

泥河湾盆地基于粒度气候指标的 轨道调谐时间标尺

韩志勇^{1,2}, 李徐生¹

1. 南京大学城市与资源学系, 江苏南京 210093

2. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西西安 710075

摘要: 泥河湾盆地东部出露一套厚近百米的以湖相为主的地层。我们测量了洞沟剖面的粒度和磁化率, 通过磁化率记录的对比, 我们可以将前人确定的古地磁界线转移到我们的深度坐标上来, 并建立了初步的时间标尺。样品中粒径在 $20\sim 50\ \mu\text{m}$ 之间的颗粒含量时间序列可以与 ETP 曲线对比, 即低含量对应高 ETP 值。这样的对比意味着在北半球夏季太阳辐射量相对增加的时期, 进入泥河湾盆地沉积物中的风尘物质减少了。这与已知的北方风尘的演化历史是吻合的, 所以我们认为粒度 ($20\sim 50\ \mu\text{m}$) 含量是泥河湾盆地沉积物中比较可靠的古气候变化的替代性指标。对于沉积速率相对高的时段, 即 $>780\ \text{ka}$ 的地层, 我们尝试用轨道调谐的方法建立了高分辨率的时间标尺。新的粒度 ($20\sim 50\ \mu\text{m}$) 含量时间序列滤波获得的 $20\ \text{ka}$ 和 $41\ \text{ka}$ 的周期成分与岁差及地轴倾斜度的理论值可以重合。这显示洞沟剖面的粒度 ($20\sim 50\ \mu\text{m}$) 含量记录可以作为轨道调谐的气候曲线。

关键词: 泥河湾; 洞沟剖面; 粒度; 时间序列; 轨道调谐。

中图分类号: P532

文章编号: 1000-2383(2006)06-0773-07

收稿日期: 2006-05-12

Orbitally Tuned Time Scale Based on Climate Proxy Indicator of Grain Size Distribution in Nihewan Basin

HAN Zhi-yong^{1,2}, LI Xu-sheng¹

1. *Department of Urban and Resources Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China*

2. *State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China*

Abstract: The Donggou Section located in the east of Nihewan basin contains a suite of strata consisted mainly of lacustrine sediments approximate to 100 m thick. Both grain size distribution and magnetic susceptibility are measured in successive samples collected from this section. A preliminary time scale can be derived, based on the comparison between records of magnetic susceptibility, from the geomagnetic polarity reversals determined by previous studies. In this study, the grain ($20\sim 50\ \mu\text{m}$) content record of Donggou Section can be correlated to the ETP curve. The low value of the former is compared with the high value of the latter. This negative correlation implies that the dust inputs into sediments in the Nihewan basin decreases while the solar radiation on the north hemisphere increases. This scenario is compatible with the known evolution of the aeolian activity in North China. Therefore, the grain ($20\sim 50\ \mu\text{m}$) content is a reliable proxy indicator of the paleoclimate change. Orbital tuning method is performed and a time scale of high resolution is obtained for the strata older than $>780\ \text{ka}$ since the sedimentation rate here is relatively high. The $20\ \text{ka}$ and $41\ \text{ka}$ periodic components filtered from the obtained grain ($20\sim 50\ \mu\text{m}$) content time series are consistent with the theoretic cycles of the precession and the tilt, respectively, indicating that the grain ($20\sim 50\ \mu\text{m}$) content record of Donggou Section can be used as the climatic curve for orbital tuning.

Key words: Nihewan; Donggou Section; grain size; time series; orbital tuning.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40401006); 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金项目 (No. SKLLQG0303).

作者简介: 韩志勇 (1968—), 男, 副教授, 主要从事第四纪年代学研究. E-mail: zyhan@nju.edu.cn

湖相沉积物可以提供高分辨率的古气候变化的信息(Johnson *et al.*, 2002). 但相对于其它的地质记录,例如深海沉积物和黄土等,更新世的湖相沉积物研究通常受制于缺少高分辨率的时间标尺. 这一方面是因为,如果超出¹⁴C 法的测年范围,一般就难以获得高精度的同位素年龄. 所以,对于长时间尺度的湖相沉积剖面,一般只能依靠古地磁测量获得的几个界线年龄,为整个剖面提供大致的年代框架(Kravchinsky *et al.*, 2003). 另一方面,湖相沉积物中难以提取比较明确的气候变化的替代性指标,这使得通过气候记录对比的方法建立时间标尺的努力受到影响(Chen *et al.*, 1999; Hu *et al.*, 2005),直接应用轨道调谐的方法建立时间标尺的研究就更少了(刘泽纯等,2000).

