

末次冰消期以来古气候演化研究进展及展望

徐方建^{1,2}, 李安春²

1. 中国石油大学(华东)地球资源与信息学院, 山东青岛 266555

2. 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室, 山东青岛 266071

摘要 从盛冰期到全新世之间的末次冰消期经历了地球表层系统的一次巨变, 期间发生了一系列气候突变事件, 在全球不同地区以不同的方式回应着这些事件的变化过程。末次冰消期转暖的过程和机制一直是古气候研究的热点。本文综述了末次冰消期以来的古气候/季风演化研究成果, 指出海陆交界敏感地带的陆架区对全球环境变化十分敏感, 陆架区沉积物蕴含了丰富的气候/季风演化信息, 对陆架区沉积物中古气候代用指标的提取, 东亚季风演化历史及其驱动机制、季风的差异和交互作用、季风在各个时间尺度上的驱动机制等问题的分析均具有重要意义, 可以为地区及全球环境变化提供科学依据。

关键词 末次冰消期; 古气候; 季风; 陆架; 沉积物

中图分类号 P532

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)09-0102-06

Paleoclimatic Evolution Since the Last Deglaciation: A Review and Prospect View

XU Fangjian^{1,2}, LI Anchun²

1. College of Geo-resources and Information, China University of Petroleum, Qingdao 266555, Shandong Province, China

2. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, Shandong Province, China

Abstract During the last deglaciation, enormous changes occurred on the global surface. A series of abrupt climate changes occurred during this period in different ways and different parts of the world. The warming process and mechanism has been the focus of studies of paleoclimate changes, however, controversy still exists. This paper briefly reviews the development of paleoclimate and monsoon evolution since the last deglaciation, and it is pointed out that the continental shelf area is very sensitive to the global environmental changes. The shelf sediment also contains a wealth of climate/monsoon evolution information. Extraction and study of the proxies derived from the shelf sediments should be valuable. East Asian monsoon evolution history and its driving mechanism, the monsoon differences and interaction, monsoon-driven mechanism analysis in various time scales revealed by the sediments on the continental shelf are of great significance for regional and global change studies. It is suggested that the future work is to study the paleoclimate and the corresponding events in view of regional and even global changes, and more attention should be paid to the study of the continental shelf sediments.

Keywords last deglaciation; paleoclimate; monsoon; continental shelf; sediment

0 引言

近年来气候学界将季风看作是热带辐合带(Intertropical Convergence Zone, ITCZ)季节性迁移的表现, 认为季风是一个全球系统^[1]。目前比较公认的观点是全球范围内存在北美、南美、北非、南非、亚洲、和澳洲-印尼 6 个季风区, 近年来每个

区都有古季风记录的报道, 反映出全球的共同性和不同程度上的区域特性^[2]。亚洲季风系统是区域和全球气候系统的一个重要组成部分, 其演化和变率对理解全球气候有着重要作用。东亚季风作为亚洲季风的一个子系统, 是亚洲大陆与西太平洋暖池之间差异加热驱动的热力大气环流系统, 控制着

收稿日期: 2010-02-26

基金项目: 中国石油大学博士基金(Y0901036); 国家自然科学基金项目(40776030)

作者简介: 徐方建, 讲师, 研究方向为海洋沉积与矿物学, 电子信箱: xufangjiang@163.com

整个亚洲东部地区季节性变化的风力、降雨量、径流量和陆地植被等气候环境特征。近几十年来,科学界将黄土^[3]、深海^[4]和湖泊^[5]沉积物、冰芯^[6]、珊瑚^[7]、石笋^[8]、树轮^[9]、泥炭^[10]等作为古气候载体,在高分辨率古环境研究方面取得了令人鼓舞的成果。研究发现,陆架沉积物中(特别是东海)也同样记录着良好的气候/季风演化信息^[11-16]。

盛冰期至全新世期间的末次冰消期,地球表层系统经历了一次巨变,北半球高纬度地区厚 3000~4000m 的大冰盖消融,世界洋面回升 120m,冰期时出露的大陆架重新被淹没,大气 CO₂ 浓度迅速回升^[17]。期间,北半球发生了一系列气候突变事件,全球不同地区以不同的方式回应这些事件的变化过程。末次冰消期气候的快速颤动在众多气候载体中得到了不同程度的记录^[5,18-21],以亚轨道千年尺度上快速、高频变化为特征,并出现了 Bølling/Allerød 暖期(B/A)、Heinrich1 和新仙女木(Younger Dryas, YD)等气候事件。同时,人类文化取得了重大进步,延续 200 多万年的旧石器文化迅速过渡为新石器文化。末次冰消期,气候变化和人类文化演进的耦合,使得人类越来越多地关注该时期的气候演变。

