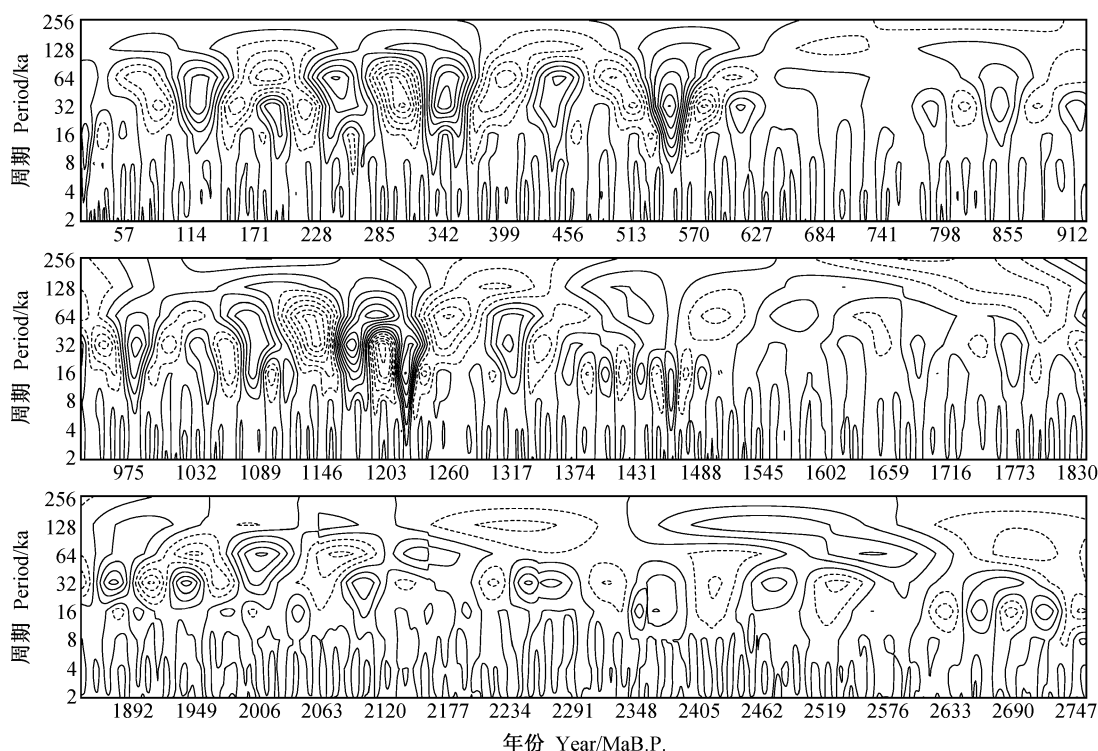


图3 灵台磁化率的小波分析

Fig. 3 The wavelet analysis of magnetic susceptibility at Lingtai

风周期演变的触发点而不是突变点,这一变化实际上从 1.3 MaB. P. 就逐渐开始出现了,在 1.15 MaB. P. 附近达到最强,1.1 MaB. P. 以后就显著减弱,又恢复了 40 ka 的周期。真正的突变点应该是第三阶段开始的 0.6 MaB. P.,类似的情况在灵台的磁化率的小波分析中也出现了(见图 3),这是第二次周期转型。

第三阶段,洛川磁化率(图 2)显示出 0.6 MaB. P. 的转型事件,出现最强的 100 ka 旋回特征,它显示出从欧洲的群智到武木 4 次冰期和间冰期的结构,其周期和强度都非常显著,这一阶段的东亚季风气候变化幅度较大。100 ka 的主周期一直持续至今,这次转型事件可以认为是 1.2 MaB. P. 以来,100 ka 占优势旋回放大,强度明显增强,该周期至今未出现减弱和断裂迹象。灵台磁化率第三阶段与洛川的一致(见图 3),也显示出 0.6 MaB. P. 是一个明显的季风气候的突变点,这就是著名的中更新世气候转型事件,这一转型持续数十万年,在 0.6 MaB. P. 附近的变化最快,它是第四纪气候变化最重要的特征之一,由此全球气候的主导周期从早更新世的 40 ka 转

