

深海记录中的热带过程及其周期性

田 军,汪品先

同济大学海洋地质国家重点实验室,上海 200092

摘要: 地球运行轨道参数包括偏心率、斜率和岁差,在地质时期分别具有 413 ka 和 100 ka、41 ka、23 ka 和 19 ka 的周期,它决定地表太阳辐射在不同纬度和季节的周期性变化。太阳辐射变化中,岁差周期最为明显,斜率周期在中高纬度比较明显,而偏心率周期本身作用微弱,主要通过调控岁差周期的变幅影响气候。传统的地球轨道驱动理论认为,北半球高纬的太阳辐射决定全球冰量和地表的气候变化,轨道周期可能线性地反映到气候变化的周期中去。实际的深海记录反映的情况并非如此,尤其在热带海区,气候替代性指标的周期性与太阳辐射的周期性既存在相似性,也存在较大区别。相似性在于,热带海区的气候替代性指标均表现出较强的岁差和斜率周期,而且通常情况下岁差周期的强度要高于斜率周期的强度,说明热带海区的气候变化受控于岁差调控的太阳辐射的变化;区别性在于,热带海区气候替代性指标通常表现出较强的不容忽视的 100 ka、413 ka 的偏心率周期和 10 ka 左右的半岁差周期,而且 100 ka、413 ka 的偏心率周期还是季风系统的典型周期,说明热带海区的气候变化并不是简单的线性响应太阳辐射的变化,也不完全受北半球高纬的控制,而是具有自身的特性。

关键词: 热带过程;周期性;深海记录。

中图分类号: P532;P736

文章编号: 1000-2383(2006)06-0747-07

收稿日期: 2006-04-15

Tropical Process and Its Periodicity in the Deep Sea Records

TIAN Jun, WANG Pin-xian

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

Abstract: The earth's orbital geometry configures eccentricity, obliquity and precession, which control the seasonal and latitudinal distribution of the insolation on the earth's surface. In the periodic variations of the insolation, the precession cycles of 23 ka and 19 ka are significant at any latitude, and the obliquity cycle of 41 ka is evident only at high and middle latitudes, whereas the eccentricity cycles of 413 ka and 100 ka are nearly faint at any latitude. The traditional orbital theory emphasizes the insolation at high northern latitudes which controls global ice volume and climate change and probably transfers its periodicity to the linear climate system. However, the periodicity of the climatic proxies from the tropics is not identical to that of the insolation. Both the insolation and the tropical process perform strong precession and less strong obliquity cycles, highlighting the dominant control of the precession modulated insolation on the tropical climatic changes. Nevertheless, the tropical process especially the monsoon system commonly performs strong eccentricity cycles of 100 ka and 413 ka, as well as significant semi-precession cycles around 10 ka, which are nearly absent in the insolation. These features indicate that the non-linear tropical climatic process doesn't simply respond to the insolation change, nor is completely controlled by the high northern latitudes, but possesses feature of its own.

Key words: tropical process; periodicity; deep sea records.

1 高纬驱动与热带过程

气候变化的轨道驱动理论强调北半球高纬的作

用,要点在于北纬 65°的夏季太阳辐射,它的周期性变化及其引起的反馈效应决定了更新世的冰期旋回 (Berger and Loutre, 1991; Milankovitch, 1930)

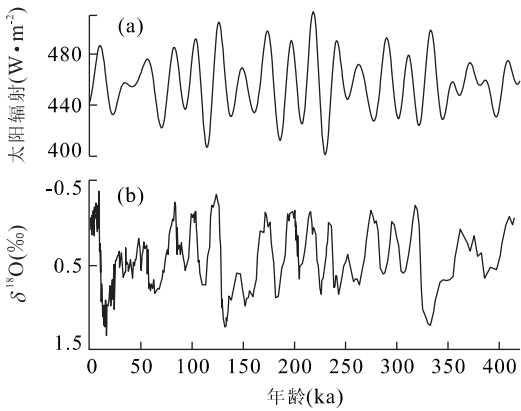


图 1 0~420 ka; (a) 北纬 65°夏季太阳辐射 (Berger and Loutre, 1991); (b) 南极大气 $\delta^{18}\text{O}$ (Petit *et al.*, 1999)
Fig. 1 0—420 ka; (a) N65° summer insolation; (b) Vostok atmosphere $\delta^{18}\text{O}$