1 高纬驱动和热带过程

地球系统中,北半球高纬区的北大西洋北部,是北大西洋深层水(NADW)下沉、推动“大洋传送带”的枢纽;低纬区的热带西太平洋暖池,是热能汇聚区以及 Walker 环流和季风环流的辐散中心。前者是表层与深层水间向下的强对流区,后者是海洋与大气之间向上的强对流区,分别是地球气候系统中的“开关”和“引擎”^[22]。以往众多研究强调了北半球高纬的驱动作用^[23-25],认为 NADW 和由其推动的大洋传送带可将大量气候信息传向全球的其他重要载体;北半球高纬区的 65°N 夏季太阳辐射+NADW 曾被普遍视作冰期旋回气候变化的根源。近期研究也认为,千年时间尺度上,大洋环流变化是大气 CO₂ 和 N₂O 含量波动的主要驱动机制^[26]。然而研究发现,近 50 年来北大西洋气候变化却主要受到了热带大洋表层水逐渐变暖的影响^[27],对此,一些科学家对古气候研究只强调北半球高纬驱动作用的观点提出了质疑^[22,28]。

对比南极冰芯和格陵兰冰芯甲烷曲线发现,南极在 20ka BP 时已经开始升温,而数千年后北极才开始升温,即北极升温远滞后于南极^[29]。对比西太平洋暖池同一深海钻孔的底栖有孔虫氧同位素和浮游有孔虫 Mg/Ca 比值曲线发现^[30-31],由 Mg/Ca 比值代表的暖池表面温度在冰消期时的增高比由氧同位素代表的全球冰量减小早数千年,这说明冰消期暖池的增温并不受北半球冰盖消融过程所控制。从冰消期南极增温和大气 CO₂ 浓度增高超前于北极冰盖融化这个观察事实出发,有学者对其具体机制进行了分析^[32-33],认为冰盛期北半球夏季太阳辐射处于低值,而南半球处于高值,南半球高纬夏季太阳辐射的升高促使南极冰盖外缘及海冰融化,进而使“生物泵”的作用减弱,导致大气 CO₂ 浓度增高;与此同时,北极冰盖已达到最大值,形成“海基”冰盖,并处在对温度变化极

其敏感的状态,而大气 CO₂ 浓度的增高可导致全球升温,从而触发北极冰盖开始融化;北极冰盖部分融化后,由于地壳反弹作用的滞后,冰盖对温度升高的敏感性进一步加强,此时北半球夏季太阳辐射也开始增加,从而促使冰盖进一步消融。丁仲礼给予该假说很高的评价,虽然他认为该假说只考虑了南北两半球高纬气候的相互作用,没有考虑热带的重要性^[34]。

随着对低纬热带过程在全球气候系统中重要性的认识日益加深,其对全球气候变化的影响作用得到了越来越多的认同,“气候赤道”ITCZ 正是焦点所在。Peterson 等^[35] 分析 Cariaco 盆地 1202 孔 90ka 以来沉积物颜色和元素,认为全球变冷时 ITCZ 南移;Haug 等^[36] 对该盆地 14ka 以来沉积物 Fe、Ti 含量分析后认为,该区域降水变化主要归因于 ITCZ 的移动,并指出太平洋地区在全球气候变化研究中应该得到更多的重视;中国东南部湖光玛珥湖沉积物年代际的 Ti 含量和磁化率等分析表明,东亚冬季风与夏季风在千年(甚至于在年代际)时间尺度上存在反相关,并将之归因于 ITCZ 的南北移动,强调了横跨太平洋地区的 ITCZ 南北移动的重要性^[37],但也存在争议,例如文献^[38]。来自石笋的研究也表明,北半球夏季太阳辐射降低、ITCZ 南移,北半球变冷、亚洲夏季风减弱^[39]。南半球 Titicaca 湖沉积记录显示该地区在末次盛冰期及 YD 时期降雨量增加,新近的研究也指出,YD 期间澳大利亚-印度夏季风降水增加,认为降水量增加是东亚冬季风增强和 ITCZ 南移共同作用的结果^[40-41]。

