

文章编号 1001 - 7410(2006)05 - 694 - 08

低纬过程的轨道驱动*

汪 品 先

(同济大学海洋地质国家重点实验室,上海 200092)

摘要 气候变化轨道驱动的发现,使古气候研究进入了定量探索变化机理的新阶段。然而经典版本的米兰科维奇学说只考虑北半球高纬区的辐射量变化,与新发现的地质记录和热带过程在现代气候中所起的作用相矛盾。文章简要地综述以贸易风与季风系统为主的低纬过程如何响应轨道变化,指出岁差与偏心率周期通过驱动热带过程影响全球气候的重要性,建议在古气候研究中发展新思路,重视区别高、低纬区不同过程的轨道周期,从高、低纬区相互作用的角度研究气候变化的机理。

主题词 气候变化 地球轨道 热带过程 岁差 偏心率

中图分类号 P714.2, P732 **文献标识码** A

1 引言

20 世纪地球科学的各项进展中,气候轨道周期的发现是一个耀眼的亮点。太阳系中地球运行轨道的周期性缓慢变化,经过地球表层系统的放大,导致了冰期旋回的重复发生。米兰科维奇计算晚第四纪北半球高纬区 65°N 的夏季太阳辐射量变化周期,与后来测得的冰期旋回深海氧同位素记录相一致,从而证实了这项“米兰科维奇学说”。进一步的研究发现,北半球高纬区下沉而形成的“北大西洋深层水(NADW)和由此推动的“大洋传送带”^[1],正是将上述冰盖的信息传向全球的重要载体,推测是轨道的缓慢变化引起冰期突变的触发机制。因此,北半球高纬区的 65°N + NADW 曾被普遍视作冰期旋回气候变化的根源所在,其他地区的变化无非是轨道周期通过北半球高纬区间接影响的结果。

气候轨道周期的发现,将地球历史科学推上了定量研究的新阶段。由于地球轨道的天文周期是可以精确计算的,也由于同位素等古环境定量指标的出现和地质时代测年技术的改进,古气候学从定性的传统地质科学中脱颖而出,进入了能够通过数学途径探索因果关系的现代科学的行列。然而,米兰科维奇只是提出了地球轨道引起气候周期的基本框架,辐射量的缓慢变化如何引起重大气候事件,其中的机制至今尚未认识;相反,传统版本的米兰科维奇

学说从产生时起就带来了一系列的未解“难题”^[2],而随着研究程度的提高,新的发现又向传统米兰科维奇学说提出了越来越多的疑问。

首先,现代气候变化研究的结果,低纬过程(如厄尔尼诺)在全球气候系统中的重要性日益明朗。既然现代的热带过程可以带动全球各个气候系统发生变化,但为什么到了古气候就“一切来自北大西洋”,只有北半球高纬度区方才重要^[3]?其次,南极冰芯、石笋和海洋等记录,纷纷说明南极和中低纬区的温度变化,在轨道的频道上发生在北极冰盖消长之前^[4~6],因而不可能由北极冰盖推动,与传统的米兰科维奇学说发生直接冲突。再次,Nd 同位素等新方法的研究结果,说明反映气候与植被更替的大洋¹³C 变化在先,“大洋传送带”的环流变化在后,北大西洋深层水不可能是冰期旋回的触发机制^[7]。总之,SPECMAP(1992)^[8]十多年前提出的“响应从北方开始,传播到南方,然后再返回来驱动北极冰盖”的轨道驱动模型,已经被地质记录新的时间序列所否定^[9];单靠北半球高纬区 65°N + NADW 解释冰期旋回的方案,已经不再成立。

本来所谓“轨道驱动”,指的是太阳辐射量在地球表面的季节与纬度分布,随着轨道参数而发生的变化;而阳光历来是普照全球,不可能用某一根纬线所能涵盖。以八、九十年前的计算技术,惟一可行的是抓住一点、重点突破。米兰科维奇对 65°N 夏

作者简介:汪品先 男 69 岁 教授、中国科学院院士 海洋地质专业 E-mail: pxwang@online.sh.cn

*国家自然科学基金项目(批准号:40520150487)资助

2006 - 07 - 15 收稿,2006 - 07 - 25 收修改稿

季辐射量进行计算,确实是当时科学上的壮举,而且准确地抓住了“牛鼻子”,这才发现了气候的天文周期。但是随着地质资料的积累和计算技术的进步,只看 65 N 就显得不够,应当全面考察辐射量变化对于气候系统的影响;而遗漏的重点是低纬区和南极区,关键是要研究那里的过程在轨道驱动下发生的变化,及其对全球气候的影响。

以上讨论的是地球系统科学的一个典型命题,涉及的地区遍及全球表面,有关的过程穿越各个圈层,远远超出一篇文章的范围。本文的目的,只是对此重大科学问题作一次“随笔”性的讨论,着重探讨低纬过程能不能直接响应轨道驱动,这种过程表现出来的轨道周期有哪些特点,然后再来看我国的古气候研究中应当注重哪些问题。其中有些观点并不成熟,谨以笔者的管窥之见,就正于同行。

