

认识偏心率周期的地层古气候意义

李前裕^{1,2}, 田 军¹, 汪品先¹

1. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

2. 澳大利亚阿德莱德大学地球与环境科学学院, 阿德莱德 SA5005

摘要: 介绍了偏心率周期在地层和古气候研究方面的新发展. 现有地球轨道模式对 250 Ma 以来的轨道运算误差能控制在 0.2% 之内, 使基于偏心率周期来划分地层年代成为可能. 新的国际标准地层年代表以 405 ka 长偏心率周期为基础来划分主要地层界线. 新生代将包括 E1—E162 偏心率长周期, 底界年龄 (65.5 ± 0.3) Ma. 这一地层年代表的建立, 标志着轨道地层学时代的到来. 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, 这些因素包括碳储库、冰盖和海平面变化、电磁场, 以及区域构造重组等等. 越来越多的研究发现碳同位素在偏心率周期上与地球轨道驱动相关, 且常领先于氧同位素的变化, 表明热带碳循环过程是影响全球气候变化的关键因素之一.

关键词: 地球轨道理论; 米兰科维奇; 偏心率周期; 轨道地层学; 古气候变化.

中图分类号: P73; P53

文章编号: 1000-2383(2005)05-0519-10

收稿日期: 2005-05-17

Recognizing the Stratigraphic and Paleoclimatic Significance of Eccentricity Cycles

LI Qian-yu^{1,2}, TIAN Jun¹, WANG Pin-xian¹

1. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. School of Earth and Environmental Sciences, University of Adelaide, Adelaide SA5005, Australia

Abstract: This paper introduces some new developments concerning orbital eccentricity in stratigraphic and paleoclimatic studies. The less than 0.2% error in calculating the current orbital model for the last 250 Ma makes possible stratigraphic subdivisions based upon eccentricity cycles. The newly erected international standard chronostratigraphic timescale uses the 405 ka long eccentricity cycles for separating major stratigraphic boundaries, and the Cenozoic Era now comprises E1 to E162 long eccentricity cycles, with the base dated at (65.5 ± 0.3) Ma. The 100 ka and 405 ka eccentricity cycles have been found in many geological records, especially those paleoclimate proxies based upon physiochemical records from deep-sea drilling cores. Many important paleoclimatic events appear to have concurred with weak amplitude periods over the eccentricity band, indicating these periods were likely prone to the influence of such factors as the global carbon reservoir, ice caps, sea level and electromagnetic field, as well as regional tectonic reconfigurations. More and more studies show that the $\delta^{13}\text{C}$ record is mainly related to orbital forcing over the eccentricity cycles, and its changes often precede $\delta^{18}\text{O}$ changes, supporting the hypothesis that the carbon cycle is one of the key factors influencing the earth's climate.

Key words: earth's orbital theory; Milankovitch; eccentricity cycles; orbital stratigraphy; paleoclimate change.

0 引言

学领域最伟大的成就之一, 它阐明了地球不同轨道周期上太阳辐射量在不同季节和纬度时的变化与气候变化的联系. 这一理论的建立也就确认了地球轨

米兰科维奇的地球轨道理论是 20 世纪地球科

道周期在以冰期旋回为主要特征的全球气候变化过程中的首选性和规律性,而这些规律性已经不断地从不同区域不同时间的地质记录中被揭示出来(Hays *et al.*, 1976; Imbrie and Imbrie, 1979; Berger *et al.*, 1984; Berger, 1988; Tiedemann *et al.*, 1994). 研究发现,短尺度周期如 19~23 ka 的岁差周期和 41 ka 的斜率周期,常常主导各种古气候记录. 原因主要是这些短周期直接反映了太阳辐射的强度,所以跟气候变化呈明显线性相关而被记录下来;而长尺度周期,特别是 100 ka 和 405 ka 偏心率周期,只不过是岁差和斜率周期起某种调制作用而已(Imbrie *et al.*, 1992, 1993; Berger *et al.*, 1999; Zachos *et al.*, 2001). 然而,第四纪冰期—间冰期旋回于 0.9 Ma 前后发生转型,从 41 ka 周期逐渐转变为 100 ka 周期,即“中更新世气候转型”(Berger and Jansen, 1994),并且这一气候转型有可能是由于热带驱动而不是冰盖驱动的结果(Rutherford and D'Hondt, 2000). 为什么主要气候周期会由短周期转为长周期或由长周期转为短周期呢?不同时间的气候转型是否是由于同样还是不同影响因素造成的呢?轨道周期的规律性能不能应用于气候变化以外的地质指标?类似的问题早已引起科学家们的广泛兴趣,而多年的研究也已经产生大量的成果. 本文拟将目前国际上有关地球轨道偏心率周期的最新研究成果和动向做简单介绍.

1 偏心率周期

地球绕太阳公转呈椭圆轨道变化,椭圆轨道短轴为近日轴,长轴则为远日轴,变化相差最大时为 6.7%,一般为 3% 左右(Berger, 1977; Imbrie and Imbrie, 1979). 同时,远日轴常常较稳定,而由圆至椭圆或由椭圆至圆形的轨道变化总是由近日轴即短轴来完成的. 假设远日轴半径为 a ,近日轴半径为 b ,那么偏心率则可由公式 $e = \sqrt{(a^2 - b^2)}/a$ 算出. 当今地球的偏心率 $e = 0.0167$,表示地球轨道的远日点大约比圆形轨道时远 1.67%,这相对于 6.7% 的最扁椭圆轨道时变化还算小的,属较低振幅时期.

地球公转的这种椭圆轨道变化形成约 100 ka 的短周期和约 405 ka 的长周期,分别称为偏心率短周期和偏心率长周期. 这些周期的变化就像正弦曲线,有高低振幅之差,代表最扁至最圆的轨道变化.