综上所述,古气候学在关心极地冰盖发育和大洋深层水的同时,将更多的目光扩展到了低纬。近年来对“全球季风”及其与 ITCZ 关系的新认识,使得季风的机制研究大为深化。实际上,目前已经从高、低纬区相互作用的角度研究气候变化的机制^[22]。现代观测和模拟研究表明,印度-太平洋暖池(IPWP)海水表层温度(SST)的微小变化可以扰乱行星尺度上的大气环流,在很大程度上影响全球水文循环^[42],同时热带水文也响应着高纬度的温度变化^[43];近期有研究认为,在年代际到千年时间尺度上,IPWP 降水异常不受区域 SST 异常控制,反而受到东亚季风/ITCZ 的影响^[44]。近 25ka 以来,在次千年时间尺度上,东非赤道水文条件变化带有明显的高纬特征,但在轨道时间尺度上,却主要响应了低纬度太阳辐射,认为经向翻转环流(MOC)将低纬过程和高纬度边界条件紧密地联系在一起^[45]。秘鲁 Andes 冰川也大致与欧洲冰川记录一致,表明热带和北大西洋地区气候之间有一定的联系^[46]。模拟表明,ITCZ 与 MOC 的相互作用会导致百年时间尺度上热带大西洋气候系统的内部变化^[47]。可见,关于气候/季风变化的高纬驱动和低纬过程、高低纬 2 种作用过程的响应和关联等方面,始终未有定论,季风演化及其驱动机制还需进一步研究。

2 末次冰消期以来气候演化及其驱动机制

目前,重建末次冰消期以来高分辨率的气候环境变化已经成为全球变化研究的热点。研究发现,当北半球格陵兰还处于极端寒冷的盛冰期时,南极大陆已经开始趋于转暖,当

格陵兰开始变暖时, 南极则变冷(两极跷跷板理论)^[48-49]。但 Law Dome 冰芯气候记录显示, 南极开始变冷并没有跟随北半球 Bølling 期转暖的步伐, 表明即使在热带低纬度不同地区, 冰消期转暖的时间也可以有近千年的差别^[50]。王淑云等^[51]认为, 格陵兰地区的快速转暖滞后于中国中低纬度转暖 1.5~2.0ka 以上, 两极跷跷板理论无法把握气候快速变化(百年~几十年)的真实性。最新研究发现, 在 100a 时间尺度上, 末次冰消期南、北大西洋气候变化存在反向关系, 认为南大洋可能通过大洋过程或是大气 CO₂ 作用对北大西洋气候变化做出直接的反馈^[20]。

在东亚地区, 末次冰消期以来气候变化的高纬驱动得到了诸多的支持。研究认为, 东亚季风降水与挪威海海面温度变化具有一定的对应关系^[21]。对中国东部及邻海区的研究表明, 最近 20ka 以来海洋环境变化滞后于陆地气候变化约 1ka, 这种滞后现象可能是由北半球陆地气候快速变化的同步性和温盐环流从北大西洋缓慢传送到太平洋海域的时间差引起的^[52]。甘肃曹岷黄土记录显示, 东亚冬季风变化与格陵兰 GISP2 冰芯记录较为一致, 认为北半球冰盖变化会导致北大西洋和太平洋洋流的调整以及大气环流形式的改变, 进而影响东亚季风的变化^[53]。与之不同的是, 高分辨率地层记录研究认为, 末次冰消期东亚季风区西北缘冬、夏季风有较为复杂的消长关系, 冬季风在 Bølling/Allerød 暖期甚至较 YD 冷期还要强盛, 这是北半球高纬度海区海冰面积在暖期缩小、冷期扩大而引起亚洲大陆蒙古-西伯利亚高压暖期增强、冷期减弱的结果; 夏季风则与格陵兰冰芯变化具有一致性, 其强弱与北半球高纬地区有紧密联系^[54]。

研究逐渐扩展到低纬。Sun 等^[55]研究认为, 东亚季风降水和冲绳海槽 SST 也与北大西洋气候变化具有紧密的联系, 热带影响可能也起到了一定的作用^[55]。李铁刚等^[56]认为冲绳海槽末次冰消期浮游有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 宽幅低值事件很可能是直接受到热带太平洋表层水的影响所致。Jian 等^[57]在冲绳海槽同样发现了北大西洋千年周期信号, 并指出在高低纬相互作用过程方面需要得到进一步研究。对湖光岩玛珥湖沉积物的研究也表明^[58], 广泛存在于格陵兰、北大西洋等北半球中高纬地区的两步式冰消期转暖模式在西北太平洋低纬度陆地区同样存在; 然而末次冰消期的初始转暖北半球低纬度区却超前高纬度区, 指示末次冰消期北半球高低纬度气候连接存在复杂性^[59]。近期通过对冰消期气候变冷事件与冰融水事件的对比也认为, 南半球和热带地区对冰消期时全球变化的重要引领作用应该得到充分重视^[60]。

末次冰消期转暖的过程和机制一直是古气候研究的热点, 但其在时间、空间上的变化以及低纬度地区在其中发挥的作用或是响应机制仍存在诸多争论。值得关注的是, 近期 Griffiths 等^[41]提出末次冰消期以来“海平面上升导致季风降雨增强”的观点, 为研究季风演化提供了新的视点: 这可能只是区域上的响应, 然而, 末次冰消期以来全球范围内的海平面上升是否会对其他季风系统或全球季风系统造成影响?