(图 1). 深海和陆地记录证明: 北半球冰盖在冰期扩张, 在间冰期消退, 最显著的周期为 100 ka、41 ka 和 21 ka, 分别接近地球的偏心率、斜率和岁差 (Hays *et al.*, 1976; Imbrie *et al.*, 1984). 典型的气候替代性指标, 如深海有孔虫氧同位素 (田军等, 2005)、黄土和古土壤的粒度和磁化率等, 均表现出显著的 100 ka、41 ka 和 21 ka 周期 (Ding *et al.*, 1994). 20 世纪 80 年代初的 CLIMAP 计划更是强调气候变化的步调受地球轨道参数的调控, 而关键点在于北半球高纬 (CLIMAP, 1976). CLIMAP 重建的末次冰期热带海区的海水表层温度几乎与现代相当, 而最大的降温区域在北大西洋高纬, 达 10 °C 之多, 由于大洋传送带 (conveyor belt) 的源区位于北大西洋高纬 (Broecker, 1991), 长期以来, 北大西洋成了古气候研究的中心, 气候变化的轨道驱动理论成为古气候学的主流思想, 该理论强调气候变化的源头在北大西洋高纬, 而北纬 65°夏季太阳辐射则是一切变化的直接外因.

低纬热带海区由于向高纬输送冰盖生长必需的热量和水汽 (Cane, 1998; Cane and Evans, 2000), 长期以来一直受到海洋与气候学家的关注. 无论是现代观测还是深海沉积记录都凸显热带太平洋在全球气候变化中的作用.

根据卫星遥感观测资料, 全球大洋最热的表层海水主要集中在以 28 °C 等温线圈定的西太平洋暖池区 (western pacific warm pool, 简称 WPWP) (Yan *et al.*, 1992), 而暖池的大小和温度的变化与厄尔尼诺/南方涛动 (El Niño-Southern Oscillation,

简称 ENSO) 现象密切相关. 西太平洋暖池区还是全球海气交换最强烈的区域, 这里的上升气流形成了三大环流, 即横向季风环流、侧向季风环流和沃克环流, 是影响全球气候变化的一个重要区域.

深海记录显示, 赤道西太平洋 ODP806B 孔和赤道东太平洋 TR163-19 孔, 浮游有孔虫的 Mg/Ca 比值证明, 0~450 ka 冰期的平均海水表层温度比全新世低 3~4 °C, 末次冰盛期则比全新世低 ~4 °C, 而一个冰期、间冰期旋回中海水表层温度的差异可高达 5 °C (Lea *et al.*, 2000). GLAMAP 采用改进的浮游有孔虫的转换函数和扩展了的数据库重建了末次冰期大西洋的海水表层温度, 结果发现相对全新世热带大西洋的降温大大超过了 CLIMAP 的估算, 达到 4~8 °C (Weinelt *et al.*, 2003; Pflaumann *et al.*, 2003). 类似的现象在热带印度洋也有发现. 这些与 CLIMAP 的记录截然相反. 不仅如此, 研究者还发现, 热带地区的海水表层温度变化往往领先于高纬冰量变化 2~3 ka (Lea *et al.*, 2000; Visser *et al.*, 2003), 这种超前的现象不仅存在于晚更新世的冰消期, 而且也同样存在于中更新世气候转型期 (Medina-Elizalde and Lea, 2005), 这使得研究者更加重视热带太平洋在全球气候变化中的作用.

2 热带过程的周期性

周期性是区分深海记录中高纬和低纬气候变化规律的一个重要手段, 比如年均太阳辐射变化的周期性就随纬度和季节的变化而变化. 如果气候变化只受太阳辐射控制, 则低纬海区气候替代性指标的周期性应与低纬太阳辐射的周期性一致, 然而记录显示, 两者既有较大的相似性, 也存在较大的差异.

2.1 太阳辐射的周期性

地球运行轨道参数包括偏心率、斜率和岁差, 在地质时期分别具有 413 ka 和 100 ka、41 ka、23 ka 和 19 ka 的周期, 它决定地表太阳辐射在不同纬度和季节的周期性变化.