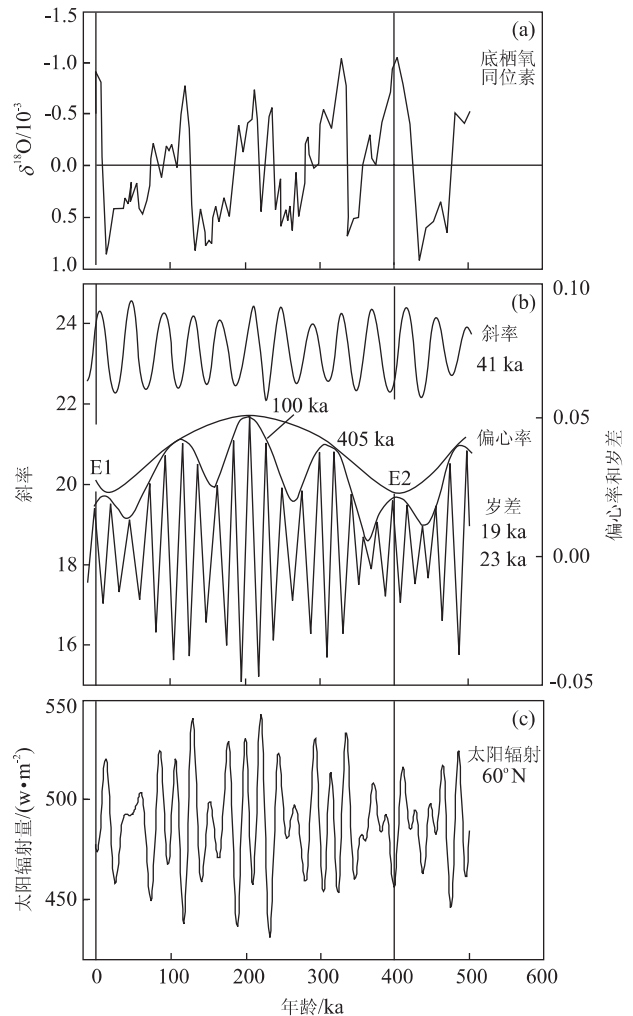


图 1 最近 50 万年来的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线(代表冰盖)与轨道参数(斜率、偏心率、岁差)以及 6 月份日辐射量变化比较(Berger and Loutre, 1991; Hodell *et al.*, 2000)

Fig. 1 The $\delta^{18}\text{O}$ record over the last 500 ka, compared with orbital elements including obliquity, eccentricity and precession and June insolation at 60°N

由于受太阳、月亮和宇宙风等诸多因素的影响,大多偏心率周期振幅都不相同,表明地球在完成某个周期后并不返回原处. 偏心率周期强振幅时北半球近日轴最短,通过岁差体现为北半球夏季日照率最高(Berger and Loutre, 1991). 不过,当各种轨道周期振幅一致趋弱时,往往表明季节反差较小,反之则季节反差较强,在偏心率 e 高值期季节反差最强(Berger *et al.*, 1992). 有关各种轨道周期模式的详细参数和计算公式,请参见 Laskar *et al.* (2004).

在高分辨率的地质记录中,偏心率周期一般表现为岁差(19~23 ka)和斜率(41 ka)的综合体或者接近 100 ka 或 405 ka 的偏心率准周期,间接地反映

了太阳辐射的强弱(图 1). 为期 100 ka 的偏心率短周期最为人们所熟悉, 因为晚第四纪的冰期旋回就是以 100 ka 周期为主要特征(Berger *et al.*, 1993; Berger and Jansen, 1994). 可能正由于有冰盖, 100 ka 周期对气候的响应才特别明显(Imbrie *et al.*, 1984, 1993). 因为岁差和斜率对太阳辐射的直接贡献较大, 所以岁差周期和斜率周期对气候响应往往呈明显的线性相关, 也就能较完好地保存在不同的地质记录中; 而偏心率周期对太阳辐射的贡献一般很小($<1\%$), 故轨道响应常为非线性(Imbrie *et al.*, 1993), 导致偏心率周期在一些地质记录中不连续或不明显. 这种理论上的低值加上不完整的地质记录, 使偏心率周期在古气候研究方面往往被认为不过是岁差和斜率的一种附加而不是气候变化的主要影响因素.

但是, 近年的研究发现, 偏心率周期在长尺度上的稳定性和振幅的多变性, 决定了它不仅可能是驱动气候变化的主要因素, 也可能是左右沉积作用的

原动力之一, 应该成为地层对比的依据.

2 基于偏心率周期的轨道地层学

现有的 405 ka 偏心率长周期模式对整个新生代的计算误差范围已被控制在 20 万年之内, 延至整个中生代其误差也不过 0.2%, 即 2 Ma 左右(Laskar *et al.*, 2004). 由于这种长尺度的稳定性, 现在已经顺理成章地把偏心率长周期作为地质年代划分的依据, 因为这样划分更能体现沉积物地层的“自然”天文年龄. 新地层年代划分法以距今约 10 ka 的偏心率长周期最弱振幅点为基数 1 再往后数, 周期数目越大年龄越老(图 2, 3). 新生代将包括 E1—E162 偏心率长周期, 底界年龄 (65.5 ± 0.3) Ma (Gradstein *et al.*, 2005).