3 ENSO 事件

古 ENSO (El Niño Southern Oscillation) 研究是全球气候变化研究中一个正在迅速兴起的新领域, 一些基本的科学问题还在争论中, 例如由于受到古气候、古季风代用指标分辨率的限制, 目前对于是否存在古 ENSO 或是其出现的时段等还存在很大的争议。不可否认的是, 亚洲季风与 ENSO 间具有某种紧密联系, 古季风与古 ENSO 之间可能也存在类似年际尺度上的关系。研究表明^[61-62], 当早全新世东亚季风逐渐减弱而印度季风逐渐增强时, 早全新世赤道太平洋正处于一种长期的类 La Niña 状态。轨道尺度上季风的反相变化和赤道太平洋类 ENSO 状态的相关性, 与年际尺度上季风的反相变化和 ENSO 的相关性是相似的。通过对比东亚季风、印度季风发现, 末次冰消期以来热带太平洋可能出现过 9 次千年尺度的类 El Niño 状态, 并与北大西洋冰筏事件一一对应, 显示了热带太平洋类 ENSO 事件、亚洲季风反相变化与北大西洋气候突然变冷之间紧密的关联^[61]。对中国东北部哈尼泥炭的研究认为^[10], 末次冰消期以来泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 与 GISP2 $\delta^{18}\text{O}$ 和北大西洋冰筏事件揭示的气候变化非常一致, 认为太阳活动的减少和融水暴发似乎都可以触发赤道太平洋 El Niño 现象, 这可能导致北半球温度异常和亚洲季风突然变化之间的遥相关。洪冰等^[63]认为, 根据季风与 ENSO 的紧密关系, 从古季风入手研究古 ENSO 是一条值得深入开展工作的路子。

4 陆架区沉积物的古气候信息

近年来通过对陆架区沉积物的研究认为, 其中蕴含着丰富的古气候演化信息。通过对位于浙闽沿岸泥质沉积区中、北部的岩心研究认为^[11,64], 中晚全新世以来泥质沉积物粒度组成受到了气候变化或东亚冬季风强度变化影响。该观点受到部分学者的质疑^[65], 但更多地得到了沉积物粒度端元分析模型^[66]和来自济州岛西南泥质区研究^[12,67]的支持。另外, 在千年时间尺度上, 东海内陆架 MD06-3040 柱状样有孔虫及其氧碳稳定同位素和介形虫分析结果与 PC-6 孔粒度资料揭示的冬季风强弱变化也具有可比性^[14,68]。进一步研究发现, 东海内陆架沉积物粒度资料揭示的东亚冬季风强度增加与太阳黑子数量减少对应良好, 在千年、百年和几十年尺度上表现出的周期与太阳活动周期非常一致^[13]。对中全新世高分辨率敏感粒度资料的研究, 则在年、代际时间尺度上揭示出东亚冬季风存在的 62a, 11a 太阳活动周期以及与现代 ENSO 周期相似的 6a 和 5a 周期^[69], 这与东海对流层中部和平流层底部气温表现出的 11a 周期变化相当吻合^[70]。近期关于沉积速率^[65]和磁性性质^[15]的研究发现, 东海内陆架中还蕴含着夏季风演化信息。

综上, 对于大约 7ka 以来陆架沉积物季风/气候演化信息的研究结论逐渐趋于一致和完善。近期在东海内陆架沉积物中发现了全球范围内广泛存在的“8.2ka 冷事件”^[65,71]和新仙女木事件^[71], 显示了全球性重要气候事件的区域性响应。日益增多的陆架区沉积物冬季风以及夏季风信息提取也说明陆架

