论文

晚渐新世-早中新世气候变化在赤道大西洋的天文响应

邹卓延^①, 黄春菊^{①*}, 李明松^{①②}, 张杨^{①③}^① 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 生物地质与环境地质国家重点实验室, 武汉 430074;^② Department of Earth and Planetary Sciences, Johns Hopkins University, Baltimore 21218, USA;^③ Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Purdue University, West Lafayette 47907-2051, USA

* 通讯作者, E-mail: huangcj@cug.edu.cn

收稿日期: 2015-12-12; 接受日期: 2016-03-10; 网络版发表日期: 2016-08-25

国家自然科学基金项目(批准号: 41322013)、高等学校学科创新引智计划项目(编号: B14031)和国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2012CB822003)资助

摘要 从晚渐新世到早中新世转换时期, 大气二氧化碳浓度降低, 极地冰盖扩张, 全球海平面大幅下降等现象表征的全球性极端气候变冷事件, 其发生的原因和机制至今仍存在争议. 本文选取赤道大西洋 ODP154 航次的 926 站为研究对象, 该钻孔的地层记录主要以浅灰色含有孔虫的超微化石白垩软泥与绿灰色的黏土质的超微化石白垩软泥互层沉积为主, 从岩芯上可见明显的浅灰色(碳酸钙含量高达 80%)-灰绿色(碳酸钙含量 60%左右)的米级旋回, 据此本文选用能反映碳酸钙含量变化的颜色反射率亮度为古气候替代性指标, 对沉积记录进行旋回分析. 通过对识别出来的 405kyr 长偏心率旋回与~40kyr 斜率旋回分别进行天文调谐, 以渐新世与中新世转换界线处为绝对年龄控制点建立该钻孔的绝对天文年代标尺. 通过对时间域序列的亮度指标的频谱变化分析, 观察到从晚渐新世到早中新世沉积记录中偏心率周期信号减弱, 而斜率周期信号增强; 并且在界线处 405kyr 偏心率周期与~1.2Myr 斜率长周期极小值重合, 这可能与这一时期的极端气候变冷事件有关. 此外, 沉积物堆积速率、底栖有孔虫氧同位素及西班牙中部啮齿类动物演替速率都具有~2Myr 的变化周期, 这或许说明了百万年尺度的地球轨道周期对于地球系统及生态演化有着重要的影响.

关键词 晚渐新世-早中新世, ODP926站, 亮度指标, 天文年代标尺, 天文轨道驱动

1 引言

渐新世与中新世之交是一全球性气候变冷时期, 深海氧同位素记录了这一被称为Miocene isotope 1

(Mi-1)的降温事件(Miller等, 1991; Zachos等, 1997; Billups等, 2002; Tian等, 2008). Mi-1时期, 底栖有孔虫稳定氧同位素呈现正偏, 大气二氧化碳浓度降低,

中文引用格式: 邹卓延, 黄春菊, 李明松, 张杨. 2016. 晚渐新世-早中新世气候变化在赤道大西洋的天文响应. 中国科学: 地球科学, 46: 1231-1240, doi: 10.1360/N072015-00371

英文引用格式: Zou Z Y, Huang C J, Li M S, Zhang Y. 2016. Climate change response to astronomical forcing during the Oligocene-Miocene transition in the equatorial Atlantic (ODP Site 926). Science China Earth Sciences, 59: 1665-1673, doi: 10.1007/s11430-016-5311-y

南极冰盖扩张,同时北极冰盖可能也开始发育,全球海平面大幅下降(Naish等, 2001; Zachos等, 2001a; Miller等, 2005; Pagani等, 2005; Hyeong等, 2014). 在这一时期,生物演替频繁(Wade等, 2011),海水中温水动物群被冷水动物群所代替(Spezzaferri, 1995),大洋古生产力则达到峰值(Diester-Haass等, 2011). 大陆植被结构也发生了演变,部分中高纬度地区的植被结构由森林主导逐渐向灌木和草本植物演变(Akgün等, 2007; Barreda和Palazzesi, 2007).

针对渐新世-中新世转换气候大幅度波动的成因机制,前人作了多种解释,包括构造运动、洋流格局变迁和天文因素等(Raymo和Ruddimann, 1992; Zachos等, 2001a, 2001b; Ruddiman, 2008). Mi-1降温事件在全球都有不同程度的响应(Rasmussen, 2004; Dunai等, 2005),从地球系统科学角度将这些信息综合起来,对人类更好地理解将来地球气候环境的演变具有重大意义(田军, 2009). 本文通过选取颜色反射率的亮度作为古气候替代指标,利用天文旋回原理,分析获取古气候变化中蕴含的轨道周期信息并

对古气候替代指标序列进行天文轨道调谐,从而获得高精度的连续天文年代标尺(黄春菊, 2014),在此基础上,分析Mi-1事件前后天文轨道周期的变化特征及沉积速率的变化规律,进而探讨其发生的可能驱动机制.