在刚刚出版的以 405 ka 偏心率长周期为划分基础的新国际标准地层年代表里, 更新世包括了 E1—E5 偏长心率周期, 上新世含有 E6—E14 长周

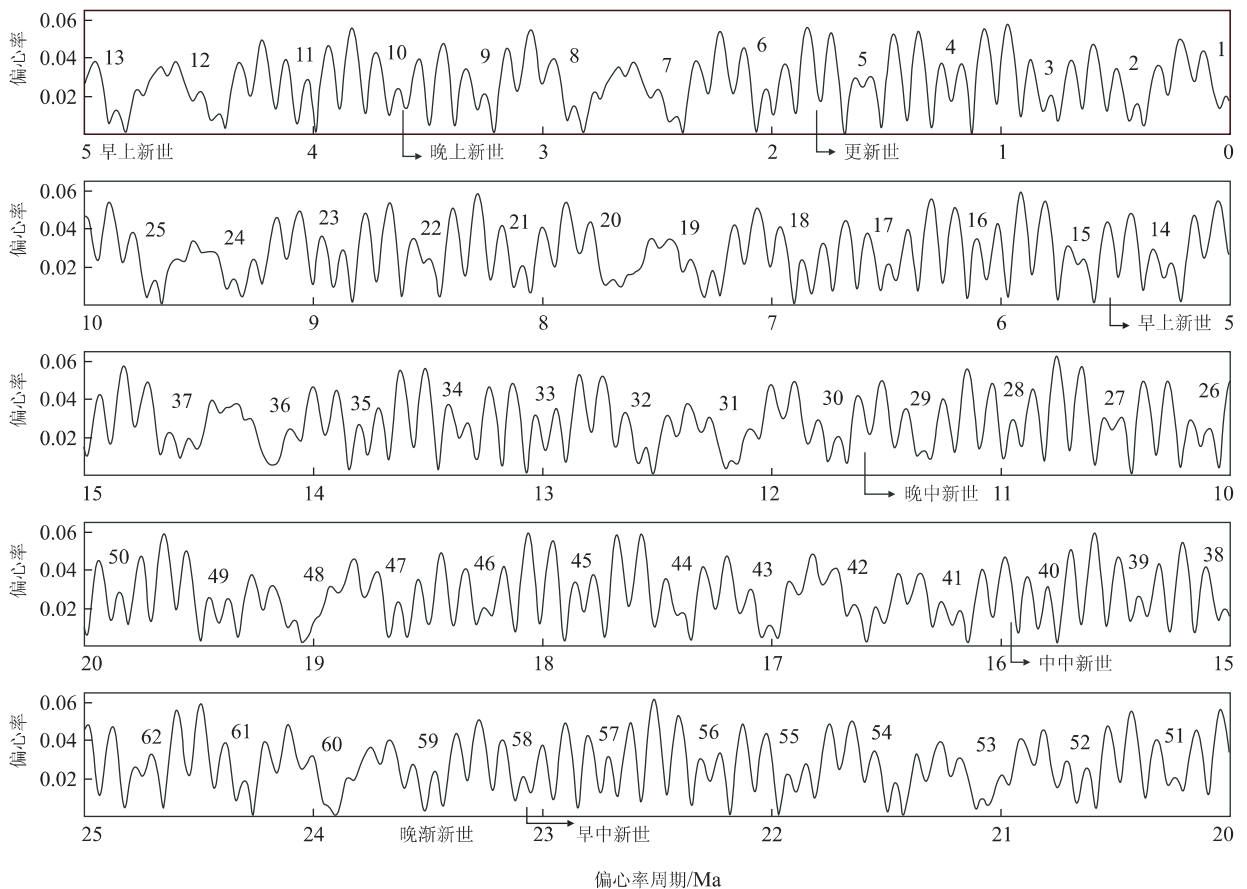


图 2 过去 250 万年包含的 1~62 偏心率长周期和主要地层界线(Laskar *et al.*, 2004; Gradstein *et al.*, 2005)

Fig. 2 The last 250 Ma includes 1—62 long eccentricity cycles and some major stratigraphic boundaries

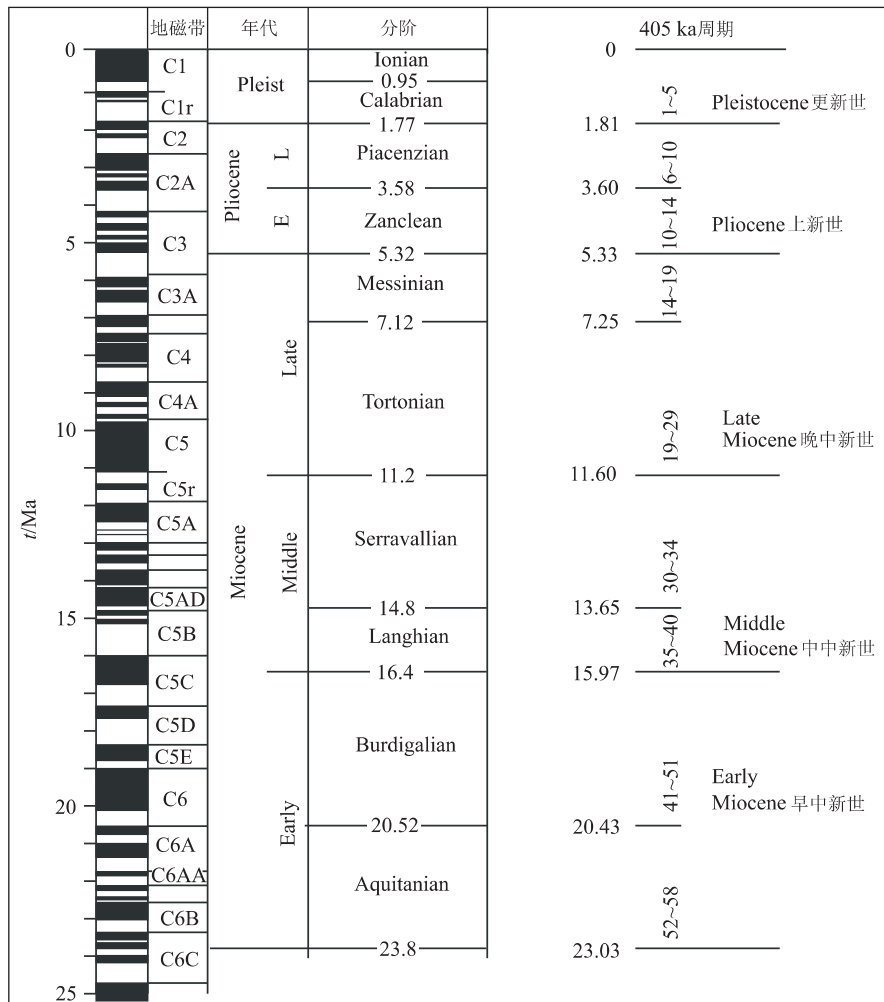


图 3 比较 1995 年和 2005 年的新近纪地质年代表(Berggren *et al.*, 1995; Lourens *et al.*, 2005)

Fig. 3 Comparison between 1995 and 2005 chronostratigraphic timescales for the Neogene

期,中新世包括 E14—E58 长周期,如此类推(图 3)。据 Lourens *et al.* (2005),上新世/更新世分界于 E5/6 长周期之间的高振幅上,界线年龄校正为 1.806 Ma(原为 1.77 Ma),中新世/上新世分界线在 E14 长周期处,年龄 5.33 Ma(原为 5.32 Ma),渐新世/中新世分界(也即古近纪/新近纪分界)则被划在 E58 长周期处,年龄 23.03 Ma(原为 23.8 Ma)。这样一来,后者的年龄变化在新的新生代标准地层年代表中的变化最大,而中新世总年龄也从原来的 18.5 Ma 减少到 17.7 Ma(图 3)。总之,新的年龄框架不仅为判断沉积物年龄和解释地质事件提供了一个更准确的对比平台,也标志着轨道地层学时代的真正到来(Gradstein *et al.*, 2005)。

不过,认识到偏心率周期的地层意义并不意味着将减少对地层层序的研究。相反,寻找合适载体来分析轨道周期仍需做大量的工作,因为并不是所有

的地层古环境指标都含有偏心率周期的记录。目前最常用的地质记录是稳定同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 、沉积物颜色反射率、磁化率等。同时,还必须参考包括古地磁和生物在内的非周期性事件,来确定所研究时段到底属于哪个偏心率长周期。反之,经过天文调谐的生物事件年龄也将增强其应用性,达到更准确定年和对比的目的(Lourens *et al.*, 2005)。