计算证明 (Berger and Loutre, 1991), 更新世以来, 夏季 (6 月) 和冬季 (12 月) 的太阳辐射在中纬和低纬热带地区主要由岁差周期控制, 而高纬地区的太阳辐射只在夏季才表现出很强的岁差周期; 斜率周期只在中高纬地区才有所体现; 至于偏心率周期, 则在任何纬度上的太阳辐射中表现都太微弱. 偏

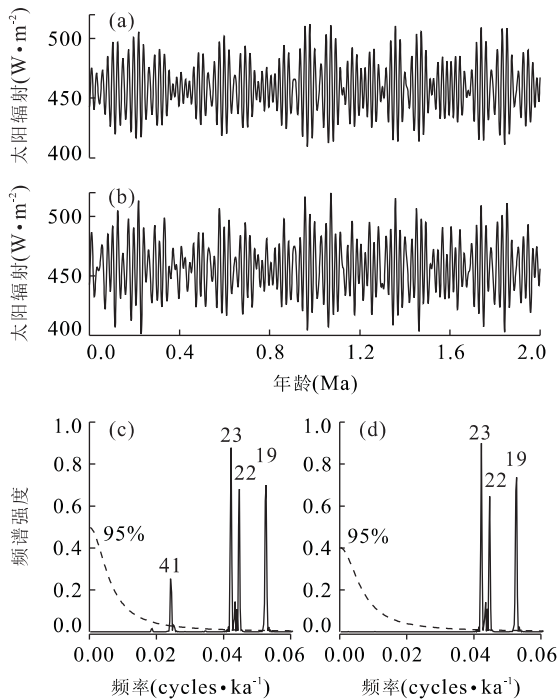


图 2 (a) 北纬 15° 夏季 (6 月) 月均太阳辐射; (b) 北纬 65° 夏季 (6 月) 月均太阳辐射; (c) 0~2 Ma 北纬 65° 夏季 (6 月) 月均太阳辐射的频谱; (d) 0~2 Ma 北纬 15° 夏季 (6 月) 月均太阳辐射的频谱

Fig. 2 (a) N15° summer (June) insolation; (b) N65° summer (June) insolation; (c) Spectrum of N65° summer (June) insolation (0-2 Ma); (d) Spectrum of N15° summer (June) insolation (0-2 Ma)

(c)和(d)均采用 95% 的检验标准, 图中数字代表具体周期, 单位为 ka

心率的作用在于调制岁差的振幅 (Berger and Loutre, 1991), 对于更新世低纬地区任一纬度上的太阳辐射, 偏心率的作用也在于调制太阳辐射的振幅变化, 表现在太阳辐射极大或极小值的周期性变化上。

图 2 中 a 和 b 分别为 0~2 Ma 北纬 65° 和 15° 夏季 (6 月 21 日~7 月 21 日) 月均太阳辐射曲线。频谱分析证明 (图 2c、d), 高纬太阳辐射具有很强的岁差和斜率周期; 而低纬太阳辐射只具有很强的岁差周期, 缺乏斜率周期; 100 ka 和 413 ka 的偏心率周期在高纬和低纬太阳辐射中表现甚微, 在线性坐标上几乎不可见。

2.2 热带过程的周期性

深海记录证明, 热带海区气候变化的周期性与低纬太阳辐射的周期性既有相似性, 又存在很大的差异性, 在某种程度上既体现了太阳辐射对气候变化的控制作用, 又表现出热带海区自身的特点, 即热带海区的气候变化并不完全受北半球高纬的调控。

相似性在于, 热带海区的气候替代性指标均表现出较强的岁差和斜率周期, 而且通常情况下岁差周期的强度要高于斜率周期的强度, 说明热带海区的气候变化受控于岁差调控的太阳辐射的变化。如赤道印度洋 MD900963 孔, 频谱分析发现该孔海水表层生产力具有很强的岁差周期, 而交叉频谱进一步显示, 表层生产力的变化与地球轨道参数 ETP (偏心率(E)+斜率(T)-岁差(P)) 在岁差周期上高度相关 (Beaufort *et al.*, 1997), 体现生产力的变化受控于岁差控制的太阳辐射的变化。在南海南部 ODP (ocean drilling program) 1143 站, 蛋白石记录的硅质生产力和浮游有孔虫碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 在更新世的变化均表现出很强的岁差周期, 且在此周期上与地球轨道参数 ETP 高度相关 (Tian *et al.*, 2004; 田军等, 2005) (图 3)。类似的例子在赤道东西太平