2 材料和方法

2.1 研究材料

深海大洋钻探154航次的926站(简称ODP926站)(3°43.148'N, 42°54.507'W, 水深3598m)位于塞阿拉高地(Ceara Rise)南侧(图1a),共钻取了三个钻孔,组成的综合剖面最大深度为606m,本文选取B钻孔350~604m作为研究段. 该站位的主要沉积物为浅灰色含有孔虫的超微化石白垩软泥和与绿灰色的黏土质的超微化石白垩软泥互层沉积,相对于晚渐新世,早中新世沉积物中生物硅碎片的含量增加可达15%,其中主要是3~8%的放射虫,以及少量的硅藻(0~3%)和硅鞭藻(0~3%),在碳酸盐含量较高的浅色层中含

图1 ODP154 航次 926 站地理位置图及该站沉积地层所记录的米级旋回的岩芯照片和对应的亮度指标

(a) ODP154 航次 926 站地理位置图(据 Curry 等(1995)修改), 图中等值线为等深线, 所标数字为海水深度(单位: m); (b) 430~455m 岩芯照片拼接图及其对应的亮度 L^* 数据以及所解释的~1m 的~40kyr 斜率周期旋回和~10m 的 405kyr 的长偏心率旋回

有较多的有孔虫, 在415m以上地层的颜色反射率值明显降低, 主要以碳酸盐含量非常低($\leq 5\%$)的深橄榄色的富含黏土(90%)的深色沉积层与突变的浅色沉积层互层为主; 岩芯上可见由浅灰色到灰绿色的1~1.3m旋回(图1b), 其成分组成也发生改变, 碳酸盐含量变化范围为60~80%, 浅色层超微化石数量较多, 碳酸盐含量更高; 深色层有机质与泥质含量高(Curry等, 1995). 本文采用颜色反射率亮度(Lightness, L^*)数据作为天文旋回分析的指标, 颜色反射率是由船上科学家采用手持式Minolta分光光度计每5cm进行测试而得到, 是ODP926站中分辨率最高的数据. 依据站位报告中的堆积速率20~25m Myr^{-1} 推算, 取样时间间隔为2~3kyr, 因而有足够的精度在频谱图上对岁差周期进行识别(Curry等, 1995). 颜色反射率数据在海相沉积中, 普遍与碳酸盐含量具有明显的正相关性(Balsam等, 1998, 1999), 并且碳酸盐含量能够有效指示古气候环境的变化(Pusz等, 2011; Zamelczyk等, 2013). 本文分析中使用的碳氧同位素数据来自Pälike等(2006)对ODP926站底栖有孔虫的测量, 数据跨度为17.86~26.5Ma; 古生产力数据来自Diester-Haass等(2011)对ODP926站底栖有孔虫丰度数据进行的计算, 数据跨度为20.2~25.4Ma; 陆地啮齿类动物演替资料来自van Dam等(2006)对西班牙中部啮齿类哺乳动物化石研究, 数据跨度2.5~24.5Ma.

926站岩芯中渐新统-中新统的分界在航次报告中并没有具体给出, 但是良好的底栖有孔虫和钙质超微化石的识别为界线年龄的确定提供了依据, 并由此建立了ODP926站初始年代框架, 研究段包含6个有孔虫事件和7个钙质超微化石事件(Curry等, 1995). 而渐新世-中新世界线年龄, 经过前人的不断校准(Cande和Kent, 1995; Shackleton等, 1999, 2000; Billups等, 2004; Pälike等, 2004, 2006), 最新的2012年国际地质年代表确定古近纪-新近纪(渐新世-中新世)分界面位于第57个405kyr长偏心率周期弱振幅处, 古地磁事件C6Cn.2n底界, 经天文调谐后的年龄为23.03Ma (Hinnov和Hilgen, 2012; Hilgen等, 2012).

2.2 研究方法

地球轨道参数的(准)周期性变化使地球表层接受的日照量分布发生改变, 进而引起地球气候的周期性波动, 这种周期性变化的气候信息被记录在全

球的沉积序列中(Strasser等, 2006; Hinnov和Hilgen, 2012). 1941年米兰科维奇对夏季日照量进行了定量计算, 计算出了过去60万年内不同地区由于地球轨道要素的变化引起的上下半年太阳辐射量曲线的变化, 天文旋回理论便是据此发展而成(Milanković, 1941). 天文旋回理论中所应用的轨道参数主要为偏心率、斜率和岁差, 此三种参数具有相对稳定的周期, Laskar等(2011)已精确计算出50Ma以来的偏心率变化曲线, 并认为405kyr是最稳定的轨道周期, 因此可作为旋回地层学用于天文地质年代校准的主要周期(Hinnov和Hilgen, 2012).

数据序列分析前需要将连续的沉积序列进行内插法等间距处理, 并使用KaleidaGraph4.0软件计算沉积序列的局部加权回归散点平滑趋势(Cleveland, 1979), 去除数据15%的加权平均的趋势值, 以减小背景值噪音产生的低频信号, 突出高频的天文轨道周期信号(Huang和Hesselbo, 2014). 在AnalySeries 2.0.4软件系统中(Paillard等, 1996), 使用高斯带通滤波, 提取出特定的天文轨道周期频段(如偏心率、斜率等)(Huang和Hesselbo, 2014), 参照La2004理论模型(Laskar等, 2004), 对所提取的天文轨道周期跟相同的理论周期旋回进行调谐从而建立高分辨率的天文年代标尺, 获得高精度的时间序列(Hinnov, 2004; 吴怀春等, 2011). 并利用SSA-MTM工具包使用多窗口分析方法(2π -MultiTaper Method, MTM)对深度域和时间域的数据序列进行频谱分析(Ghil等, 2002), 获得具有置信区间的频谱分析图.

