

文章编号 1001-8166(2008)03-0221-07

大洋碳循环与气候演变的热带驱动*

翦知盡, 金海燕

(同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

摘要 20世纪气候演变研究的最大突破,在于地球轨道变化驱动冰期旋回的米兰克维奇理论。然而近年来学术界对热带过程和大气CO₂浓度变化的研究进展,暴露了传统的轨道驱动理论存在着对低纬区和碳循环在全球气候系统中作用估计不足的严重缺陷。国家重点基础研究发展计划项目“大洋碳循环与气候演变的热带驱动”拟以南海与西太平洋暖池的深海记录为依据,进行全球性对比和跨越地球圈层的探索,通过观测分析结果与数值模拟的结合、地质记录与现代过程的结合,检验和论证大洋碳储库长周期变化机制的假说,对于不同时间尺度上低纬过程如何通过碳循环在全球气候环境演变中的作用,实现理论上的突破。本文简要介绍了该项目的目的、科学意义、关键科学问题及预期目标等。

关键词 :气候演变理论 ;大洋碳循环 ;热带驱动 ;全球季风 ;西太平洋暖池

中图分类号 :P73 **文献标识码** :A

1 引言

随着新世纪的到来,地球科学发展到了研究“地球系统”的新阶段,其中深海研究又是关键环节。30多年的深海钻探(DSDP)/大洋钻探(ODP)建立的地层序列和古气候记录,为确立地球轨道驱动冰期旋回的气候演变理论提供了证据。然而,基于65°N太阳辐射量物理效应的轨道周期理论,从建立时起便面临着一系列难以解答的难题。在地球运行轨道的三大参数中,4万年的斜率周期影响太阳辐射量在高、低纬度间的分配,2万年的岁差周期影响冬夏的季节差,10万年的偏心率变化调控着气候岁差变化幅度的周期。但是,第四纪晚期的冰期旋回,为什么由4万年变成了10万年周期(“十万年难题”) ? 偏心率有10万年和40万年两种周期,为什么看不到40万年周期(“40万年难题”) ? 距今约四十万年前的氧同位素11期是百万年来最暖的间冰期,怎样用当时微弱的轨道变化来解释(“11期难题”) [1] ?

近年来,国际学术界在现代海洋气候研究中,发现热带过程在全球气候变化中起着驱动作用 [2,3],与地质记录研究中单纯强调冰盖与高纬区作用的传统发生矛盾;同时,在高分辨率海洋沉积记录里,也发现冰消期热带海区水温和大气CO₂浓度早于北极冰盖发生变化 [4,5],提出了热带和南极海区在驱动冰期旋回中所起积极作用的问题,向传统的气候演变的轨道驱动理论提出了挑战。

1.1 大洋碳储库长周期

南沙深海地层中发现的大洋碳储库周期性变动,为热带过程可能通过碳循环影响冰期旋回提供了新的证据。南海大洋钻探和深海“973”项目在南沙海区建成的西太平洋第一个500万年的高分辨率(千年等级)剖面 [6],最引人注目的是¹³C剖面中40~50万年的长周期。这种以碳同位素重值期(¹³C_{max})为标志的长周期不仅见于南海,而且存在于整个大洋;不但见于碳同位素,而且记录于碳酸盐旋回,是大洋碳储库对于偏心率长周期的响应 [7,8]。由于偏心率和岁差周期是轨道驱动热带响应的特

* 收稿日期 2008-01-10,修回日期 2008-01-20.

* 基金项目:国家重点基础研究发展计划项目“大洋碳循环与气候演变的热带驱动”(编号2007CB51900)资助.