位于河北西北部的泥河湾盆地,堆积了巨厚的以湖相为主的第四纪沉积物,蕴涵着丰富的古生物、古人类和古气候的信息,地层的时代问题很早就吸引了众多关注的目光. 盆地的东部,出露了厚达百米的地层,适合进行高分辨率的时间标尺研究. 在这里相继发掘出了一系列的旧石器遗址,最新的研究结果将人类最早到达东北亚的时代后推到 1 Ma 以前(Zhu *et al.*, 2001, 2004). 无论是进一步的古人类学研究,还是古气候研究等,都要求高分辨率的时间标尺.

源自我国北方干旱、半干旱地区的风尘受天气系统的控制,被气流携带并沉降于广大的地区(Pye and Zhou, 1989). 气下的风尘堆积形成黄土—古土壤序列,它是古气候变化的良好载体(Ding *et al.*, 1995; Lu *et al.*, 1999; Guo *et al.*, 2000),使用轨道调谐的方法可以为黄土剖面建立高分辨率的时间标尺(Ding *et al.*, 1994; Lu *et al.*, 1999; Heslop *et al.*, 2000). 泥河湾盆地就位于黄土堆积区,所以也会接受风尘沉积. 如果可以从沉积物中提取出风尘的信息,也就找到了可靠的古气候变化的替代性指标. 最近的研究显示,泥河湾盆地的沉积物可以与北方黄土及海洋沉积物对比(杨晓强和李华梅,1999; Han *et al.*, 2002). 同时,某些测量指标的时间序列显示地球轨道尺度的周期性变化(迟振卿等,2002). 有鉴于此,我们决定选取泥河湾盆地东部的洞沟剖面为研究对象,探讨沉积物中粒度含量的气候意义,并尝试利用轨道调谐的方法建立高分辨率的时间标尺.

1 剖面与测量

洞沟剖面位于河北省阳原县钱家沙洼村附近,

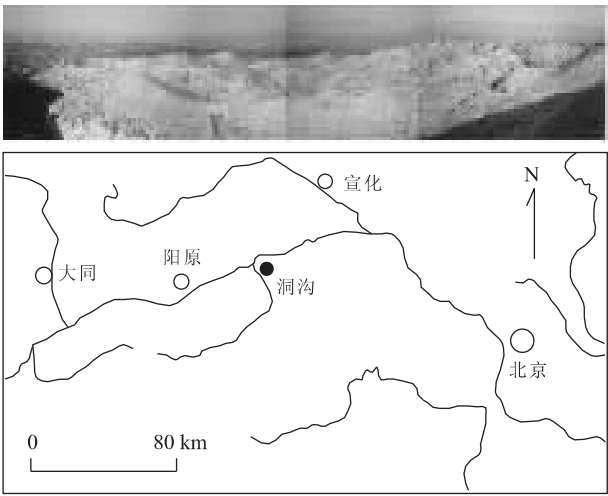


图 1 洞沟剖面照片及其位置图

Fig. 1 Location map and the photo showing Donggou Section. 照片右边为近水平的台地,也就是剖面的顶部,照片左边为剖面的底部;镜头大致向西

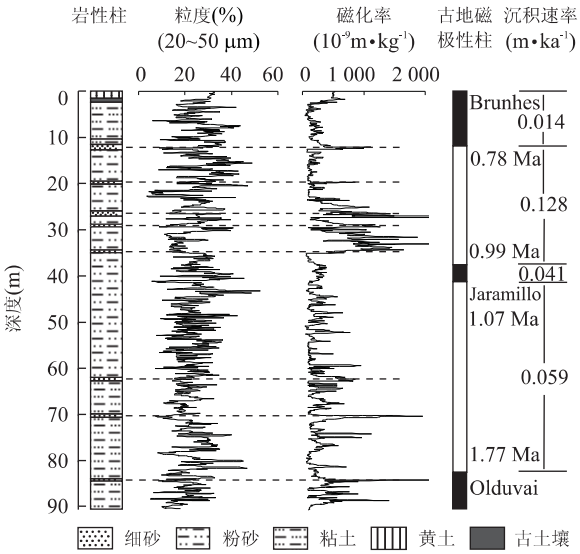


图 2 洞沟剖面的粒度和磁化率的测量值随深度的变化曲线

Fig. 2 Variation curve of grain (20—50 μm) content and magnetic susceptibility of Donggou Section. 虚线指示剖面中砂层的位置;古地磁极性柱是前人的研究结果(Zhu *et al.*, 2001),这里是根据磁化率曲线对比而确定其位置的(详见后文);各段的沉积速率是按古地磁界线的年龄计算的