3 天文旋回分析结果

3.1 深度域频谱分析

对研究层段350~604m颜色反射率 L^* 数据序列按照5cm等间距重新取样, 并去除15%的加权平均趋势值, 总共得到5095个数据点的剩余值序列(图2d). 对预处理后的 L^* 数据的剩余值序列的进行多窗谱分析(MTM), 图2j显示出该沉积序列存在11.2、1.38、1.21、1.04、0.96、0.65和0.55m的旋回周期, 其中11.2和1.21m周期较为显著. 按照站位初始推算的堆积速率20~25m Myr^{-1} 估算, 11.2m旋回的沉积持续时间为448~560kyr, 1.22m旋回的沉积持续时间为48.8~61kyr, 据此推算这两个沉积旋回应分别对应于米兰

图2 ODP926B孔深度域的 L^* 数据序列的旋回综合分析图

(a) La2004 偏心率理论曲线 405kyr 滤波及编号; (b) La2004 斜率理论曲线; (c) L^* 深度域序列~1.1m 滤波曲线(中心频率 0.88 和带宽 0.2); (d) L^* 数据序列; (e) L^* 数据序列 11m 滤波曲线(中心频率 0.09 和带宽 0.02); (f) ODP926B 孔研究层段的岩芯照片拼接图; (g) L^* 深度域序列的演化频谱图(滑动窗口为 15m); (h)和(i) 分别为 350~497 和 497~604m 研究层段的 L^* 深度域序列的 MTM 频谱分析图; (j) 350~604m 研究层段的 L^* 深度域序列的 MTM 频谱分析图; 频谱图中所标数字的单位为 m, 虚线为置信线

科维奇旋回的405kyr长偏心率周期与~40kyr斜率周期, 而0.65和0.55m的沉积旋回则对应~20kyr岁差周期. 由 L^* 数据序列的深度域演化谱(图2g)可以看出, 在大约在500m之上, ~1.1m旋回的频率变低, 沉积速率变大, 表明此后沉积环境可能发生了改变, 渐新世-中新世交界大约在497m, 恰巧在此变化范围内. 以

497m为分界, 将两段 L^* 数据分别进行多窗谱分析(MTM)(图2h和i), 结果表明在渐新世末期, 9.8和~1m的旋回对应的峰值突出, 而在中新世初期, 1.2m左右的旋回对应的峰值非常突出, 11.6m左右的旋回明显; 从晚渐新世到早中新世, 长偏心率旋回由对应的9.8m增加到11.6m, 斜率周期旋回由对应的~1m增加到1.21m.

3.2 天文年代标尺的建立

根据上面推算的研究层段~11m的旋回代表405kyr长偏心率旋回周期, 而~1.1m旋回代表~40kyr斜率周期. 因为405kyr的偏心率周期最为稳定(Hinnov和Hilgen, 2012), 因此, 本文首先以405kyr长偏心率旋回周期对研究层段进行天文调谐, 建立天文年代标尺. 对研究层段350~604m的 L^* 剩余值数据序列按照进行高斯带通滤波, 共得到近23个~11m的长偏心率沉积旋回(图2e). 将滤波曲线与原始 L^* 剩余值数据序列进行对照, 根据滤波的23个~11m沉积旋回的极小值读取405kyr的旋回控制点.

渐新世-中新世交界处有精细的古生物地层划分, 界线之下的钙质超微化石*Sphenolithus delphix*末现面(23.11Ma)位于研究段499.66m处, 界线之上的浮游有孔虫*Paragloborotalia kugleri*始现面(22.96Ma)位于研究段495.67m处(Curry等, 1995; Raffi等, 2006). 由此古生物事件年龄可以将 L^* 数据序列~11m左右滤波中499.6m处的极小值点对应到偏心率理论周期滤波中23.09Ma处的极小值点. 本文依据此点作为时间锚点, 将读取的23个405kyr旋回控制点与La2004偏心率理论曲线(Laskar等, 2004)一一对应(图2a和e及红色虚线), 将深度域数据序列转化为时间域序列, 建立绝对年代标尺, 获得了从17.72~26.98Ma的 L^* 数据的时间序列.

因为~40kyr斜率周期旋回在研究层段中表现最为显著, 本文在405kyr长偏心率调谐的基础上又使用~40kyr斜率周期旋回进一步对 L^* 数据序列进行天文调谐. 采用相同的方法, 对研究层段350~604m的 L^* 数据序列利用高斯带通滤波, 获得~40kyr斜率周期控制点, 在405kyr长偏心率旋回的约束下, 将 L^* 数据序列中的~40kyr斜率周期的控制点与La2004斜率理论曲线(Laskar等, 2004)一一对应(图2b和c及灰色虚线), 从而得到了17.74~26.99Ma的 L^* 时间序列(图3e).