2 轨道周期的地理差异

地球运行轨道的几何变化,影响着太阳辐射量在地球表面的纬度与季节分布。影响主要通过 4.1 万年的斜率周期和 2.3 万年的岁差周期,10 万年和 41.3 万年的偏心率周期本身的直接影响太小,其作用在于调控岁差周期气候效应(即“气候岁差”)的变化幅度,偏心率小到 0 时岁差的气候效应也就随之消失。不同纬度区对不同轨道参数的敏感程度不一:高纬区辐射量受斜率(4 万年周期)影响大,而岁差(2 万年周期)在中、低纬区表现最强(图 1)。地球上的气候过程,在高纬度区可以冰盖的张缩为代表,在中、低纬区以季风为代表;轨道周期的气候响应也就可以归纳为两大类:高纬区的冰盖响应和中、低纬区的季风响应。前者重点反映斜率周期,后者的主要表现为岁差周期以及调控气候岁差变幅的偏心率周期^[10,11]。

但是辐射量还不等于气候。且不谈温室气体等因素,仅仅由于海洋和陆地的热容量悬殊,轨道驱动的气候效果就会受到海陆分布的影响。Short 等^[12]用数值模拟求出了地球上不同地区,80 万年以来夏季最高温度的变化曲线,然后通过频谱分析比较各种轨道周期的地理分布。结果发现,高纬区受斜率与岁差驱动(图 2a),低纬区受岁差驱动(图 2b);而赤道区除岁差外,还有 40 万年和 10 万年的偏心率、以及 1 万年左右的半岁差周期,如赤道非洲的模拟结果所示(图 2c)。由于太阳在春分和秋分每年两次直射赤道,南北两半球的岁差有着相反的相位,因此 2 万年的岁差周期中就含有两次辐射量的峰值,

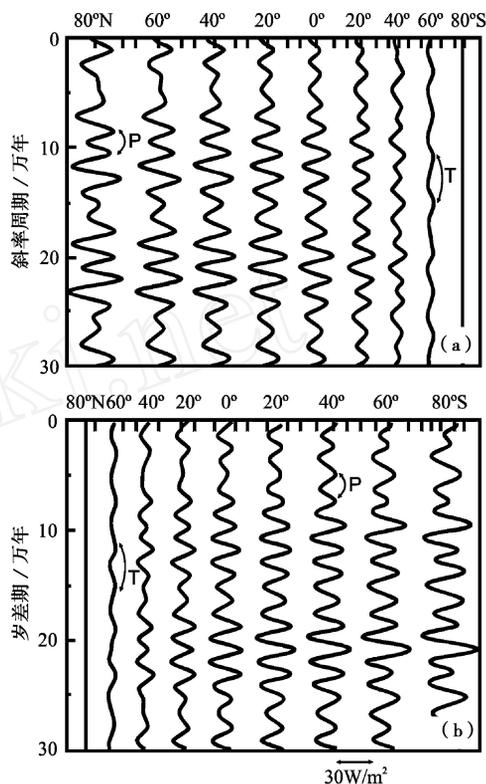


图 1 近 30 万年来不同纬度区 6 月 (a) 与 12 月 (b) 太阳辐射量的变化 (据 Ruddiman, 2001^[10])
4 万年斜率周期 (T) 对高纬区影响大, 2 万年岁差周期 (P) 对中、低纬区影响大
下方细箭头表示辐射量尺度

Fig 1 June (a) and December (b) monthly insolation variations over the last 300,000 years (based on Ruddiman, 2001^[10])

这就是 1 万年的半岁差^[12,13]。同样,由于热带地区对于气候周期中变冷的部分不敏感,使得气温震荡曲线的下半部失去效应,气候响应的低温部分受到截切,能量转向 10 万年和 40 万年的偏心率周期^[14]。因此,半岁差和偏心率周期在轨道驱动中功率强大,这正是热带过程和季风响应的重要特征。

3 贸易风与厄尔尼诺的轨道周期

2~7 年周期性厄尔尼诺现象的发现,改变了我们对气候周期的认识。如果说高纬区的冰盖消长,主要是由于热量经向输送的变化;那么热带的厄尔尼诺现象,是贸易风减弱、赤道东太平洋水温异常升高的结果,属于纬向过程。厄尔尼诺不仅是一种年际震荡,随着其强度与频度的变化,还会在长时间尺度上影响气候的平均状态。因此,可以在不同的时间尺度上,利用赤道东太平洋的海面平均温度研究厄尔尼诺的发育程度。15 万年来热带太平洋