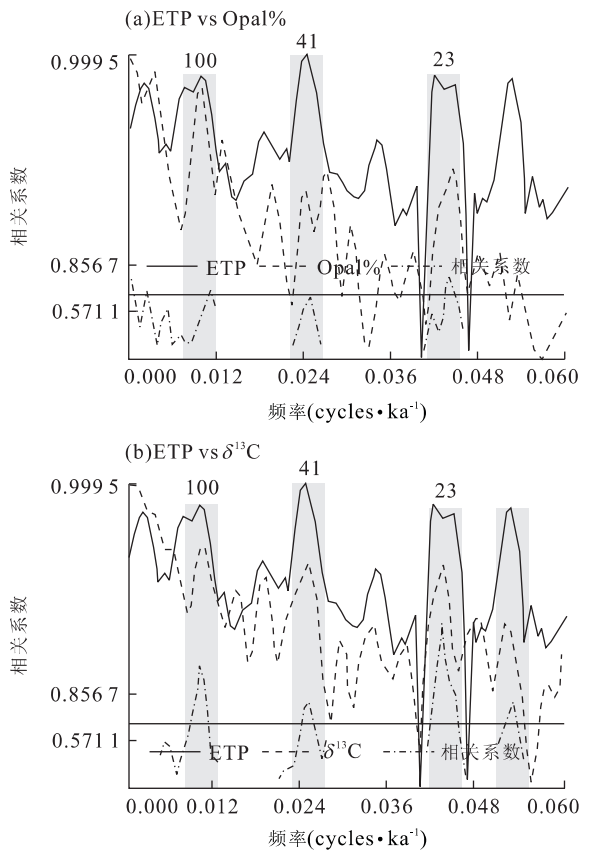


图 3 南海 ODP1143 站 (0~1.6 Ma); (a) 蛋白石 Opal% 与 ETP 的交叉频谱; (b) 浮游有孔虫碳同位素的 $\delta^{13}\text{C}$ 与 ETP 的交叉频谱

Fig. 3 Cross spectrum of (a) opal and ETP, and (b) $\delta^{13}\text{C}$ and ETP at ODP Site 1143 in the South China Sea (0-1.6 Ma)

图中数字代表周期, 单位 ka

洋 (Ravelo and Shackleton, 1995) 和赤道大西洋 (Tiedemann *et al.*, 1994) 均广泛存在, 表现出岁差调控的太阳辐射对热带海区气候变化的线性控制作用。

而差异性则在于, 模拟和深海记录中的热带海区气候替代性指标通常表现出 10 ka 左右的半岁差周期和 100 ka、413 ka 的偏心率周期, 反映了气候系统的非线性过程。有两种方式可以产生半岁差周期: 其一, 一个岁差周期中近日点与春分或秋分点的两次重合可以产生半岁差周期, 正如太阳每年通过赤道两次产生半年周期一样; 其二, 南北半球的岁差信号呈反相的 180° , 南半球的岁差信号传递到北半球也可以在北半球产生半岁差周期 (Rutherford and Hondt, 2000)。气候模拟显示, 轨道尺度上, 热带海区厄尔尼诺 (ENSO) 爆发的周期与半岁差周期相吻合, 约 11 ka (Clement *et al.*, 1999)。能量平衡模式发现, 模拟的热带海水表层温度不仅含有典型的 100 ka、40 ka 和 20 ka 的轨道周期, 而且还含有 10 ka 的半岁差周期和 413 ka 的长偏心率周期, 而高纬夏季太阳辐射和海水表层温度的周期只局限于 41 ka 和 23 ka、100 ka 的偏心率周期则很弱 (Short *et al.*, 1991); 此外, 热带气候变化中的半岁差周期与偏心率周期关联紧密, 偏心率周期与半岁差周期在强度上呈正比, 即气候变化的偏心率周期是半岁差周期的产物, 而且半岁差周期的变化也影响到了斜率和岁差周期的振幅变化 (Clement *et al.*, 1999)。深海记录发现, 1.5 Ma 以前, 北半球高纬碳酸钙堆积通量在岁差和半岁差周期上的相位差变化方向相反, 1.5 Ma 后则同向变化, 而热带大西洋粉尘通量在岁差和半岁差周期上的相位差始终是同向变化, 数字滤波的结果也显示底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 中的 100 ka 周期正好在 1.5 Ma 开始增强, 这说明, 大西洋低纬热带地区独特的半岁差信号在大约 1.5 Ma 传递到了高纬, 并导致了气候变化的 100 ka 周期 (Rutherford and Hondt, 2000)。半岁差周期也相继在热带海区的深海记录中被发现, 如南海南部 ODP1143 站表层与次表层浮游有孔虫的 $\delta^{18}\text{O}$ 差值 (Tian *et al.*, 2004)、南海北部 ODP1144 站深海孢粉记录等 (Sun *et al.*, 2003) (图 4)。此外, 匈牙利的高分辨率陆相孢粉记录显示, 在北极冰盖形成期间 (3.05~2.6 Ma), 植被变化显示出很强的半岁差和偏心率周期, 且半岁差周期的振幅控制偏心率周期的振幅, 进一步说明了热带地区气候变化的重要性 (Willis *et al.*, 1999)。可以假设, 正是热带地区半岁

