

doi:10.3799/dqkx.2010.069

基于 EMD 分解的甘孜黄土磁化率记录的西南季风演化周期性

刘冬雁^{1,2}, 李巍然^{1,2}, 乔彦松³, 王玲², 彭莎莎²

1. 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东青岛 266100

2. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东青岛 266100

3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

摘要: 黄土磁化率可用以指示夏季风强度, 并已在中国风尘堆积的古气候演化周期研究中得到较好应用, 但迄今多集中于东南季风区。以青藏高原东南缘甘孜 A 黄土剖面磁性地层学研究为基础, 对 1.16 Ma 以来的磁化率记录进行经验模态分解 (EMD), 探讨西南季风演化的多时间尺度周期性。结果表明, 偏心率、地轴倾斜、岁差的准周期成分在西南季风区黄土沉积中有明显反映, 指示西南季风的演化受天文因素控制; 出现岁差的拍频周期, 指示印度季风系统具有热带特征; 准 200 ka 周期是真实存在的, 但其成因机制需要进一步研究; 约 400 ka 周期波动, 可能对应理论值为准 400 ka 的偏心率长周期。西南季风演化的主要驱动因素可能是低纬太阳辐射。对于沉积记录的周期性研究来讲, 经验模态分解更切合实际, 它比传统谱分析方法有明显的优势和应用潜力。

关键词: 青藏高原; 气候变化; 黄土; 磁化率; 经验模态分解 (EMD)。

中图分类号: P539.3

文章编号: 1000-2383(2010)04-0533-09

收稿日期: 2009-10-22

The Periodicity of the Southwest Monsoon Revealed by the Magnetic Susceptibility of the Garzê A Loess-Paleosol Sequence Using EMD Method

LIU Dong-yan^{1,2}, LI Wei-ran^{1,2}, QIAO Yan-song³, WANG Ling², PENG Sha-sha²

1. Key Laboratory of Sea Floor Resource and Exploration Technique of Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. College of Marine Geoscience, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

3. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: The magnetic susceptibility of loess as a proxy for the intensity of summer monsoon has been used to investigate the periodicity of paleoclimatic changes of aeolian deposits in China. However, previous studies focused most on the southeast monsoon areas. On the basis of magnetostratigraphic study of the Garzê A section on the southeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau, the magnetic susceptibility records during the past 1.16 Ma were subject to an empirical mode decomposition (EMD) to discuss the periodicity of the southwest monsoon evolution at various time scales. The results show that: (1) the significant orbital periodicities do exist including the eccentricity, obliquity and precession periods in our records, which indicates that the southwest monsoon is also controlled by the astronomical factors; (2) The beat frequency periods of the precession are detected, which shows the tropical climatic characteristics of the southwest monsoon; (3) the quasi-200 ka cycle is confirmed in existence but its forming mechanism needs further study; (4) the appearance of quasi-400 ka cycle fluctuation may correspond to quasi-400 ka eccentricity cycle. Therefore, the main forcing of Indian monsoon system may be the solar insolation at low latitude. As for the studies of paleoenvironment evolution of sedimentary records, EMD is superior and has more potentials than the traditional method of spectral analysis.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; climate change; loess; magnetic susceptibility; empirical mode decomposition (EMD).

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 40472088); 国土资源大调查项目 (No. 1212010911072)。

作者简介: 刘冬雁 (1967—), 女, 副教授, 主要从事第四纪环境教学与科研。E-mail: dongyanliu67@126.com

0 引言

自 20 世纪 70 年代中期以来, Milankovitch 天文辐射理论在深海沉积、黄土沉积等研究中不断得到应用和发展, 大量研究表明, 地球轨道三要素的典型理论周期(10 万年偏心率、4 万年地轴倾斜和 2 万年岁差)的确存在于第四纪地质记录中(丁仲礼和余志伟, 1995; 田军等, 2004; 肖海丰等, 2006). 亚洲夏季风分为印度季风(西南季风)和东亚季风(东南季风)两大支, 两者的演化均受地球轨道要素影响. 目前, 关于印度季风轨道尺度形成、演化的信息主要来源于对海洋沉积的研究(Clemens *et al.*, 1991; 刘海生等, 2005). 上述研究成果需要在陆相沉积中得到印证, 以实现古气候演化记录的海陆对比. 黄土是中国特色的陆相研究材料, 长期以来其研究区域主要集中在东南季风区. 因此, 有必要就西南季风区黄土记录的轨道、亚轨道时间尺度古气候周期性作进一步研究, 以更加全面地认识亚洲夏季风的第四纪演化特征.

川西高原位于青藏高原东南缘, 属西南季风区, 广布其上的黄土—古土壤序列主要是早更新世晚期以来形成的, 应该记录了西南季风的多时间尺度周期信息. 甘孜黄土是川西高原发现的年代较老、沉积连续的风尘堆积序列之一, 国内外学者曾对其地层时代、成因及古环境解释等方面进行了深入研究(方小敏等, 1996; 蒋复初等, 1997; 潘保田和王建民, 1999; 颜茂都等, 2001), 为进一步研究工作奠定了基础.

气候变化是一种非平稳和非线性的过程, 传统的基于傅里叶变换的谱分析方法在处理相关问题时有一定局限性(林振山和汪曙光, 2004a). 经验模态分解方法(empirical mode decomposition, EMD)能较好地解决资料序列的非平稳和非线性问题, 并且能够在长周期变化的分辨方面给出较高的精度(王卫强等, 1999). 本文拟在甘孜 A 剖面黄土磁性地层学的基础上, 尝试引入 EMD 方法, 对磁化率时序进行不同时间尺度周期的分离, 以探讨早更新世晚期以来西南季风演化的时频特征.