图3 利用 405kyr 稳定长偏心率调谐建立的 ODP926B 孔 L^* 序列的绝对天文年代标尺与 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 数据序列及 La2004 理论偏心率曲线的综合对比图

(a) La2004 的偏心率理论曲线、405kyr 及 ~2.4Myr 滤波曲线(Laskar 等, 2004); (b) ODP926B 孔 L^* 经 ~40kyr 天文调谐获得的时间域数据序列的 405kyr 滤波曲线; (c) La2004 斜率理论曲线及 ~1.2Myr 斜率振幅周期滤波曲线(红线); (d) 经 ~40kyr 天文调谐获得的 L^* 时间域序列的 ~40kyr 滤波曲线; (e) 经 ~40kyr 天文调谐后的 L^* 数据序列; (f) 和 (g) 分别为经天文校准的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的时间域数据序列(据 Palike 等(2006)); (h) 经 405kyr 长偏心率周期调谐所获取的 L^* 数据序列的时间域演化频谱图; (i) 经 ~40kyr 斜率周期调谐所获取的 L^* 数据序列的时间域演化频谱图; (j) 和 (k) 分别为经天文校准的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的时间域演化频谱图(据 Palike 等(2006)); (l) 经 405kyr 长偏心率周期调谐的 L^* 序列早中新世 19~23.03Ma 段的频谱分析图; (m) 经 405kyr 长偏心率周期调谐的 L^* 序列的晚渐新世 23.03~26.98Ma 段的频谱分析图; (n) 经 ~40kyr 斜率周期调谐的 L^* 序列的早中新世 19~23.03Ma 段的频谱分析图; (o) 经 ~40kyr 斜率周期调谐的 L^* 序列的晚渐新世 23.03~26.99Ma 段的频谱分析图; (p) 和 (q) 分别为经 405kyr 长偏心率和 ~40kyr 斜率周期调谐的整个 L^* 序列的频谱分析图; (r) 和 (s) 分别为 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 数据序列 17.86~26.5Ma 段的频谱分析图; (t) 17.8~27Ma 对应时间段的 La2004 理论 ETP 频谱图(各频谱图中标数字的单位为 kyr)

在利用斜率周期调谐的过程中, 由于 L^* 数据序列中因岩芯断缺而存在着多处数据的断缺, 因此在这些数据断缺的层段就无法做到 L^* 数据的斜率巡回滤波跟理论的斜率周期巡回完全一一对应. 例如, 在362~366m的 L^* 数据断缺的层段, 应该对应于第45~46个偏心率巡回中的4个理论的斜率周期; 在411~414m的 L^* 数据断缺的层段, 应该对应于第50个偏心率巡回中的4个理论的斜率周期, 但是 L^* 数据序列中只有3个~1.1m巡回滤波, 可能存在1个左右的斜率巡回周期的缺失; 在595~597m层段应该对应于第66个偏心率巡回中的2个理论的斜率周期; 在 L^* 数据序列的374、432、471、490、529和548m附近也均存在一个左右的斜率周期的数据断缺. 此外, 在对应的偏心率周期中 L^* 数据的斜率巡回滤波个数与理论的斜率周期数不是完全相等, 在第59个偏心率周期对应的510~521m段深度域多一个~1.1m巡回的滤波, 调谐过程中把两个较小巡回合并对应于一个理论的斜率周期; 而在第51和53个偏心率周期对应的421~431和443~452m段深度域数据序列中缺少一个~1.1m巡回滤波, 第63个偏心率周期对应的555~565m段缺少两个~1.1m巡回滤波, 这说明这些层段有可能存在着沉积间断. 因此, 如果不考虑偏心率周期的控制, 仅仅采用斜率周期来调谐数据序列, 那么结果很可能因为数据断缺或沉积间断而使建立的天文年代标尺不够精确, 会有部分时间缺失, 而采用稳定的405kyr长偏心率对数据进行天文调谐就可以避免这样的误差.

3.3 时间域频谱分析

对利用405kyr长偏心率周期调谐获得的时间域 L^* 数据序列进行MTM频谱分析, 频谱图(图3p)显示出非常明显的405和40kyr周期(频谱分析周期精确到千年, 下同), 同时可见~1500、~750、48、39、33、29、24和22kyr周期, 但130和102kyr短偏心率周期对应的峰值不明显. 而进一步利用~40kyr斜率周期调谐获得时间域的频谱分析(图3q)显示出非常明显的405、40和20kyr周期, 同时还有较弱的781和124kyr周期. 将两个时间域频谱分析与La2004理论的ETP(岁差、斜率和偏心率的综合曲线)(Laskar等, 2004)频谱图(图3t)进行对比, 发现有很好的对应, 频谱图上显示的周期与米兰科维奇巡回周期相吻合,

表明所建立的天文年代模型是基本合理的.

为了分析渐新世末期和中新世早期巡回周期的变化, 以23.03Ma为界线, 截取19~23.03和23.03~27Ma两段持续时间相同序列分别进行频谱分析(图3l~o), 两种调谐方式对应时间段的频谱显示出了相似的特征. 405kyr长偏心率周期调谐结果, 晚渐新世的时间域的频谱图(图3m)显示405kyr长偏心率周期能量最突出, 40kyr斜率周期较强. 而早中新世(图3l)的时间域频谱分析中41kyr左右的斜率周期最为显著, 405kyr长偏心率周期明显但没有晚渐新世那么突出, 并且还存在着~1.1Myr的长周期, 可能对应于~1.2Myr的斜率振幅的调制长周期. ~40kyr斜率周期调谐结果中, 晚渐新世的时间域频谱(图3o)显示出明显的405、40和20kyr周期, 有较弱的95kyr周期. 早中新世部分(图3n)有明显的40kyr周期, 除了有400和20kyr周期外, 还有~1.2Myr长斜率周期存在.