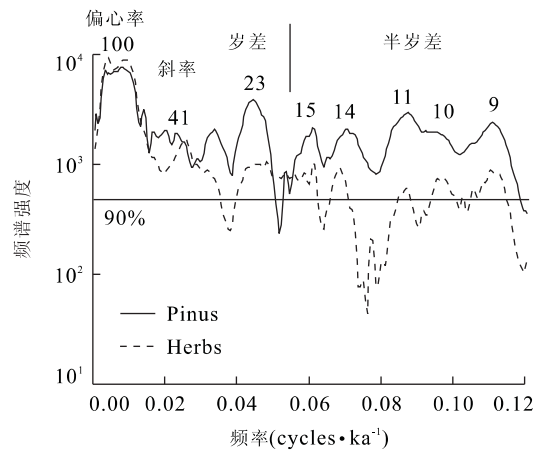


图 4 南海 ODP1144 站 0~400 ka 孢粉谱中草本植物 (Herbs) 和松粉 (Pinus) 百分含量的频谱

Fig. 4 Spectrum of Herbs and Pinus percentage at ODP Site 1144 in the South China Sea (0-400 ka)

图中数字代表周期, 单位 ka (Sun *et al.*, 2003)

差周期的作用, 使得北极冰盖形成时期冰量的变化出现显著的 100 ka 偏心率周期, 同时增强了 41 ka 斜率周期的振幅, 而削弱了 23 ka 岁差周期的振幅, 造成高纬冰量和太阳辐射变化中天文周期的差异。

2.3 季风系统的周期性

季风是低纬地区特有的自然现象, 它的形成是由于大陆和海洋的差异性比热造成的, 因为陆地热容量小, 对太阳辐射的响应远比海洋要快。今天的季风在北半球强盛, 而在南半球微弱, 原因在于大部分的陆地都分布在北半球。从理论上讲, 如果夏季的太阳辐射越强, 则夏季风越强, 反之, 如果冬季的太阳辐射越弱, 则冬季风越强。地质历史上, 如果夏季太阳辐射越强, 则陆地受热更快更深, 形成的夏季风更强, 降雨更多; 如果冬季太阳辐射越弱, 则陆地散热更快, 形成的冬季风越强。在地质历史上, 只有当时的夏季太阳辐射值明显超过现代的夏季太阳辐射值, 才会留下明显的地质记录。非洲的湖泊记录为此推论提供了很好的证据。年均太阳辐射在 10~140 ka 期间存在 6 次极大值期, 平均每隔 23 ka 出现一次, 显示了很强的岁差周期, 地质记录显示, 在这些特定的时期, 非洲的许多湖泊存在高湖面, 代表了强劲的夏季风, 尽管这些湖泊现在大部分都已干涸或湖面很低 (Ruddiman, 2000), 显示出太阳辐射对热带季风系统的线性控制。

然而, 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

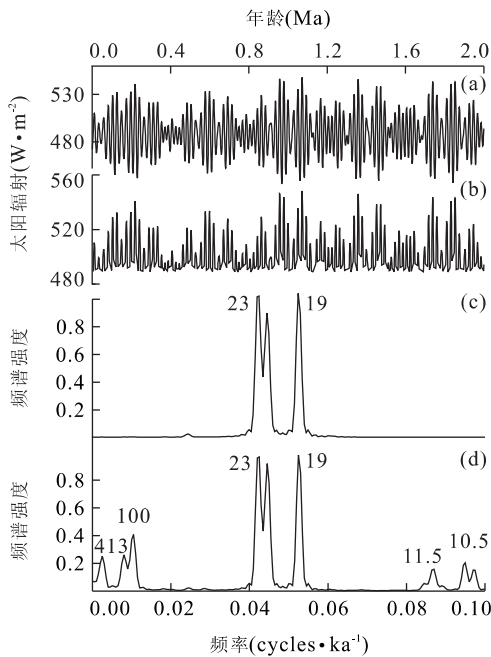


图 5 0~2 Ma; (a) 北纬 30° 夏季太阳辐射; (b) 北纬 30° 夏季太阳辐射高值部分; (c) 北纬 30° 夏季太阳辐射的频谱; (d) 北纬 30° 夏季太阳辐射高值部分的频谱