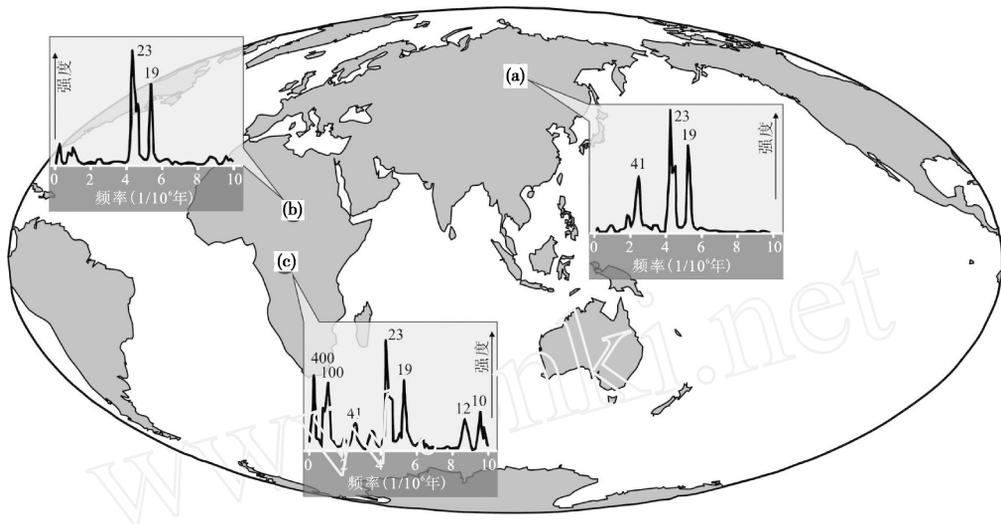


图 2 轨道驱动气候效应在不同地区的“地理过滤”作用:近 80 万年来夏季最高温度模拟结果的频谱分析
据 Short 等, 1991^[112] 编绘

(a) 60°N, 100°E (欧亚大陆中北部) (b) 15°N, 20°E (撒哈拉南缘) (c) 0°N, 20°E (赤道非洲)

Fig 2 “Geographic filtering” of climatic effects of orbital forcing in different areas: amplitude spectrum of the simulated maximum summer temperature for the past 800,000 years (based on Short *et al.*, 1991^[112])

(29°N ~ 29°S) 海气相互作用的模拟结果表明, 厄尔尼诺的发育程度受岁差驱动^[15]。地质记录证明, 末次盛冰期时贸易风和东太平洋上升流减弱、水温升高, 热带太平洋处于长期的厄尔尼诺状态; 全新世中期东太平洋水温变凉, 处于拉尼娜状态^[16]。

但假如要研究古厄尔尼诺事件而不是平均状态的话, 就需要更高分辨率的记录, 比如利用造礁珊瑚的年纹层, 在年度分辨率基础上进行再造。用这种办法虽然不大可能得到长期连续的记录, 却能提供厄尔尼诺强度与频度变化的直接证据。最值得注意的成果, 是西太平洋暖池核心区新几内亚岛以北的珊瑚记录, 在 13 万年来的 8 个时间段里取得了短期的珊瑚记录, 分析结果发现无论冰期或间冰期都有厄尔尼诺现象, 但是强度和变幅最大的是晚全新世到现在, 上次间冰期也比较强, 最弱的是全新世早期。由此看来, 厄尔尼诺既受轨道的岁差周期驱动, 又受整个海水温度控制, 冰期的寒冷条件会抑制厄尔尼诺事件的发生^[17]。

厄尔尼诺与岁差周期的关系, 反映了低纬过程轨道驱动的特征。然而在地球系统中, 热带的气候变化也会受到高纬区的影响。关于上新世时的热带太平洋, 究竟处于长期的厄尔尼诺状态还是拉尼娜状态, 学术界尚有争论^[18], 但是深海记录确实表明 300 万年前开始随着北极冰盖的发育, 赤道东太平

洋的表层水温与生产力都出现了典型的 4 万年斜率周期, 反映出当时厄尔尼诺状态的出现遵循高纬区的周期性。其实, 这种斜率周期最可能是南半球高纬区的气候信息, 随着南大洋海水的北上, 在热带海区上涌, 造成表层水温与生产力的周期性变化^[19]。可见, 热带气候记录的也并不全是低纬过程的信息, 高纬区的变化也会进入低纬区。但必须注意这是在北极冰盖发育、大洋温跃层变浅的前提下, 来自高纬的冷水才能在东太平洋上涌海面; 早于 300 万年前, 还没有北极冰盖的条件下这种高纬影响难以出现^[20]。第四纪由于两极都发育大冰盖, 高、低纬区的相互作用空前强烈, 这正是第四纪轨道驱动较前复杂的原因所在。

当然, 赤道贸易风和热带过程决不限于太平洋。赤道高生产力取决于受贸易风控制的上升流, 只要贸易风发生变化, 热带大洋的生产力都会出现厄尔尼诺类型的准周期现象。根据深海沉积中的钙质超微化石, 可以推算赤道海区的生产力变化, 然后再根据生产力的变化推算贸易风的强弱。赤道大西洋由此求出的 20 万年贸易风记录, 主要是 2 万年的岁差和 1 万年的半岁差周期^[13, 21]; 而赤道印度洋 25 万年的记录中, 以 2 万年岁差周期为最强^[22]。无论大西洋还是印度洋, 研究者都将热带过程与太平洋相比, 认为是“类似厄尔尼诺”的现象。