可以预见,这一方法将与较成熟的古地磁法和生物地层法一道,在鉴定沉积物年龄和恢复地层的完整诸方面紧密与古环境古气候分析相结合,为地球系统科学研究铺出一条新路。

3 偏心率周期的古气候意义

为什么主要气候周期会由短周期转为长周期或由长周期转为短周期呢?显然,气候变化主要是由

地球轨道周期牵制已成为不可争辩的事实,但不同轨道周期的叠加以及不同环境参数(如碳储库变化)对不同轨道周期的响应和反馈,增加了对气候驱动机制认识的困难.近年发现的碳循环变化在偏心率周期上领先于冰盖 $\delta^{18}\text{O}$ 变化(Shackleton, 2000; Wang *et al.*, 2003),表明长尺度的偏心率周期可能比各种短周期更有助于对气候变化机理的认识.

除了第四纪典型的 100 ka 气候周期以外,较老的地质时期也有偏心率周期或准偏心率周期的记录,尽管这些记录不一定是连续的(Beaufort, 1994).在地中海一带晚中新世至上新世广泛发育的腐泥层,据研究只与偏心率所调节的斜率和岁差周期上的太阳辐射强弱有关(Sierro *et al.*, 1999; Krjigsman *et al.*, 1999; Lourens *et al.*, 2001; Van Vugt *et al.*, 2001).把腐泥层层序与颜色反射率、Ti/Al 比值和辐射率进行对比,发现腐泥层形成于太阳辐射较强时也即 41 ka 斜率周期强振幅的时段.并且有些偏心率周期似乎与地球磁极变化有某种联系,虽然这种联系的内在控制机制还不清楚.

高分辨率的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 记录除了揭露短尺度

的快速气候变动之外,大多还包含了多种周期的信息. Clemens and Tiedemann (1997)分析深海 $\delta^{18}\text{O}$ 记录后发现,上新世至早更新世的气候变化有偏心率驱动的因素.较长的古气候记录往往可以分辨出不同周期的叠加,例如中新世以 $\delta^{18}\text{O}$ 变重为标志的气候变冷事件(Mi 事件)几乎都与偏心率周期弱振幅时段相吻合(Beaufort, 1994).其他次级 $\delta^{18}\text{O}$ 变重事件似乎也是如此,并且在中新世之前底栖 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的偏重常常都同步发生,这些特征很清楚地表现在热带大西洋 ODP929 站的记录中(Paul *et al.*, 2000)(图 4).类似的还有渐新世的降温事件或 Oi 事件,同样其反映的特征不仅仅与弱振幅相关,并且这些事件的周期也就是 3 个偏心率长周期的组合(Wade and Pälike, 2004).特别有意思的是,始新世/渐新世交界各种沉积记录的大幅度变化也是始于 E85 而止于 E84 偏心率长周期(图 5).在热带太平洋 ODP1218 站包括 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 、堆积速率和碳酸盐含量均快速上升,这些特征用 CCD 大幅度下降和南极冰盖增大来解释似乎不足,可能还伴随全球变冷或者有冰盖形成(Coxall *et al.*, 2005)(图 5).

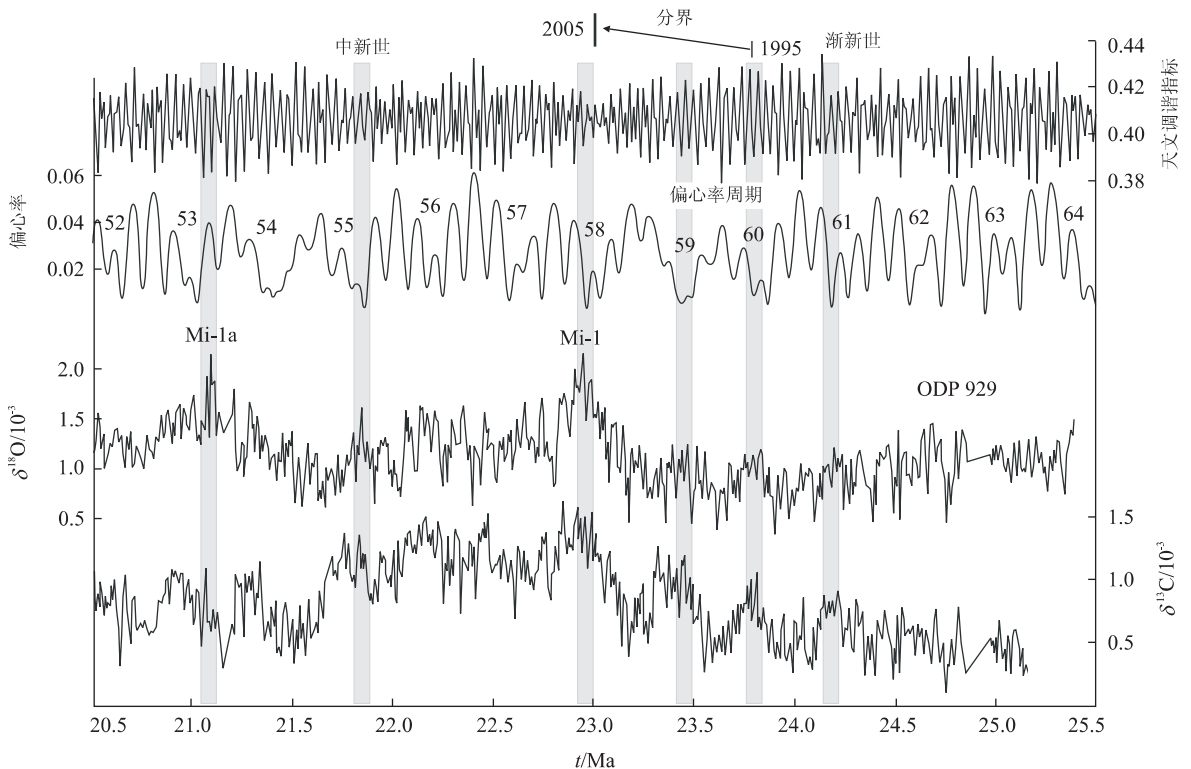


图 4 热带大西洋 ODP929 站渐新世/中新世交界底栖 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的偏重跟偏心率长周期相关(据 Paul *et al.*, 2000)