变为此后的 100 ka 周期。

对于晚第四纪 100 ka 主导周期产生的原因一直为古气候学界所困惑,因为地球轨道偏心率引起太阳辐射量的变化太小,不足以视为 100 ka 周期冰期旋回的直接驱动力^[30],一般用非线性机制如 100 ka 周期与岁差、半岁差周期非线性耦合加以解释^[14]。此外,另一种解释归因于北半球冰盖动力学^[31],并认为北半球冰量变化是东亚冬季风变化的主要驱动力^[15]。近来,碳循环、大气 CO₂ 变化被认为是导致 100 ka 周期的主要原因^[28],并且低纬海洋的变化对其有重要的贡献^[32,33]。黄土磁化率作为东亚夏季风变化的指标,可能更多地受到来自低纬海洋的影响,因此能够记录到同海洋沉积物相一致的气候变化周期。

4.2 东亚季风周期的奇异谱分析

图 4 是针对不同时段计算的洛川磁化率奇异谱分析,纵坐标表示该时段的时间主分量大小,时间主分量 TPC 振幅越大,表示该主分量在所有特征向量中的权重越大,占有的方差也就越大,其描述的波形或周期也就是该时段内的主导周期。横坐标为时间单位,其长度为 $n=N-m+l$,表示

周期的长度,并不对应于某个具体的时段。图 4a 为 0~0.6 MaB. P. 显著周期的振荡,时间主分量为第 1 (TPC1)、2 分量 (TPC2),两个主分量的相关系数达到 0.9819,周期的信度超过 95%。由图可看到两个主分量的时间位相相差 25 ka,因此对应的周期为 100 ka,两个波型也大致能看到图 4a 时间主分量 TPC1 和 TPC2 的振荡周期为 100 ka。图 4b 是 2.45~2.10 MaB. P. 时段显著周期的时间主分量振荡,两个时间主分量位相差 10 ka,波型的周期为 40 ka,两个时间主分量的相关系数达到 0.9864,通过了特征值统计信度检验和成对特征向量准周期信号统计信度检验。从图 2 中不难看出,奇异谱所检测出的周期正是小波分析图中周期信号最强的时段,这显示出两者结果的一致性。

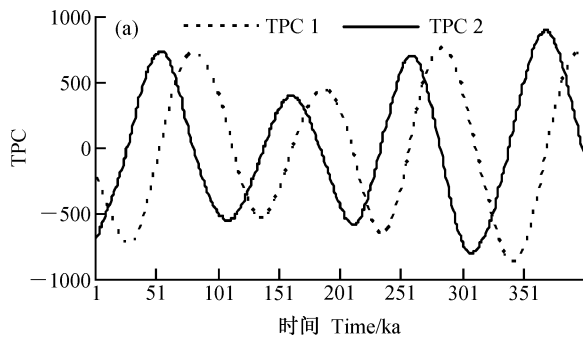


图 5a 为灵台磁化率 0~0.6 MaB. P. 的 100 ka 周期的振荡示意图,其显著性检验的信度在 95% 以上,第 1、2 时间主分量的相关系数达到 0.9903。由此可见在 0~0.6 MaB. P. 时段,灵台和洛川的 100 ka 主导周期是一致的。但是 100 ka 周期究竟是从 0.6 MaB. P. 开始,还从 0.9 或 0.7 MaB. P. 开始学术界还有争议^[12,34]。有研究认为在 1.2 MaB. P. 时全球气候开始转型^[31],也有的认为最早从 1.05 MaB. P. 开始^[35],但一般的观点认为从 0.9 MaB. P. 的中更新世开始的^[36]。本文也检测到了 0.9 MaB. P. 以来的东亚季风的强信号,发现 0.9 MaB. P. 确实有存在 100 ka 周期的可能,但检测时间主分量之间的相关系数只达到 0.9326,检测的 100 ka 周期也不能通过 95% 的信度检验,表明 0.9 MaB. P. 以来气候转型已开