在图3中, 斜率周期的理论曲线~1.2Myr的振幅低值处(图中灰色及蓝色条带), L^* 数据序列的~40kyr的斜率周期的滤波曲线(图3d)也基本上处于低值, 同时在405kyr长偏心率周期调谐的 L^* 数据序列的频谱演化图(图3h)中, ~40kyr的斜率周期的频率段在~1.2Myr斜率周期的振幅低值节点处具有明显的突变. 405kyr长偏心率周期和~40kyr的斜率周期调谐的 L^* 数据序列频谱演化图(图3h和i)以及碳和氧同位素数据序列的时间域的频谱演化图(图3j和k)表现出不同的频谱特征, L^* 序列的演化图谱中~40kyr斜率周期在整个研究段都表现很明显, 而碳和氧同位素序列中405kyr的周期要比~40kyr的斜率周期更明显. 在24.2~23.03Ma期间, L^* 序列和氧同位素序列中~40kyr周期非常显著但在碳同位素序列中几乎没有显示; 而在21.4~20.4Ma期间, L^* 序列和碳同位素序列中斜率周期显著, 但在氧同位素序列中斜率周期不明显. 这些不同指标的频谱在相同时间段表现的不同特征说明它们对古气候的响应机制存在差异.

3.4 沉积物的堆积速率

据前人推算, 研究区沉积物的堆积速率在晚渐新世时期约为20~30m Myr⁻¹, 而早中新世时期约为25~35m Myr⁻¹, 从晚渐新世到早中新世的堆积速率有较明显增加(Weedon等, 1997; Shackleton等, 1999). 本文根据405kyr长偏心率周期调谐建立的年代模型

图4 多个指标~2Myr 旋回滤波曲线与理论曲线的对比

(a) La2004 理论的偏心率曲线及~2.4Myr 滤波曲线(Laskar 等, 2004); (b) $\delta^{18}\text{O}$ 数据序列及~2Myr 滤波曲线(据 Pálike 等(2006)); (c) 研究区海洋古生产力($\text{g C cm}^{-2} \text{ kyr}^{-1}$)及~2.3Myr 的滤波曲线(据 Diester-Haass 等(2011)); (d) 西班牙中部啮齿类哺乳动物物种演替速率(Myr^{-1})及~2.4Myr 滤波(据 van Dam 等(2006)); (e) 经~40kyr 斜率周期调谐所获得的沉积物堆积速率及~2.3Myr 滤波曲线; (f) 经 405kyr 长偏心率周期调谐获得的沉积物堆积速率(m Myr^{-1})及~2.3Myr 滤波曲线

所计算沉积物的堆积速率如图4f所示, 经~40kyr斜率周期调谐所获得的沉积物堆积速率如图4e所示, 可以看出沉积物堆积速率的变化具有~2.3Myr的周期性变化的特征(图4e和f), 此周期对应于偏心率振幅调制周期的~2.36Myr(图4a). 此外, 海洋古生产力数据序列(Diester-Haass等, 2011)具有~2.3Myr左右的变化周期(图4c), 而陆地啮齿类哺乳动物演替速率(van Dam等, 2006)也具有~2.4Myr周期(图4d).

4 讨论

4.1 926 站 B 孔的天文年代标尺

本文采用最为稳定的405kyr长偏心率周期对350~604m层段的 L^* 数据序列进行天文调谐建立了17.72~26.98Ma的天文年代标尺, 其持续时间为9.26Myr; 在此基础上, 在405kyr旋回的约束下, 进一步使用~40kyr斜率周期再次对 L^* 数据序列进行天文调谐, 得到17.74~26.99Ma的天文年代标尺, 其持续时间为9.25Myr, 这与单独用405kyr的长偏心率周期调谐所得的持续时间仅仅差0.01Myr. 如果不考虑

405kyr的偏心率周期的约束, 仅仅用斜率周期对数据序列进行天文调谐, 就会由于存在数据断缺或者沉积间断而使所建立的天文年代标尺偏短. 但是, 在利用405kyr长偏心率周期调谐时, 这些短期的数据缺失以及没有被沉积物记录的短时间的沉积间断/缺失就可忽略不计, 因而利用405kyr长偏心率周期进行调谐所获得的天文年代标尺就会比仅仅利用岁差周期或者斜率周期调谐的结果更加精确.

Shackleton等(1999)利用La1993理论模型(Laskar等, 1993)的斜率与岁差标准化后所获得的综合理论目标曲线与ODP926B钻孔的伽马测井曲线和磁化率曲线进行天文校准, 获得到了14~28Ma的年代标尺. 在此年代标尺基础上, Zachos等(2001a)对ODP926B钻孔的411.01~551.51m层段底栖有孔虫氧同位素数据进行天文旋回分析, 获得的沉积年代为20~25.04Ma, 而本文建立年代标尺的对应段为19.90~24.97Ma, 这是由于Shackleton等(1999)和Zachos等(2001a)采用的La1993天文轨道模型与更新的La2004模型有一定差别. Pálike等(2006)利用La2004的天文轨道模型(Laskar等, 2004)的受~100kyr偏心率振幅调制的气

候岁差作为理论目标曲线对ODP926B钻孔的磁化率、颜色反射率序列及底栖有孔虫所获取的碳氧同位素数据序列的350.13~587.71m层段进行天文调谐, 获取的研究层段的沉积年代为17.86~26.5Ma, 这与本文所建立的天文年代标尺的17.74~26.37Ma对应, 与Pälike等(2006)关于ODP926B钻孔研究层段的顶部的天文绝对年龄仅仅相差~0.12Myr, 持续时间仅相差0.01Myr, 因此, 可以说本文利用405kyr长偏心率周期及~40kyr斜率周期进行天文调谐所建立的天文年代标尺是非常精准的。