区沉积物是重要的气候/季风信息载体。

5 问题及展望

季风是当今地球上范围最大的低纬区气候系统,将全球季风系统看作一个整体是当前气候学的重要发展趋势。近几十年来,科学界发展出多种古气候、季风载体,在高分辨率古环境研究方面取得了令人鼓舞的成果,然而选择的主要研究对象绝大多数来自于深海和陆地。近年来诸多的尝试工作证明,陆架区沉积物也蕴含了丰富的气候/季风演化信息,但由于受到风化、搬运、沉积、再改造、溶解、保存、成岩以及多物源、多动力(潮汐、风浪、流系等)、海平面变化等过程的复杂性影响,陆架浅海沉积物中的古气候信息提取进展缓慢。

末次冰消期地球表层系统巨变会对海陆交界敏感地带造成什么样的影响,其沉积物记录了什么样的古环境、古气候演化信息?目前的研究还不足以对此问题作出详细解答。在冰盖消融、北半球夏季太阳辐射增强、大气 CO₂ 浓度增高等重大变化的总体背景下,陆架区可靠、合理的气候/季风演化信息的提取工作亟待进一步开展,认为将会在以下方面取得一定进展。

- 1) 获得更加可靠、合理的区域气候/季风演化信息;
- 2) 与东亚区域内高分辨率的石笋、泥炭等记录进行对比,探讨季风的关系,如冬、夏季风的关系,以及夏季风在邻近区域内演化特征的异同等;
- 3) 将亚洲季风放在亚-澳季风系统内部甚至全球季风范围内进行考虑,探讨季风的差异和交互作用,这方面亚洲季风、印度季风、非洲季风等均有高分辨率的记录可以对比;
- 4) 分析季风在各个尺度上的驱动机制问题,如东亚季风与高、低纬驱动过程、海平面上升的关系,千、百年尺度上一些气候突变事件的演变过程与控制机制,在十年甚至年际尺度上与太阳活动和 ENSO 活动的关系等。

参考文献 (References)

[1] 汪品先. 全球季风的地质演变[J]. 科学通报, 2009, 54(5): 535-556.
Wang Pinxian. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(5): 535-556.

[2] Liu Z, Harrison S P, Kutzbach J, *et al.* Global monsoons in the mid-Holocene and oceanic feedback [J]. *Climate Dynamics*, 2004, 22: 157-182.

[3] Ding Z L, Yang S L, Sun J M, *et al.* Iron geochemistry of loess and red clay deposits in the Chinese Loess Plateau and implications for long-term Asian monsoon evolution in the last 7.0 Ma [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 185: 99-109.

[4] Sun Y, Wu F, Clemens S C, *et al.* Processes controlling the geochemical composition of the South China Sea sediments during the last climatic cycle[J]. *Chemical Geology*, 2008, 257: 243-249.

[5] Shen J, Liu X, Wang S, *et al.* Palaeoclimatic changes in the Qinghai Lake area during the last 18,000 years [J]. *Quaternary International*, 2005, 136: 131-140.

[6] Thompson L G, Thompson M E, Davis M E, *et al.* Holocene-late Pleistocene climatic ice core records from Qinghai-Tibetan Plateau[J].

Science, 1989, 246: 474-477.

[7] Yu K F, Zhao J X, Liu T S, *et al.* High-frequency winter cooling and reef coral mortality during the Holocene climatic optimum [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 224: 143-155.

[8] Wang Y, Cheng H, Edwards R L, *et al.* The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and North Atlantic climate[J]. *Science*, 2005, 308: 854-857.

[9] Feng X, Cui H, Tang K, *et al.* Tree-ring δD as indicator of Asian monsoon intensity[J]. *Quaternary Research*, 1999, 51: 262-266.

[10] Hong Y T, Hong B, Lin Q H, *et al.* Synchronous climate anomalies in the western North Pacific and North Atlantic regions during the last 14,000 years[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28: 840-849.

[11] 肖尚斌, 李安春, 蒋富清, 等. 近 2ka 来东海内陆架的泥质沉积记录及其气候意义[J]. 科学通报, 2004, 49(21): 2233-2238.
Xiao Shangbin, Li Anchun, Jiang Fuqing, *et al.* *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(21): 2233-2238.

[12] 向荣, 杨作升, Saito Y, 等. 济州岛西南泥质区近 2300 a 来环境敏感粒度组分记录的东亚冬季风变化[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36(7): 654-662.
Xiang Rong, Yang Zuosheng, Saito Y, *et al.* *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 36(7): 654-662.

[13] Xiao S, Li A, Liu J P, *et al.* Coherence between solar activity and the East Asian winter monsoon variability in the past 8000 years from Yangtze River-derived mud in the East China Sea [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 237: 293-304.