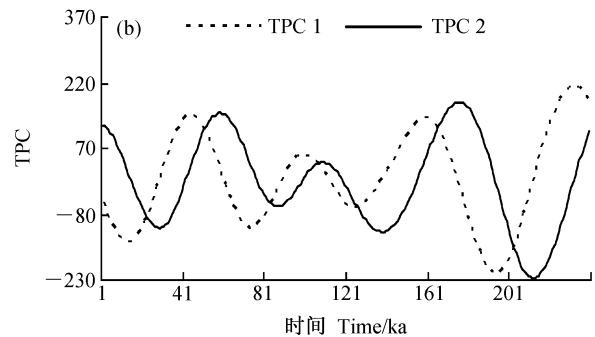


图 4 洛川磁化率的部分奇异谱分析结果 (通过两步信度检验): (a) 0.0~0.6 MaB. P. 第 1 (TPC1)、2 (TPC2) 时间主分量 100 ka 周期的振荡; (b) 2.1~2.45 MaB. P. 第 1 (TPC1)、2 (TPC2) 时间主分量 40 ka 周期的振荡

Fig. 4 The partial SSA results of magnetic susceptibility at Luochuan (pass two steps confidence tests). (a) First (TPC1) and second (TPC2) time principal component with 100 ka cycle in 0.0—0.6 MaB. P.; (b) First (TPC1) and second (TPC2) time principal component with 40 ka cycle in 2.1—2.45 MaB. P.

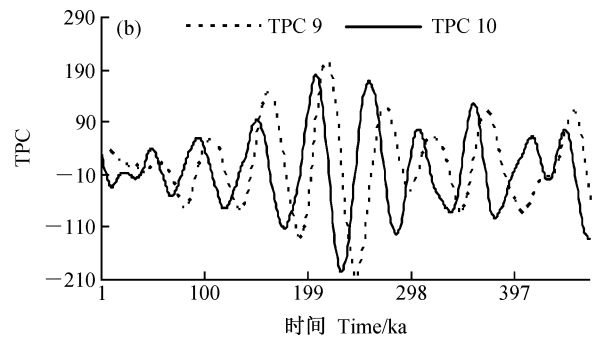
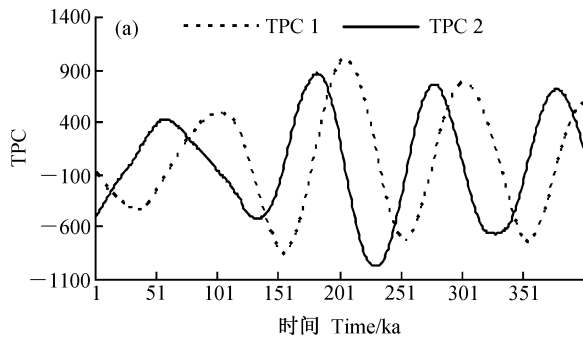


图 5 灵台磁化率的奇异谱分析结果: (a) 0.0~0.6 MaB. P. 间第 1、2 时间主分量 100 ka 周期的振荡 (通过两步检验); (b) 1.85~2.55 MaB. P. 间第 9、10 时间主分量 40 ka 周期的振荡 (未通过两步检验)

Fig. 5 The SSA results of magnetic susceptibility at Lingtai: (a) First (TPC1) and second (TPC2) time principal component with 100 ka cycle in 0.0—0.6 MaB. P. (pass two steps confidence tests); (b) Ninth (TPC9) and tenth (TPC10) time principal component with 40 ka cycle in 1.85—2.55 MaB. P. (fail to pass two steps confidence tests)