Fig. 5 0—2 Ma; (a) N30° summer insolation; (b) Warm part of N30° summer insolation; (c) Spectrum of N30° summer insolation; (d) Spectrum of the warm part of N30° summer insolation

太阳辐射据 Berger and Loutre (1991), 图中数字代表周期, 单位 ka

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 , $N=2, 3, 4, \dots$), 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。如果将 0~2 Ma 北纬 30° 夏季太阳辐射的低值部分去掉 (舍去低于平均值的部分), 则太阳辐射的高值部分便表现出 100 ka、413 ka 的偏心率周期和 11.5 ka、10.5 ka 的半岁差拍频周期 (图 5), 这正是季风系统具有的典型周期。

热带大西洋 ODP659 站 5 Ma 以来的风尘含量记录了非洲季风晚上新世以来轨道尺度上的变化 (Tiedemann *et al.*, 1994)。交叉频谱分析表明, 5 Ma 以来 659 站的风尘记录含有显著的 23 ka 和 19 ka 的岁差周期, 100 ka 和 413 ka 的偏心率周期, 11.5 ka 和 10.5 ka 的半岁差周期, 而且在每个周期上均与北纬 30° 夏季太阳辐射的高值部分充分相关 (图 6), 体现了季风系统独特的周期性。

400 ka 的长偏心率周期在上新世至早更新世 (1.2~5 Ma) 是非洲季风的典型周期, 这在地中海

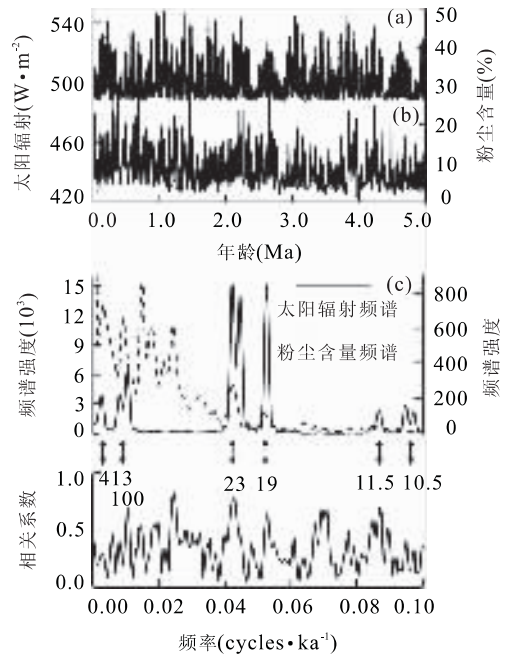


图 6 (a) 北纬 30° 夏季太阳辐射的高值部分 (0~5 Ma); (b) 热带大西洋 ODP659 站风尘记录 (0~5 Ma); (c) 北纬 30° 太阳辐射的高值与 ODP659 站的风尘记录的交叉频谱

Fig. 6 (a) Warm part of N30° summer insolation (0—5 Ma); (b) Eolian percentage at ODP Site 659 in the tropical Atlantic (0—5 Ma); (c) Cross spectrum of the warm part of N30° summer insolation and the eolian percentage at ODP Site 659

图中双向箭头表示主要的轨道周期和拍频周期以及两者在此周期上高度相关; (c) 中的数字代表周期, 单位 ka

沉积中的有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 记录中反映最为明显 (图 7a, Lourens, 1994)。图 7 显示, 指示季风变化的稳定氧同位素在 1.21~5.34 Ma 具有很强的 413 ka 的长偏心率周期 (图 7b), 该周期强度在 $\delta^{18}\text{O}$ 记录中与斜率和岁差周期的强度相当, 但是大大超过 100 ka 偏心率周期的强度。

热带地区季风的岁差和偏心率周期不仅在晚新生代有清楚的记录, 而且在 200 Ma 前的湖泊沉积中也有很好的表现。美国 Newark 湖 200 Ma 前位于北纬 10° 左右, 湖泊的大小和深度受季风强度的影响, 湖相软泥沉积的厚度记录显示, Newark 湖的深度变化表现出很强的 21 ka 的岁差周期和 100 ka、413 ka 的偏心率周期, 沉积至少持续了 20 Ma (Ruddiman, 2000)。