作者简介:翦知盡(1966-),男,湖南常德人,教授,主要从事古海洋学、微体古生物学研究. E-mail: zjiank@online.sh.cn

征,大洋碳储库的长周期变化必然是低纬过程的产物。果然,通过中意合作在西西里岛的研究,证明地中海上新世的地层中,碳同位素和碳酸盐沉积准确地记录了非洲季风的 40 万年偏心率长周期。最近的研究成果已经证实,从古新世晚期到上新世,大洋碳储库的 40 万年长周期普遍存在^[9-11],被喻为地球气候系统的“心跳”节律^[12];只是到了第四纪,大洋碳储库的长周期“延长”到 50 万年左右,而且在碳同位素重值事件之后,北极冰盖急剧增大、冰期旋回随之“转型”(如 90 万年前的“中更新世革命”)^[7,13],因而可能是冰期气候强化的原因。

叠加在冰期旋回之上的大洋碳储库长周期,代表着地球表层系统一种尚待认识的新机制。每隔 40~50 万年出现的碳同位素重值期($^{13}\text{C}_{\text{max}}$),大洋碳储库发生重大变更,必然对全球碳循环和气候系统产生影响;而当今的地球正经历着又一次 $^{13}\text{C}_{\text{max}}$ 期,只有理解这种机制才可能科学地预测未来的变化趋势。如下次冰期究竟是已在降临^[14],还是远在 5 万年以后的事^[15],分歧就在于对大气 CO_2 浓度天然变化趋势缺乏依据。碳在大洋储库中的滞留时间长达 10 万年左右^[9],这是偏心率长周期体现在碳同位素的基础;然而偏心率如何驱动碳储库的变化,则是阐明这种新机制的关键问题。国家重点基础研究发展计划项目“地球圈层相互作用中的深海过程和深海记录”的研究,提出了“低纬辐射量-季风-风化-硅供应-硅藻-碳储库”的工作假说^[8],认为轨道周期驱动季风等低纬过程,季风调控着陆地的化学风化速率和输入大洋的硅元素丰度,硅的输入影响大洋浮游植物中硅藻与颗石藻的比值,决定着沉降颗粒中有机碳与无机碳的比例,从而导致大洋的碳储库的长周期变化。

1.2 气候演变的热带驱动与次表层水生物群

传统的轨道驱动理论忽略低纬区的作用,原因之一就是以为热带表层水温在冰期旋回中并无明显变化,而这种结论已随着新方法的采用而遭到否定^[4]。

西太平洋暖池区作为接受太阳辐射能量最大的海区,通过季风和厄尔尼诺等影响全球^[2];这种热带的热气交换,可以改变高纬区的气候,如北大西洋涛动(NAO)就源自热带^[16]。现代地球气候系统的这种特征,没有理由认为在地质时期里不存在。对“西太平洋暖池”进行高分辨率(10 年至百年等级)研究的结果,发现冰消期暖池表层水温的变化在时间上与南极/南大洋的变暖接近,也与冰芯记录的大

气 CO_2 浓度变化相当一致,而与北半球冰盖的融化几乎同时或者早 2~3 ka^[17]。然而更加重要的发现在于表层以下的变化:包括温跃层深度、次表层水性质在内的上层海洋结构特征,可能是热带海区在气候演变中比表层水温更为活跃的因素。研究发现,“西太平洋暖池”核心区晚第四纪的表层水温和温跃层深度都存在明显的千年、百年尺度快速气候波动,而从浮游有孔虫混合层种与温跃层种的 ^{18}O 差值($^{18}\text{O}_{\text{P-G}}$)中,可以看出冰期、冰消期和全新世气候的短周期不同,其中温跃层种的变化比表层种更为灵敏^[17]。

作为“暖池”的特征,温跃层深度和次表层水性质与厄尔尼诺等热带过程密切相关,而生活其中的浮游生物又能提供其变化的记录。尤其值得注意的是硅藻的“树荫”类群,这类在次表层水里生活的大个体硅藻,可以利用深层的营养,在表层寡养的大洋“勃发”,并形成“藻席”迅速埋葬,造成由单种组成的纹层沉积^[18]。这类不能用常规手段发现的硅藻群及其勃发形成的大洋硅藻层,在地球表层系统变化中的重要作用最近才开始受到重视,很可能是中白垩黑色页岩和地中海腐泥层的成因^[19],而且在前述第四纪碳同位素重值期已有多处发现^[20,21],我国在热带太平洋 5 500 m 水深处发现的硅藻层也很可能与 $^{13}\text{C}_{\text{max}}$ 的出现相关。