4 季风气候的轨道周期

古季风的研究始于非洲的湖面升降,接着是阿拉伯海上流历史所反映的印度季风,而东亚古季风的研究则从黄土-古土壤剖面开始,拓展到洞穴、湖泊与海洋。现在,南海与阿拉伯海已经成为研究南亚与东亚季风历史的两大基地^[23]。关于亚洲季风气候的轨道周期以及其他时间尺度上的演变,我们最近有过比较全面的总结^[24],这里只是选择轨道驱动中的突出问题进行讨论。

季风形成在中低纬区,由于海陆接受太阳辐射时升温速率不同所致,因此与地球表面的海陆分布密切相关。陆地的规模愈大,海陆的反差愈强,季风也更加发育。三叠纪时的联合大陆产生出“超级季风”^[25],便是实例。而当代的地球表面,再度出现了大陆汇聚的趋势,从非洲、南亚到东亚与澳洲的季风区,已经连成一个巨大的系统(图 3a)^[26]。其中非洲大陆横跨赤道,海陆分布格局最为简单,轨道驱动的气候效应也最为直接,岁差与偏心率的周期应当最强;印度次大陆与印度洋分居赤道两侧,印度洋跨赤道的潜热输送起着重要作用^[27],轨道驱动的效果比非洲复杂;至于东亚季风,南北有亚、澳两个大陆,东西有太平洋与青藏高原,从轨道驱动到季风气候之间卷入的因素更多、轨道周期的表现也必定更加复杂(图 3b)。

果然,非洲季风的轨道驱动最为直观。岁差周期控制的季风降雨,每隔两万多年为非洲的干旱区带来大湖,湖泊干枯后湖底的硅藻被吹到热带大西洋,在地层中呈岁差周期出现^[28]。规模更大的是地中海的腐泥层,强大的北非夏季风引起尼罗河泛滥,为贫养的地中海带来巨量的营养元素和表层水的淡化,导致硅藻勃发,在广大的海底形成腐泥层^[29]。腐泥层与夏季风均受轨道参数控制^[30],发生在岁差低值期,亦即北半球夏季辐射量最大、季节差最强的时候;而且只在偏心率最大,亦即气候岁差变化最强的时期,才有腐泥层成束出现^[31]。地中海的沉积随着构造运动上升后出露在意大利南方,其中不少地层剖面已被选为晚新生代的国际层型。研究该区上新世层型剖面的荷兰科学家,利用其中的腐泥层和与此相当的暗色层作为岁差标志,进行年代调谐和编号,建立了天文地层序列^[31],并已正式列入国际地层表^[32]。

值得格外注意的,是偏心率对气候岁差的调控作用。前面说过,气候岁差的变幅受偏心率调控,偏

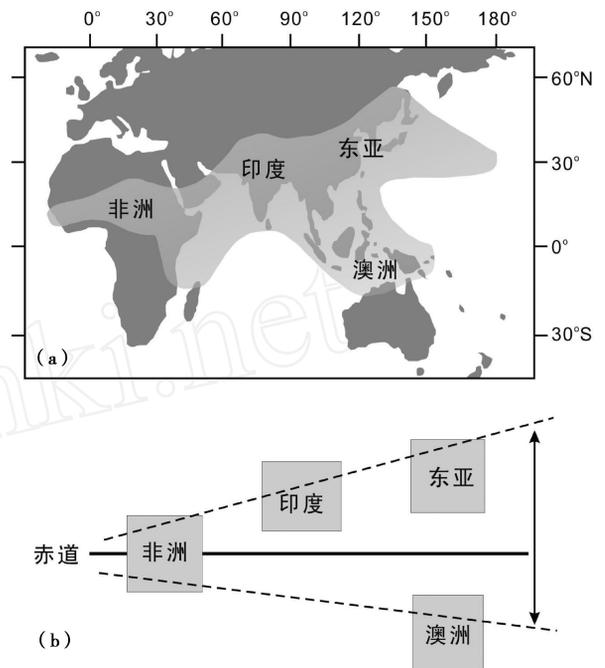


图 3 现代的亚-非-澳季风系统

(a)季风气候地理分布示意图(据 Black^[26]修改)

(b)非洲、印度、东亚、澳洲季风系统的海陆分布、地理位置分析

Fig 3 Modern African-Asian-Australian monsoon system

心率为零时岁差的气候效应消失。因此地中海的“腐泥层”在偏心率最小的时期不能形成,出现的是连续的石灰岩层;等到偏心率的高值期,气候岁差变幅最大,每个岁差周期都会出现腐泥层。结果是每当偏心率每逢 10 万年的高值期,出现小的腐泥层束;每逢偏心率 40 万年的大高值期,出现大的腐泥层束。在意大利南方的露头上,偏心率和岁差的岩性韵律历历在目,从远处就可以看出地层的轨道周期来^[33]。