1 研究区概况

川西高原西界金沙江, 东临四川盆地, 南接云贵高原, 大致在北纬 $26^{\circ}\sim 34^{\circ}$ 、东经 $97^{\circ}\sim 104^{\circ}$ 之间, 地势由北西向南东倾斜. 由于新生代以来青藏高原急剧上升, 河流下切, 河流阶地沿河呈线性分布, 可达

7 级之多. 甘孜盆地处于川西高原的西部, 属藏东、川西针叶林温暖亚湿润带, 现今年平均温度 5.6°C , 年均降水量 636 mm, 年均蒸发量 1 661.1 mm, 降水主要集中在夏季, 占全年总降水量的 81%.

2 材料与方法

甘孜 A 剖面($31^{\circ}37'22.8''\text{N}$ 、 $99^{\circ}58'29.4''\text{E}$)位于甘孜县城西北约 2 km 处(图 1), 剖面所处地貌部位属于雅砻江的五级阶地, 海拔 3 483 m. 剖面总厚度 32.5 m, 其中典型风成黄土厚约 28.5 m, 下伏厚约 4 m 的次生黄土与残坡积砾石层, 底部与基岩呈不整合接触. 根据地层的岩性、结构、颜色、接触关系等特征自上而下可以初分为 36 层(图 2). 依据土壤发生特征和其组合结构可将剖面中约 17 层强弱古土壤合并为 14 大层($S_0\sim S_{13}$), 黄土亦相应合并为 14 大层($L_1\sim L_{14}$)(图 2).

为了采到原始层位的样品, 在剖面上开挖一条 50~60 cm 深的探槽. 按照 20~40 cm 的间距采集用于古地磁测试的定向样品 108 块; 按照 2 cm 的间距采集用于磁化率测试的样品 1 626 个. 古地磁测试在中国地质科学院地质力学研究所古地磁实验室完成, 磁化率测试在英国产 Bartington MS2 磁化率仪上完成.

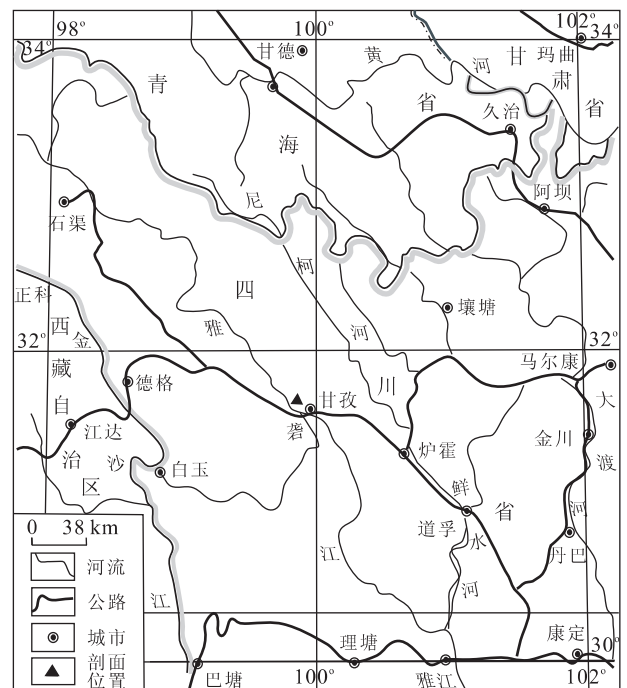


图 1 甘孜 A 剖面位置

Fig. 1 The location of the Garzê A section

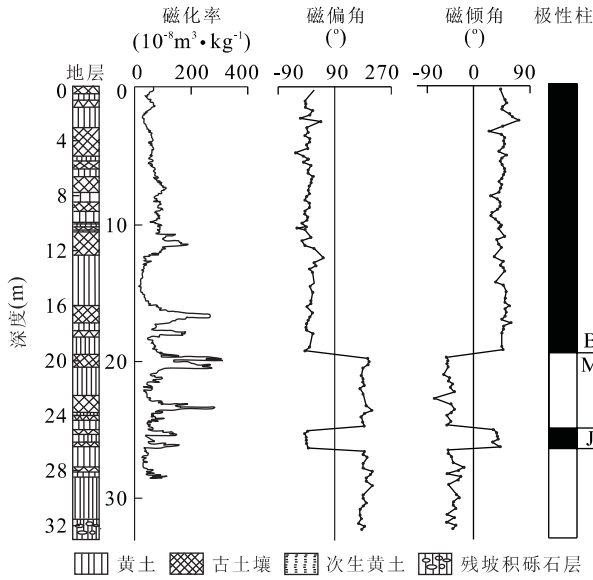


图 2 甘孜 A 剖面黄土—古土壤序列及其磁化率和磁性地层
Fig. 2 Loess-paleosol sequence and variations in the magnetic susceptibility and paleomagnetic records of the Garzê A section

本文采用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)方法,以更灵敏地捕捉西南季风“Milankovitch 周期”的时间域特征. EMD 是依据原始信号自身的固有特征来进行分解的,在理论上,它可以应用于任何类型的信号分解(林振山和汪曙光, 2004a). 据我们所知,目前,虽然 EMD 尚未广泛用于第四纪黄土气候替代指标的周期性研究,但它在海洋科学(王卫强等, 1999)、地球物理(王祝文等, 2008)、太阳活动(林振山和汪曙光, 2004b; 李强等, 2007)等相关领域的应用是成功的. 在中国黄土古气候研究中,磁化率是一个经典的夏季风替代指标,以 EMD 方法为基础研究其所指示的多时间尺度古气候演化周期性应该更切合实际.

迄今为止,较成熟的传统谱分析方法中尤以功率谱分析应用最为广泛. Blackman-Tukey 方法(以下简称 BT 法)是一种功率谱分析方法,它的最大优点在于不可能产生伪造的谱特征;弱点是分辨率低,许多特征被显著平滑. 本文同时以 BT 法对研究剖面磁化率时序作周期分析,用以与 EMD 方法的结果作对比.