Fig. 4 Increases in the benthic $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ across the Oligocene/Miocene boundary at ODP Site 929 from the tropical Atlantic were related to the long eccentricity cycles

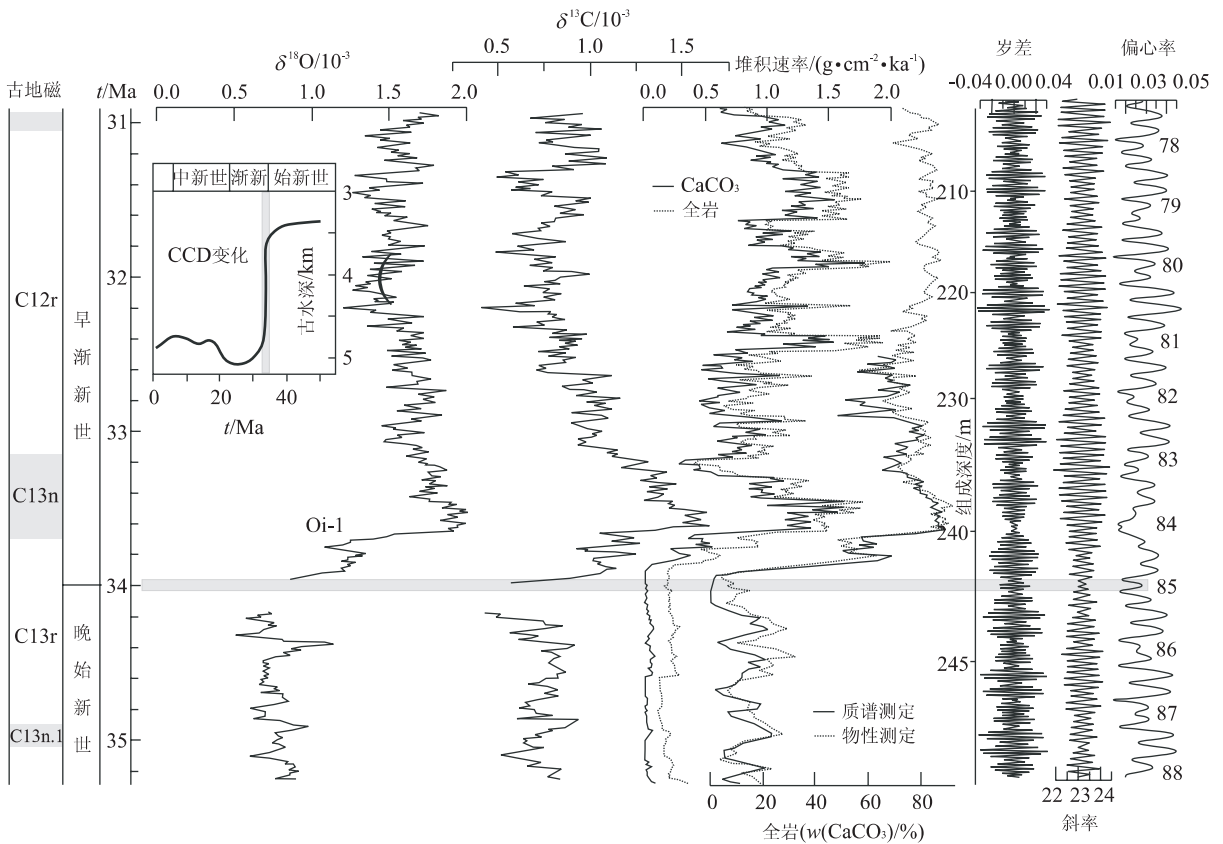


图 5 热带太平洋 ODP1218 站始新世/渐新世交界底栖 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 、碳酸钙堆积速率和碳酸钙含量的巨大变化,也与轨道周期相对应,表明 CCD 下降和南极冰盖增大,并且可能伴随全球变冷或者冰盖形成(据 Coxall *et al.*, 2005 简化)

Fig. 5 The great variations in $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values, carbonate accumulation rates and CaCO_3 content across the Oligocene/Miocene boundary at ODP Site 1218 from the tropical Pacific were also related to orbital cycles, indicating a significant drop of CCD and Antarctic ice cap enlargement, probably accompanied also by global cooling and/or ice accumulation on northern hemisphere

4 南海—西太平洋地区的轨道周期古气候研究

在西太平洋地区, $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 记录所反映的古气候事件也揭示明显的偏心率周期。例如,发生于 14 Ma 左右的中中新世气候转型(MMCO)导致南极冰盖大发展,在西南太平洋 ODP1171 站以表层水温下降 $6\sim 7\text{ }^\circ\text{C}$ 为主要特征,并且明显与长偏心率周期同步(图 6)。据 Shevenell *et al.* (2004) 研究,在该站的表层水降温领先于南极冷水圈增长约 6 万年,可能是因为偏心率周期在很大程度上左右了全球水流结构变化,进而影响低纬热流向高纬输送,最终导致 MMCO 的结果。类似的记录也被发现于南海北部 ODP1146 站,并且中中新世底栖 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的 405 ka 周期与 Laskar 的轨道周期模式在 14.9 Ma 之前相当一致,但自 14.9 Ma 开始则转以斜率周期

为主导。Holbourn *et al.* (2004) 认为 ODP1146 站的这些现象反映了一种气候轨道驱动的转型,即从低纬偏心率驱动转为高纬斜率驱动,后者标志着南极冰盖扩张的影响(图 7)。

田军等(2004)分析了南海南部 ODP1143 站 5 Ma 以来有孔虫稳定同位素变化对地球轨道的响应,发现底栖 $\delta^{18}\text{O}$ 的 100 ka 周期的振幅在 3.5 Ma 以前较小,而在 2.0~3.5 Ma 期间显著增大,并在中等振幅上保持稳定(图 8); 2.0~1.5 Ma 期间振幅又趋于减小,尔后振幅又逐渐增加,并一直持续到现在,且达到 5 Ma 以来的最大值。浮游 $\delta^{18}\text{O}$ 的 100 ka 周期在 0.6 Ma 以前的振幅变化非常小,从 0.6 Ma 至今其振幅逐渐增强,成为晚更新世的主导周期。底栖有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 记录中的 100 ka 周期的振幅与底栖 $\delta^{18}\text{O}$ 的滤波结果类似,也是在 0.6 Ma 前才开始增加,并成为晚更新世的主导周期;而浮游 $\delta^{13}\text{C}$ 的 100 ka