与非洲相比,亚洲季风的周期性比较复杂,尤其是东亚季风,东与太平洋厄尔尼诺相互影响,南与澳洲季风隔海呼应,西有青藏高原低压,北有西伯利亚高压,因此季风变化与本区低纬辐射量变化之间,并不呈简单的线性关系^[23]。东亚季风无论陆地与海洋的记录,都显示出与冰期旋回的关系,通常冰期时冬季风强,间冰期时夏季风强。除了众所周知的黄土与古土壤和冰期旋回的关系外,近年来南海深海的粘土矿物、孢子花粉分析,或者超微化石和蛋白石所反映的古生产力,都显示出与冰期旋回相关的轨道周期^[34]。

说到这里,有必要提醒冬、夏季风的不同。由于东亚季风系统中冬季风相当强,比如南海冬季风对上升流和生产力的影响并不在夏季风之下,而冬季

风明显地受西伯利亚高压与北极冰盖的影响,因此季风记录与冰期的对应并不奇怪。因此笼统地讲“季风强弱,就不容易与冰期旋回相区别。其实,我们讨论低纬过程所指的夏季风,就显示出与冰期旋回明显不同的周期性,特别是半岁差与偏心率长周期。无论在南海孢粉或者浮游有孔虫反映的海水上层结构中,都发现了1万年的半岁差周期^[35];而反映降水量和风化强度的沉积物K/Si比值,主要是岁差与偏心率周期^[36]。在南海南部深海沉积中的季风记录,具有40万年、10万年偏心率周期、4万年斜率周期、2万年岁差和1万年半岁差周期等最为丰富的频谱,显示出低纬海区对轨道周期响应的特色^[34]。这种多周期的轨道驱动现象,在南亚季风记录中同样存在^[37]。

其中特别有趣的是偏心率周期。南沙海区发现有孔虫碳同位素记录中有40~50万年的长周期,全球对比的结果发现是全大洋碳储库变化的反映^[37, 38]。这种周期也存在于上新世以来大西洋与地中海的粉尘沉积中^[39, 40],和南海反映分化作用强度的沉积物元素比值中^[41],与40万年偏心率长周期相对应,是非洲与亚洲季风的共同特点,推断是热带辐射量变化驱动季风造成干湿气候变化的产物,只是进入第四纪后随着北极冰盖的扩张而受到干扰,变为50万年的长周期^[42]。这种长周期和碳酸盐沉积旋回中也有表现,说明是大洋碳储库的周期性变化,而且在新生代早期就有记录,至少可以追溯到晚古新世^[43],因此是低纬过程直接响应轨道驱动的产物,与北半球冰盖或北大西洋深层水并无关系。

在晚近地质时期里,大洋碳储库的偏心率长周期以地中海的记录最为典型,那里的腐泥层反映了在偏心率调控的岁差驱动下,非洲季风盛衰的天文节奏。至于轨道周期如何通过季风改变大洋碳储库,其中的机制尚待认识,我们初步推测是季风气候通过风化作用和浮游植物群的成分,改变有机碳在海洋碳沉积中的比例所致^[42]。由于大洋中碳的滞留时间长达十余万年,全大洋规模的碳储库变化对于10万年以下的冰期旋回并不敏感^[44],因而受轨道驱动的变化集中表现在40万年长周期上。在新生代早、中期的碳同位素记录中,偏心率长周期表现尤为清晰,说明热带过程的轨道驱动在北极冰盖出现以前占有主导地位,应当是今后古气候定量研究的优先领域之一。

5 从地球系统看古气候学

由上可见,以贸易风和季风为主的低纬气候系

统,都可以直接对轨道驱动作出的响应,并非都要等待北半球高纬区的间接影响。如果从整个地球系统出发研究轨道驱动,就会看到北半球的高纬区和北大西洋深层水(65°N+NADW)固然重要,但毕竟只是整个系统的一部分。在第四纪的气候变化中,北半球冰盖消长的信号简直“压倒一切”,但毕竟低纬区对于轨道驱动的反应同样存在,同样影响着全球气候系统。如果古季风的研究,也无非是证明季风在“冰期时减弱,间冰期加强”,那又何苦要兴师动众地加以专门研究?诚如国际亚洲古季风工作组的总结报告中所指出的:“人们往往习惯于在冰期、间冰期的框架里研究季风变迁,但这是不正确的;研究古季风应当在热带、亚热带变化的广泛视野里进行,其中包括海气相互作用如海水温度、水汽通量的变化在内。”^[23]最近,Ruddiman^[11]更是直截了当地点穿了矛盾:无论古季风轨道驱动的理论,或者石笋的高分辨率记录都说明是以岁差周期为主,而现在海洋沉积中的许多“季风标志”出现的变化周期与此不同,这究竟是季风的标志,还是由别的因素造成?换句话说,我们正在大张旗鼓研究的“季风”周期,究竟是不是季风?

