

南海北部上新世晚期东亚冬季风增强的 同位素和有孔虫证据

翦知[✉] 汪品先 赵泉鸿 成鑫荣 王吉良

(同济大学海洋地质教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要 对南海北部大洋钻探 ODP1148 站进行稳定同位素和有孔虫分析, 采用多种替代性指标, 追溯上新世晚期以来东亚冬季风的演变。发现约 3.1 ~ 2.2 Ma B. P. 之间, 浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber* 的 ^{13}C 值显著降低, 而 *Neogloboquadrina dutertrei* 的相对丰度明显增大, 指示冬季风急剧增强, 并伴随表层海水温度的降低和古生产力的增高。此后, 冬季风还有几次明显的增强, 特别是在约 1.7 Ma B. P., 1.3 Ma B. P., 0.9 Ma B. P., 0.6 Ma B. P. 和 0.2 Ma B. P.。频谱分析揭示冬季风主要受冰盖体积大小的控制, 而太阳辐射量变化也起一定作用。

主题词 东亚冬季风 上新世晚期 同位素 有孔虫 南海

1 引言

亚洲季风区是现代世界人口最为密集的地区, 其气候变化规律的辨识对于人类社会的持续发展有特殊的意义。但亚洲古季风的研究, 一向以南亚(即印度)季风为主, 印度洋不仅提供了晚第四纪季风盛衰的记录, 而且有多次 DSDP/ODP 航次的钻探为新近纪以来的季风史提供材料。相比之下, 东亚古季风的研究程度不高, 并且主要依靠陆地记录(如中国黄土)。为此, 大洋钻探 ODP 第 184 航次于 1999 年在南海 5 个站位采取了高质量岩芯, 其中北部 ODP1148 站(18°50'N, 116°34'E)水深约 3 297 m, 提供了渐新世晚期以来相对连续的古环境剖面^[1]。本次研究通过该站中新世最晚期近 6 Ma 以来的稳定同位素和有孔虫群变化, 采用多种替代性指标, 旨在获得东亚冬季风演变的海洋记录, 进而探讨其驱动力机制。

2 南海北部东亚冬季风的替代性指标

研究古季风首要解决的问题是古季风替代性指标的建立。近年来, 已经在阿拉伯海找到一系列南亚夏季风的替代性指标, 如浮游有孔虫上升流属种 *Globigerina bulloides*、生物蛋白石含量和沉积物粒度等^[2-4]。而东亚季风区不仅具有典型的夏季风, 其

* 第一作者简介: 翦知[✉] 男 35 岁 教授 海洋地质学专业 E-mail: zjiank@online.sh.cn

国家自然科学基金(批准号: 49999560)资助重大项目和国家重点基础研究发展规划项目(批准号: G2000078502)

2001 - 05 - 22 收稿, 2001 - 06 - 23 收修改稿

冬季风亦十分强烈,这就需要不同季节生长的浮游有孔虫属种及其同位素来分别指示冬、夏季风。

浮游有孔虫上升流属种 *G. bulloides* 在阿拉伯海区夏季风增强时,其通量明显增大,相对丰度一般也超过 30%~40%^[2,4],在浮游有孔虫群中占绝对优势,因而可以作为夏季风的替代性指标。但该种在南海现代表层沉积中含量不超过 10%^[5],且主要生长在冬季^[6],很难作为东亚季风的替代性指标。根据南海中部沉积捕获器研究,浮游有孔虫的高通量主要出现在冬、夏两个季风期,其中优势种 *Neogloboquadrina dutertrei* (相对丰度超过 10%) 主要出现在冬季^[6]。该种在南海现代表层沉积中含量也都超过 10%,在研究区可达 20%以上^[5],是南海浮游有孔虫群的优势种,可以作为东亚冬季风的替代性标志。

此外,根据南海现代表层沉积中浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber* 的 ¹³C 分布,在南海北部存在一个明显的低 ¹³C 值的舌头状区域,朝巴士海峡方向 ¹³C 值减小,这是由东亚冬季风引起的表层环流从巴士海峡方向带来的富营养水体所造成^[7]。也就是说,尽管 *G. ruber* 的 ¹³C 值总体上反映的是全球表层水碳同位素变化,但在南海北部研究区随着东亚冬季风增强,其值也越偏负。实际上,南海表层沉积中孢粉的浓度分布^[8],也揭示了在东亚冬季风驱动下表层环流从巴士海峡方向进入南海北部。因此,本次研究将浮游有孔虫 *N. dutertrei* 的相对丰度和 *G. ruber* 的 ¹³C 作为东亚冬季风的替代性指标。

3 上新世晚期东亚冬季风的急剧增强

3.1 碳同位素证据

ODP1148 站的年代框架,主要依据氧同位素地层和磁性地层学以及浮游有孔虫生物地层学^[11]。该站位 200mcd(合成深度米)以上的沉积物相当于近 6Ma 以来的沉积,按 15~80cm 取样间距,共获 400 余样品供稳定同位素分析。其中约 3.1Ma B. P. 以来采用浮游有孔虫 *G. ruber* 的壳体,样品平均时间分辨率为 9 000a,而 6.0~3.1Ma B. P. 之间采用 *Globigerinoides sacculifer*,平均时间分辨率为 25 000a。由于这两个种的同位素存在一定种间差异,本文将所有 *G. sacculifer* 碳同位素值都减去 0.36‰,转换为 *G. ruber* 的相应值。有关稳定同位素分析方法、详细结果将另文发表¹⁾。