表 1 磁化率周期强信号奇异谱检测结果
Table 1 The test results of the significant cycles of magnetic susceptibility by using SSA

洛川 Luochuan				灵台 Lingtai			
时段 Year/MaB. P.	周期 Cycle/ka	相关系数 correlationcoefficient	信度检验 confidencetest	时段 Year/MaB. P.	周期 Cycle/ka	相关系数 correlationcoefficient	信度检验 confidencetest
0.60~0.00	100	0.9819	通过 Pass	0.60~0.00	100	0.9903	通过 Pass
1.37~0.77	40	0.9702	通过 Pass	0.60~0.00	40	0.9620	通过 Pass
1.87~1.37	20	0.9514	没通过 Not Pass	0.60~0.00	20	0.9639	通过 Pass
1.87~0.66	200	0.9664	通过 Pass	1.37~0.77	40	0.9882	通过 Pass
2.10~1.80	40	0.9620	通过 Pass	1.87~1.37	—	—	—
2.45~2.10	40	0.9864	通过 Pass	2.55~1.85	40	0.9772	通过 Pass

始出现,但并不显著,只有从 0.7~0.6 MaB. P. 开始 100 ka 周期才变得显著。从图 2 和图 3 上可以看到,实际在 0.9~0.6 MaB. P. 时段,等值线稀疏,振幅较小,周期不明显,因此可以认为,这一时期是转型的过渡期,与 Ruddiman 等^[37]和 Bolton 等^[38]的结论相一致,而这一转型事件在南海沉积物也有记录^[33]。

图 5b 为灵台磁化率序列奇异谱分析得到的 2.55~1.85 MaB. P. 间第 9、10 时间主分量的振荡,相关系数为 0.9772,通过显著性检验。图中显示主分量之间的位相差为 10 ka,主分量的周期为 40 ka。因此可以认为图中显示的 40 ka 周期的趋势是气候变化的强信号;虽然主分量是第 9、10 个分量,但在 2.55~1.85 MaB. P. 之间的气候变化中,40 ka 的周期仍重要。在图 3 中,相应的时段内,40 ka 周期还是相对比较清楚的,这表明这个时期东亚夏季风的演变以 40 ka 周期变化为主。有的学者认为 1.2 MaB. P. 是一次周期转型事件^[12,20],为此本文计算了 1.2 MaB. P. 前后东亚季风周期的强信号。洛川和灵台的磁化率都表明,在 1.2 MaB. P. 前后夏季风 40ka 周期演变信号没有明显差异,即并不是一次显著的转型事件。但在图 2 和图 3 中,1.2 MaB. P. 前后的等直线密集,振幅加大,显示出东亚季风演变存在一次很强的事件。始于 1.2MaB. P. 的昆仑—黄河运动,是青藏高原隆升中的一次重要事件,期间昆仑山上升,黄河切穿积石峡,青藏高原开始大面积进入冰冻圈^[39]。可以认为,这是一次触发事件,这对 0.9 MaB. P. 开始的气候转型是有影响的。

除以上显著的强信号周期外,洛川和灵台的磁化率序列中,还在其他一些时段上存在周期变化,表 1 是根据小波分析的结果,分别对不同时

段用奇异谱分析检测到的一些周期,有些周期通过 95%显著性检验,表明奇异谱检测到的周期是该时段上的强信号,该周期趋势是存在的,还有一些周期可能不显著。由表可见,1.37 MaB. P. 以前,与第一个构造——气候旋回相一致,奇异谱分析表明,1.87~1.37 MaB. P. 之间,洛川和灵台的磁化率没有检测到显著的周期变化,中国红土气候期的研究也表明,该时期旋回不清^[40]。2.5~1.8 MaB. P. 左右主要为 40 ka 周期,在小波分析的图上,40 ka 周期也比较清楚,但强度较弱。1.37~0.77 MaB. P. 时段内,洛川和灵台磁化率都表现出 40 ka 的周期,在 1.2 MaB. P. 前后季风周期的演变并没有明显差异,因而不存在气候周期的转型,这个时期与第二个构造——气候旋回一致。在 0.60~0.0 MaB. P. 洛川和灵台的磁化率都存在 100 ka 的周期,并且通过信度检验,这个时期属于第四纪中的第三个构造——气候旋回,青藏高原在 3 000 m 左右,气候与现代气候较接近,波动显著加强。在灵台的磁化率中同时还检测到 40、20 ka 的周期^[9],但 100 ka 周期相对较强,表明东亚季风可能同时存在多个时间尺度的演变周期^[41]。