最近的研究发现微型浮游生物在热带海洋碳循环中起着重要作用。如原绿球藻(*Prochlorococcus*)是光合自养的最小(0.6~0.7 μm)原核生物,以此为代表的超微型浮游生物(picoplankton),主要生活在表层以下的弱光层环境中^[22]和“树荫种”硅藻一样被常规的生物调查所遗漏,但在寡养的海区可以构成浮游生物群和海洋固碳的主体,在南海、赤道太平洋等海区的碳循环中起着重要作用。实际上,这类超微型生物是地球上出现最早的生物,经历了地球历史上所有的重大环境变化,不仅存活了下来,而且是大洋环境的优势类群。如果能找到他们的标记物,就找到了认识地史过程的一把钥匙。就像利用某些甾醇指示硅藻^[23]、用长链不饱和酮指示某些颗石藻一样。由于超微型原核生物本身难以形成化石,如何区分其功能类群并利用其特有的分子标记物,通过有机地球化学标志推断古海洋的超微型浮游生物群随地球环境的变化,是一个国际性难题。但已有的研究进展展现了这方面的美好前景,如时序红外显微数字化技术(TIREM)^[24]可准确地区分和定量微型生物功能类群 AAPB;海洋 Crenarchaeota

类古菌特有的脂类能够在地层中保存并指示古温度 (“TEX 86”法)^[25],初步结果显示南海中新世时表层水温可高达 31°C,显示有机地球化学在古海洋学和海洋碳循环研究中的应用前景。

1.3 气候系统的双重驱动

南海大洋钻探和深海“973”项目研究首次提出了气候演变的冰盖驱动和热带驱动的“双重驱动”假说^[8, 17]。传统的气候演变的轨道驱动理论强调北大西洋高纬地区的作用:由低纬区流入的表层暖水在此降温结冰,剩下咸而冷的海水因比重大而下沉,在深层向其他洋区扩散。冰期时该区被冰盖封住,不能形成下沉的深层水,致使“传送带”中断,地球表层由“间冰期”转入“冰期”状态。即使北极冰盖的局部崩解,也可以使此区表层水因海冰扩散而降低盐度,减少下沉水量而削弱“传送带”,导致全球性的气候变冷事件^[26]。因此,北大西洋高纬区被认为是地球表层气候系统变化的源泉,决定着全球的气候变迁。

然而,近年来随着对厄尔尼诺和低纬季风气候的注意,发现低纬度海区在现代全球的气候系统中起着关键作用。其中,多年平均表层水温超过 28 的“西太平洋暖池”区,是世界大洋海水加热最强、因而向大气输送辐射热和通过蒸发输送潜热最强的海区。由此区上升辐散的气流所形成的三大环流圈,通过季风和厄尔尼诺控制着地球上大片面积的气候,是向高纬度输送能量的热源和气候系统的“引擎”,一旦暖池区海水上层结构和表层水温变化,就会影响全球的气候系统^[2]。北大西洋高纬区固然重要,但也只相当于地球气候系统的“开关”。特别是,南海和西太平洋暖池区深海高分辨率沉积记录中发现的气候突变、冰消期热带气候变化相对于冰盖的超前、以及独立于冰盖消长的碳循环事件的发现等^[4, 12, 17],说明热带过程和碳循环是传统理论中所缺乏的重要环节。

尽管国际古气候和古海洋学研究的重心仍然集中在欧美之间的北大西洋,但热带太平洋和碳循环在地球气候系统中的作用日益成为当今气候学研究的热点,如美国、德国、法国、澳大利亚都投入了很大的人力和物力,相继组织多个航次(如 ODP/IODP, 国际海洋全球变化研究 IMAGES, 德国“太阳号”SONNE 航次等)进行研究。即使高纬地区的古气候研究,也对西太平洋暖池也越来越关注,如 2007—2008 年的国际极地年 IPY 组织的 BIPOMAC 项目的一项关键任务就是研究高、低纬度区的古气候联系。

