

南沙海区晚上新世海水上层结构变化

李建如,汪品先

(同济大学海洋地质教育部重点实验室,上海 200092)

摘要:对南沙海区水深 2 772 m 的 ODP1143 站 100~150 m 井段共 101 块沉积样品进行了浮游有孔虫分析,结果表明,从 3.27 Ma 到 2.55 Ma 该区表层海水温度逐步降低,温跃层逐步加深,推测是晚上新世北半球冰盖形成过程中,东亚季风相应加强的结果。与此同时,南沙与南海北部的温跃层深度差值不断加大,可能是西太平洋暖池最终形成或加强的表现。3.2 Ma 前后,表层海水温度和海水温跃层深度都发生了急剧变化,反映出北半球冰盖和西太平洋暖池的发育可能存在一定的相关性。

关键词:北半球冰盖;西太平洋暖池;温跃层深度;表层海水温度;晚上新世;南沙海区

中图分类号:P736.22 **文献标识码:**A **文章编号:**0256-1492(2004)04-0067-05

晚上新世北半球冰盖形成和扩大,使得地球表层在显生宙六亿年历史上第一次两极都被冰盖笼罩,全球气候进入了具有典型冰期、间冰期旋回的极端气候期。然而地球究竟是如何进入这种地史上罕见的气候不稳定期,至今仍属未解之谜。不仅对此变化的原因、机制尚有不同看法^[1-2],而且这段转变时期在世界各大洋中的表现也并不完全一致^[3]:如大西洋和南大洋上新世晚期大洋表层海水温度明显下降^[4];亚热带西太平洋表层海水温度也呈降低趋势,而在热带和西赤道太平洋则稍有升高或相对稳定^[5]。与此同时,全世界表层海水温度最高的海区“西太平洋暖池”可能也是最终形成于晚上新世^[6],其形成发育过程与冰盖有无联系是古海洋学的新命题。

大洋钻探 184 航次为南海古海洋学研究提供了绝好的材料。在南海北部,已经发现晚上新世表层水温有明显下降^[7]。ODP1143 站位于南沙海区,同时又处在“西太平洋暖池”的边缘。本次工作对该井晚上新世地层进行浮游有孔虫分析,从表层海水古温度和温跃层深度等入手,探讨北半球冰盖和西太平洋暖池形成过程在南沙海区的反映。

1 材料与方法

ODP184 航次 1143 站位于 9°21.72'N、113°17.11'E,水深 2 772 m,近 516 mcd (合成深度)的

基金项目:国家重点基础研究项目(2000078500);国家自然科学基金项目(40125015,40321603)

作者简介:李建如(1978—),男,博士生,从事古海洋学研究,E-mail:peal@gs.tongji.edu.cn

收稿日期:2004-08-28;改回日期:2004-10-12。周立君编辑

岩心记录了近 10 Ma 以来的沉积历史,平均沉积速率达 30~70 m/Ma^[8]。本次对 100~150 mcd 井段按 50 cm 的采样间距取得 101 块样品,进行有孔虫的定量分析。样品以标准微体古生物学方法处理,对大于 0.154 mm 的粗组分进行分样,并从中挑出 200~500 枚浮游有孔虫完整壳体进行鉴定、统计。

对此井的上部 5 Ma 地层,根据有孔虫与超微化石生物地层学、磁性地层学与氧同位素地层学建立了年代框架^[8];然后又使用自动轨道调谐方法,对底栖有孔虫 ¹⁸O 进行天文调谐,建立了西太平洋地区 5 Ma 以来的天文年代表^[9],为本次工作提供了可靠的时间序列(图 1A)。

2 表层海水温度变化

运用浮游有孔虫估算表层海水古温度,最常见的是转换函数法,这在南海的研究中已被广泛使用^[5,10]。转换函数法的设计是定量分析冬、夏水温,但存在着种种缺陷,在低纬区的应用有许多困难;加上地质历史时期生物属种的演化,此法的应用一般仅限于晚第四纪,用于更老的地层比较困难。为避免转换函数法对表层水种与次表层水种混在一起处理的弱点,本文采用浮游有孔虫两个浅水种 *Globigerinoides sacculifer*/*Globigerinoides ruber* 的比值作为古温度变化的指标。浮游有孔虫 *G. sacculifer* 为典型的热带属种,*G. ruber* 则为典型的亚热带属种,南海的研究显示,温度高时 *G. sacculifer* 的含量相对较高,因此,两者含量的比值可以反映温度的变化:*G. sacculifer*/*G. ruber* 比值若增大,则表示表层海水温度升高;反之,则表示表层海水温度降低。此法不能提供冬、夏温度值,却能较客观地反