从图 1 可以看出,近 6Ma 以来 ODP1148 站 *G. ruber* 的 ¹³C 可以明显地分为 4 个阶段:约 3.1Ma B. P. 之前在 0.96‰ 上下波动,3.1~2.2Ma B. P. 之间发生显著的降低,其幅度可达 1‰ 以上,而 2.2~1.7Ma B. P. 和 1.7~0.0Ma B. P. 之间分别在 0.27‰ 和 0.53‰ 附近变化。如果我们选取赤道东太平洋 ODP851 站(2°46'N, 110°34'W, 水深 3 760m)^[9] 和赤道西太平洋 DSDP856 站(0°30'N, 158°30'E, 水深 2 218m)^[10],比较南海北部与太平洋表层水碳同位素记录(其中太平洋两个站均采用浮游有孔虫 *G. sacculifer* 的数据)的差异,结果发现南海北部 ODP1148 站 *G. ruber* 的 ¹³C 在 3.1~2.2Ma B. P. 之间的显著降低是区域性事件。根据现代南海 *G. ruber* 的 ¹³C 分布,推断东亚冬季风在 3.1~2.2Ma B. P. 之间显著增强,从而导致南海北部 ODP1148 站 *G. ruber* 的 ¹³C 降低,或者说

1) 翦知微,成鑫荣,赵泉鸿等. 南海北部近六百万年以来的氧同位素地层与事件. 2001

东亚冬季风的增强使得表层水 ^{13}C 的降低在南海北部更显著。实际上,这一时期对应于北半球冰盖的形成^[11~14],也与中国马兰黄土开始堆积指示的冬季风急剧增强^[15]相吻合。

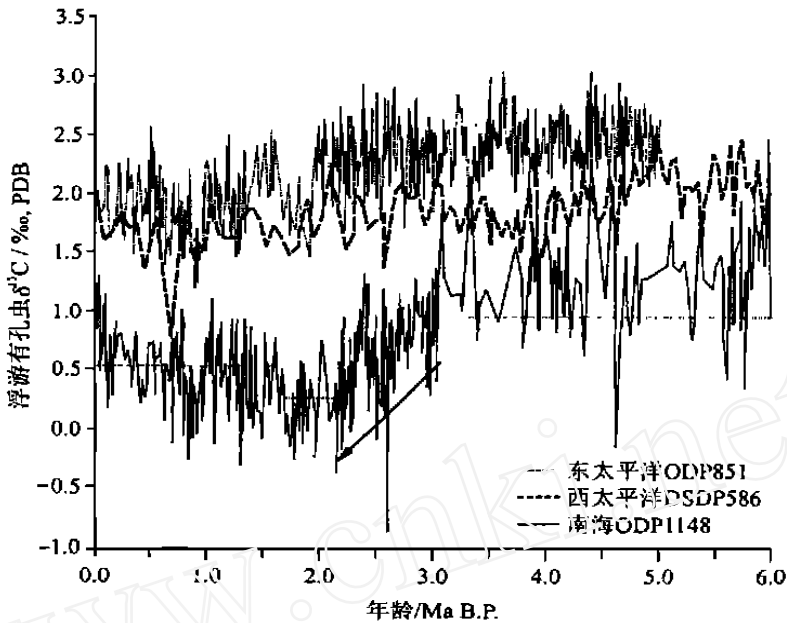


图1 南海北部 ODP1148 站近 6Ma 以来浮游有孔虫 *G. ruber* 的 ^{13}C 及其与赤道东太平洋 ODP851 站和赤道西太平洋 DSDP586 站 *G. sacculifer* 的比较
水平虚线示各阶段的平均值,斜箭头示意东亚冬季风的增强

Fig. 1 Planktonic foraminiferal ^{13}C (*G. ruber*) during the last 6Ma at ODP Site 1148 in the northern South China Sea and its comparison with those of ODP851 and DSDP586 (*G. sacculifer*) in the eastern and western equatorial Pacific, respectively

3.2 浮游有孔虫证据

有孔虫的定量分析共完成 417 个样品,其中南亚夏季风的替代性指标 *G. bulloides* 的相对丰度变化不大,一般不超过 10%,平均值也低于 3.0%,而南海的东亚冬季风替代性指标 *N. dutertrei* 的含量却变化十分显著。如图 2 所示,ODP1148 站的 *N. dutertrei* 含量在约 3.1Ma B.P. 之前含量很低,一般不超过 5%,而 3.1~2.2Ma B.P. 之间,含量急剧上升为 20%~50%,成为浮游有孔虫群的绝对优势种,指示了东亚冬季风的急剧增强。这与浮游有孔虫 *G. ruber* 的 ^{13}C 指示的 3.1~2.2Ma B.P. 之间东亚冬季风增强相一致。