[14] 赵泉涌, 翦知湓, 张在秀, 等. 东海陆架泥质沉积区全新世有孔虫和介形虫及其古环境应用[J]. 微体古生物学报, 2009, 26(2): 117-128.
Zhao Quanhong, Jian Zhimin, Zhang Zaixiu, *et al.* *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2009, 26(2): 117-128.

[15] Zheng Y, Kissel C, Zheng H B, *et al.* Sedimentation on the inner shelf of the East China Sea: Magnetic properties, diagenesis and paleoclimate implications[J]. *Marine Geology*, 2010, 268: 34-42.

[16] 肖尚斌, 张京穗, 陈木宏, 等. 从陆架泥质沉积中寻找高分辨率的全新世东亚季风记录[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2007, 29(4): 342-347.
Xiao Shangbin, Zhang Jingsui, Chen Muhong, *et al.* *Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences*, 2007, 29(4): 342-347.

[17] Lambeck K, Chappell J. Sea level change through the last glacial cycle [J]. *Science*, 2001, 292: 679-686.

[18] Li B, Jian Z, Wang P. Pulleniatina obliquiloculata as a paleoceanographic indicator in the southern Okinawa Trough during the last 20,000 years [J]. *Marine Micropaleontology*, 1997, 32: 59-69.

[19] Shakun J D, Burns S J, Fleitmann D, *et al.* A high-resolution, absolute-dated deglacial speleothem record of Indian Ocean climate from Socotra Island, Yemen[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 259: 442-456.

[20] Barker S, Diz P, Vautravers M J, *et al.* Interhemispheric Atlantic seesaw response during the last deglaciation[J]. *Nature*, 2009, 457: 1097-1102.

[21] 周卫建, 安芷生, Porter S C, 等. 末次冰消期东亚和挪威海气候事件的对比[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1997, 27(3): 260-264.
Zhou Weijian, An Zhisheng, Porter S C, *et al.* *Science in China Series D: Earth Sciences*, 1997, 27(3): 260-264.

[22] 汪品先. 低纬过程的轨道驱动[J]. 第四纪研究, 2006, 26(5): 694-701.
Wang Pinxian. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(5): 694-701.

[23] Bond G, Showers W, Cheseby M, *et al.* A pervasive millennial-scale cycle in north Atlantic Holocene and glacial climates[J]. *Science*, 1997, 278: 1257-1266.