气候系统的双重驱动假说,作为气候环境演变中一种新机制的发现,已逐渐获得国内外学术界的初步认识和高度评价。尽管在形成完整的理论系统、或得到学术界的公认之前,还有很长的路程,但可以说,通过近年来的努力,新世纪开始学术界已处在“气候环境系统演变的理论”实行组装的前夕。

2 项目研究的科学意义

对气候环境自然演变机制的认识,既是地球科学的前沿课题,也是预测未来环境变化趋势的先决条件。要科学地预测人类社会生存环境的变化趋势,不仅要了解人类活动引起的短期变化,还必须认识自然因素造成的、叠加在短期变化上的长期趋势。20 世纪气候演变研究的最大突破,在于地球轨道变化驱动冰期旋回的米兰柯维奇理论。然而,轨道参数的微小差异,如何通过气候系统中的放大效应引起冰期旋回的巨大变化,其驱动机理至今仍属未解之谜。传统的轨道驱动理论依据 65% 太阳辐射量的物理效应,在万年尺度上讨论冰期旋回的成因,却忽视了低纬区、生物地球化学和多种时间尺度过程相互叠加的效应。当前,从极地冰芯中 CO₂的记录和热带海区现代气候变化的发现,都已经指出传统的轨道驱动理论的片面性。从地球系统高度,将高、低纬地区,长、短时间尺度,水循环和碳循环的作用相互结合起来,为气候演变的长期趋势建立新理论的任务已经摆在学术界的面前。

我国以陆地记录为依据的古气候研究,在国际学术界做出了重大贡献,是中国地球科学的亮点之一。1999 年的南海大洋钻探(ODP)和航次后的重大基金项目的研究,使我国在深海古环境研究上一举进入国际前沿^[27],随后开展的国家重点基础研究发展计划项目“地球圈层相互作用中的深海过程和深海记录”(2000—2005),发现大洋碳储库能够通过热带过程直接响应轨道周期的驱动,提出了气候演变的冰盖驱动和热带驱动的双重驱动假说,在气候演变的理论研究上取得突破性进展^[17]。如果,我国能充分利用已经取得的研究成果和经验,通过一系列新技术的引进(如分析沉积物的 ¹⁵N、无机与有机 ¹³C 等)和关键问题(如西太平洋暖池的次表层水及其浮游生物群的变化等)的“攻关”,围绕关键性科学问题“热带碳循环”深入追索,从地球系统科学角度进行气候演变机理研究,揭示低纬热带过程通过碳循环在全球气候环境演变中的作用,不仅可望克服气候变化轨道驱动传统理论中的若干“难

题”,在气候环境系统演变机理的研究上做出国际贡献,而且可以根据新的认识(气候演变的“双重驱动”、偏心率长周期等)提出当代地球系统中大洋碳储库的变化趋势,并由此对地球环境长期变化趋势(如下次冰期的来临)进行科学的预测。

3 拟解决的关键科学问题和主要研究内容

国家重点基础研究发展计划项目“大洋碳循环与气候演变的热带驱动”拟解决的关键科学问题是:检验和论证大洋碳储库长周期变化机制的假说,揭示不同时间尺度上低纬过程在全球气候环境演变中的作用。

为此,将针对上述问题从轨道尺度到海洋尺度开展研究,其主要内容涉及以下三大方面:

3.1 西太平洋暖池的低纬过程

作为地球表层系统的热源,“西太平洋暖池”区在现代全球气候系统中举足轻重,如其上升气流形成三大环流,通过季风和厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)控制着全球大部分地区的气候。研究表明暖池在冰期旋回中曾发生明显的变化,特别是其次表层海水的变化尤为显著。本项目计划在轨道和海洋时间尺度上研究海水上层结构,结合海流和大气环流模拟,及其与实际记录的对比,探讨“西太平洋暖池”从响应轨道驱动到能量输送格局的变化,将从以下三点开展工作:

3.1.1 热带与两极过程的相位关系

研究发现在冰消期和中更新世气候转型期,“西太平洋暖池”表层水的温度变化与南极冰芯中大气 CO_2 浓度的变化一致,而与代表冰盖体积变化的 ^{18}O 的变化几乎同时或者略微超前,有力地证明了气候系统中热带驱动的重要性和独立性,全球的气候变化并不都是单靠北极冰盖和北大西洋深层水的变化而带动的。那么冰期旋回中“暖池”表层水变化是否始终与南大洋的一致?两者如何联系?是否在高、低纬度海区之间存在所谓的“大气桥梁与大洋隧道”?在比较高、低纬度的古气候记录的同时,需要数值模拟的理论支撑。

3.1.2 西部边界流与能量输送格局的变化

西太平洋边界流是热带太平洋和极地大洋热交流的主要渠道,也是亚洲大陆和太平洋之间物质和能量交换的场所。冰期旋回中西太平洋边界流无论强弱还是途径都发生了变化,特别是其中的黑潮起源于西太平洋北赤道流,冰期时两者都减弱吗?两

者的变化是对应关系,还是消长关系?与南、北半球的热带辐合区(ITCZ)的迁移有何关系?这一工作将追溯暖池的热量如何传输到高纬地区、进而影响全球气候环境。

3.1.3 次表层水及其生物群

前期研究已经发现,无论按照浮游有孔虫次表层属种及其同位素所记录,还是高分辨率($0.5^\circ \times 0.5^\circ$)海气耦合模式的模拟结果,冰期旋回中次表层海水温度的变化幅度都较表层海水为大。而微生物的群落结构(特别是弱光种、无光种)亦随次表层水的水文和营养水平发生变化,从而改变海洋“生物泵”的固碳作用、引起碳循环变化。那么“西太平洋暖池”的次表层水从哪里来?与南大洋有何关联?为什么变化大?在气候的热带驱动中扮演何角色?计划组织暖池区次表层海水的专题航次,进行多学科现场观测和综合分析。

3.2 大洋碳储库的周期性

大洋碳储库长周期的发现,说明碳储库在偏心率的长周期尺度上,可以直接对轨道周期做出响应。然而碳循环作为生物地球化学过程,比水循环中的物理过程复杂的多,是穿越大气、海洋、岩石与生物各圈层的典型地球系统科学命题。本项目计划在建立大剖面(如五百万年来各大洋、南海和地中海的“碳”剖面)的基础上,结合碳循环数值模拟,研究大洋碳储库长周期的实质及其在全球气候演变中的作用,揭示机理,论证假说,主要从以下三点开展工作:

3.2.1 大洋碳储库长周期变化的机制

在南海与地中海工作的基础上,建立各大洋近五百万年来碳同位素的对比剖面,与碳酸盐记录相结合,再造全大洋的碳储库演变史,并验证前一个“973”项目提出的“季风-风化-硅供应-硅藻-碳储库”的工作假设^[17]。其中,关键环节之一是浮游植物群中硅藻和颗石藻的比例,和微生物弱光种的种群结构变化。需要从风化作用的长周期对硅输入海洋,到南大洋水潜入热带次表层造成硅藻勃发,通过沉积物中有机碳/无机碳埋葬比例对碳储库发生影响开展研究。对其中的许多环节,将通过更多的观测、培养试验和模拟作进一步的探索。

3.2.2 大洋碳储库与大气 CO_2

为预测未来气候变化的趋势,必须了解大洋碳储库长周期变化与大气 CO_2 浓度的关系;查明碳同位素重值期($^{13}\text{C}_{\text{max}}$)对大气 CO_2 浓度的响应,更是预测下次冰期时间的关键。目前,科学界在南极获得的全球最长的大气 CO_2 浓度直接记录仅限于最近

的70万年左右,而对间接记录的结果又多有争议。如何利用大洋碳储库的记录,通过数值模拟求取更长时间的大气CO₂浓度记录,是一项富有挑战性的任务。大洋碳储库的变化,在碳酸盐的保存与溶解、无机和有机碳的同位素均有反映。但最近发现,南海深海沉积中有机碳的¹³C变化与反映冰盖的¹⁸O相似,而与无机碳的¹³C长周期完全不同,有待进一步追索其间的关系。