3 结果

3.1 时间标尺的确定

磁性地层研究结果表明(图 2),布容—松山(B/M)界线出现在 L₈ 的底部,并且在剖面下部 24.9~

26.4 m 的位置出现了松山负向期的贾拉米洛(Jaramillo)正向极性亚带. 以 B/M 界线(0.78 MaBP)和 Jaramillo 正极性亚时的底界年龄(1.07 MaBP)计算出该时期的风尘堆积速率为 2.38 cm/ka, 以此沉积速率外推,得到剖面典型风尘堆积的底界(深度 28.5 m)年龄约为 1.16 MaBP,该结果与颜茂都等(2001)和乔彦松等(2006)在甘孜地区所做的相关工作结果基本一致. 以磁性地层中极性倒转的年龄(包括 B/M 界限(0.78 MaBP)和贾拉米洛正极性亚时的顶、底界年龄(分别为 0.99 MaBP 和 1.07 MaBP))作为时间控制点,运用 Kukla *et al.* (1988)建立的黄土地层“磁化率时间标尺”模型进行内插,获得该序列 1.16 MaBP 以来的时间标尺(图 3),其详细过程参见文献乔彦松等(2007). 以此获得的时间标尺的平均样品分辨率约为 0.7 ka,能够满足轨道、亚轨道周期分析的要求.

3.2 磁化率信号的经验模态分解

在中国北方第四纪黄土—古土壤序列研究中,磁化率是衡量夏季风强度的敏感参数或代用指标,受到大多数研究者的重视(安芷生等, 1990). 甘孜 A 剖面磁化率曲线波动对相应黄土与古土壤层有比较清楚的显示(图 2),即古土壤层磁化率高,黄土层磁化率相对较低. 不仅如此,在磁化率曲线上,还能分辨出非常明显的低频高幅波动以及其上跃动的次一级变化,指示了第四纪气候变化多旋回的特点. 本区域降水主要受西南季风强弱变化的影响. 在西南季风的强势期,降水丰沛,水热组合导致风化成壤作用强烈,磁化率高. 反之,在西南季风弱化阶段,磁化率低. 前人研究也表明,本研究区磁化率指标可以作为反映西南季风强弱的替代指标(蒋复初等, 1997; 吴海斌等, 2002).

在进行 EMD 分解之前,先用三次样条函数将磁化率时间序列插值为 5 ka 等间距时间序列. 然后用 EMD 方法对其进行逐级分解,得到了按频率由高到低排列的 7 个 IMF 分量(图 4). 最后,用快速傅里叶变换(FFT)求取各个 IMF 分量的平均周期. 图 4 中的原信号即是 1.160 kaBP 以来磁化率距平时间

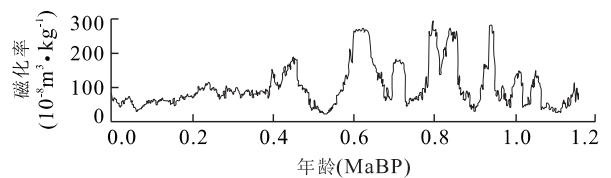


图 3 甘孜 A 剖面磁化率曲线
Fig. 3 Susceptibility curve of the Garzê A section

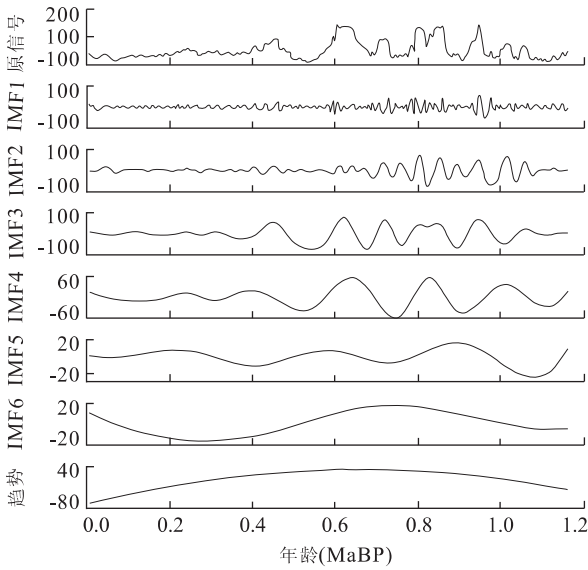


图 4 甘孜 A 剖面磁化率指标 EMD 分解获得的 7 个模态和 1 个趋势项

Fig. 4 7 modes and a trend decomposed from susceptibility of the Garzê A section using EMD method

序列。通过 EMD 获得的每一个 IMF 分量都有不同的振幅和频率,分析得出,这 7 个 IMF 分量大都具有物理意义。IMF1, 平均周期为 7.6、10.3 ka 和 21.5 ka, 对应岁差周期及其拍频周期的波动; IMF2 平均周期为 41 ka, 对应地轴倾斜的波动; IMF3 对应约 10 万年偏心率短周期的波动; IMF4 表示尺度约 20 万年周期的波动; IMF5 表示约 40 万年周期的波动, 对应偏心率长周期; IMF6 贡献不大, 可能来自 EMD 分解残差; 趋势分量即 IMF7。EMD 原理及详细分解过程见相关文献(王卫强等, 1999; 林振山和汪曙光, 2004a; 王祝文等, 2008)。

3.3 磁化率信号的功率谱分析结果

甘孜 A 剖面磁化率功率谱分析(图 5)检出的大于 90% 置信度的周期为 114、100、73、50~42、22.2、

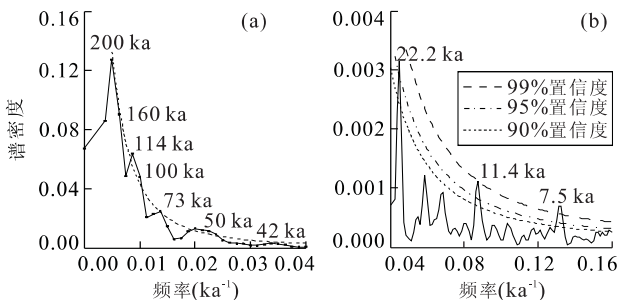


图 5 甘孜 A 剖面磁化率功率谱(BT 法)

Fig. 5 Spectral analysis of the magnetic susceptibility variations of the Garzê A section