- [24] Wang L, Samthein M, Erlenkeuser H, *et al.* Holocene variations in Asian monsoon moisture: A bidecadal sediment record from the South China Sea[J]. *Geophysical research letters*, 1999, 26(18): 2889–2892.
- [25] Cheng H, Edwards R L, Broecker W S, *et al.* Ice age terminations[J]. *Science*, 2009, 326: 248–252.
- [26] Schmittner A, Galbraith E D. Glacial greenhouse –gas fluctuations controlled by ocean circulation changes[J]. *Nature*, 2008, 456: 373–376.
- [27] Hoerling M P, Hurrell J W, Xu T. Tropical origins for recent North Atlantic climate change[J]. *Science*, 2001, 292: 90–92.
- [28] Kerr R A. The tropics return to the climate system [J]. *Science*, 2001, 292: 660–661.
- [29] Wunsch C. Greenland–Antarctic phase relations and millennial time–scale climate fluctuations in the Greenland ice–cores [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22: 1631–1646.
- [30] 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.
- [31] Medina–Elizalde M, Lea D W. The mid–pleistocene transition in the tropical pacific[J]. *Science*, 2005, 310: 1009–1012.
- [32] Henderson G M, Slowey N C. Evidence from U–Th dating against Northern Hemisphere forcing of the penultimate deglaciation[J]. *Nature*, 2000, 404: 61–66.
- [33] Kim S J, Crowley T J, Stössel A. Local orbital forcing of Antarctic climate change during the last interglacial[J]. *Science*, 1998, 280: 728–730.
- [34] 丁仲礼. 米兰科维奇冰期旋回理论: 挑战与机遇 [J]. 第四纪研究, 2006, 26(5): 710–717.
Ding Zhongli. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(5): 710–717.
- [35] Peterson L C, Haug G H, Hughen K A, *et al.* Rapid changes in the hydrologic cycle of the tropical Atlantic during the last glacial [J]. *Science*, 2000, 290: 1947–1951.
- [36] Haug G H, Hughen K A, Sigman D M, *et al.* Southward migration of the intertropical convergence zone through the Holocene [J]. *Science*, 2001, 293: 1304–1308.
- [37] Yancheva G, Nowaczyk N R, Mingram J, *et al.* Influence of the intertropical convergence zone on the East Asian monsoon[J]. *Nature*, 2007, 445: 74–77.
- [38] Zhou H, Guan H, Chi B. Record of winter monsoon strength [J]. *Nature*, 2007, 450: E10–E11.
- [39] Dykoski C A, Edwards R L, Cheng H, *et al.* A high–resolution, absolute –dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233: 71–86.
- [40] Baker P A, Seltzer G O, Fritz S C, *et al.* The history of South American tropical precipitation for the past 25,000 years [J]. *Science*, 2001, 291: 640–643.
- [41] Griffiths M L, Drysdale R N, Gagan M K, *et al.* Increasing Australian–Indonesian monsoon rainfall linked to early Holocene sea–level rise[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2: 636–639.
- [42] Qu T, Du Y, Strachan J, *et al.* Sea surface temperature and its variability in the Indonesian region[J]. *Oceanography*, 2005, 18: 50–61.
- [43] Broccoli A J, Dahl K A, Stouffer R J. Response of the ITCZ to northern hemisphere cooling [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33, doi: 10.1029/2005GL024546.
- [44] Oppo D W, Rosenthal Y, Linsley B K. 2,000–year–long temperature and hydrology reconstructions from the Indo–Pacific warm pool [J]. *Nature*, 2009, 460: 1113–1116.
- [45] Verschuren D, Damsté J S S, Moernaut J, *et al.* Half–precessional dynamics of monsoon rainfall near the East African Equator [J]. *Nature*, 2009, 462: 637–641.
- [46] Licciardi J M, Schaefer J M, Taggart J R, *et al.* Holocene glacier fluctuations in the Peruvian Andes indicate northern climate linkages[J]. *Science*, 2009, 325: 1677–1679.
- [47] Vellinga M, Wu P. Low–latitude freshwater influence on centennial variability of the Atlantic thermohaline circulation[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17: 4498–4511.
- [48] Broecker W S. Paleoocean circulation during the last deglaciation: A bipolar seesaw?[J]. *Paleoceanography*, 1998, 13(2): 119–121.
- [49] Morgan V, Delmotte M, Ommen T V, *et al.* Relative timing of deglacial climate events in Antarctica and Greenland [J]. *Science*, 2002, 297: 1862–1864.
- [50] Flower B P, Hastings D W, Hill H W, *et al.* Phasing of deglacial warming and Laurentide Ice Sheet meltwater in the Gulf of Mexico[J]. *Geology*, 2004, 32(7): 597–600.
- [51] 王淑云, 吕厚远, 刘嘉麒. 我国中低纬度末次冰消期气候转暖与高纬度气候变化的关系[J]. 第四纪研究, 2006, 26(2): 283–292.
Wang Shuyun, Lu Houyuan, Liu Jiaqi. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(2): 283–292.
- [52] 吕厚远, 刘振夏, 刘宝柱, 等. 2万年来我国东部海陆环境变化的不同步现象[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(1): 17–23.
Lu Houyuan, Liu Zhenxia, Liu Baozhu, *et al.* *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2002, 22(1): 17–23.
- [53] 王建民, 施祺, 陈发虎, 等. 末次冰消期以来东亚季风快速变化的黄土记录及与格陵兰 GISP2 冰芯记录的对比[J]. 科学通报, 1998, 43(9): 1007–1008.
Wang Jianmin, Shi Qi, Chen Fahu, *et al.* *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(9): 1007–1008.
- [54] 李森, 强明瑞, 李保生, 等. 末次冰消期东亚季风区西北缘气候快速变化事件[J]. 地质论评, 2004, 50(1): 106–112.
Li Sen, Qiang Mingrui, Li Baosheng, *et al.* *Geological Review*, 2004, 50(1): 106–112.
- [55] Sun Y, Oppo D W, Xiang R, *et al.* Last deglaciation in the Okinawa Trough: Subtropical northwest Pacific link to Northern Hemisphere and tropical climate [J]. *Paleoceanography*, 2005, 20 (4): PA4005, doi: 10.1029/2004PA001061.
- [56] 李铁刚, 刘振夏, Hall M A, 等. 冲绳海槽末次冰消期浮游有孔虫 $\delta^{13}C$ 宽幅低值事件[J]. 科学通报, 2002, 47(4): 298–301.
Li Tiegang, Liu Zhenxia, Hall M A, *et al.* *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(4): 298–301.
- [57] Jian Z, Wang P, Saito Y, *et al.* Holocene variability of the Kuroshio Current in the Okinawa Trough, northwestern Pacific Ocean [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 184: 305–319.
- [58] Taylor K C, Lamorey G W, Doyle G A, *et al.* The ‘flickering switch’ of late Pleistocene climate change[J]. *Nature*, 1993, 361: 432–436.
- [59] 王文远, 刘嘉麒, Negendank J, 等. 热带湖光岩玛珥湖记录的末次冰消期东亚夏季风两步式的变化[J]. 科学通报, 2000, 45(8): 860–864.
Wang Wenyan, Liu Jiaqi, Negendank J, *et al.* *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(8): 860–864.
- [60] 黄恩清, 田军. 末次冰消期冰融水事件与气候突变 [J]. 科学通报, 2008, 53(12): 1437–1447.
Huang Enqing, Tian Jun. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53 (12): 1437–1447.
- [61] Hong Y T, Hong B, Lin Q H, *et al.* Inverse phase oscillations between the East Asian and Indian Ocean summer monsoons during the last 12000 years and paleo–El Niño[J]. *Earth and Planetary Science Letters*,