3.2.3 大洋碳储库与冰盖

揭示大洋碳储库长周期的同时,又发现第四纪前后碳储库与冰盖关系的变化。第四纪以前,大洋碳储库在偏心率长周期上的变化与冰盖消长一致,而近一百多万年来¹⁸O与¹³C失去了在偏心率周期上的耦合关系,¹³C代表的碳储库长周期也不与偏心率的变化一致。至少在晚新生代,氧、碳同位素耦合关系的“脱钩”,反映了冰盖与碳储库关系的变化,是地球系统过程的转型^[14]。但是,是什么机制导致第四纪氧碳同位素与偏心率长周期“脱钩”?要科学地预测未来冰期,就必须认清大洋碳系统和冰盖的关系。通过引进新的技术方法,将选择关键时间段,对研究区深海沉积进行多学科综合分析,探讨低纬热带过程如何通过碳循环对冰盖和全球气候环境变化产生影响或响应。

3.3 全球季风演变的区域响应

季风是当今地球上范围最大的低纬区气候系统,当前气候学的重要趋势是将全球季风系统作为整体,重点研究夏季风降水的全球性变化。从地轨道周期的地质记录看,东亚季风较南亚季风系统更为复杂^[28],而南亚季风又比非洲季风复杂,关键在于各个季风系统的海陆分布及与赤道的关系不同。表现在地中海沉积记录中的非洲季风,比亚洲季风更加清晰地揭示出风化作用的岁差周期和碳储库的偏心率长周期,是大洋碳储库轨道周期受热带驱动的典型表现。近百万余年来,大洋碳同位素重值期,其实正是全球季风的特殊强化期。本项目将在全球季风研究的框架下,探索低纬过程在大洋碳储库和全球气候演变的作用,从季风时空变化的高度重新认识东亚古季风在轨道和亚轨道尺度上的变化机制,争取有所突破。主要从以下三点开展工作:

3.3.1 东亚季风演变周期性的比较

现代全球季风系统中,东亚季风最为复杂,不仅有跨越赤道的热带影响,还有来自太平洋的副热带影响和青藏高原的影响。与典型的非洲季风(意大利剖面)和南亚季风(阿拉伯海)的地质记录相比

较,冬季风和北半球冰盖影响的强烈,是东亚季风的重要区别。目前,非洲季风的轨道周期已经成为国际地层层型剖面的年代学基础,有待将南海记录的东亚夏季风信息与地中海记录的非洲季风比较,结合数值模拟的研究,揭示东亚季风在轨道尺度上演变的特殊性。

3.3.2 风化沉积作用与碳循环

本项目“热带循环”工作假设的第一步,就是季风降雨对风化作用的控制,从而为大洋输入相应的营养元素,进而影响大洋浮游微生物的种群结构和海洋的固碳作用,导致大洋碳储库的周期变化。然而,在构造和轨道尺度上,低纬太平洋周围大陆风化剥蚀、搬运和沉积如何变化?与海洋初级生产力的关系如何?这就需要建立东亚季风区大陆风化作用的沉积学标志,追溯风化沉积作用变化的海洋记录,同时与地中海区的响应过程进行比较,分析其对碳循环的影响。

3.3.3 全球季风的演变与热带驱动

从南海和地中海的季风记录看,由夏季风体现的热带驱动,都经历了明显的变化,两者的共性在很大程度上反映了全球季风的演变。然而,东亚季风与低纬“西太平洋暖池”的关系到底如何?与高纬冰盖的关系又如何?需要开展从东亚季风的环境效应到替代性指标(如风化作用、花粉和碳屑等)的建立,到查明不同时间尺度上“暖池”与东亚季风关系的研究,从而揭示全球季风在气候演变热带驱动中的作用。对于全球季风的特殊加强时段(如50万年前的事件),尤其需要重点剖析以探索热带驱动的机理。

4 预期目标

4.1 总体目标

以南海与西太平洋暖池的深海记录为依据,进行全球性对比和跨越地球圈层的探索;通过观测分析结果与数值模拟的结合、地质记录与现代过程的结合、海洋与陆地记录的结合,检验和论证大洋碳储库长周期变化机制的假说,对于不同时间尺度上低纬过程通过碳循环在全球气候环境演变中的作用,实现理论上的突破,为下次冰期的预测提供科学依据。