11.4 ka 和 7.5 ka。由于谱密度在轨道尺度和亚轨道尺度上相差很多, 在同一个坐标系下很难区分其周期值, 因此将频谱分析结果以 0.04 为界, 分别作在 2 个坐标系中。图 5 中列出了 90%、95% 和 99% 三条置信度曲线, 主要的周期值在图中标出。

4 讨论

4.1 西南季风的周期特征

4.1.1 岁差及其拍频周期 从频率域来看, IMF1 分量的 FFT 平均周期有 21.5、10.3 和 7.6 ka, 与传统 BT 法检出的周期 22.2、11.4 和 7.5 ka 在数字上吻合(图 5), 对应岁差周期理论值的 23 ka 及其拍频周期的半岁差 11.5 ka 和 1/3 岁差 7.6 ka 等, IMF1 即为岁差及其拍频模态; 由于该剖面平均采样分辨率可达 0.7 ka 左右、BT 法步长 2 ka, 谱分析中出现的 11.4 和 7.5 ka 的周期是有意义的。半岁差周期在受到东亚夏季风强烈影响的南中国海(田军等, 2004)、印度季风影响下的印度洋(刘海生等, 2005)、非洲季风影响下的东地中海地区(黄恩清和田军, 2007)的海洋沉积中和东南季风影响下的中国黄土高原风尘沉积(余志伟和丁仲礼, 2003)中都有发现。综合以上地质记录可以看出, 10 ka 的半岁差周期实际表现为约 15~9 ka 的周期。

在时间域上, IMF1 分量与岁差理论值的波动存在对应关系(图 6), 0.6、0.7、0.8~0.9 和 0.95 MaBP 左右的 IMF1 高幅分量对应理论值的高幅波动, 其间 0.55、0.65、0.75、0.85、0.9 和 1.0 MaBP 左右的 IMF1 低幅分量对应理论值的低幅波动。IMF1 分量最大振幅波动为 80 单位左右, 可见它对磁化率整体的贡献是很明显的。

4.1.2 地轴倾斜周期 IMF2 分量的 FFT 平均周期为 41 ka, 显然为地轴倾斜模态。除此之外, 传统的 BT 法还检出了 50 ka 周期(图 5a), 在 IMF2 分量中, 它表现为约 1.05~0.7 MaBP 期间的高幅波动, 最大振幅 100 单位左右, 对磁化率整体的贡献是很大的(图 7)。Berger(1977)认为地轴倾斜率周期包括 54、41 和 31 ka, 所以检出的准 50 ka 周期可能是地轴倾斜周期。然而我们通过改变 BT 法中最大滞后相关长度发现, 50 ka 周期十分稳定, 并不能调整为约 54 ka 周期。位于南大洋亚极带的 ODP1090 站夏季海表温度(SSST)记录的谱分析结果显示, 1.8~1.2 和 1.2~0.6 MaBP 阶段存在非常明显的 50 ka 谱峰, 可以与低纬深海记录的 54 ka 周期对比

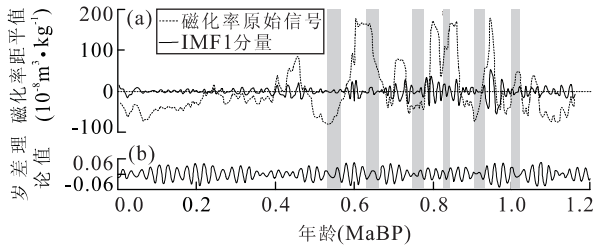


图 6 甘孜 A 剖面磁化率指标 EMD 分解的 IMF1 分量(a)与岁差理论值(b)的对比

Fig. 6 Susceptibility of the Garzê A section mode of IMF1 decomposed by EMD method (a) compared with orbital-precession (b)

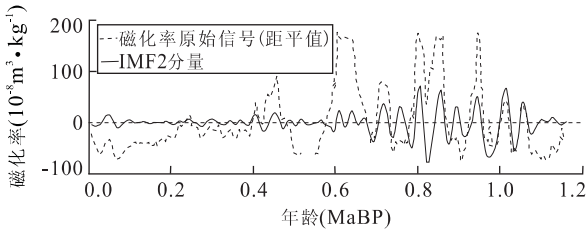


图 7 甘孜 A 剖面磁化率指标 EMD 分解的 IMF2 分量

Fig. 7 Susceptibility of the Garzê A section mode of IMF2 using EMD method

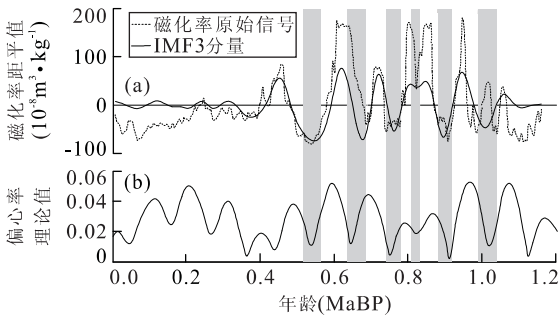


图 8 甘孜 A 剖面磁化率指标 EMD 分解的 IMF3 分量(a)与偏心率短周期理论值的对比(b)

Fig. 8 Susceptibility of the Garzê A section mode of IMF3 decomposed by the EMD method (a) compared with orbital eccentricity (b)

(Beccquey and Gersonde, 2002). 在我国东南季风影响下的宝鸡黄土剖面 0.8 MaBP 以来的磁化率记录(余志伟等, 1992)、南海北部 ODP1144 站(金海燕和翦知湓, 2008)、西南季风影响下的云南鹤庆湖相沉积记录(肖海丰等, 2006)中, 均检出约 50 ka 的主导周期。

4.1.3 偏心率短周期 IMF3 对应约 100 ka 偏心率短周期的波动(图 4)。IMF3 分量与偏心率理论值的对比(图 8)表明, 两者具有一致性, 尤其在 B/M 界限 (0.78 MaBP) 和 Jaramillo 底界年龄