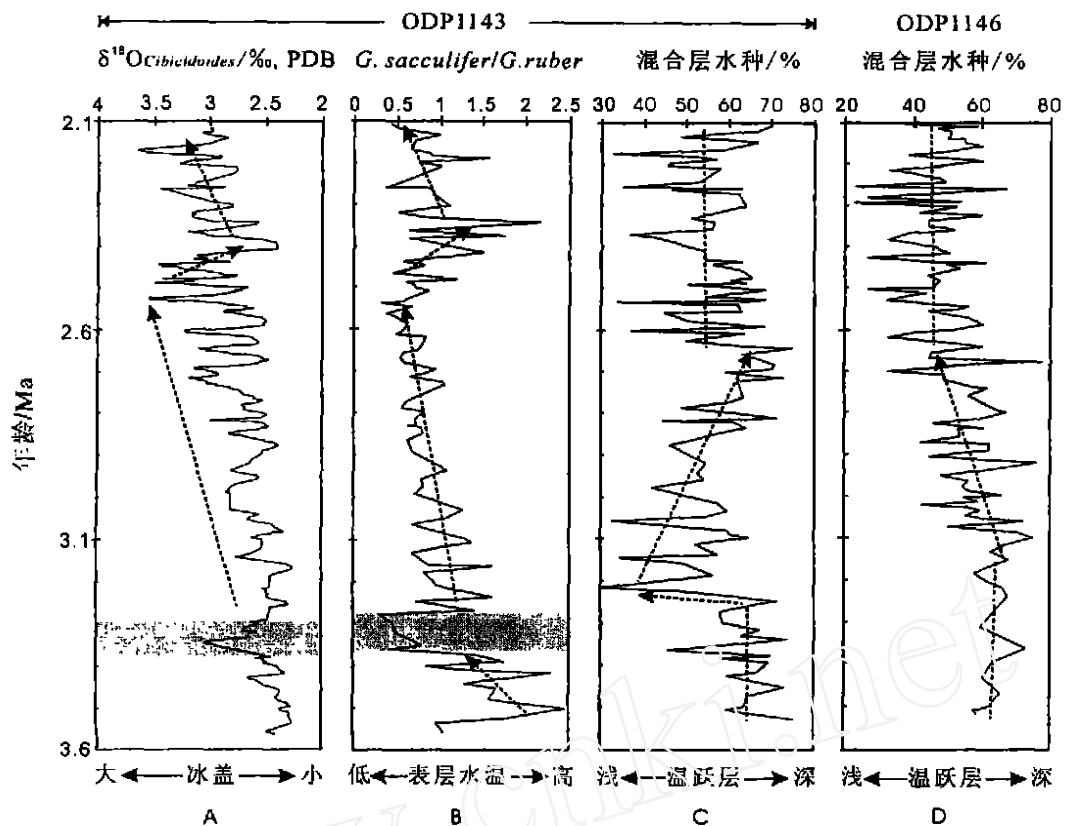


图1 南沙海区大洋钻探站位浮游有孔虫组合的变化

A. ODP1143 站底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线^[9]; B. ODP1143 站浮游有孔虫 *G. sacculifer*/*G. ruber*; C. ODP1143 站混合层水种含量; D. ODP1146 站混合层水种含量^[10,13]。图中阴影表示底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 和 *G. sacculifer*/*G. ruber* 的急剧变化阶段,虚线表示底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 、*G. sacculifer*/*G. ruber* 和浮游有孔虫混合层水种含量的变化趋势。

Fig. 1 Downcore variation of the planktonic foraminiferal assemblages in the southern South China Sea

A. Benthic foraminiferal $\delta^{18}\text{O}$ from Site 1143; B. *G. sacculifer*/*G. ruber* from Site 1143^[9]; C. Proportion (%) of mixed-layer species from Site 1143; D. Proportion (%) of mixed-layer species from Site 1146^[10,13]. Gray bar indicates the interval of drastic changes; arrows show the trend of variation.