4.2 五年预期目标

在南海、“西太平洋暖池”和黑潮流域的特选海区,实现轨道和海洋时间尺度上三维空间内的古海洋学再造,追溯氧、碳同位素和上层海水结构变化的

历史。

在关键性的海洋现代过程和微型浮游生物的作用方面,取得技术方法和观测系统的原创性成果。

将观测分析结果与数值模拟的结合,地质记录与现代过程的结合,海洋与陆地记录的结合,提出不同时间尺度上低纬热带过程通过碳循环在全球气候环境演变中作用的新认识。

通过广泛的合作研究和学科的交叉渗透,以期形成一支能够进入国际前沿领域的我国深海科学和海陆结合古环境研究的队伍。

参考文献(References):

- [1] Imbrie J, Berger A, Boyle E A, et al. On the structure and origin of major glaciation cycles, 2, the 100 000-year cycle [J]. *Paleoceanography*, 1993, 8: 699-735.
- [2] Webster P J. The role of hydrological processes in ocean-atmosphere interaction [J]. *Reviews of Geophysics*, 1994, 32: 427-476.
- [3] Cole J E, Dunbar R B, McClanahan T R, et al. Tropical Pacific forcing of decadal SST variability in the Western Indian Ocean over the past two centuries [J]. *Science*, 2000, 287: 617-619.
- [4] Lea D W, Pak D K, Spero H J. Climate impact of late Quaternary equatorial Pacific sea surface temperature variations [J]. *Science*, 2000, 289: 1719-1724.
- [5] Shackleton N J. The 100 000-year ice-age cycle identified and found to lag temperature, carbon dioxide, and orbital eccentricity [J]. *Science*, 2000, 289: 1897-1902.
- [6] Tian J, Wang P, Cheng X, et al. Astronomically tuned Plio-Pleistocene benthic ^{18}O record from South China Sea and Atlantic-Pacific comparison [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 203: 1015-1029.
- [7] Wang P, Tian J, Cheng X, et al. Major Pleistocene stages in a carbon perspective: The South China Sea record and its global comparison [J]. *Paleoceanography*, 2004, 19, doi: 10.1029/2003PA000991.
- [8] Wang Pinxian, Tian Jun, Cheng Xinrong, et al. Exploring cyclic changes of the ocean carbon reservoir [J]. *Chinese Science Bulletin*. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(23): 2536-2548. [汪品先, 田军, 成鑫荣, 等. 探索大洋碳储库的演变周期[J]. *科学通报*, 2003, 48(21): 2216-2227.]
- [9] Cramer B S, Wright J D, Kent D V, et al. Orbital climate forcing of ^{13}C excursions in the late Paleocene-early Eocene (chrons C24n-C25n) [J]. *Paleoceanography*, 2003, 18(4): 1097, doi: 10.1029/2003PA000909.
- [10] Wade B S, Pike H. Oligocene climate dynamics [J]. *Paleoceanography*, 2004, 19: PA4019, doi: 10.1029/2004PA001042.
- [11] Holbourn A, Kuhnt W, Schulz M, et al. Impacts of orbital forcing and atmospheric carbon dioxide on Miocene ice-sheet expansion [J]. *Nature*, 2005, 438: 483-487.
- [12] Pike H, Norris R D, Herrle J O, et al. The heartbeat of the Oligocene climate system [J]. *Nature*, 2006, 314: 1894-1898.
- [13] Wang P, Tian J, Cheng X, et al. Carbon reservoir change preceded major ice-sheet expansion at the Mid-Brunhes event [J]. *Geology*, 2003, 31: 239-242.
- [14] Raymo M E. The timing of major climate terminations [J]. *Paleoceanography*, 1997, 12: 577-585.
- [15] Berger A, Loutre M F. An exceptionally long interglacial ahead? [J]. *Science*, 2002, 297: 1287-1288.
- [16] Kerr R A. The tropics return to the climate system [J]. *Science*, 2001, 292: 660-661.
- [17] Wang Pinxian, Jian Zhimin, Liu Zhifei. Interactions between the earth spheres: Deep-sea processes and records (II) tropical forcing of climate changes and Carbon cycling [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(4): 338-345. [汪品先, 翦知鑫, 刘志飞. 地球圈层相互作用中的深海过程和深海记录 (II): 气候变化的热带驱动与碳循环 [J]. *地球科学进展*, 2006, 21(4): 338-345.]
- [18] Kemp A E S, Pike J, Pearce R B, et al. The "Fall dump"—a new perspective on the role of a "shade flora" in the annual cycle of diatom production and export flux [J]. *Deep-Sea Research II*, 2000, 47: 2129-2154.
- [19] Kump L R, Arthur M A. Interpreting carbon-isotope excursions: carbonate and organic matter [J]. *Chemical Geology*, 1999, 161: 181-198.
- [20] Schmieder F, von Döbenek T, Bleil U. The Mid-Pleistocene climate transition as documented in the deep South Atlantic Ocean: initiation, interim state and terminal event [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 179: 539-549.
- [21] Gingele F X, Schmieder F. Anomalous South Atlantic lithologies confirm global scale of unusual mid-Pleistocene climate excursion [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 186: 93-101.
- [22] Jiao N, Yang Y, Koshikawa H, et al. Influence of hydrographic conditions on picoplankton distribution in the East China Sea [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2002, 30: 37-48.
- [23] Schubert C J, Villanueva J, Calvert S E, et al. Stable phytoplankton community structure in the Arabian Sea over the past 200 000 years [J]. *Nature*, 1998, 394: 563-566.
- [24] Jiao N Z, Zhang Y, Chen Y. Time series observation based infrared epifluorescence microscopic approach (TIREM) for accurate enumeration of bacteriochlorophyll containing microbes in marine environments [J]. *Journal of Microbiological Methods*, 2005, 63(3), doi: 10.1016/j.jmimet.2005.09.002.
- [25] Schouten S, Hopmans E C, Schefuss E, et al. Distributional variations in marine crenarchaeotal membrane lipids: a new tool for reconstructing ancient sea water temperatures? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 204: 265-274.
- [26] Broecker W S. The great ocean conveyor [J]. *Oceanography*, 1991, 49(2): 79-89.
- [27] Liu Dongsheng. Ocean Drilling Program and International significance of Chinese paleoceanographic study [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(21): 2205. [刘东生, 大洋钻探与我国古