- 2005, 231: 337–346.
- [62] Koutavas A, Stieglitz L J, Marchitto T M, *et al.* El Niño-like pattern in ice age tropical Pacific Sea surface temperature [J]. *Science*, 2002, 297: 226–230.
- [63] 洪冰, 林庆华, 洪业汤. 全新世亚洲季风, ENSO 及高北纬度气候间的关联[J]. *科学通报*, 2006, 51(17): 1977–1984.
Hong Bing, Lin Qinghua, Hong Yetang. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(17): 1977–1984.
- [64] 肖尚斌, 李安春, 陈木宏, 等. 近 8ka 东亚冬季风变化的东海内陆架泥质沉积记录 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2005, 30(5): 573–581.
Xiao Shangbin, Li Anchun, Chen Muhong, *et al.* *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2005, 30(5): 573–581.
- [65] 王可, 郑洪波, Prins M, 等. 东海内陆架泥质沉积反映的古环境演化 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(4): 1–10.
Wang Ke, Zheng Hongbo, Prins M, *et al.* *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2008, 28(4): 1–10.
- [66] 张晓东, 许淑梅, 翟世奎, 等. 东海内陆架沉积气候信息的端元分析模型反演[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(2): 25–32.
Zhang Xiaodong, Xu Shumei, Zhai Shikui, *et al.* *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2006, 26(2): 25–32.

- [67] 孙晓燕, 李广雪, 刘勇, 等. 东东北部泥质区敏感粒度组分对东亚季风演变的响应[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(4): 11–17.
Sun Xiaoyan, Li Guangxue, Liu Yong, *et al.* *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2008, 28(4): 11–17.
- [68] 赵泉鸿, 翦知湜, 张在秀, 等. 东海内陆架泥质沉积区全新世古环境变迁: 有孔虫证据[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(2): 75–82.
Zhao Quanhong, Jian Zhimin, Zhang Zaixiu, *et al.* *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2009, 29(2): 75–82.
- [69] 徐方建, 李安春, 万世明, 等. 东海内陆架泥质区中全新世环境敏感粒度组分的地质意义[J]. *海洋学报*, 2009, 31(3): 95–102.
Xu Fangjian, Li Anchun, Wan Shiming, *et al.* *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(3): 95–102.
- [70] 曲维政, 黄菲, 赵进平, 等. 影响东海气候的太阳活动信息分析[J]. *海洋学报*, 2006, 28(2): 39–45.
Qu Weizheng, Huang Fei, Zhao Jinping, *et al.* *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(2): 39–45.
- [71] 徐方建, 李安春, 肖尚斌, 等. 末次冰消期以来东海内陆架古环境演化[J]. *沉积学报*, 2009, 27(1): 118–127.
Xu Fangjian, Li Anchun, Xiao Shangbin, *et al.* *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(1): 118–127.

(责任编辑 刘志远)

加入全国学会注册个人会员登记号

中国科协所属的全国学会有192个, 如中国数学会、中国光学学会等, 您加入自己所属学科的全国学会了吗? 您拥有个人会员登记号了吗?

如果您已经加入某一全国学会, 请赶快注册个人会员登记号, 它将使您:

→ 通过个人会员管理系统方便地浏览学会概况, 登记个人参加学术活动、发表专著等信息, 发表意见和建议, 查看学会相关信息。

→ 您参加所加入的全国学会举办的学术活动, 可获得注册费等方面的减免优惠。

→ 您在《科技导报》发表学术论文, 交纳版面费时将获得优惠, 还可以8折优惠价订阅《科技导报》。