5 结 论

2.6 MaB. P. 以来,东亚季风进入盛行期。洛川、灵台磁化率的小波分析表明,2.6~1.2 MaB. P. 东亚季风主要以 40 ka 的周期振荡为主,显示出黄赤夹角对东亚夏季风的演变起着主导作用。在 1.2 MaB. P. 前后,SSA 分析表明并没有明显的周期差异,因而认为 1.2 MaB. P. 并非真正意义上的转型事件,而是一次周期变化的触发

事件。受其影响, 40 ka 的周期开始减弱, 并在 0.9~0.7 MaB. P. 期间崩溃, 同时孕育着 100 ka 周期出现, 但 100 ka 周期并不显著。小波分析表明, 40 ka 周期到 100 ka 周期转型不是突然的, 而有一较长的过渡期, 在这一过渡期内, 夏季风气候演变的周期性不十分清楚, 只有在 0.6 MaB. P. 前后, 100 ka 周期才真正得以建立。0.9~0.6 MaB. P. 期间东亚夏季风的演变表现平缓, 而 0.6 MaB. P. 开始夏季风振幅增大, 冷暖变化强烈, 可能与低纬海洋对碳循环的调节作用有关。

SSA 从统计角度检验了各地质时期的准周期存在的显著性, 结果表明 2.6~0.77 MaB. P. 期间主要显示出 40 ka 的周期变化, 1.2 MaB. P. 前后的周期没有显著的差异, 这进一步证明 1.2 MaB. P. 不是一次转型事件, 而是一次触发事件。40 ka 周期在 2.6~0.77 MaB. P. 的大部分地质时期内都通过显著性检验, 但在 1.87~1.37 MaB. P. 灵台的磁化率没有检测到周期, 洛川磁化率的 20 ka 周期也不显著, 小波分析显示这段时期等值线稀疏, 振幅较小 (正负值小)。对于学术界有争议的 100 ka 周期建立的时间, 奇异谱分析的结果与小波分析一致, 即从 1.2 MaB. P. 的触发事件开始, 40 ka 周期逐渐衰减, 并从 0.9 MaB. P. 开始崩溃, 0.9~0.6 MaB. P. 期间是 100 ka 周期与 40 ka 周期的调整期, 0.9 MaB. P. 开始已有 100 ka 周期的迹象, 但 SSA 分析表明周期不显著, 只有从 0.6 MaB. P. 开始, 100 ka 周期变得显著, 成为东亚夏季风演变的强信号。

要精确确定东亚季演变中 100 ka 周期出现的确切时间, 需要更高精度的时间标尺, 但本文所使用的时间标尺在解决这个问题时精度还不够。此外, 单根据谱分析结果讨论周期出现的确切时间还不够充分, 需要使用不同频率的带通滤波曲线来考察周期在不同时期的强度等特征, 这些都是在现有基础上需要进一步做的工作。

参考文献 (References)

- [1] 陈骏, 季峻峰, 仇纲, 等. 陕西洛川黄土化学风化程度的地球化学研究. 中国科学 (D 辑), 1997, **7** (6): 531~536
Chen Jun, Ji Junfeng, Qiu Gang, et al. The research on