的确,随着资料的充实和机理的揭示,正确识别高、低纬区对轨道驱动响应的时机已在成熟,把冰盖与季风的历史像“眉毛”与“胡子”那样分开的时间也已经来到。在地球系统中,高、低纬区各有其对轨道变化最敏感的不稳定区:高纬的北大西洋北部,是深层水(NADW)下沉、推动“大洋传送带”的枢纽;低纬的西太平洋暖池,是热能汇聚区以及沃克环流和季风环流的辐散中心。前者是海洋与大气之间向上的强对流区,后者是表层与深层水间向下的强对流区^[45],分别是地球气候系统中的“开关”和“引擎”,研究地球的气候系统两者缺一不可。两者间结合的途径既有低纬影响高纬,也有高纬影响低纬;既有通过大气的“桥梁”,也有通过海洋的“隧道”,关键是要揭示结合的具体途径和测出影响的大小^[46]。当务之急是要检出典型的高纬过程与典型的低纬过程,然后才能识别两者在不同程度上叠加的产物。比如极地冰芯中的CH₄含量、地中海地层中的腐泥层,都是低纬过程的直接证据,也都是岁差与偏心率周期记录的典型。

古气候研究始自第四纪,重点在于晚第四纪。但第四纪两极发育大冰盖,至少是显生宙6亿年来绝无仅有的特例,在气候演变历史上严重缺乏代表性;加以晚第四纪时间跨度有限,从中难以看到轨道

长周期的作用。如果从长时间尺度看,地球的大部分历史里缺乏大型冰盖,因而低纬过程才是气候变化的基本机制;而一些重大气候变化事件,很可能是轨道长周期叠加的产物,不一定都要寻找构造运动的背景。就偏心率而言,在10万年和40万年之上还有240万年的超长周期控制其变化幅度;4万年的斜率周期之上,也有120万年的长周期调控其变化幅度。一旦不同系列长周期的最低值恰好重叠,就会发生严重的气候环境突变事件^[33]。例如23Ma前渐新世/中新世交界的Mi-1和14Ma前中中新世蒙特利期结束时的两次变冷事件,都可能是40万年偏心率长周期的最低值,和120万年斜率长周期最低值的巧合所致^[47, 48]。

地球轨道参数的天文长周期,和我们习惯的昼夜、冬夏的天文短周期一样,都具有计时和指示环境背景的双重功能。40万年的偏心率长周期,是地球轨道变化中最为稳定的参数^[49],其长度也适用于显生宙地质历史的时间分辨率,因此它不仅为地质计时提供了“钟摆”,而且也指示地质历史上气候环境变化的节律,最近已被正式用作新生代天文年代学的标准。比如上新世相当偏心率长周期的6~14期,中新世从58期到15期等等(表1)^[50]。从目前的记录看,偏心率长周期至少是大洋碳储库变化的节律^[39],至于其更加丰富的环境含义,尚待就今后的研究去揭示。比如有人提出,由于太阳的潮汐引力在偏心率最大期增强,就有可能诱发地球的火山活动^[51]。

表1 晚新生代的的天文年代学序列^[50]

Table 1 Astronomical chronology of the Late Cenozoic with long-eccentricity numeration

地质年代	下界年龄 /Ma	偏心率长周期编号
更新世	1. 81	1 ~ 5
上新世	5. 33	6 ~ 14
晚中新世	11. 60	15 ~ 29
中中新世	15. 97	30 ~ 40
中新世	23. 03	41 ~ 58

总之,古气候研究已经进入探索机理的定量阶段。作为一个跨越众多圈层的地球系统问题,研究思路和方法起着关键性的作用。轨道驱动是古气候研究的一大亮点,而决不当是供我们拿数据去凑、拿曲线去套的条框。米兰科维奇学说只是在原则上得到肯定,实际的机制尚待发现,真正的理论尚待建立。研究工作切忌盲目地跟从。气候变化必称是季

风盛衰,构造运动无不属高原隆升,这种学术上“顺大溜”、“说套话”的积习,是我们科学创新的障碍。一旦古环境研究陷入现成的窠臼,保真尚且不易,遑论科学创新。我国在古环境研究中已经取得了突出的成就,如果能乘胜前进,将高纬与低纬过程相结合,在不同时间尺度上探索气候环境变化的机理,必将能为国际学术界做出历史性的贡献。

致谢 本文承黄维博士协助制图,特此致谢。

参考文献 (References)