映温度变化趋势^[11-12]。

如图 1B 所示,1143 站晚上新世 *G. sacculifer*/*G. ruber* 比值在 3.36 Ma 前达最高值但呈现下降趋势,代表了从中新世中期高水温向晚期降低的过程;从 3.37 到 3.27 Ma, *G. sacculifer*/*G. ruber* 值从突然降低到突然回升,与底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 的突然变重(图 1A 的阴影)相对应,指示了表层海水发生一次显著的降温事件。此后, *G. sacculifer*/*G. ruber* 比值呈下降趋势,直至 2.55 Ma 左右,反映了表层海水温度逐步降低的过程,亦与同位素曲线所指示的冰盖形成相对应。2.55 Ma 以来, *G. sacculifer*/*G. ruber* 比值先升高后降低,也与 $\delta^{18}\text{O}$ 的先变轻后变重的趋势相同,即温度上升对应冰盖缩小、温度下降对应冰盖扩大。

总体说来,南沙海区晚上新世的表层海水温度

总体呈下降的趋势,基本和北半球冰盖的形成与扩大相一致,温度的升降与冰盖的消长对应,反映两者间可能的关联。

3 温跃层深度变化

现代生态学的研究表明,浮游有孔虫的分布与水深和温跃层密切相关^[14-15]。*Globorotalia menardii*类、*Neogloboquadrina* spp.、*Pulleniatina obliquiloculata*类和 *Spheroidina dehiscens* 等在中低纬海区主要生活于温跃层以下的深层水中。当温跃层变深时,这些温跃层属种生存空间变小,含量相应降低; *G. ruber*、*G. sacculifer* 和 *Dentoglobigerina altispira* 等混合层属种主要分布于温跃层以上的浅水中,其丰度随着温跃层深度的加大而增高。因此,这两类浮游有孔

虫的含量可以作为温跃层深度变化的定性指标^[14,16]。

经计算,ODP1143站的浮游有孔虫混合层水种的含量如图1C所示:3.3 Ma之前,混合层水种含量大约为65%,反映了温跃层较深;3.3~3.2 Ma时,混合层水种含量突然降低,最低仅30%左右,指示了温跃层的突然变浅;此后,混合层水种含量逐步升高,上升至2.65 Ma的75%左右,说明了温跃层的逐渐变深。

西太平洋暖池相对于周围海区其海水混合层厚而温跃层深,因此,可以用两者之间温跃层深度梯度的出现作为西太平洋暖池形成的标志,也可以用其差值的变化追踪暖池的强弱变化^[6]。ODP1146站的研究显示,3.1 Ma前南海北部浮游有孔虫混合层的含量大约为60%~70%,没有较大幅度变化^[10],这与1143站一致,表示了南海南北温跃层深度差异变化不明显。而3.2 Ma以来ODP1146站的浮游有孔虫混合层种含量逐渐降低,说明温跃层深度逐渐变浅(如图1D)。3.2 Ma以来南海温跃层深度南变深、北变浅,可能是西太平洋暖池形成或者加强的表现。

4 讨论

底栖有孔虫的氧同位素记录常被用来指示极地冰盖体积和底层水温的变化。南沙海区ODP1143站的底栖有孔虫 *Cibicidoides* 氧同位素值在3.37 Ma之前相对较轻且波动不大,说明深层水温度相对稳定;而同期 *G. sacculifer*/*G. ruber*的高值指示了南沙海区表层海水温度也相对较高,与这一时期全球气候温暖^[17]相吻合。3.37~3.27 Ma的底层海水¹⁸O和表层海水温度的突然变化事件可能是北半球冰盖一次突变事件所致。1143站表层海水温度在3.27~2.55 Ma逐步降低,与南海北部的变化趋势相同;1146和1148站的研究发现3.1 Ma之后表层海水温度逐渐降低,并认为是东亚冬季风强化的结果^[10,13];1143站底栖有孔虫¹⁸O值变重而浮游有孔虫¹⁸O基本不变,说明表层水盐度降低,抵偿了冰盖增大导致的¹⁸O变化,由此推论东亚季风在3.3~2.5 Ma强化导致降水量增大,使得表层水相对变淡^[18]。总之,1143站晚上新世3.27~2.55 Ma表层海水温度和盐度的降低可能是东亚冬、夏季风的强化所致,而东亚冬季风的强化又和北半球冰盖的形成和扩张有关^[13],可以认为表层海水温度的变化是对北半球冰盖变化的响应。