- the earth chemic property of the Shanxi Luchuan loess chemistry efflorescencing degree. *Science in China* (Ser. D) (in Chinese), 1997, **7** (6): 531~536
[2] 刘东生. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985. 191~208
Liu Dongsheng. *Loess and Environments* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1985. 191~208.
[3] An Z S, Liu T S, Lu Y. et al. The long-term paleomonsoon variation recorded by the loess-palesol sequence in central China. *Quaternary International*, 1990, **7/8**: 91~95
[4] An Z S. The history and variability of the East Asian monsoon. *Quaternary Science Reviews*, 2000, **19**: 171~187
[5] Ding Z L, Yu Z W, Rutter N W, et al. Towards an orbital time scale for Chinese loess deposits. *Quaternary Science Reviews*, 1994, **13**: 39~70
[6] 陈骏, 安芷生, 汪永进, 等. 最近 800 ka 洛川黄土剖面中 Rb/Sr 分布和古季风变迁. 中国科学 (D 辑), 1998, **28** (6): 498~504
Chen Jun, An Zhisheng, Wang Yongjin, et al. In the past 800, 000 years variations of Rb/Sr distribution and ancient monsoon in the loess section. *Science in China* (Ser. D) (in Chinese), 1998, **28** (6): 498~504
[7] 陈骏, 汪永进, 陈阳, 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 Jun, Wang Yongjin, Chen Yang, et al. The earth chemical characters and ancient monsoon climate meanings about Rb and Sr in the loess stratum of China. *Journal of Geology* (in Chinese), 2001, **75** (2): 259~266
[8] 陈阳, 陈骏, 季峻峰, 等. 陕西洛川黄土剖面的白度参数及其古气候意义. 地质论评, 2002, **48** (1): 38~43
Chen Yang, Chen Jun, Ji Junfeng, et al. White component parameters and ancient climate meanings of the loess section in Shanxi Luchuan. *Geology Reviews* (in Chinese), 2002, **48** (1): 38~43
[9] 郝青振, 郭正堂. 1.2 Ma 以来黄土—古土壤序列风化成土强度的定量研究与东亚夏季风演化. 中国科学 (D 辑), 2001, **31** (6): 520~528
Hao Qingzhen, Guo Zhengtang. The research on the series of transformation from loess (ancient soil) to soil and the evolvement of monsoon in east Asia in latest 1.2 Ma years. *Science in China* (Ser. D) (in Chinese), 2001, **31** (6): 520~528
[10] 王绍武, 蔡静宁, 朱锦红, 等. 中国气象变化的研究. 气候与环境研究, 2002, **7** (2): 137~145
Wang Shaowu, Cai Jingning, Zhu Jinhong. Studies on climate change in China. *Climate and Environment Research* (in Chinese), 2002, **7** (2): 137~145
[11] 安芷生, 刘晓东. 东亚季风气候的历史与变率. 科学通报, 2000, **45** (3): 238~249