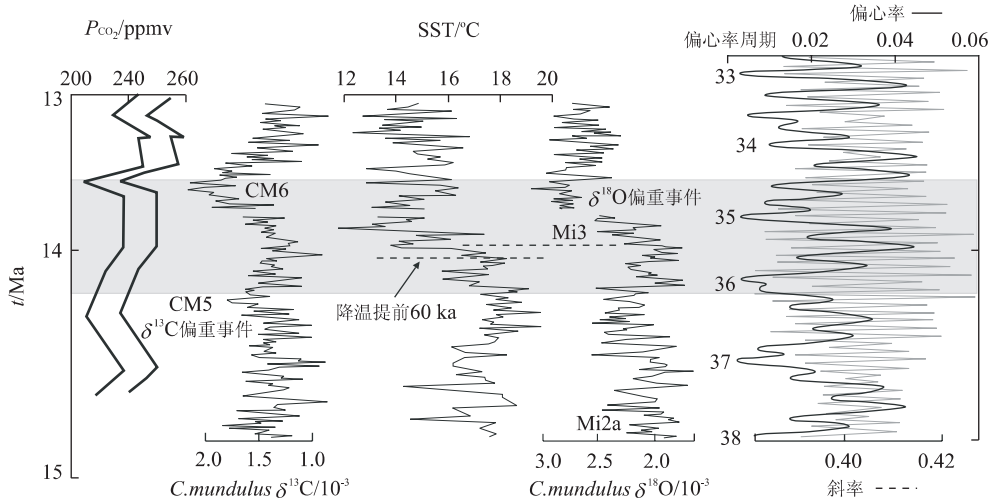


图 6 西南太平洋 ODP1171 站底栖 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 以及 Mg/Ca 比值求得的表层水温变化与偏心率周期和全球 CO_2 含量的关系,表明中新世气候转型时降温约 $6\sim 7^{\circ}\text{C}$,比南极冷水圈增长提前约 6 万年 (Shevenell *et al.*, 2004)

Fig. 6 Comparisons between the benthic $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ and the Mg/Ca -derived SST from ODP Site 1171 in the southwestern Pacific and eccentricity cycles and the global P_{CO_2} , indicating a drop of SST by $6\sim 7^{\circ}\text{C}$ which was about 60 ka prior to the Antarctic cryosphere expansion during the Middle Miocene climate transition

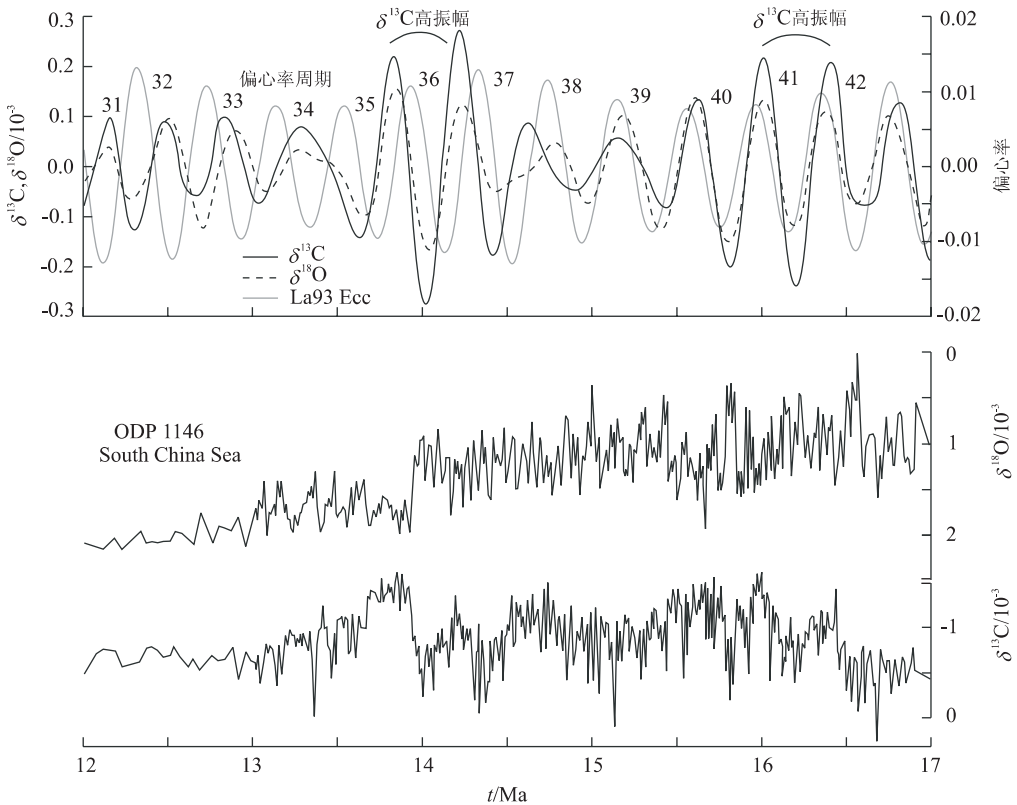


图 7 南海北部 ODP1146 站中新世底栖 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 在偏心率长周期的滤波结果表示明显不同步始于 15~14 百万年间 (Holbourn *et al.*, 2004)

Fig. 7 Filtered eccentricity signal components in benthic $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ from ODP Site 1146 in the northern South China Sea show obvious discrepancies starting from 15-14 Ma