海洋学研究的国际意义[J]. 科学通报, 2003, 48(21): 2205.]

[28] Wang P, Clemens S, Beaufort L, et al. Evolution and variability

of the Asian Monsoon System: State of the art and outstanding issues [J]. Quaternary Science Reviews 2005, 24: 595-629.

Ocean Carbon Cycle and Tropical Forcing of Climate Evolution

JIAN Zhimin, JIN Haiyan

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

Abstract: Scientific forecasting of living environment change for the human society requires a proper understanding of the mechanism and the nature of climate-environment changes. Recent progresses in the studies of tropical process and atmospheric CO₂ concentration further reveal the imperfection of the classical Milankovitch theory on the role of low latitude region and carbon cycle in the global climate system, although it has been widely applied to orbital-driven glacial cycles. The new National Key Basic Research Science Foundation (973) project, entitled "Ocean Carbon Cycle and Tropical Forcing of Climate Evolution", is aimed to clarify and test the hypothesis about the long period of ocean carbon reservoir. This project will achieve global correlation and probe into the connection between different earth's spheres, based on the deep sea records of the South China Sea and western Pacific warm pool. The results of observations will be combined with mathematic modeling to reveal the role of low latitude process in the global climate environment through carbon cycling on various time scales, contributing to international studies of the evolution of the climate system. This article briefly introduces the research purpose, science significance, key scientific questions and expected goals of the project.

Key words: Theory of climate evolution; Ocean carbon cycle; Tropical forcing; Global monsoon; Western Pacific warm pool.