即在郝家台—官厅一带的台地西侧. 洞沟是一个大体东西向延伸的冲沟(图 1). 台地顶面海拔约 950 m,沟口约 850 m. 露头显示,这里的地层水平,地层基本连续,未发现明显的侵蚀间断面. 可供测量的地层厚约 90 m,为一套灰绿、灰黄色、灰白色的泥砂质沉积,主要属湖相. 顶部是 1.5 m 的末次冰期黄

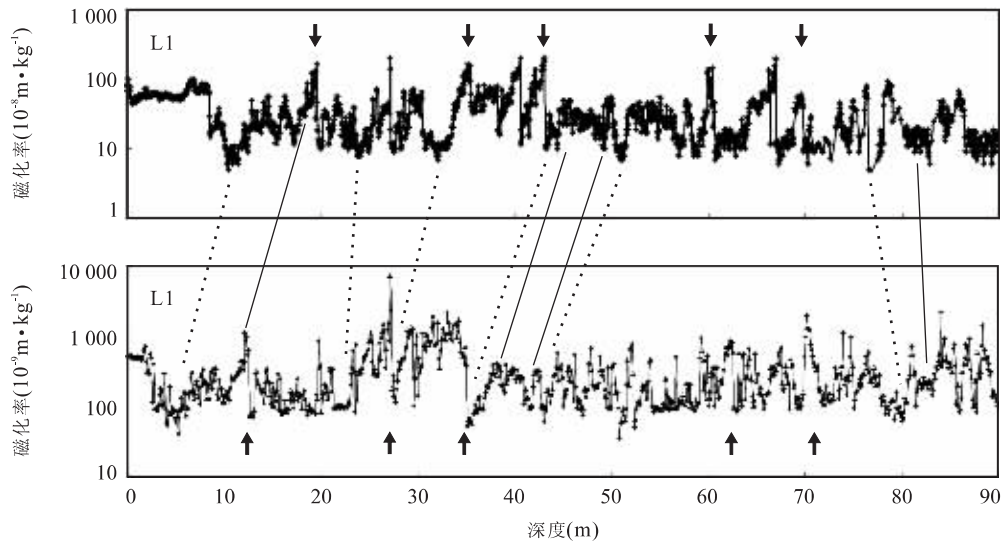


图 3 本次研究获得的磁化率曲线(下图)与前人的(上图)的对比

Fig. 3 Correlation of the magnetic susceptibility curve of Donggou Section (lower) with that obtained by another study (upper) (Zhu *et al.* , 2001)

虚线指示主要的对比点;箭头为洞沟剖面中主要的砂层的位置;实线指示古地磁界线的位置

土(L1)和 0.3 m 的末次间冰期古土壤(S1).

我们的取样间距为 10 cm, 每个样品的跨度一般为 2 cm, 少量约为 3 cm. 所取样品约几十克. 样品经风干, 在不破坏矿物颗粒的前提下, 研磨使之分散并混合均匀. 我们使用卡帕桥(KLY-3)测量了样品的质量磁化率. 粒度测量在中国科学院地质与地球物理研究所粒度分析实验室进行. 每个样品取大约 0.2 g, 首先采用 10~20 mL 的 30% H₂O₂ 去除有机物, 然后样品用 10 mL 的 10% HCl 浸泡超过 24 h, 最后加入 10 mL 的 0.05 M 的六偏磷酸钠, 并超声波震荡 10 min. 所使用的激光粒度仪为 Mastersizer 2000. 测量结果显示, 沉积物粒度细的, 其磁化率就低, 所以剖面中砂层基本对应于高值段(图 2).

2 基于粒度指标的轨道调谐时间标尺的建立

2.1 初步的时间标尺

前人的研究揭示洞沟剖面记录了 Brunhes 极性时、Jaramillo 和 Olduvai 极性亚时 (Zhu *et al.* , 2001). 为确定各古地磁界线在剖面上的位置, 我们利用了磁化率曲线对比的方法, 将我们所测的磁化率曲线与前人的对比, 就可以比较准确地将前人的古地磁界线深度转移到我们的剖面深度坐标上来(图 3). 对比的结果表明, 各古地磁界线的深度自上

而下分别大约为 10.9 m(780 ka)、37.7 m(990 ka)、41 m(1 070 ka)及 82.3 m(1 770 ka).