4.2 天文轨道周期驱动的气候变化及生态响应

从晚渐新世到早中新世, 沉积记录中影响颜色反射率 L^* 指标的主导天文轨道参数发生了变化。从频谱(图3l~o)中可以看出, 从晚渐新世到早中新世, 405kyr偏心率的信号强度有所减弱; 而~40kyr斜率周期旋回信号在O/M界线之后明显增强, 在 L^* 序列和碳氧同位素序列的演化图谱上也可以看出这样的特征变化。由此可见, 在晚渐新世时期, 研究区的沉积过程可能由岁差-偏心率周期和斜率周期共同控制, 而23.03Ma之后的沉积过程中斜率周期的驱动作用明显加强。

Mi-1事件发生在晚渐新世-早中新世的转换时期, 天文轨道长偏心率与斜率振幅周期同时处于最小值(Zachos等, 2001a), 中中新世降温事件也是发生在长偏心率周期与斜率长周期最低值重合时期(Abels等, 2005), 这说明这一全球范围内的极端降温气候事件很可能是受天文因素驱动(汪品先, 2006b)。926站B孔的沉积物对这一渐新世-中新世之交重大气候变化事件也具有明显的响应, 沉积速率和沉积环境发生了明显的变化(图2g和4f)。偏心率值越低, 那么地球绕日公转轨道就越接近圆形, 而斜率振幅低值即斜率变化范围最小, 使南北回归线范围缩小, 地球上气候的季节性差异不明显, 太阳辐射更多的集中在赤道地区, 高纬度地区接受的日照量明显比高斜率值期间减小, 极地形成的冰层不容易融化, 有利于冰盖的积累, 这时期 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 都表现为高值(Zachos等, 2001b; 汪品先, 2006a; Holbourn等, 2005, 2013)。Mi-1之后(23~21.8Ma) $\delta^{13}\text{C}$ 值变高也说明气候的变化可能导致了全球碳储库随之发生重要变化(Zachos等, 1997, 2001a; Pälike等, 2006; Raffi等, 2006)。

23Ma之后斜率周期驱动作用明显增强, 这可能说明高纬度由斜率周期驱动的气候变化增强, 致使在低纬度的沉积过程中也表现出较强的斜率周期驱动的特征(Bosmans等, 2014)。

Van Dam等(2006)提出西班牙中部啮齿类哺乳动物演替是受~2.4Myr长偏心率周期驱动的, 本研究所获得的沉积物堆积速率显示有~2.3Myr的周期性变化(图4e和f)与古生产力曲线显示的~2.3Myr周期性变化(图4c)基本一致, 而且它们都与~2.4Myr偏心率振幅调制周期相近, 这可以说明古生产力和沉积物的堆积过程也是受天文轨道周期驱动的。然而, ODP926B孔沉积物堆积速率、古生产力及氧同位素序列的~2Myr长周期有近似的变化趋势, 但它们的变化明显的落后于~2.4Myr偏心率振幅调制周期。这可能反映了天文轨道周期的变化驱动了地球气候系统的变化, 地球气候系统的变化又进一步驱动着海洋生态系统的演化, 进而驱动着沉积过程的演化, 并且这一过程需要一定的响应和反馈时间。

5 结论

ODP926站各项古气候替代指标均显示出较好的天文周期的变化, 指示了晚渐新世-早中新世的气候转变受到了天文因素的驱动。Mi-1降温事件恰好处于长偏心率周期与斜率振幅长周期极小值交汇处, 不同的天文轨道周期极小值的叠加, 使得地球上的气候发生了重大变化, 出现极端气候事件。同时, 我们发现颜色反射率亮度反映的主控天文轨道周期参数发生了变化, 从晚渐新世到早中新世, 偏心率周期驱动强度减弱, 而斜率周期的驱动强度增加, 这表明渐新世-中新世气候变化主控天文轨道参数发生了变化, 而Mi-1的极端气候事件是主控天文轨道参数变化的转折点。另外, 926站B孔沉积物堆积速率及古生产力具有~2.3Myr的偏心率振幅调制长周期的旋回性变化, 这表明海底沉积系统及海洋生态系统的演化受到了更长尺度的天文轨道参数的控制。陆地啮齿类哺乳动物演替速率及赤道大西洋古生产力具有相同的两百万年周期, 这或许可以说明百万年尺度的天文轨道周期不仅仅对气候有着调节作用, 并且对于地球系统的生态演化有着重要影响。