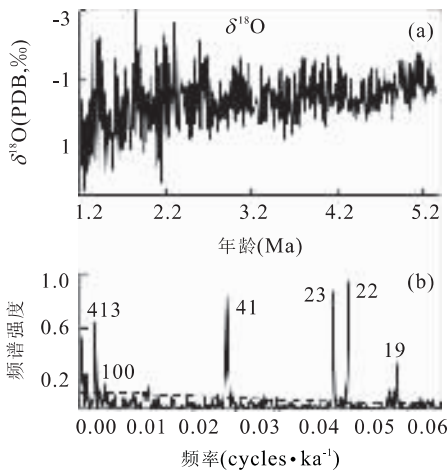


图 7 (a)地中海 Rossello 合成剖面 $\delta^{18}\text{O}$ (1.2~5.3 Ma); (b)地中海 Rossello 合成剖面 $\delta^{18}\text{O}$ (1.2~5.3 Ma) 的频谱
Fig. 7 (a) $\delta^{18}\text{O}$ of the Rossello composite profile in the Mediterranean Sea (1.2–5.3 Ma) and (b) its spectrum

(a)和(b)中的数字代表周期,单位 ka。图中虚线代表频谱分析中 80%的检验标准

3 结论

热带海区气候变化的周期性特点不仅仅反映在 413 ka、100 ka 的偏心率周期和 10 ka 左右的半岁差周期上,某些特定的气候替代性指标还具有一些特殊的周期,而且该周期既不与轨道周期也不与它们的拍频周期相关联,比如赤道太平洋和印度洋的海水初级生产力在晚更新世具有显著的 30 ka 周期 (Beaufort *et al.*, 2001)。然而,30 ka 的周期只在赤道太平洋和印度洋的初级生产力中显现,却不见于赤道大西洋的初级生产力中,一种解释认为,由于厄尔尼诺/南方涛动事件(ENSO)只发生在赤道太平洋和印度洋海区,在赤道大西洋尚无表现。因此,30 ka 的周期是厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)事件在轨道赤道上的表现 (Pisias and Mix, 1997)。此外,南极冰心的 CO_2 记录也蕴藏显著的 30 ka 的周期 (Petit *et al.*, 1999),而且还与赤道太平洋和印度洋的初级生产力在 30 ka 和 23 ka 岁差周期上高度相关 (Beaufort *et al.*, 2001),进一步凸显了低纬生物泵在影响大气 CO_2 浓度方面的作用 (Rich *et al.*, 1999)。

地球轨道驱动理论,即米兰科维奇理论,尽管在解释低纬区气候变化的机制上存在很大不足,但仍是轨道尺度上解释古气候变化机制的最好的理论。随着更长、分辨率更高、更连续的深海相和陆相地质

记录的出现,随着我们对过去地球轨道变化的了解更加深远和精确,我们将对全球气候变化的周期性特点有更准确的了解。这对揭示过去气候变化的机制、预测未来气候发展的趋势具有深远的意义。

致谢:分析研究的样品由国际大洋钻探计划提供。

References

- Beaufort, L., De Garidel-Thoron, T., Mix, A., et al., 2001. ENSO-like forcing on oceanic primary production during the Late Pleistocene. *Science*, 293:2440–2444.
- Beaufort, L., Lancelot, L. Y., Camberlin, P., et al., 1997. Insolation cycles as a major control of equatorial Indian Ocean primary production. *Science*, 278:1451–1454.
- Berger, A., Loutre, M. F., 1991. Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quaternary Science Reviews*, 10:297–317.
- Broecker, W. S., 1991. The great ocean conveyor belt. *Oceanography*, 4:79–89.
- Cane, M., 1998. A role for the tropical Pacific. *Science*, 282:59.
- Cane, M., Evans, M., 2000. Do the tropics rule? *Science*, 290:1107–1108.
- Clement, A., Seager, R., Cane, M., 1999. Orbital controls on the El Niño/southern oscillation and the tropical climate. *Paleoceanography*, 14:441–456.
- CLIMAP Project Members, 1976. The surface of the ice-age earth: Quantitative geological evidence is used to reconstruct boundary conditions for the climate 18 000 years ago. *Science*, 191:1131–1137.
- Ding, Z. L., Yu, Z. W., Rutter, N. W., et al., 1994. Towards an orbital time scale for Chinese loess deposits. *Quaternary Science Reviews*, 13:39–70.
- Hays, J. D., Imbrie, J., Shackleton, N. J., 1976. Variations in the earth's orbit: Pacemaker of the ice ages. *Science*, 194:1121–1132.
- 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 ^{18}O record. In: Berger A., ed., Milankovitch and climate. D. Reidel, Norwell, Mass., 269–305.
- Lea, D. W., Pak, D. K., Spero, H. J., 2000. Climate impact of Late Quaternary equatorial Pacific sea surface temperature variations. *Science*, 289:1719–1724.
- Lourens, L. J., 1994. Astronomical forcing of Mediterranean climate during the last 5.3 million years [Dissertation]. Utrecht University, Netherlands, 247.
- Medina-Elizalde, M., Lea, D. W., 2005. The Mid-Pleistocene