因为剖面顶部未发现全新世的土壤, 所以将末次冰期黄土(L1)顶部(0 m)的年龄初步定为 10 ka. 这样, 我们在整个剖面上获得了 5 个时间控制点. 在此基础上, 采用线性内插及外推法计算出其他深度的年龄, 最后建立了洞沟剖面初步的时间标尺.

按照获得的深度与年龄关系, 我们计算了古地磁界线之间的平均沉积速率. 结果发现, 自上而下, 4 段的沉积速率分别是 0.014、0.128、0.041 和 0.059 m/ka. 大体上, 按沉积速率洞沟剖面可以分为 3 个阶段. 晚期阶段(<780 ka)的沉积速率最低, 中期阶段(780~990 ka)的沉积速率最高, 后者大约是前者的 9 倍, 早期阶段(>990 ka)的沉积速率介于前两者之间. 这个随时间变化的沉积速率, 可能反映了盆地的演化过程. 沉积速率过低不利于轨道调谐法的应用. 例如, ODP667 孔在过去 2 Ma 里的平均沉积速率大约是 0.043 m/ka(Shackleton *et al.* , 1990), 同样时间里黄土—古土壤序列的沉积速率大约是 0.066 m/ka(Heslop *et al.* , 2000). 由此看来, 洞沟剖面晚期阶段(<780 ka)的沉积速率偏低, 同时因为该段顶部出现非湖相的沉积物, 所以这个时段的记录没有被考虑.

2.2 粒度(20~50 μm)含量的气候意义

我们的研究集中在中期阶段和早期阶段. 按初

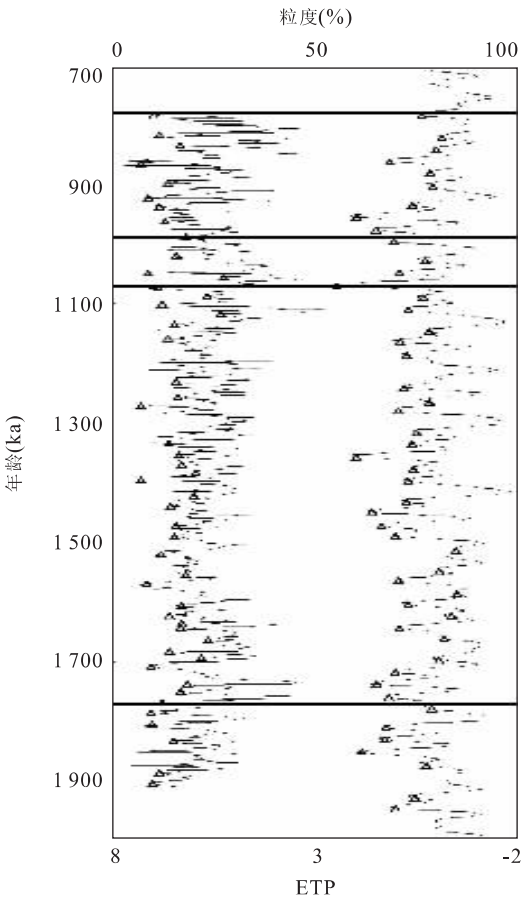


图 4 洞沟剖面初步的粒度(20~50 μm)含量时间序列与 ETP 曲线的对比

Fig. 4 Correlation of the preliminary time series of Donggou grain (20—50 μm) content with ETP curve
黑色的条带指示古地磁界线;三角指示 49 个对比点

步的时间标尺,我们发现粒度(20~50 μm)含量曲线与 ETP 曲线(见后面的解释)有很大相似性(图 4). 首先,我们发现 4 个古地磁界线附近的粒度含量接近低谷,与此相对应的 ETP 值则靠近高峰. 所以我们可以推测洞沟剖面的粒度含量与 ETP 曲线可能呈反相的关系. 接着,我们检查了曲线的其他部分,结果发现这样的反相的对比关系确实比较明显,表现为主要的粒度含量曲线的谷都可以对比到 ETP 曲线上的峰,甚至多数区段的曲线形态还是相似的.

至于为何两者之间存在这样的对比关系,我们认为完全可以根据已有的研究成果来解释. 粒径在 20~50 μm 之间的颗粒是北方黄土的主要成分. 典型的黄土粒径范围是 0~250 μm ,而主要的模式粒径是 16~32 μm (Sun *et al.*, 2002). 泥河湾盆地处于黄土堆积区,盆地的湖相沉积物中应该含有相当多的风尘物质. 以沉积厚度较大的盆地中部为例,

2 Ma里累积的沉积物厚度大约是 200 m(闵隆瑞等, 2000),考虑到黄土高原及临区在此期间沉积的黄土厚度也有大约 100 m(熊尚发等, 1999),且目前在盆地的汇水区域内几乎没有黄土堆积,所以有理由相信,湖相沉积物中的大多数颗粒(20~50 μm)是风尘成因的. 但由于水动力对粒度含量也有影响,所以目前还无法定量地估计沉积物中风尘的比例.