周期的振幅在 5 Ma 记录中则一直较弱,只是在一些短的时间里略有增加,阶段性与底栖 $\delta^{13}\text{C}$ 相似

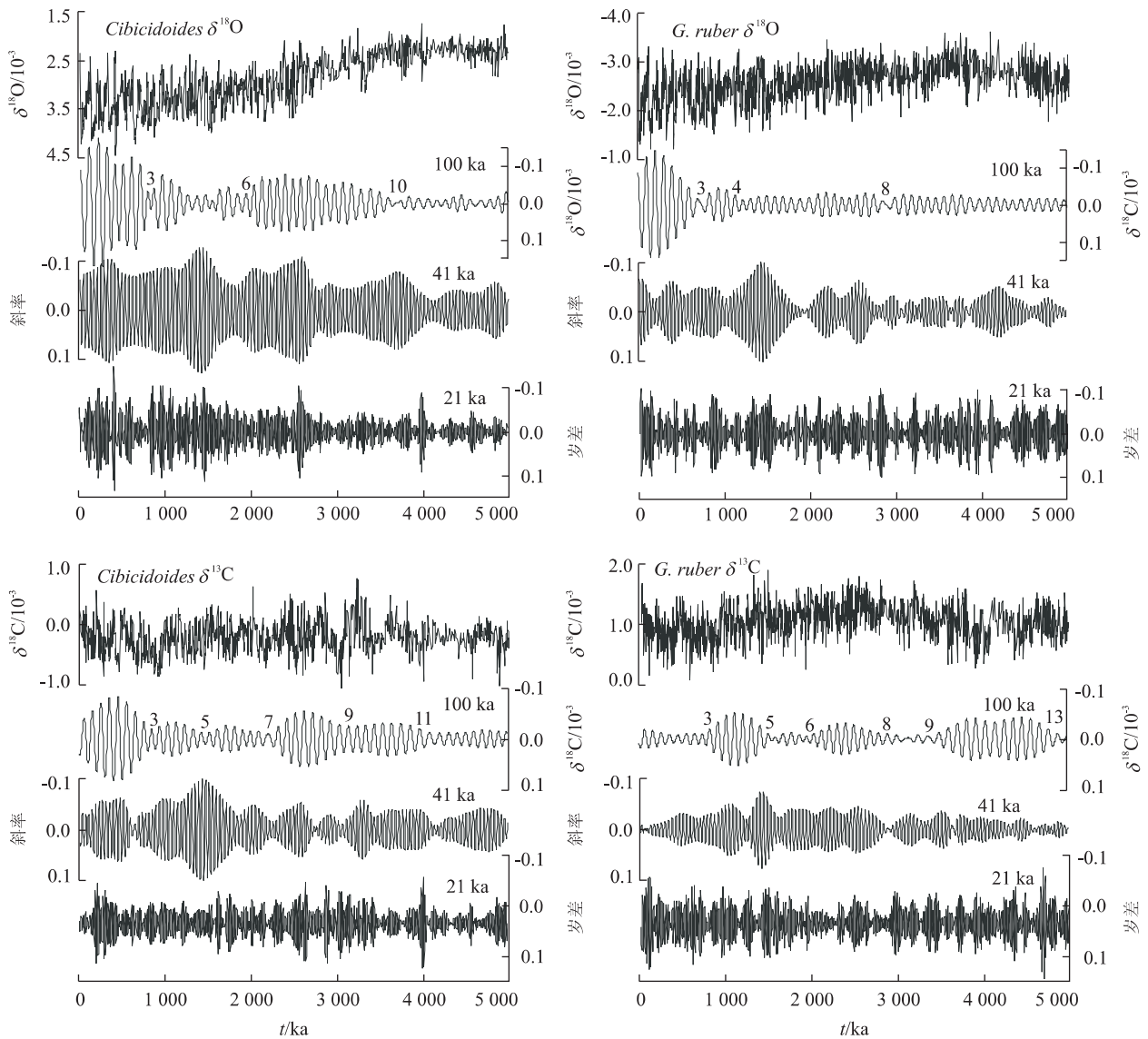


图 8 南海南部 ODP1143 站过去 5 百万年来的底栖有孔虫 *Cibicidoides* 和浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber* $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta^{13}\text{C}$ 在偏心率、斜率和岁差周期上的滤波结果,表明偏心率周期在这些气候记录上明显的不连续性(田军等,2004)

Fig. 8 Filtered orbital signal components in benthic and planktonic $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ from ODP Site 1143 in the southern South China Sea over the eccentricity, obliquity and precession bands, showing the distinctive discontinuity of the eccentricity cycles from these climate records

并且较为明显(图 8). 他们还发现浮游 $\delta^{13}\text{C}$ 在 405 ka 周期上与地球轨道驱动高度相关,并且在 100 ka 周期上 $\delta^{13}\text{C}$ 领先于 $\delta^{18}\text{O}$,说明热带区碳循环对气候变化有影响.

包括 ODP1143 站在内,来自全球各大洋的多条 $\delta^{13}\text{C}$ 记录剖面都出现周期性 $\delta^{13}\text{C}$ 偏重事件. 据汪品先等(2003)研究,自 3.6 Ma 以来(晚上新世至第四纪)共有 9 次这样的 $\delta^{13}\text{C}$ 偏重事件($\delta^{13}\text{C}_{\text{max}}$ I ~ IX),且具 400~500 ka 长偏心率(准)周期. 这些 $\delta^{13}\text{C}$ 偏重事件往往领先于以 $\delta^{18}\text{O}$ 偏重为标志的气候变

冷事件,如 $\delta^{13}\text{C}_{\text{max}}$ - III 领先“中更新世革命”(MPR)、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{max}}$ - II 领先“中布容事件”(MBE)等. 这种规律性表明, $\delta^{13}\text{C}_{\text{max}}$ 事件反映了大洋碳库的改组,其变化领先于冰盖扩张也证明了碳循环对于冰期变化的调控作用. 所以轨道周期气候变化的热带过程可能是全球气候变化比高纬过程更关键的驱动力(Rutherford and D'Hondt, 2000; Shackleton, 2000; Wang *et al.*, 2003).

5 小结

偏心率周期在长尺度上的稳定性,为长尺度地质年代划分提供了轨道地层的依据.新的国际地层年代表基于偏心率长周期来划分地层,试图更客观地体现沉积物的自然年龄,为综合地层古气候研究提供了一个新的平台.稳定同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 记录,以及沉积物的其他物理化学记录包括颜色反射率和磁化率等,将在提供古气候指标的同时,提供地层年龄和层序完整性的指标.同时,挖掘偏心率周期的古气候反映,不仅有助于恢复沉积地层的完整性,而且还利于匡别偏心率与其他地球轨道周期在气候变化上的关系特别是它们在驱动和控制气候演变的贡献之大小.

致谢: Felix Gradstein 教授和 Lucas Lourens 教授提供基于偏心率长周期所新建的国际地层年代表, André Berger 教授澄清有关轨道周期的理论,在此一并致谢.