- transition in the tropical Pacific. *Science*, 310: 1009—1012.
- Milankovitch, M., 1930. Mathematische Klimalehre und astronomische Theorie der Klimaschwankungen. In: Koppen, W., Geiger, R., eds., *Handbuch der Klimatologie*. Gebrüder Borntraeger, Berlin, I (A), 1—76.
- Petit, J. R., Jouzel, J., Raynaud, D., et al., 1999. Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399: 429—436.
- Pflaumann, U., Sarnthein, M., Chapman, M., et al., 2003. Glacial North Atlantic: Sea-surface conditions reconstructed by GLAMAP 2000. *Paleoceanography*, 18(3): 1065, doi: 10. 1029/2002PA000774.
- Pisias, N. G., Mix, A. C., 1997. Spatial and temporal oceanographic variability of the eastern equatorial Pacific during the Late Pleistocene: Evidence from Radiolarian microfossils. *Paleoceanography*, 12: 381—393.
- Ravelo, A., Shackleton, N. J., 1995. Evidence for surface-water circulation changes at Site 851 in the eastern tropical Pacific Ocean. *Proc. ODP Sci. Results*, 138: 503—514.
- Rich, J. J., Hollander, D., Birchfield, G. E., 1999. Role of regional bioproductivity in atmospheric CO₂ changes. *Global Biogeochem. Cycles*, 13: 531—553.
- Ruddiman, W. F., 2000. *Earth's climate: Past and future*. W. H. Freeman and Company, New York, 174—192.
- Rutherford, S., Hondt, S. D., 2000. Early onset and tropical forcing of 100 000 year Pleistocene glacial cycles. *Nature*, 408: 72—75.
- Short, D. A., Mengel, J. G., Crowley, T. J., et al., 1991. Filtering of Milankovitch cycles by earth's geography. *Quaternary Research*, 35: 157—173.
- Sun, X. J., Luo, Y. L., Huang, F., et al., 2003. Deep-sea pollen from the South China Sea: Pleistocene indicators of East Asian monsoon. *Marine Geology*, 201: 97—118.
- Tian, J., Wang, P. X., Cheng, X. R., et al., 2004. Pleistocene precession forcing of the upper ocean structure variations in the southern South China Sea. *Progress in Natural Science*, 4(11): 1004—1009.
- Tian, J., Wang, P. X., Cheng, X. R., et al., 2005. Establishment of the Plio-Pleistocene astronomical timescale of ODP Site 1143, southern South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(1): 31—39 (in Chinese with English abstract).
- Tiedemann, R., Sarnthein, M., Shackleton, N. J., 1994. Astronomic timescale for the Pliocene Atlantic ¹⁸O and dust flux records from Ocean Drilling Program Site 659. *Paleoceanography*, 9: 619—638.
- Visser, K., Thunell, R. C., Stott, L., 2003. Magnitude and timing of temperature change in the Indo-Pacific warm pool during deglaciation. *Nature*, 421: 152—155.
- Weinelt, M., Vogelsang, E., Kucera, M., et al., 2003. Variability of North Atlantic heat transfer during MIS2. *Paleoceanography*, 18(3): 1071, doi: 10. 1029/2002PA000772.
- Willis, K. J., Kleczkowski, A., Briggs, K. M., et al., 1999. The role of sub-Milankovitch climatic forcing in the initiation of the northern hemisphere glaciation. *Science*, 285: 568—571.
- Yan, X. H., Ho, C. R., Zheng, Q., et al., 1992. Temperature and size variabilities of the western Pacific warm pool. *Science*, 258: 1643—1645.

附中文参考文献

- 田军, 汪品先, 成鑫荣, 等, 2005. 南海 ODP1143 站上新世至更新世天文年代标尺的建立. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(1): 31—39.