致谢 感谢Linda Hinnov教授在天文旋回分析方面的指导, 感谢国际大洋钻探计划提供研究资料。

参考文献

- 黄春菊. 2014. 旋回地层学和天文年代学及其在中生代的研究现状. *地学前缘*, 21: 48–66
- 田军. 2009. 新生代的气候节律: 赤道太平洋IODP-320, 321航次. *地球科学进展*, 24: 1357–1361
- 汪品先. 2006a. 编制地球的“万年历”. *自然杂志*, 28: 1–6
- 汪品先. 2006b. 地质计时的天文“钟摆”. *海洋地质与第四纪地质*, 26: 1–7
- 吴怀春, 张世红, 冯庆来, 方念乔, 杨天水, 李海燕. 2011. 旋回地层学理论基础, 研究进展和展望. *地球科学*, 36: 409–428
- Abels H A, Hilgen F J, Krijgsman W, Kruk R W, Raffi I, Turco E, Zachariasse W J. 2005. Long-period orbital control on middle Miocene global cooling: Integrated stratigraphy and astronomical tuning of the Blue Clay Formation on Malta. *Paleoceanography*, 20: PA4012, doi: 10.1029/2004PA001129
- Akgün F, Kayseri M S, Akkiraz M S. 2007. Palaeoclimatic evolution and vegetational changes during the Late Oligocene-Miocene period in Western and Central Anatolia (Turkey). *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoeconol*, 253: 56–90
- Balsam W L, Deaton B C, Damuth J E. 1998. The effects of water content on diffuse reflectance spectrophotometry studies of deep-sea sediment cores. *Mar Geol*, 149: 177–189
- Balsam W L, Deaton B C, Damuth J E. 1999. Evaluating optical lightness as a proxy for carbonate content in marine sediment cores. *Mar Geol*, 161: 141–153
- Barreda V, Palazzesi L. 2007. Patagonian vegetation turnovers during the Paleogene-early Neogene: Origin of arid-adapted floras. *Bot Rev*, 73: 31–50
- Billups K, Channell J, Zachos J. 2002. Late Oligocene to early Miocene geochronology and paleoceanography from the subantarctic South Atlantic. *Paleoceanography*, 17: 4-1–4-11
- Billups K, Pälike H, Channell J, Zachos J C, Shackleton N J. 2004. Astronomic calibration of the late Oligocene through early Miocene geomagnetic polarity time scale. *Earth Planet Sci Lett*, 224: 33–44
- Bosmans J H C, Jfhout S S, Tuenter E, Hilgen F J, Lourens L J. 2014. Response of the north african summer monsoon to precession and obliquity forcings in the EC-Earth GCM. *Clim Dyn*, 44: 279–297
- Cande S C, Kent D V. 1995. Revised calibration of the geomagnetic polarity time scale for the Late Cretaceous and Cenozoic. *J Geophys Res*, 100: 6093–6095
- Cleveland W S. 1979. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *J Am Stat Assoc*, 74: 829–836
- Curry W B, Shackleton N J, Richter C, Backman J E, Bassinot F, Bickert T, Chaisson W P, Cullen J L, Demenocal P B, Dobson D M, Ewert L, Crütznér J, Hagelberg T K, Hampt G, Harris S E, Herbert T D, Moran K, Murayama M, Murray D W, Pearson P N, Raffi I, Scheneider D A, Tiedemann R, Valet J-P, Weedon G P, Yasuda H, Zachos J C. 1995. Initial Reports: Site 926. *Proc Ocean Drill Prog*, 154: 153–232
- Diester-Haass L, Billups K, Emeis K. 2011. Enhanced paleoproductivity across the Oligocene/Miocene boundary as evidenced by benthic foraminiferal accumulation rates. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoeconol*, 302: 464–473
- Dunai T J, López G A G, Juez-Larré J. 2005. Oligocene-Miocene age of aridity in the Atacama Desert revealed by exposure dating of erosion-sensitive landforms. *Geology*, 33: 321–324
- Ghil M, Allen M R, Dettinger M D, Ide K, Kondrashov D, Mann M E, Robertson A W, Saunders A, Tian Y, Varadi F. 2002. Advanced spectral methods for climatic time series. *Rev Geophys*, 40: 3-1–3-41
- Hilgen F J, Lourens L J, van Dam J A. 2012. Chapter 29: The Neogene Period. In: Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, Ogg G M, eds. *The Geologic Time Scale 2012*. Oxford: Elsevier Science Ltd., 2: 923–978
- Hinnov L A. 2004. Earth's orbital parameters, cycyle stratigraphy. In: Gradstein F M, Ogg G, Smith A G, eds. *A Geologic Time Scale 2004*. Cambridge: Cambridge University Press. 55–62
- Hinnov L A, Hilgen F J. 2012. Chapter 4: Cyclostratigraphy and astrochronology. In: Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, Ogg G M, eds. *The Geologic Time Scale 2012*. Oxford: Elsevier Science Ltd., 1: 63–83
- Holbourn A, Kuhnt W, Clemens S, Prell W, Andersen N. 2013. Middle to late Miocene stepwise climate cooling: Evidence from a high-resolution deep water isotope curve spanning 8 million years. *Paleoceanography*, 28: 688–699
- Holbourn A, Kuhnt W, Schulz M, Erlenkeuser H. 2005. Impacts of orbital forcing and atmospheric carbon dioxide on Miocene ice-sheet expansion. *Nature*, 438: 483–487
- Huang C, Hesselbo S P. 2014. Pacing of the Toarcian Oceanic Anoxic Event (Early Jurassic) from astronomical correlation of marine sections. *Gondwana Res*, 25: 1348–1356
- Hyeong K, Lee J, Seo I, Lee M J, Yoo C M, Khim B-K. 2014. Southward shift of the Intertropical Convergence Zone due to Northern Hemisphere cooling at the Oligocene-Miocene boundary. *Geology*, 42: 667–670
- Laskar J, Fienga A, Gastineau M, Manche H. 2011. La2010: A new orbital solution for the long-term motion of the Earth. *Astron Astrophys*, 532: A89
- Laskar J, Joutel F, Boudin F. 1993. Orbital, precessional, and insolation quantities for the Earth from –20 Myr to +10 Myr. *Astron Astrophys*, 270: 522–533
- Laskar J, Robutel P, Joutel F, Gastineau M, Correia A, Levrard B. 2004. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. *Astron Astrophys*, 428: 261–285