(1.07 MaBP) 之间一致性最好。在峰谷值及波动过程的细节刻画上, IMF3 分量充分显示出 EMD 方法的“灵敏”优势。B/M 界限(0.78 MaBP) 以来, 只有 0.78 MaBP 和假定的 0 Ma 两个时间控制点, 故而降低了时间标尺的可靠性, 但 IMF3 分量的峰谷波动仍较明显。IMF3 分量 100 ka 周期最大振幅波动为 140 单位左右, 它对磁化率整体的贡献是最大的。

前人基于阿拉伯海 0.35 MaBP 以来的沉积记录所反映的印度洋季风演变似乎以 41 ka 和 23 ka 周期为主, 而不具备特征的 100 ka “冰量周期”(Clemens *et al.*, 1991)。IMF3 分量波形的时间域特征(图 8)及其对磁化率整体所具有的最大贡献, 揭示了 1.15 MaBP 以来川西黄土记录的西南季风演化中存在 100 ka 周期。西南季风影响下的云南鹤庆湖相沉积中(肖海丰等, 2006)亦检出约 100 ka 的主导周期。

4.1.4 准 200 ka 周期 IMF4 表示尺度约 200 ka 的周期波动(图 9); 对应功率谱分析的准 200 ka 周期(200 ka 和 160 ka)。虽然它在功率谱分析中没有通过 90% 置信度检验(图 5), 但这个周期是真实存在的(图 4)。200 ka 准周期已引起相关研究者的注意。Clemens and Tiedemann (1997) 在 1.2 ~ 5.2 MaBP 期间 ODP659 $\delta^{18}O$ 记录中曾发现过 202 ka 和 163 ka 的周期; 位于祁连山东段的沙沟剖面, 0.8 MaBP 以来中值粒径记录的约 200 ka 周期明显, 邬光剑(2001)认为此周期可能是 100 ka 冰量周期的变种; 黄土高原中部的长武剖面 0.90 Ma 以来的风尘铁含量具有一个约 160 ka 的周期(魏建晶和郭正堂, 2003); 灵台黄土剖面 0.42 MaBP 以来 $\delta^{13}C$ 曲线中检出 210 ka 的周期成分被认为可能是 10 个岁差周期(21 ka) 的组合周期(周斌, 2005)。Sun *et al.* (2006) 亦在灵台和赵家川黄土剖面石英粒度和磁化率记录中检出 164~225 的主要周期。南海南部 ODP1143 站 0.9 MaBP 以来放射虫指标的变化存在约 200 ka 的旋回周期(杨丽红等, 2002);

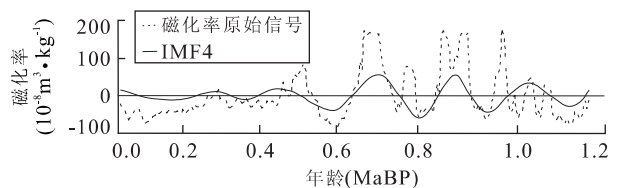


图 9 甘孜 A 剖面磁化率指标 EMD 分解的 IMF4 分量
Fig. 9 Susceptibility of the Garzê A section mode of IMF4 decomposed by EMD method

ODP1144 站 0.9~0.4 MaBP 期间氧同位素的 207 ka 周期振幅异常突出(金海燕和翦知潜, 2008). IMF4 分量准 200 ka 周期最大振幅波动为 100 单位左右, 对磁化率整体贡献很大.

关于准 200 ka 周期的成因鲜见讨论. 它到底是由轨道动力引起的, 还是源于非轨道因素? 这是一个不容忽视的成分, 一个需要进一步研究的问题.

4.1.5 其他长周期 IMF5 表示约 400 ka 周期的波动(图 4), 弱振幅时期大致分布在 1.1、0.75 和 0.40 Ma 左右, 基本对应约 400 ka 的偏心率长周期理论值. 偏心率的 100 ka 短周期和 405 ka 长周期在诸多地质记录中都有反映, 特别是来自深海钻孔的物理化学古气候指标. 很多古气候重大事件往往发生在偏心率周期的弱振幅时期, 表明弱振幅时期易受其他因素的干扰影响(李前裕等, 2005).

IMF6 中, 最低谷值发生在约 0.25 Ma, 最高峰值发生在约 0.75 Ma(图 4). 该模态在研究剖面中贡献不大, 可能来自 EMD 分解残差.

最后的趋势分量即 IMF7(图 4) 显示出整个剖面中期的明显暖湿及晚期气候的变冷. 研究表明, EMD 方法能相当好地提取非平稳信号的平均态, 这其实是 EMD 方法的一个意外收获(林振山和汪曙光, 2004a).

4.1.6 小结 EMD 分解与 FFT 结果显示, 在未经轨道调谐的时间标尺下, 同样检出岁差、地轴倾斜和偏心率的典型周期, 而且这些典型周期的时间域特征与相应轨道要素的理论值具有良好的可比性(图 6、图 8). 可见西南季风的演化明显受地球轨道要素控制, 这与同位于西南季风区的云南鹤庆深钻湖相沉积记录的研究结果一致(肖海丰等, 2006).

地质记录表明, 季风系统对太阳辐射的响应是非线性的, 即一定条件下季风系统只响应太阳辐射的高值部分. 反映到周期性上, 就是对于影响太阳辐射微弱的 100 ka 和 413 ka 的偏心率周期, 以及一些岁差的拍频周期(岁差/ N , $N=2, 3, \dots$), 如 11.5 ka (岁差/2), 7.6 ka (岁差/3) 等, 季风系统可以作出强烈的响应(Rutherford and Hondt, 2000; 田军和汪品先, 2006). 本剖面约 400 ka 周期、约 100 ka 周期和岁差、半岁差、1/3 岁差周期的集中出现, 指示了西南季风对太阳辐射的强烈非线性响应. 半岁差周期的起因被认为在热带地区(田军和汪品先, 2006). 岁差及其拍频周期在本剖面中的集中表现, 说明了西南季风具有热带特征. 所以, 西南季风演化的主要驱动因素可能是低纬太阳辐射.