- An Zisheng, Liu Xiaodong. The history and change rate of the monsoon climate in eastern Asia. *Science Report* (in Chinese), 2000, **45** (3): 238~249
- [12] 李力, 安芷生. 过去 600 万年黄土高原夏季风周期的阶段性演化及其强迫因子初探. 第四纪研究, 2001, **21** (2): 134~144
- Li Li, An Zhisheng. The research on the phase evolvement and its forcing factors of the Loess Plateau monsoon in summer in latest years. *Quaternary Science Reviews* (in Chinese), 2001, **21** (2): 134~144
- [13] Lu H, Zhang F, Liu X, et al. Periodicities of palaeoclimatic variations recorded by loess-paleosol sequences in China. *Quaternary Science Reviews*, 2004, **23** (18~19): 1891~1900
- [14] 余志伟, 丁仲礼. 黄土古气候记录中 100 ka 周期与岁差、半岁差周期的非线性耦合关系. 中国科学 (D 辑), 2003, **33** (6): 520~528
- Yu Zhiwei, Ding Zhongli. The coupling relation among 100, 000 years and the precessional, the half precessional circulations in the records about the loess ancient climate. *Science in China (Ser. D)* (in Chinese), 2003, **33** (6): 520~528
- [15] Ding Z L, Liu T S, Rutter N W, et al. Ice-volume forcing of East Asian winter monsoon variations in the past 800, 000 years. *Quaternary Research*, 1995, **44**: 149~159
- [16] 咸鹏, 李崇银. 国际上年代际到世纪时间尺度气候变化的研究. 气候与环境研究, 2001, **6** (3): 337~353
- Xian Peng, Li Chongyin. A review variability with inter-decadal-centennial time scale in the world. *Climate and Environment Research* (in Chinese), 2001, **6** (3): 337~353
- [17] Lu H Y, Liu X D, Zhang F Q, et al. Astronomical calibration of loess-paleosol deposits at Luochuan, central Chinese loess plateau. *Palaeogeog. Palaeoclim. Palaeocol.*, 1999, **154**: 237~246
- [18] 孙东怀, 陈明扬, Show J., 等. 晚新生代黄土高原风尘堆积序列的磁性地层年代与古气候记录. 中国科学 (D 辑), 1998, **28** (1): 79~84
- Sun Donghuai, Chen Mingyang, Show J., et al. Magnetostratigraphy and paleoclimate records of late cenozoic eolian sequence in the Loess Plateau of China. *Science in China (Ser. D)* (in Chinese), 1998, **28** (1): 79~84
- [19] Cande S C, Kent D V. Revised calibration of the geomagnetic polarity time scale for the late Cretaceous and Cenozoic. *J. Geophys. Res.* 1995, **100**: 6093~6095
- [20] 孙东怀, 安芷生, 苏瑞侠, 等. 最近 2.6 Ma 中国北方季风环流与细粉环流演变的风尘堆积记录. 中国科学 (D 辑), 2003, **33** (6): 492~504
- Shen Donghuai, An Zhisheng, Su Ruixia, et al. The records about eolian sequence of the evolution of the monsoon circulation and minute powder circulation in northern China. *Science in China (Ser. D)*, 2003, **33** (6): 492~504
- [21] Kukla G. Pleistocene climate in China dated by magnetic susceptibility. *Quaternary Science Review*, 1987, **6**: 191~219
- [22] Zhou L P, Oldfield F, Wintle A G, et al. Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese loess. *Nature*, 1990, **346**: 737~739
- [23] Chen J, Ji J F, Chen Y, et al. Use of rubidium to date loess and paleosol of Luochuan sequence, central China. *Quaternary Research*, 2000, **54**: 198~205
- [24] 陈旸. 黄土高原古夏季风时空变迁的地球化学研究. 南京大学博士学位论文, 2002
- Chen Yang. The earth's chemistry research on time and space changes of the Loess Plateau monsoon in summer. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University, 2002
- [25] 江志红, 丁裕国. 奇异谱分析的广义性及其应用特色. 气象学报, 1998, **56** (6): 736~744
- Jiang Zhihong, Ding Yuguo. Generality and applied features for singular spectrum analysis. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1998, **56** (6): 736~744
- [26] 匡正, 季仲贞, 林一骅. 华北降水时间序列资料的小波分析. 气候与环境研究, 2002, **5** (3): 312~317
- Kuang Zheng, Ji Zhongzhen, Lin Yihua. Wavelet analysis of rainfall data in North China. *Climate and Environment Research* (in Chinese), 2002, **5** (3): 312~317
- [27] 丁裕国, 江志红. 气象数据时间序列信号处理. 北京: 气象出版社, 1998, 160~163
- Ding Yuguo, Jiang Zhihong. *The Analysis on Time-Series Singles of Meteorological Data* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1998. 160~163
- [28] 余锦华, 丁裕国, 江志红. 我国近百年气温变化的奇异谱分析. 南京气象学院学报. 2000, **23** (4): 586~593
- Yu Jinhua, Ding Yuguo, Jiang Zhihong. Singular spectrum analysis of temperature variations in China during the recent 100 years. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2000, **23** (4): 586~593
- [29] 余志伟, 丁仲礼, 刘东生. 第四纪古气候变化非线性动力学初步研究——黄土粒度曲线的奇异谱分析. 第四纪研究, 1993, **12** (3): 214~230
- Yu Zhiwei, Ding Zhongli., Liu Dongsheng. The basic research on the non-linear dynamics of the ancient climate change in the Quaternary Century—the singular spectrum analysis about the curves of the loess granularity. *Quaternary Research* (in Chinese), 1993, **12** (3): 214~230
- [30] Shackleton N J. The 100 000-year ice-age cycle identified and found to lag temperature, carbon dioxide and orbital Eccentricity. *Science*, 2000, **289**: 1897~1902
- [31] Clark P U, Alley R B, Pollard D. Northern Hemisphere-ice-sheet influences on global climate change, *Science*,