- 1 Bröecker W S. The Great Conveyor Belt. *Oceanography*, 1991, 4 (2): 79 ~ 89
- 2 Imbrie J, Berger A, Boyle EA *et al*. On the structure and origin of major glaciation cycles, 2, the 100,000-year cycle. *Paleoceanography*, 1993, 8: 699 ~ 735
- 3 Kerr R A. The tropics return to the climate system. *Science*, 2001, 292: 660 ~ 661
- 4 Winograd IJ, Coplen T B, Landwehr J M *et al*. A continuous 500,000-year climate record from vein calcite in Devils Hole, Nevada. *Science*, 1992, 258: 255 ~ 260
- 5 Lea D W, Pak D K, Speer H J. Climate impact of Late Quaternary Equatorial Pacific sea surface temperature variations. *Science*, 2000, 289: 1719 ~ 1724
- 6 Shackleton N J. The 100,000-year ice-age cycle identified and found to lag temperature, carbon dioxide, and orbital eccentricity. *Science*, 2000, 289: 1897 ~ 1902
- 7 Piotrowski A M, Goldstein S L, Hemming S R *et al*. Temporal relationships of carbon cycling and ocean circulation at glacial boundaries. *Science*, 2005, 307: 1933 ~ 1938
- 8 Imbrie J, Boyle EA, Clemens S C *et al*. On the structure and origin of major glaciation cycles. I. Linear responses to Milankovitch forcing. *Paleoceanography*, 1992, 7: 701 ~ 738
- 9 Ruddiman W F. Orbital insolation, ice volume, and greenhouse gases. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22 (15 ~ 17): 1597 ~ 1629
- 10 Ruddiman W F. *Earth's Climate: Past and Future*. Freeman & Co., N. Y., 2001. 1 ~ 465
- 11 Ruddiman W F. What is the timing of orbital-scale monsoon changes? *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25 (7 ~ 8): 657 ~ 658
- 12 Short D A, Mengel J G, Crowley T J *et al*. Filtering of Milankovitch cycles by Earth's geography. *Quaternary Research*, 1991, 35 (2): 157 ~ 173
- 13 Berger A, Loutre M F, McIntyre A. Intertropical latitudes, precessional and half-precessional cycles. *Science*, 1997, 278: 1476 ~ 1478
- 14 Crowley T J, Kim K-Y, Mengel J G *et al*. Modeling 100,000-year climate fluctuations in Pre-Pleistocene time series. *Science*, 1992, 255: 705 ~ 707
- 15 Clement A C, Seager R, Cane M A. Orbital controls on the El

- Niño/Southern Oscillation and the tropical climate *Paleoceanography*, 1999, 14: 441~456
- 16 Koutavas A, Lynch-Stieglitz J, Marchitto T M Jr *et al* El Niño-like pattern in ice age tropical Pacific sea surface temperature. *Science*, 2002, 297: 226~229
- 17 Tudhope A W, Chilcott C P, McCulloch M T *et al* Variability in the El Niño-Southern Oscillation through a glacial-interglacial cycle. *Science*, 2001, 291: 1511~1517
- 18 Kerr R A. El Niño or La Niña? The past hints at the future. *Science*, 2005, 309: 687
- 19 Lawrence K T, Liu Z H, Herbert T D. Evolution of the eastern tropical Pacific through Plio-Pleistocene glaciation. *Science*, 2006, 312: 79~83
- 20 Philander S G, Fedorov A V. Role of tropics in changing the response to Milankovitch forcing some three million years ago. *Paleoceanography*, 2003, 18: 1045, doi: 10.1029/2002PA000837
- 21 Molino B, McIntyre A. Precessional forcing of nutricline dynamics in the Equatorial Atlantic. *Science*, 1990, 249: 766~769
- 22 Beaufort L, de Garidel-Thoron T, Mix A C *et al* ENSO-like forcing on oceanic primary production during the Late Pleistocene. *Science*, 2001, 293: 2440~2444
- 23 Wang B, Clemens S C, Liu P. Contrasting the Indian and East Asian monsoons: Implications on geological timescales. *Marine Geology*, 2003, 201(1~3): 5~21
- 24 Wang P X, Clemens S, Beaufort L *et al* Evolution and variability of the Asian monsoon system: Status of the art and outstanding issues. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24(5~6): 595~629
- 25 Kutzbach J E, Gallimore R G. Pangaea climates: Megamonsoons of the megacontinent. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94: 3341~3357
- 26 Black D E. Enhanced: The rains may be a'ccomin'. *Science*, 2002, 297: 528~529
- 27 Clemens S, Prell W, Murray D *et al* Forcing mechanisms of the Indian Ocean monsoon. *Nature*, 1991, 353: 720~725
- 28 Pokras E M, Mix A C. Earth's precession cycle and Quaternary climate change in tropical Africa. *Nature*, 1987, 326: 486~487
- 29 Sachs J P, Repeta D J. Oligotrophy and nitrogen fixation during Eastern Mediterranean sapropel events. *Science*, 1999, 286: 2485~2488
- 30 Rossignol-Strick M. Africa monsoons, an immediate climate response to orbital insolation. *Nature*, 1983, 304: 46~49
- 31 Hilgen F J. Astronomical calibration of Gauss to Matuyama sapropels in the Mediterranean and implication for the Geomagnetic Polarity Time Scale. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 104(2~4): 226~244
- 32 徐道一. 天文地质年代表与旋回地层学研究进展. *地层学杂志*, 2005, 29(增 11): 635~640
- Xu Daoyi. Astro-geologic time scale and the advancements of cyclostratigraphy. *Journal of Stratigraphy*, 2005, 29(Suppl 11): 635~640
- 33 汪品先. 地质计时的天文“钟摆”. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(1): 1~7
- Wang Pinxian. Astronomical “pendulum” for geological clock. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(1): 1~7
- 34 汪品先, 翦知, 赵泉鸿等. 南海演变与季风历史的深海证据. *科学通报*, 2003, 48(21): 2228~2239
- Wang Pinxian, Jian Zhimin, Zhao Quanhong *et al* Evolution of the South China Sea and monsoon history revealed in deep-sea records. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(23): 2549~2561
- 35 田军, 汪品先, 成鑫荣. 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*, 2004, 14(6): 683~688
- Tian Jun, Wang Pinxian, Cheng Xinrong. Pleistocene precession forcing of the upper ocean structure variations of the southern South China Sea. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(6): 683~688
- 36 Wehausen R, Brunsack H-J. Astronomical forcing of the East Asian monsoon mirrored by the composition of Pliocene South China Sea sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 201(3~4): 621~636
- 37 Clemens S C, Prell W L. A 350,000 year summer monsoon multiproxy stack from the Owen ridge, Northern Arabian Sea. *Marine Geology*, 2003, 201(1~3): 35~51
- 38 Wang P, Tian J, Cheng X *et al* Carbon reservoir change preceded major ice-sheet expansion at the mid-Brunhes event. *Geology*, 2003, 31(3): 239~242
- 39 Wang P, Tian J, Cheng X *et al* Major Pleistocene stages in a carbon perspective: The South China Sea record and its global comparison. *Paleoceanography*, 2004, 19: PA 4005, doi: 10.1029/2003PA000991
- 40 Tiedemann R, Samthein M, Shackleton N J. Astronomic timescale for the Pliocene Atlantic ¹⁸O and dust flux records from Ocean Drilling Program Site 659. *Paleoceanography*, 1994, 9: 619~638
- 41 deMenocal P B. Plio-Pleistocene African climate. *Science*, 1995, 270: 53~59
- 42 汪品先, 田军, 成鑫荣等. 探索大洋碳储库的演变周期. *科学通报*, 2003, 48(21): 2216~2227
- Wang Pinxian, Tian Jun, Cheng Xinrong *et al* Exploring cyclic changes of the ocean carbon reservoir. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(23): 2536~2548
- 43 Cramer B S, Wright J D, Kent D V *et al* Orbital climate forcing of ¹³C excursions in the Late Paleocene-Early Eocene (chrons C24n-C25n). *Paleoceanography*, 2003, 18(4): 1097, doi: 10.1029/2003PA000909
- 44 Cramer B S. Deconvolving the carbon isotope record (Abstract). *EOS Trans AGU*, 2003, 84(46): F213
- 45 Webster P J. The role of hydrological processes in ocean-atmosphere interactions. *Reviews Geophysics*, 1994, 32: 427~476
- 46 Liu Z, Yang H. Extratropical control of tropical climate, the atmospheric bridge and oceanic tunnel. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(5): 1230, doi: 10.1029/2002GL016492
- 47 Abels H A, Hilgen F J, Krijgsman W *et al* Long-period orbital control on Middle Miocene global cooling: Integrated stratigraphy and astronomical tuning of the Blue Clay Formation on Malta. *Paleoceanography*, 2005, 20: PA4012, doi: 10.1029/2004PA001129