4.2 EMD 的优势

到目前为止, 在 Milankovitch 周期的研究中, 频谱分析是最主要的方法之一, 它被广泛应用于各种古气候记录体系, 能获取到重要频率域特征, 揭示可能存在的物理过程及其因果关系. 这些频谱分析方法大多建立在傅立叶变换的基础上, 其优点是在频率域内获得非常高的分辨率, 但无法同时表现这些不同的周期成分在时间域的变化. 对于古气候研究而言, 了解不同周期成分随时间变化的过程是非常重要的, 它能够提供关于古气候系统的动态演化信息. 应用广泛的多尺度分析方法——小波分析, 能将信号在不同时间尺度上的变化以其在频率域里得到的幅度峰值表现出来, 但它不能得到完全分离的某个时间尺度上的变化分量, 海森堡测不准原理限制了其时域和频域精度的提高. 另外, 小波分析存在不能克服的缺陷, 如最优小波基的选取、变换层数的确定, 在不同小波基下处理所得的结果大不相同(高凤娇和宋立新, 2007). 逐渐受到关注的 EMD 方法是依据原始信号本身的固有特性进行分解的, 无须预先设定任何基函数. EMD 方法的最大突破点就是分解的 IMF 幅值允许改变, 其获得的是变化的振幅和频率, 而传统的谱分析方法是幅值不变的简谐信号为基函数的(李强等, 2007). 经 EMD 分解得到的 IMF 序列是直接来自原始数据中分离出来的, 事先无需确定分解阶次, 不受人为因素影响, 不存在机械分解. 因此, IMF 序列能更好地反映原始信号的固有物理特性, 每阶 IMF 序列都代表了某种特定意义的频带信息, 可准确地反映出物理过程中能量在时间上的分布(王祝文等, 2008). 原始地质记录的古环境时间序列是含有不同振幅不同频率成分的波动, 其幅值增减和频率变化与古环境条件有密切的关系. 所以, 以 EMD 方法为基础对其进行研究应该更切合实际.

谱分析能够检出的周期长度有赖于地质记录的时间跨度. 至 2003 年, 国际上海相记录中具有千年等级的分辨率而又上溯到 5 Ma 以上的长序列只有三处; 具有万年等级的分辨率而又上溯到 20 Ma 以上的长序列也只见三处(汪品先等, 2003), 中国南海 ODP184 航次在东沙附近建成全球唯一不经拼接的 23 Ma 同位素连续剖面(汪品先等, 2003), 传统谱分析检出的最长周期是 2 000 ka, 约为其地质记录时间跨度的 1/10; 中国黄土的最长时间序列为秦安中新世黄土记录, 传统谱分析检出的最长周期是 1 500 ka(魏建晶, 2003), 亦约为其地质记录时间跨

度的 1/10。由本文 IMF4、IMF5 和 IMF6 所获得的周期长度可以看出,EMD 能够使古环境时间序列的周期性研究对地质记录时间跨度的依赖性大大降低,最大甚至能获得约 1/3 时间跨度的长周期,这一优势是传统谱分析方法无法比拟的。EMD 方法能够在对长周期变化的分辨方面给出较高的精度(王卫强等,1999)。

总之,通过本文的尝试性工作可以看到,相对于传统谱分析方法而言,EMD 具有相当的优势。但要真正有效地在古环境研究中用好该方法,还应注意它的缺陷:(1)波动现象——因方法中多次用到三次样条函数,这可能会引起过冲或欠冲现象;(2)端点效应——端点效应的解决程度直接影响该方法的应用效果,解决得好,时频分析效果就好,否则结果可能不理想甚至是完全错误的(王祝文等,2008)。

5 结论

(1)从磁化率原始信号中分离出岁差 23 ka、地轴倾斜 41 ka、偏心率 100、400 ka 等典型轨道周期模态,说明西南季风的演化明显受天文因素控制。在岁差模态还出现了 11.4、7.5 ka 的拍频周期。400 ka 周期、100 ka 周期和岁差及其拍频周期的集中出现,指示了印度季风系统对太阳辐射的非线性响应;岁差极其拍频周期的出现,说明西南季风具有热带特征。西南季风演化的主要驱动因素可能是低纬太阳辐射。

(2)EMD 方法克服了其他一些方法的缺陷,其结果不受基函数影响与时频测不准原理限制,能够灵敏捕捉到信号随时间和频率动态变化的不同阶段的主要特征,而且大大降低了古气候周期研究对地质记录时间跨度的依赖性,比传统谱分析方法具有明显的优势。本文将 EMD 方法应用到第四纪黄土古气候替代指标周期的提取,仅是尝试。相信随着 EMD 方法的不断完善,它在古气候演变研究中将有更广泛的应用前景。

致谢:审稿专家的宝贵意见和建议使本文得以很大提高,谨致谢忱。

References

An, Z. S., Porter, S., Kukla, G., 1990. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau of Central China during the last 130 000 years. *Chinese Science Bulletin*, 35(7): 529—532 (in Chinese).

Becquey, S., Gersonde, R., 2002. Past hydrographic and climatic changes in the subantarctic zone of the South Atlantic—the Pleistocene record from ODP site 1090. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 182(3—4): 221—239. doi: 10.1016/S0031—0182(01)00497—7

Berger, A. L., 1977. Support for the astronomical theory of climatic change. *Nature*, 269: 44—45. doi: 10.1038/26904400

Clemens, S., Prell, W., Murray, D., et al., 1991. Forcing mechanisms of the Indian Ocean monsoon. *Nature*, 353: 720—725. doi: 10.1038/353720a0

Clemens, S. C., Tiedemann, R., 1997. Eccentricity forcing of Pliocene—Early Pleistocene climate revealed in a marine oxygen-isotope record. *Nature*, 385: 801—804. doi: 10.1038/385801a0

Ding, Z. L., Yu, Z. W., 1995. Forcing mechanisms of paleomonsoons over East Asia. *Quaternary Sciences*, (1): 63—74 (in Chinese with English abstract).