- 1999, **286**: 1104~1111
- [32] Rutherford S, D Hondt S. Early onset and tropical forcing of 100, 000-year Pleistocene glacial cycles. *Nature*, 2000, **408**: 72~75
- [33] 汪品先, 田军, 成鑫荣. 第四纪冰期旋回转型在南沙深海的记录. 中国科学 (D辑), 2001, **31** (10): 793~799
Wang Pinxian, Tian Jun, Cheng Xinrong. Transition of Quaternary glacial cyclicity in deep-sea records at Nansha, the South China Sea. *Science in China* (Ser. D) (in Chinese), 2001, **31** (10): 793~799
- [34] 邬光剑, 潘保田, 管玉清, 等. 中更新世气候转型与 100 ka 周期研究. 地球科学进展, 2002, **17** (4): 605~611
Wu Guangjian, Pan Baotian, Guan Yuqing, et al. The research on the climate revolution and its 100, 000 years cycle in the Middle Pleistocene. *Advancement in the Earth Science* (in Chinese), 2002, **17** (4): 605~611
- [35] Dupont L M, Donner B, Schneider R, et al. Mid-Pleistocene environmental change in tropical Africa began as early as 1.05 MaB.P. *Geology*, 2001, **29** (3): 195~198
- [36] Maasch K A. Statistical detection of the mid-Pleistocene transition. *Climate Dyn.*, 1988, **2**: 133~143
- [37] Ruddiman W F, Raymo M E, Martinson D G, et al. Pleistocene Evolution: North Hemisphere Ice sheet and North Atlantic Ocean. *Paleoceanography*, 1989, **4** (4): 353~412
- [38] Bolton E W, Maasch K A, Lilly J M. A wavelet analysis of Plio-Pleistocene climate change indicators: A new view of periodicity evolution. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, **22**: 2753~2756
- [39] 李吉均, 方小敏, 潘保田, 等. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响. 第四纪研究, 2001, **21** (5): 381~391
Li Jijun, Fang Xiaomin, Pan Baotian, et al. Late Cenozoic uplift of Qinghai-Xiang Plateau and its impacts on environments in surrounding area. *Quaternary Science* (in Chinese), 2001, **21** (5): 381~391
- [40] 黄镇国, 张伟强. 中国红土期气候期构造期的耦合. 地理学报, 2000, **55** (2): 200~207
Huang Zhenguo, Zhang Weiqiang. The coupling among ruddle, climate period and formation period. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2000, **55** (2): 200~207
- [41] 任国玉. 气候变化的历史记录和可能原因——IPCC 1995 第一工作组报告评述. 气候与环境研究. 1997, **2** (2): 1178~1192
Ren Guoyu. A Review on Records and the Possible Causes of Global Climate Changes. *Climate and Environment Research* (in Chinese), 1997, **2** (2): 1178~1192