地球轨道三要素,即偏心率、地轴倾斜度和岁差的变化可以导致抵达地球的太阳辐射量有规律地发生变化,越来越多的证据表明这可能是古气候变化的外在驱动力. 一般认为,北半球高纬度夏季的太阳辐射量的变化是至关重要的,这决定了全球冰量的变化,而后者是东亚季风的变迁原因(Sun *et al.*, 2002). ETP 值较低使得全球冰量的增加,这会导致东亚冬季风的增强,引起北方干旱、半干旱区的风蚀作用的加强,造成黄土堆积区风尘堆积量增加(An *et al.*, 1990). 相应地,这个时期形成的沉积物中风尘物质的比例增加了(Hovan *et al.*, 1989; Kohfeld and Harrison, 2003). 所以可以推断,这个时期泥河湾盆地的沉积物中风尘物质所占比例就高. 相反的情况出现在全球冰量较低的阶段,也就是说,ETP 值较高的时期,泥河湾盆地沉积物中风尘所占比例就低. 我们观察到的情况正是如此.

2.3 基于粒度指标的轨道调谐

轨道调谐法需要建立气候曲线和靶函数. 我们使用洞沟剖面的粒度(20~50 μm)含量作为气候曲线. 前面的分析表明,粒度(20~50 μm)含量具有明确的气候意义,能够反映地球轨道尺度的气候变化. 至于靶函数,我们将依理论计算获得的地球轨道三要素的数据(Berger and Loutre, 1991),分别做了正规化处理,然后按(E+T-P)的公式算出 ETP 曲线. 之所以这样计算 ETP,是因为以下几个方面的考虑. 首先,谱分析显示,初步的粒度(20~50 μm)含量时间序列含有 100 ka 的周期,所以需要考虑偏心率的贡献. 其次,我们目前还不能定量估计三要素贡献的大小,所以就赋予它们相同的权重. 最后,岁差值的大小与其他两要素的数值大小对北半球太阳辐射量的贡献是不同的. 前者的值最大时,北半球夏季的太阳辐射量相对减少,而后两者的值最大时,北半球高纬度地区的太阳辐射量相对增加. 因为气候系统对太阳辐射量的变化的响应会滞后,同时不同的气候周期滞后的时间不一致. 目前还没有湖相沉积物中气候对地球轨道周期响应滞后程度的估计,

黄土剖面的研究沿用深海沉积物中气候对地轴倾斜度和岁差的响应滞后时间,两者分别滞后大约 8 ka 和 5 ka(丁仲礼等,1991). 我们也采用这个相位差.

数学处理借助软件 AnalySeries (Paillard *et al.*, 1996). 与一般的轨道调谐不同,我们的处理目的不是为了获得最佳的气候曲线与靶函数的匹配,而是希望以前面所展示的对比方案为基础,检查这样的匹配能够获得怎样的结果. 首先采用目视的方法,将主要的粒度(20~50 μm)含量曲线的谷对比到主要的 ETP 曲线的峰. 然后将每一区段的其他的粒度(20~50 μm)含量曲线的谷分别对比到相应的 ETP 曲线的峰. 值得注意的是,所有的对比点都是粒度(20~50 μm)含量曲线的谷与 ETP 曲线的峰. 这样,我们一共加入了 49 个时间控制点(图 4),根据滤波的结果,仅对少量目视对比没有把握的时间控制点略作调整.

3 讨论

经过了数次调整,就得到了最终的粒度(20~50 μm)含量时间序列. 采用 linear function 的 integration 方法重新构建等距的时间序列,经 remove linear trend 和 normalized to unit variance 处理,使用 B-Tukey 法滤波. 滤波使用的 window type 是 Bartlett, band width 是 0.002 63. 轨道三要素的 Tukey 滤波与理论计算对比有以下特征:岁差和地轴倾斜度与滤波得到的相应的周期成分可以重叠,没有发现峰谷存在出入的情况,而且滤波曲线的相对变化幅度与理论的也大体一致(图 5). 部分滤波的峰谷与地轴倾斜度的理论曲线相比有一些偏差,但均小于 10 ka. 偏心率与滤波得到的相应的周期成分关系就复杂了,在 780~1600 ka 时间段内,两者呈反相的关系,在此以前则是正相的关系. 类似的情况在黄土的研究中也出现(丁仲礼等,1991),这可能是 100 ka 左右的周期并不是偏心率变化直接引起的,而是其他因素所导致的(King, 1996; Clemens and Tiedemann, 1997; Rial, 1999).