Fang, X. M., Chen, F. B., Shi, Y. F., et al., 1996. Ganzi loess and maximum glaciation on the Qinghai-Xizang Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 41(20): 1865—1867 (in Chinese).

Gao, F. J., Song, L. X., 2007. Research of a new multi-scale analysis method. *Application of Electronic Technique*, 33(9): 60—63 (in Chinese with English abstract).

Huang, E. Q., Tian, J., 2007. Early Pliocene precession rhythm of African monsoon and Mediterranean Sea surface productivity. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(3): 313—321 (in Chinese with English abstract).

Jiang, F. C., Wu, X. H., Xiao, H. G., et al., 1997. The Ganzi loess stratigraphy in the West Sichuan Plateau. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(4): 413—420 (in Chinese with English abstract).

Jin, H. Y., Jian, Z. M., 2008. Comparison of climate changes between northern and southern South China Sea during the Mid-Pleistocene climate transition period. *Quaternary Sciences*, 28(3): 381—390 (in Chinese with English abstract).

Kukla, G., Heller, F., Liu, X. M., et al., 1988. Pleistocene climates in China dated by magnetic susceptibility. *Geology*, 16(9): 811—814. doi: 10.1130/0091—7613(1988)016<0811:PCICDB>2.3.CO

Li, Q., Wu, J., Xu, Z. W., et al., 2007. Extracting of periodic components in the solar activity using EMD method. *Chinese Journal of Space Science*, 27(1): 1—6 (in Chinese with English abstract).

Li, Q. Y., Tian, J., Wang, P. X., 2005. Recognizing the stra-

- tigraphic and paleoclimatic significance of eccentricity cycles, *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(5): 519–528 (in Chinese with English abstract).
- Lin, Z. S., Wang, S. G., 2004a. EMD Analysis of northern hemisphere temperature variability during last 4 centuries. *Journal of Tropical Meteorology*, 20(1): 90–96 (in Chinese with English abstract).
- Lin, Z. S., Wang, S. G., 2004b. A study on the problem of 100 ka cycles of astroclimatology. *Chinese Journal of Geophysics*, 47(6): 971–975 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. S., Fang, N. Q., Ai, X. T., et al., 2005. Natural thermoluminescence characteristics of carbonate in deep sea cores. *Acta Oceanologica Sinica*, 27(1): 78–83 (in Chinese with English abstract).
- Pan, B. T., Wang, J. M., 1999. Loess record of Qinghai-Xizang Plateau monsoon variations in the eastern part of the plateau since the last interglacial. *Quaternary Sciences*, 4: 330–335 (in Chinese with English abstract).
- Qiao, Y. S., Liu, D. Y., Li, C. Z., et al., 2007. Magnetostratigraphy of a loess-soil sequence in the Garze area, western Sichuan. *Journal of Geomechanics*, 13(4): 289–296 (in Chinese with English abstract).
- Qiao, Y. S., Zhao, Z. Z., Wang, Y., et al., 2006. Magnetostratigraphy and its paleoclimatic significance of a loess-soil sequence from Ganzi area, West Sichuan Plateau. *Quaternary Sciences*, 26(2): 250–256 (in Chinese with English abstract).
- Rutherford, S., Hondt, S. D., 2000. Early onset and tropical forcing of 100 000 year Pleistocene glacial cycles. *Nature*, 408: 72–75. doi:10.1038/35040533
- Sun, Y. B., Clemens, S. C., An, Z. S., et al., 2006. Astronomical timescale and palaeoclimatic implication of stacked 3.6 Myr monsoon records from the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 25(1–2): 33–48. doi:10.1016/j.quascirev.2005.07.005
- Tian, J., Wang, P. X., 2006. Tropical process and its periodicity in the deep-sea records. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(6): 747–753 (in Chinese with English abstract).
- Tian, J., Wang, P. X., Cheng, X. R., 2004. Pleistocene precession forcing of the upper ocean structure variations of the southern South China Sea. *Progress in Natural Science*, 14(6): 683–688 (in Chinese).
- Wang, P. X., Zhao, Q. H., Jian, Z. M., et al., 2003. Thirty million years deep-sea records in the South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 48(21): 2206–2215 (in Chinese).
- Wang, W. Q., Chen, Z. Y., Zuo, J. C., 1999. Empirical mode decomposition method for study of the mean sea level variation along the China coast. *Acta Oceanologica Sinica*, 21(6): 102–109 (in Chinese).
- Wang, Z. W., Liu, J. H., Nie, C. Y., 2008. Time-frequency analysis of array acoustic logging waveform signal based on Hilbert-Huang transform. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(3): 387–392 (in Chinese with English abstract).
- Wei, J. J., 2003. Evolutionary cycles of paleoclimate recorded in Qin'an loess-paleosol sequence in Miocene (Dissertation). Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Wei, J. J., Guo, Z. T., 2003. Variation of dust iron content in the past 900 ka recorded in loess-paleosol sequences and its paleoclimatic implication. *Chinese Science Bulletin*, 48(11): 1214–1218 (in Chinese).
- Wu, G. J., 2001. Tectonic uplifts and climatic changes in eastern Qilian Mountains over the 0.8 Ma (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou (in Chinese with English abstract).
- Wu, H. B., Guo, Z. T., Fang, X. M., et al., 2002. Extension of drylands in northern China around 250 kaBP linked with uplift of the southeast margin of Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 47(17): 1341–1346. doi:10.1360/02tb9381 (in Chinese).
- Xiao, H. F., Shen, J., Xiao, X. Y., 2006. The orbital scale evolution of the southwest monsoon reflected by the Heqing core in Yunnan Province. *Quaternary Sciences*, 26(2): 274–282 (in Chinese with English abstract).
- Yan, M. D., Fang, X. M., Chen, S. Y., et al., 2001. Pleistocene magnetic susceptibility and paleomagnetism of the Tibetan loess and its implication on large climatic change events. *Science in China (Series D)*, 31(Suppl.): 182–186. doi:10.1007/BF02911991 (in Chinese).
- Yang, L. H., Chen, M. H., Wang, R. J., et al., 2002. Radio larian record to paleoecological environment change events over the past 1.2 MaBP in the southern South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 47(14): 1098–1102 (in Chinese).
- Yu, Z. W., Ding, Z. L., 2003. The coupling relation among the 100 000 years and the precessional, the half precessional cycles in the loess paleoclimatic records. *Science in China (Series D)*, 33(6): 520–528 (in Chinese).
- Yu, Z. W., Ding, Z. L., Liu, D. S., 1992. Preliminary study on climatic periodities recorded in Baoji loess section, Chinese Loess Plateau. *Chinese Journal of Geology*, (Suppl.):