ODP1143站混合层水种含量在3.3 Ma之前和南海北部ODP1146站大体相近,且相对稳定^[11],表示了南海南北海水温跃层深度差异不明显(图1D)。ODP1146站的研究还显示3.2 Ma以来南海北部浮游有孔虫混合层种含量逐渐降低,说明温跃层深度逐渐变浅^[13](图1D);而南沙海区ODP1143站浮游有孔虫混合层种含量则显著增加,指示了海水温跃层深度的逐步加深,与南海北部形成鲜明的对比。这说明3.2 Ma以来南海南北海水温跃层深度梯度不断增大,可能是西太平洋暖池形成或者加强的表现,这与翦知^[19]等认为的现代意义的西太平洋暖池最终形成于3.6~3.3 Ma的结果大体一致^[6]。2.65 Ma之后,南海南北海水温跃层深度梯度变化不大,可能指示了西太平洋暖池的相对稳定。

综上所述,南沙海区在晚上新世3.0 Ma前后,表层海水的温度和温跃层深度都发生了急剧变化,两者的变化分别与北半球冰盖和西太平洋暖池形成的过程相关:北半球冰盖通过东亚冬季风的加强影响着南沙海区表层海水温度的变化;南海南北海水温跃层深度梯度的变化则是西太平洋暖池发育的直接体现。冰盖与暖池这两件看来不相关的事件几乎同时发生,是否又说明两者之间存在着某种相关性,有待于进一步的研究证实。

5 结论

(1) 晚上新世南沙海区表层海水温度可分为以下几个阶段:3.37 Ma之前表层海水温度较高,3.27~2.55 Ma逐步降低,2.55 Ma以来则先升高再降低。表层海水温度的升降与北半球冰盖形成与消长有很好的相关性。其中,3.37~3.27 Ma期间表层海水还发生了一次突然降温 and 回升事件。

(2) 晚上新世南沙海区海水温跃层在3.2~2.65 Ma期间显著变深,与此同时,南海南北海水温跃层深度梯度不断增大,指示了西太平洋暖池的形成与强盛;2.65 Ma以来南海海水温跃层深度则保持相对稳定。3.3~3.2 Ma,亦即上述表层水温突变事件之后南沙海区海水温跃层突然变浅,原因尚待查明。

(3) 南沙海区的记录既反映了北半球冰盖引起的东亚季风变化,又反映了西太平洋暖池的历史。两者在上新世晚期同时发生急剧变化,为冰盖、暖池、季风之间的关系提出了新的研究线索。

致谢:本研究承蒙大洋钻探第184航次提供样品,特此致谢。

参考文献(References)