为了验证轨道调谐的结果,我们也对粒度(20~50 μm)含量时间序列与 ETP 曲线做了交叉谱分析(参数同滤波分析). ETP 曲线除显示主要的地球轨道三要素的周期外,也显示 29 ka 和 54 ka 的周期,不过谱密度较小(图 6). 粒度(20~50 μm)含量时间序列显示出比较明显的 19 ka 和 41 ka 的周期,而 23 ka 和

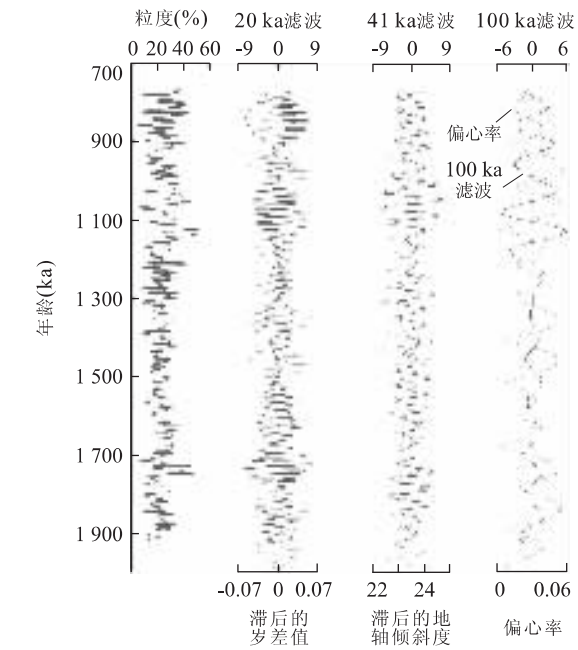


图 5 洞沟剖面轨道调谐时间标尺及滤波分析
Fig. 5 Orbitally tuned time scale of Donggou Section and filtered periods compared to calculated orbital parameter curves

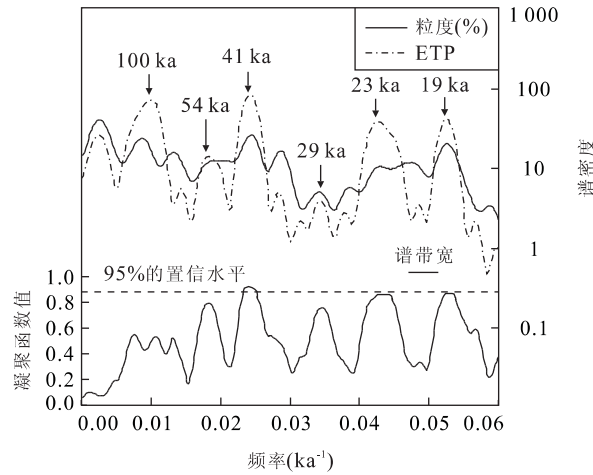


图 6 洞沟剖面粒度(20~50 μm)含量时间序列与 ETP 曲线的交叉谱分析
Fig. 6 Cross spectral analysis between time series of Donggou grain (20 — 50 μm) content and ETP curve

100 ka 的周期相对不太明显. 粒度(20~50 μm)含量时间序列与 ETP 曲线在 19 ka、23 ka 和 41 ka 的周期上凝聚函数值较高,但 100 ka 的周期上的凝聚函数值就较低. 相比之下,29 ka 和 54 ka 的周期上的凝聚函数值还比较高. 交叉谱分析表明两个记录具有可比性. 也就是说,将我们所构建的气候曲线与靶函

数对比是可以接受的。

由于我们在轨道调谐过程中尽可能减少了不确定因素的引入,例如,不加入违背基本峰谷对应关系的时间控制点,所以,得到的粒度($20\sim 50\ \mu\text{m}$)含量时间序列可以较多地反映实际的气候变化。如果粒度($20\sim 50\ \mu\text{m}$)含量可以被视为风尘通量的替代性指标,那么可以说,780~1 900 ka 之间的入湖风尘通量是受地球轨道三要素控制的。