270—278 (in Chinese with English abstract).

Zhou, B., 2005. The record of elemental carbon in the loess of Lingtai section since the Late Cenozoic and the environment and climate change (Dissertation). Chinese Academy of Sciences, Guangzhou (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 安芷生, Porter, S., Kukla, G., 1990. 最近 13 万年黄土高原季风变迁的磁化率证据. 科学通报, 35(7): 529—532.
- 丁仲礼, 余志伟, 1995. 第四纪时期东亚季风变化的动力机制. 第四纪研究, (1): 63—74.
- 方小敏, 陈富斌, 施雅风, 等, 1996. 甘孜黄土与青藏高原冰冻圈演化. 科学通报, 41(20): 1865—1867.
- 高凤娇, 宋立新, 2007. 一种新的多尺度分析方法的研究. 电子技术应用, 33(9): 60—63.
- 黄恩清, 田军, 2007. 上新世非洲季风与地中海表层生产力变化的岁差节律. 地球科学——中国地质大学学报, 32(3): 313—321.
- 蒋复初, 吴锡浩, 肖华国, 等, 1997. 川西高原甘孜黄土地层学. 地球学报, 18(4): 413—420.
- 金海燕, 翦知湓, 2008. 中更新世气候转型期南海北部和南部的气候变化差异. 第四纪研究, 28(3): 381—390.
- 李前裕, 田军, 汪品先, 2005. 认识偏心率周期的地层古气候意义. 地球科学——中国地质大学学报, 30(5): 519—528.
- 李强, 吴健, 许正文, 等, 2007. 利用 EMD 方法提取太阳活动周期成分. 空间科学学报, 27(1): 1—6.
- 林振山, 汪曙光, 2004a. 近四百年北半球气温变化的分析: EMD 方法的应用. 热带气象学报, 20(1): 90—96.
- 林振山, 汪曙光, 2004b. 天文气候学 10 万年问题的研究. 地球物理学报, 47(6): 971—975.
- 刘海生, 方念乔, 艾星涛, 等, 2005. 深海碳酸盐岩心天然热释光变化特征. 海洋学报, 27(1): 78—83.
- 潘保田, 王建民, 1999. 末次间冰期以来青藏高原东部季风演化的黄土沉积记录. 第四纪研究, 4: 330—335.
- 乔彦松, 刘冬雁, 李朝柱, 等, 2007. 川西甘孜地区黄土的磁性地层学研究. 地质力学学报, 13(4): 289—296.
- 乔彦松, 赵志中, 王燕, 等, 2006. 川西甘孜黄土磁性地层学研

究及其古气候意义. 第四纪研究, 26(2): 250—256.

- 田军, 汪品先, 2006. 深海记录中的热带过程及其周期性. 地球科学——中国地质大学学报, 31(6): 747—753.
- 田军, 汪品先, 成鑫荣, 2004. 更新世南海南部上层海水结构变化的岁差驱动. 自然科学进展, 14(6): 683—688.
- 汪品先, 赵泉鸿, 翦知湓, 等, 2003. 南海三千万年的深海记录. 科学通报, 48(21): 2206—2215.
- 王卫强, 陈宗镛, 左军成, 1999. 经验模态法在中国沿岸海面变化中的应用研究. 海洋学报, 21(6): 102—109.
- 王祝文, 刘菁华, 聂春燕, 2008. 基于 Hilbert-Huang 变换的阵列声波测井信号时频分析. 地球科学——中国地质大学学报, 33(3): 387—392.
- 魏建晶, 2003. 中新世秦安黄土—古土壤序列记录的古气候变化周期(博士学位论文). 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所.
- 魏建晶, 郭正堂, 2003. 900 ka 以来黄土—古土壤序列记录的风尘铁含量变化及其古气候意义. 科学通报, 48(11): 1214—1218.
- 邬光剑, 2001. 祁连山东段 0.8 Ma 以来的构造隆升与气候变化(博士学位论文). 兰州: 兰州大学.
- 吴海斌, 郭正堂, 方小敏, 等, 2002. 250 kaBP 前后中国北方干旱区的扩张及其原因. 科学通报, 47(17): 1341—1346.
- 肖海丰, 沈吉, 肖霞云, 2006. 云南鹤庆钻孔揭示的西南季风轨道尺度演化. 第四纪研究, 26(2): 274—282.
- 颜茂都, 方小敏, 陈诗越, 等, 2001. 青藏高原更新世黄土磁化率和磁性地层与高原重大气候变化事件. 中国科学(D 辑), 31(增刊): 182—186.
- 杨丽红, 陈木宏, 王汝建, 等, 2002. 南海南部 1.2 MaBP 以来古生态环境变化事件的放射虫记录. 科学通报, 47(14): 1098—1102.
- 余志伟, 丁仲礼, 2003. 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), 33(6): 520—528.
- 余志伟, 丁仲礼, 刘东生, 1992. 黄土记录的古气候周期性研究. 地质科学, (增刊): 270—278.
- 周斌, 2005. 晚新生代以来灵台黄土剖面元素碳记录与气候环境变化(博士学位论文). 广州: 中国科学院研究生院.