- [1] Haug H G, Tiedemann R. Effect of the formation of the Isthmus of Panama on Atlantic Ocean thermohaline circulation [J]. *Nature*, 1998, 393: 673—676.
- [2] Cane A M, Molnar P. Closing of the Indonesian Seaway as a precursor to East African aridification around 3~4 million years ago [J]. *Nature*, 2001, 411: 157—162.
- [3] Maslin M A, Li X S, Loutre M F, et al. The contribution of orbital forcing to the progressive intensification of northern hemisphere glaciation [J]. *Qua. Sci. Rev.*, 1998, 17: 411—426.
- [4] Kennett J P. Late Cenozoic oxygen and carbon isotopic history and volcanic ash stratigraphy: DSDP Site 284, South Pacific [J]. *Am. J. Sci.*, 1979, 279: 52—69.
- [5] Wang L J. Sea surface temperature history of the low latitude Western Pacific during the last 5.3 million years [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1994, 108: 379—436.
- [6] 翦知霏, 李保华, 王吉良. 从微体化石看西太平洋暖池的形成与演化 [J]. *第四纪研究*, 2003, 23 (2): 185—191. [JIAN Zhi-min, LI Bao-hua, WANG Ji-liang. Formation and evolution of the Western Pacific Warm Pool recorded by microfossils [J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23 (2): 185—191.]
- [7] 翦知霏, 成鑫荣, 赵泉鸿, 等. 南海北部近 6 Ma 以来的氧同位素地层与事件 [J]. *中国科学(D 辑)*, 2001, 31 (10): 816—822. [JIAN Zhi-min, CHENG Xin-rong, ZHAO Quan-hong. Oxygen isotope stratigraphy and events in the northern South China Sea during the last 6 million years [J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 44 (10): 952—960.]
- [8] Wang P X, Prell W L, Blum P, et al. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports 184 [R]. Ocean Drilling Program College Station, TX, 2000.
- [9] Tian J, Wang P X, Chen X R, et al. Astronomically tuned Plio-Pleistocene benthic ^{18}O records from South China Sea and Atlantic-Pacific comparison [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 203: 1015—1029.
- [10] Li B H, Wang J L, Huang B Q, et al. South China Sea surface water evolution over the last 12 Ma: A south-north comparison from Ocean Drilling Program Sites 1143 and 1146 [J]. *Paleoceanography*, 2004, 19.
- [11] BÉA W H. An ecological, zoogeographic and taxonomic review of recent planktonic foraminifera [A]. In: Ramsay A T S (ed.). *Ocean Micropaleontology [M]*. Academic Press, London, 1997.
- [12] Wang P X, Min Q B, Bian Y H, et al. Planktonic foraminifera in the continental slope of the northern South China Sea during the last 130 000 years and their paleo-oceanographic implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1986, 60: 1—11.
- [13] Huang B Q, Cheng X R, Jian Z M, et al. Response of upper ocean structure to the initiation of the North Hemisphere glaciation in the South China Sea [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2003, 196: 305—318.
- [14] Chen M T, Prell W L. Faunal distribution patterns of planktonic foraminifera in surface sediments of the low-latitude Pacific [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1995, 137: 55—77.
- [15] Hemleben C, Spindler M, Anderson O R. *Modern Planktonic Foraminifera [M]*. New York: Springer-Verlag, 1989. 220—257.
- [16] Ravelo A C, Fairbanks R G. Oxygen isotopic composition of multiple species of planktonic foraminifera: recorders of the modern photic zone temperature gradient [J]. *Paleoceanography*, 1992, 7 (6): 815—831.
- [17] Shackleton N J, Hall M A, Pate D. Pliocene stable isotope stratigraphy of Site 846 [A]. In: Pisias N G, Mayer L A, Janecek T R, et al. (eds.). *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results [C]*. 1995, 138: 337—353.
- [18] Tian J, Wang P X, Cheng X R. Development of the East Asian monsoon and Northern Hemisphere glaciation: oxygen isotope records from the South China Sea [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23: 2007—2016.

LATE PLIOCENE CHANGES OF UPPER OCEAN STRUCTURE IN THE SOUTHERN SOUTH CHINA SEA

LI Jian-ru, WANG Pin-xian

(MOE key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract :Planktonic foraminifera from Ocean Drilling Program Site 1143, southern South China Sea, was analyzed in order to reconstruct the changes of upper ocean structure during the late Pliocene (3.6 ~ 2.1 Ma). The gradual decline of the *Globigerinoides sacculifer* / *Globigerinoides ruber* ratios from 3.27 Ma to 2.55 Ma indicates a successive decrease of sea surface temperature. The correspondence between the sea surface temperature and benthic ^{18}O records suggests that the cooling was probably caused by the strengthening of the East Asian winter monsoon, which in turn is associated with the progressive intensification of the Northern Hemisphere glaciation. At the same time, the stepwise increase of the relative abundance of mixed-layer species in the planktonic foraminiferal assemblage suggests a deepening of the thermocline. A comparison with the records from the northern South China Sea, has revealed a significant increase of the southern-northern gradient of the thermocline depth, implying the final formation or further development of the "Western Pacific Warm Pool". The rapid decrease of SST and the thermocline depth at Site 1143 during about 3.2 Ma, suggest some causal relationship between the Northern Hemisphere glaciation and the "Western Pacific Warm Pool".

Key words :Northern Hemisphere glaciation; Western Pacific Warm Pool; thermocline; sea surface temperature; late Pliocene; southern South China Sea