对于时代跨度大的泥河湾盆地的沉积物,必须依靠详细的古地磁测量提供最基本的年代框架。按前人将小长梁旧石器遗址层位对比到洞沟剖面上的方案(Zhu *et al.*, 2001),遗址层位在洞沟剖面的深度是 65.8 m,则新的时间标尺指示小长梁旧石器遗址的年龄是 1 490 ka。这个数据与作者的另一项研究的结果是吻合的,这项研究通过将洞沟剖面与北方黄土剖面对比,估计出遗址层位的年龄应该是 1 467~1 539 ka(尚未发表)。根据古地磁界线年龄按平均沉积速率计算获得的年龄是 1 360 ka(Zhu *et al.*, 2001),我们的年龄比其略大。

我们使用轨道调谐法建立的时间标尺,应该是可靠的。这一方法可以成为泥河湾盆地沉积物测年的新选择。需要说明的是,如果地层中存在沉积间断、缺失,或者沉积速率变化剧烈,那么这样的剖面是不适合做轨道调谐法测年的。不过,假如剖面的部分区段符合条件,仍可以实施高分辨率的轨道调谐法测年。如果能将这一方法应用于邻近的剖面,就可以为众多含古人类遗址的层位的年代确定及相互对比提供一个新途径。

4 结论

泥河湾盆地东部洞沟剖面的粒度分析表明,湖相沉积物的粒度($20\sim 50\ \mu\text{m}$)含量记录可以与 ETP 曲线对比,较高的粒度含量出现在 ETP 值较低的时段,也就是北半球夏季太阳辐射量较低的时段,相当于北方黄土的堆积阶段。所以我们认为粒度含量记录可以用作气候曲线,对其进行轨道调谐就可以为沉积剖面建立高分辨率的时间标尺。

通过轨道调谐我们获得了 780~1 900 ka 之间的粒度含量时间序列。它显示了明显的地轴倾斜度和岁差周期的变化,表明湖相沉积物在此时间尺度上对古气候变化还是敏感的。但 100 ka 的周期成分与偏心率没有特定的对应关系,暗示偏心率变化并

非该时段沉积物中气候变化的直接驱动因素。

References

- An, Z. S., Liu, T. S., Lou, Y. C., et al., 1990. The long-term palaeomonsoon variation recorded by the loess-paleosol sequence in central China. *Quat. Int.*, 7(8): 91–95.
- Berger, A., Loutre, M. F., 1991. Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quat. Sci. Rev.*, 10: 297–317.
- Chen, F. H., Bloemendal, J., Zhang, P. Z., et al., 1999. An 800 ka proxy record of climate from lake sediments of the Zoige basin, eastern Tibetan plateau. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 151: 307–320.
- Chi, Z. Q., Min, L. R., Zhu, G. X., et al., 2002. Paleoclimatic periodicities recorded in Nihewan lacustrine deposits, Hebei Province, North China. *Earth Science Frontiers*, 9(1): 182–186 (in Chinese with English abstract).
- Clemens, S. C., Tiedemann, R., 1997. Eccentricity forcing of Pliocene-Early Pleistocene climate revealed in a marine oxygen-isotope record. *Nature*, 385: 801–804.
- Ding, Z. L., Liu, T. S., Rutter, N. W., et al., 1995. Ice-volume forcing of east Asian winter monsoon variations in the past 800 000 years. *Quat. Res.*, 44: 149–159.
- Ding, Z. L., Yu, Z. W., Liu, D. S., 1991. Process in loess research (Part 3): Time scale. *Quaternary Sciences*, (4): 336–348 (in Chinese with English abstract).
- Ding, Z. L., Yu, Z. W., Rutter, N. W., et al., 1994. Towards an orbital time scale for Chinese loess deposits. *Quat. Sci. Rev.*, 13: 39–70.
- Guo, Z. T., Biscaye, P., Wei, L. Y., et al., 2000. Summer monsoon variations over the last 1.2 Ma from the weathering of loess-soil sequences in China. *Geophys. Res. Lett.*, 27(12): 1751–1754.
- Han, Z. Y., Liu, D. Y., Hovan, S. A., 2002. Lightness time scale for terrestrial sediments in loess deposit area in the past 500 000 years. *Paleoceanography*, 17: 1048, doi:10.1029/2001PA000731.
- Heslop, D., Langereis, C. G., Dekkers, M. J., 2000. A new astronomical timescale for the loess deposits of Northern China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 184: 125–139.
- Hovan, S. A., Rea, D. K., Pisias, N. G., et al., 1989. A direct link between the China loess and marine $\delta^{18}\text{O}$ records: Aeolian flux to the north Pacific. *Nature*, 340: 296–298.
- Hu, S., Goddu, S. R., Appel, E., et al., 2005. Palaeoclimatic changes over the past 1 million years derived from la-