- Milanković M. 1941. Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem. Beograd: Königlich Serbische Akademie. 633
- Miller K G, Feigenson M D, Wright J D, Clement B M. 1991. Miocene isotope reference section, Deep Sea Drilling Project Site 608: An evaluation of isotope and biostratigraphic resolution. *Paleoceanography*, 6: 33–52
- Miller K G, Kominz M A, Browning J V, Wright J D, Mountain G S, Katz M E, Sugarman P J, Cramer B S, Christie-Blick N, Pekar S F. 2005. The Phanerozoic record of global sea-level change. *Science*, 310: 1293–1298
- Naish T R, Woolfe K J, Barrett P J, Wilson G S, Atkins C, Bohaty S M, Bücker C J, Claps M, Davey F J, Dunbar G B. 2001. Orbitally induced oscillations in the East Antarctic ice sheet at the Oligocene/Miocene boundary. *Nature*, 413: 719–723
- Pälike H, Frazier J, Zachos J C. 2006. Extended orbitally forced palaeoclimatic records from the equatorial Atlantic Ceara Rise. *Quat Sci Rev*, 25: 3138–3149
- Pälike H, Laskar J, Shackleton N J. 2004. Geologic constraints on the chaotic diffusion of the solar system. *Geology*, 32: 929–932
- Pagani M, Zachos J C, Freeman K H, Tipple B, Bohaty S. 2005. Marked decline in atmospheric carbon dioxide concentrations during the Paleogene. *Science*, 309: 600–603
- Paillard D, Labeyrie L, Yiou P. 1996. Macintosh program performs time-series analysis. *EOS Trans Am Geophys Union*, 77: 379–379
- Pusz A E, Thunell R C, Miller K G. 2011. Deep water temperature, carbonate ion, and ice volume changes across the Eocene-Oligocene climate transition. *Paleoceanography*, 26: PA2205, doi: 10.1029/2010PA001950
- Raffi I, Backman J, Fornaciari E, Pälike H, Rio D, Lourens L, Hilgen F. 2006. A review of calcareous nannofossil astrobiochronology encompassing the past 25 million years. *Quat Sci Rev*, 25: 3113–3137
- Rasmussen E S. 2004. The interplay between true eustatic sea-level changes, tectonics, and climatic changes: What is the dominating factor in sequence formation of the Upper Oligocene-Miocene succession in the eastern North Sea Basin, Denmark? *Glob Planet Change*, 41: 15–30
- Raymo M, Ruddiman W F. 1992. Tectonic forcing of late Cenozoic climate. *Nature*, 359: 117–122
- Ruddiman W F. 2008. *Earth's Climate: Past and Future*. 2nd ed. New York: W. H. Freeman and Company. 388
- Shackleton N, Crowhurst S, Weedon G, Laskar J. 1999. Astronomical calibration of Oligocene-Miocene time. *Philos Trans R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 357: 1907–1929
- Shackleton N J, Hall M A, Raffi I, Tauxe L, Zachos J. 2000. Astronomical calibration age for the Oligocene-Miocene boundary. *Geology*, 28: 447–450
- Spezzaferri S. 1995. Planktonic foraminiferal paleoclimatic implications across the Oligocene-Miocene transition in the oceanic record (Atlantic, Indian and South Pacific). *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol*, 114: 43–74
- Strasser A, Hilgen F J, Heckel P H. 2006. Cyclostratigraphy concepts, definitions, and applications. *Newsl Stratigr*, 42: 75–114
- Tian J, Zhao Q, Wang P, Li Q, Cheng X. 2008. Astronomically modulated Neogene sediment records from the South China Sea. *Paleoceanography*, 23: PA3210, doi: 10.1029/2007PA001552
- Van Dam J A, Aziz H A, Sierra M Á Á, Hilgen F J, van den Hoek Ostende L W, Lourens L J, Mein P, van der Meulen A J, Pelaez-Campomanes P. 2006. Long-period astronomical forcing of mammal turnover. *Nature*, 443: 687–691
- Wade B S, Pearson P N, Berggren W A, Pälike H. 2011. Review and revision of Cenozoic tropical planktonic foraminiferal biostratigraphy and calibration to the geomagnetic polarity and astronomical time scale. *Earth-Sci Rev*, 104: 111–142
- Weedon G P, Shackleton N J, Pearson P N. 1997. The Oligocene time scale and cyclostratigraphy on the Ceara Rise, western equatorial Atlantic. *Integr Ocean Drill Prog Prel Rep*, 154: 101–114
- Zachos J C, Flower B P, Paul H. 1997. Orbitally paced climate oscillations across the Oligocene/Miocene boundary. *Nature*, 388: 567–570
- Zachos J C, Shackleton N J, Revenaugh J S, Pälike H, Flower B P. 2001a. Climate response to orbital forcing across the Oligocene-Miocene boundary. *Science*, 292: 274–278
- Zachos J C, Pagani M, Sloan L, Thomas E, Billups K. 2001b. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 292: 686–693
- Zamelczyk K, Rasmussen T L, Husum K, Hald M. 2013. Marine calcium carbonate preservation vs. climate change over the last two millennia in the Fram Strait: Implications for planktic foraminiferal paleostudies. *Mar Micropaleontol*, 98: 14–27