References

- Beaufort, L., 1994. Climatic importance of the modulation of the 100 kyr cycle inferred from 16 m. y. long Miocene records. *Paleoceanography*, 9: 821—834.
- Berger, A., 1977. Support for the astronomical theory of climatic change. *Nature*, 269: 44—45.
- Berger, A., Imbrie, J., Hays, J. D., 1984. Milankovitch and climate. Reidel Publishing, Dordrecht.
- Berger, A., 1988. Milankovitch theory and climate. *Review of Geophysics*, 26(4): 624—657.
- Berger, A., Loutre, M. F., 1991. Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quat. Sci. Rev.*, 10: 297—317.
- Berger, A., Li, X. S., Loutre, M. F., 1999. Modeling northern hemisphere ice volume over the last 3 Ma. *Quat. Sci. Rev.*, 18: 1—11.
- Berger, A., Loutre, M. F., Laskar, J., 1992. Stability of the astronomical frequencies over the earth's history for paleoclimate studies. *Sciences*, 255: 560—566.
- Berger, W. H., Bickert, T., Jansen, E., et al., 1993. The central mystery of the Quaternary ice age. *Oceanus*, 36: 53—56.
- Berger, W. H., Jansen, E., 1994. Mid-Pleistocene climate shift—The Nansen connection. *Geophys. Monogr.*, 84: 295—311.
- Berggren, W. A., Kent, D. V., Swisher, C. C., et al., 1995. A revised Cenozoic geochronology and chronostratigraphy. In: Berggren, W. A., Kent, D. V., Aubry, M. P., et al., eds., *Geochronology, time scales and global stratigraphic correlation. SEPM Special Publication*, 54: 129—212.
- Clemens, S. C., Tiedemann, R., 1997. Eccentricity forcing of Pliocene-Early Pleistocene climate revealed in a marine oxygen-isotope record. *Nature*, 385: 801—804.
- Coxall, H. K., Wilson, P. A., Pälike, H., et al., 2005. Rapid stepwise onset of Antarctic glaciation and deeper calcite compensation in the Pacific Ocean. *Nature*, 433: 53—57.
- Gradstein, F., Ogg, J., Smith, A., 2005. *A geologic time scale 2004*. Cambridge University Press, London.
- Hays, J. D., Imbrie, J., Shackleton, N. J., 1976. Variations of the earth's orbit; Pacemaker of the ice age. *Science*, 194: 1121—1132.
- Hodell, D. A., Charles, C. D., Ninnemann, U. S., 2000. Comparison of interglacial stages in the South Atlantic sector of the southern ocean for the past 450 kyr: Implications for marine isotope stage MIS 11. *Global and Planetary Change*, 24: 7—26.
- Holbourn, A., Kuhnt, W., Schulz, M., 2004. Orbital paced climate variability during the Middle Miocene: High resolution benthic foraminiferal stable-isotopic records from the tropical western Pacific. In: Clift, P., Wang, P., Kuhnt, W., et al., eds., *Continent-ocean interactions within East Asian marginal seas. Geophysical Monograph*, 149: 321—337.
- Imbrie, J., Boyle, E., Clemens, S., et al., 1992. On the structure and origin of major glaciation cycles. 1. Linear responses to Milankovitch forcing. *Paleoceanography*, 7: 701—738.
- Imbrie, J., Imbrie, K. P., 1979. *Ice ages: Solving the mystery*. Harvard University Press, MA.
- Imbrie, J., Berger, A., Boyle, E., et al., 1993. On the structure and origin of major glaciation cycles. 2. The 100 000-year cycle. *Paleoceanography*, 8: 699—735.
- Imbrie, J., Hays, J. D., Martinson, D. G., et al., 1984. 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. D., et al., eds., *Milankovitch and climate. Part 1*. Reidel Publishing Co., Dordrecht, 269—305.
- Krijgsman, W., Hilgen, F. J., Raffi, I., et al., 1999. Chronology, causes and progression of the Messinian salinity crisis. *Nature*, 400: 652—655.

- Laskar, J., Robutel, P., Joutel, F., et al., 2004. A long term numerical solution for the insolation quantities of the earth. *Astron. Astrophys.*, 428:261—285.
- Lourens, L. J., Wehausen, R., Brumsack, H. J., 2001. Geological constraints on tidal dissipation and dynamical ellipticity of the earth over the past three million years. *Nature*, 409:1029—1033.
- Lourens, L. J., Hilgen, F. J., Shackleton, N. J., et al., 2005. The Neogene period. In: Gradstein, F., Ogg, J., Smith, A., eds., *A geologic time scale 2004*. Cambridge University Press, London.
- Paul, H. A., Zachos, J. C., Flower, B. P., et al., 2000. Orbitally induced climate and geochemical variability across the Oligocene/Miocene boundary. *Paleoceanography*, 15:471—485.
- Rutherford, S., D'Hondt, S., 2000. Early onset and tropical forcing of 100 000-year Pleistocene glacial cycles. *Nature*, 408:72—75.
- Shackleton, N. J., 2000. The 100 000-year ice-age cycle identified and found to lag temperature, carbon dioxide and orbital eccentricity. *Science*, 289:1897—1902.
- Shevenell, A. E., Kennett, J. P., Lea, D. W., 2004. Middle Miocene Southern Ocean cooling and Antarctic cryosphere expansion. *Science*, 305:1766—1770.
- Sierro, F. J., Flores, J. A., Zamarreno, I., et al., 1999. Messinian pre-evaporite sapropels and precession-induced oscillation in western Mediterranean climate. *Mar. Geol.*, 153:137—146.
- Tian, J., Wang, P. X., Cheng, X. R., 2004. Responses of foraminiferal isotopic variations at ODP Site 1143 in the southern South China Sea to orbital forcing. *Science in China (Ser. D)*, 47(10):943—953.
- Tiedemann, R., Sarnthein, M., Shackleton, N. J., 1994. Astronomic timescale for the Pliocene Atlantic $\delta^{18}\text{O}$ and dust flux records from Ocean Drilling Program Site 659. *Paleoceanography*, 9:619—638.
- Van Vugt, N., Langereis, C. G., Hilgen, F. J., 2001. Orbital forcing in Pliocene-Pleistocene Mediterranean lacustrine deposits; dominant expression of eccentricity versus precession. *Palaeogeogr.*, *Palaeoclimatol.*, *Palaeoecol.*, 172:193—205.
- Wade, B. S., Pälike, H., 2004. Oligocene climate dynamics. *Paleoceanography*, 19: PA4019. doi: 10. 1029/2004PA001042.
- Wang, P. X., Tian, J., Cheng, X. R., et al., 2003. Exploring cyclic changes of the ocean carbon reservoir. *Chinese Sci. Bull.*, 48(23):2536—2548 (in Chinese).
- Zachos, J. C., Pagani, M., Sloan, L., et al., 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 292:686—693.

附中文参考文献

- 田军, 汪品先, 成鑫荣, 2004. 南沙 ODP1143 站有孔虫同位素变化对地球轨道驱动响应. *中国科学 (D 辑)*, 34(5): 452—460.
- 汪品先, 田军, 成鑫荣, 等, 2003. 探索大洋碳储库的演变周期. *科学通报*, 48(23): 2536—2548.