- custrine sediments of Heqing basin (Yunnan, China). *Quat. Int.*, 136: 123—129.
- Johnson, T. C., Brown, E. T., McManus, J., 2002. A high-resolution paleoclimate record spanning the past 25 000 years in southern East Africa. *Science*, 296: 113—132.
- King, T., 1996. Quantifying non-linearity and geometry in time series of climate. *Quat. Sci. Rev.*, 15: 247—266.
- Kohfeld, K. E., Harrison, S. P., 2003. Glacial-interglacial changes in dust deposition on the Chinese Loess plateau. *Quat. Sci. Rev.*, 22: 1859—1878.
- Kravchinsky, V. A., Krainov, M. A., Evans, M. E., et al., 2003. Magnetic record of Lake Baikal sediments; Chronological and paleoclimatic implication for the last 6.7 Myr. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 195: 281—298.
- Liu, Z. C., Chen, Y., Yuan, L. W., et al., 2000. Deducing the paleoclimate change during the past 2.85 Ma by using the natural gamma-ray hole logging curve. *Science in China (Series D)*, 30(6): 509—618 (in Chinese).
- Lu, H. Y., Liu, X. D., Zhang, F. Q., et al., 1999. Astronomical calibration of loess-paleosol deposits at Luochuan, central Chinese Loess plateau. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 154: 237—246.
- Lu, H. Y., Van Huissteden, K., An, Z. S., et al., 1999. East Asia winter monsoon variations on a millennial time-scale before the last glacial-interglacial cycle. *J. Quaternary Sciences*, 14: 101—110.
- Min, L. R., Chi, Z. Q., Zhu, G. X., 2000. Division of Quaternary lacustrine beds in Jingerwa borehole of the Yangyuan basin. *Acta Geologica Sinica*, 74(2): 108—115 (in Chinese with English abstract).
- Paillard, D., Labeyrie, L., Yiou, P., 1996. Macintosh program performs time-series analysis. *EOS Trans. AGU*, 77: 379.
- Pye, K., Zhou, L., 1989. Late Pleistocene and Holocene aeolian dust deposition in north China and the northwest Pacific Ocean. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 73: 11—23.
- Rial, J., 1999. Pacemaking the ice ages by frequency modulation of earth's orbital eccentricity. *Science*, 285: 564—568.
- Shackleton, N. J., Berger, A., Peltier, W. R., 1990. An alternative astronomical calibration of the lower Pleistocene timescale based on ODP Site 677. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 81: 251—261.
- Sun, D., Bloemendal, J., Rea, D. K., et al., 2002. Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments, and numerical partitioning of the sedimentary components. *Sediment. Geol.*, 152: 263—277.
- Xiong, S. F., Ding, Z. L., Liu, D. S., 1999. Loess deposits in Beijing region since last 1.2 Ma and desert expansion over northern China. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 19(3): 68—73 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. Q., Li, H. M., 1999. The sediment susceptibility and grain-size profile respond to change of depositional environment in Nihewan basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17 (Suppl.): 763—768 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, R. X., Hoffman, K. A., Potts, R., et al., 2001. Earliest presence of humans in northeast Asia. *Nature*, 413: 413—417.
- Zhu, R. X., Potts, R., Xie F., et al., 2004. New evidence on the earliest human presence at high northern latitudes in northeast Asian. *Nature*, 431: 559—562.

附中文参考文献

- 迟振卿, 闵隆瑞, 朱关祥, 等, 2002. 泥河湾湖相沉积层记录的古气候周期性. *地学前缘*, 9(1): 182—186.
- 丁仲礼, 余志伟, 刘东生, 1991. 中国黄土研究新进展(三): 时间标尺. *第四纪研究*, (4): 336—348.
- 刘泽纯, 陈晔, 袁林旺, 等, 2000. 应用自然伽玛测井曲线反演 2.85 MaBP 来的古气候变化. *中国科学(D 辑)*, 30(6): 509—618.
- 闵隆瑞, 迟振卿, 朱关祥, 2000. 从井儿洼孔岩心看阳原盆地第四纪湖相层的划分. *地质学报*, 74(2): 108—115.
- 熊尚发, 丁仲礼, 刘东生, 1999. 北京郊区 1.2 Ma 以来黄土沉积及其对东部沙漠扩张的指示. *海洋地质与第四纪地质*, 19(3): 68—73.
- 杨晓强, 李华梅, 1999. 泥河湾盆地沉积物磁化率及粒度参数对沉积环境的响应. *沉积学报*, 17(增刊): 763—768.