- 48 Palike H, Frazier J, Zachos J C. Extended orbitally forced palaeoclimatic records from the equatorial Atlantic Ceara Rise. *Quaternary Science Reviews*, 2006, in press
- 49 Berger A, Loutre M F, Laskar J. Stability of the astronomical frequencies over the Earth's history for paleoclimate studies. *Science*, 1992, 255: 560 ~ 566
- 50 李前裕, 田 军, 汪品先. 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*, 2005, 30 (5): 519 ~ 528
- Li Qianyu, Tian Jun, Wang Pinxian. Recognizing the stratigraphic and paleoclimatic significance of eccentricity cycles. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2005, 30 (5): 519 ~ 528
- Li Qianyu, Tian Jun, Wang Pinxian. Recognizing the stratigraphic and paleoclimatic significance of eccentricity cycles. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2005, 30 (5): 519 ~ 528
- Li Qianyu, Tian Jun, Wang Pinxian. Recognizing the stratigraphic and paleoclimatic significance of eccentricity cycles. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2005, 30 (5): 519 ~ 528

ORBITAL FORCING OF THE LOW-LATITUDE PROCESSES

Wang Pinxian

(The State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract

With the discovery of orbital forcing of climate changes, the research on palaeoclimate has entered a new stage of searching for mechanism in climate changes on the basis of quantitative approaches. The classical version of the Milankovitch theory is based towards considering insolation changes only in the boreal high-latitudes, and is challenged now by newly recovered geological records and by the crucial role played by the tropics in the modern climate changes. The present paper briefly reviews the ways how Earth's orbit affects the low-latitude processes such as the trade wind and monsoon systems, emphasizing the significant role played by precession and eccentricity in the global climate system through low-latitudinal response. The paper calls for new approaches to palaeoclimate studies in China, stresses the necessity of distinguishing periodicities of low- vs high-latitude processes in climate response to orbital forcing, and to explore the mechanism of climate changes in the context of interactions between low- and high-latitudes.

Key words climate change, Earth's orbit, tropical processes, precession, eccentricity