4 上新世晚期的古海洋变迁

上新世晚期是地球历史上一个非常特殊的时期,随着北半球冰盖的形成^[11~14],全球从温暖、均一的环境变为具有典型冰期-间冰期旋回的极端气候。这一时期,东亚季风区

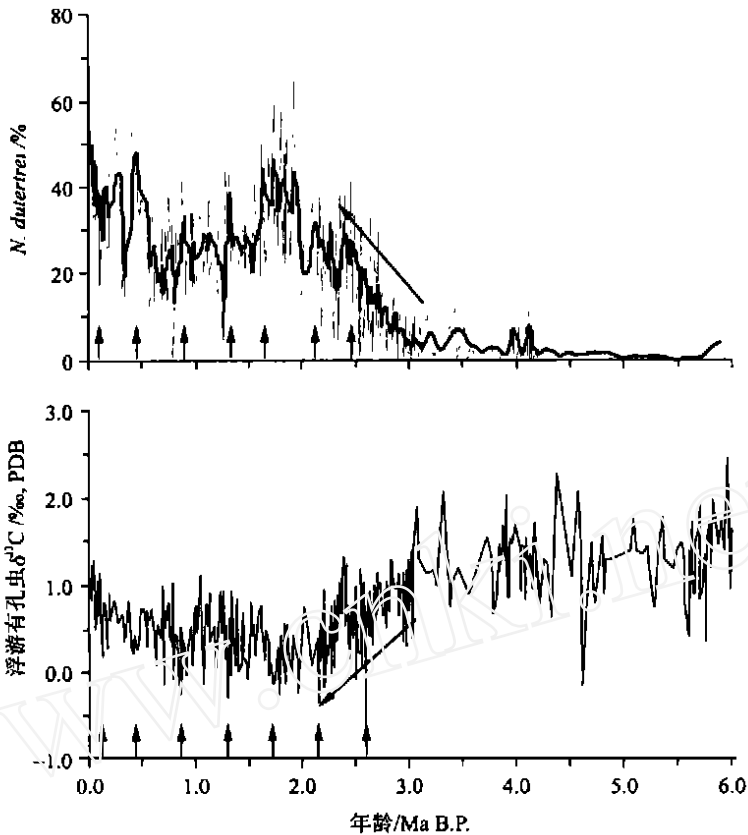


图2 ODP1148 站近 6Ma 以来浮游有孔虫 *N. dutertrei* 的相对丰度与
G. ruber 的 ^{13}C 比较

黑色粗线条示 5 点滑动平均结果,垂直的小箭头指示 *N. dutertrei* 丰度增加、 ^{13}C 值降低的事件,斜箭头示意东亚冬季风的增强

Fig. 2 Comparison of *N. dutertrei* abundance with planktonic foraminiferal ^{13}C (*G. ruber*) during the last 6 Ma at ODP Site 1148

的陆地^[15]和海洋记录均指示冬季风显著增强,强劲的东北季风必然引起表层环流等一系列古海洋学变化。

我们采用 P. R. Thompson 的 FP-12E^[16]和 U. Pflaumann 等的 SIMMAX-28^[5]转换函数估算表层海水温度,其中第四纪以前出现的属种依据形态进行归类^[17]。结果如图 3 所示,在约 3.1Ma B. P. 之前南海北部的表层海水温度变化不大,冬季温度在 24.5 上下波动,与这一时期全球气候温暖^[18]相吻合。而 3.1~2.2Ma B. P. 之间表层海水温度明显下降,且主要表现在冬季温度上,变化幅度可达 4 以上。

南海北部底栖有孔虫 ^{18}O 反映的底层海水温度在 3.1~2.5Ma B. P. 之间显著降低约 5.8¹⁾,指示北半球冰盖在这一时期形成^[11~14]。但浮游有孔虫 ^{18}O 反映的上新世以

1) 翦知明,成鑫荣,赵泉鸿等. 南海北部近六百万年以来的氧同位素地层与事件. 2001

来表层水降温却发生在约 2.2Ma B. P. 和约 0.9Ma B. P. (见图 3)。尽管 5.0 ~ 2.2Ma B. P. 之间浮游有孔虫 ^{18}O 值也有几次变重(约 4.3Ma B. P., 3.8Ma B. P., 3.4Ma B. P., 3.1Ma B. P., 2.7Ma B. P. 和 2.5Ma B. P.), 指示表层水降温, 但每次事件之后表层水温和 ^{18}O 又恢复到上新世的平均水平。只是在上新世晚期约 2.2Ma B. P., 浮游有孔虫 ^{18}O 才第一次发生不可逆转的变重, 到中更新世约 0.9Ma B. P. 再次变重, 说明南海北部表层水温曾阶梯状下降, 这与用转换函数估算的南海北部和北太平洋^[19] 亚热带区表层海水温度变化相一致。推测东亚冬季风在 3.1 ~ 2.2Ma B. P. 之间急剧增强, 冬季有更多的冷水从巴士海峡方向进入南海北部, 从而引起冬季表层海水温度的显著降低。

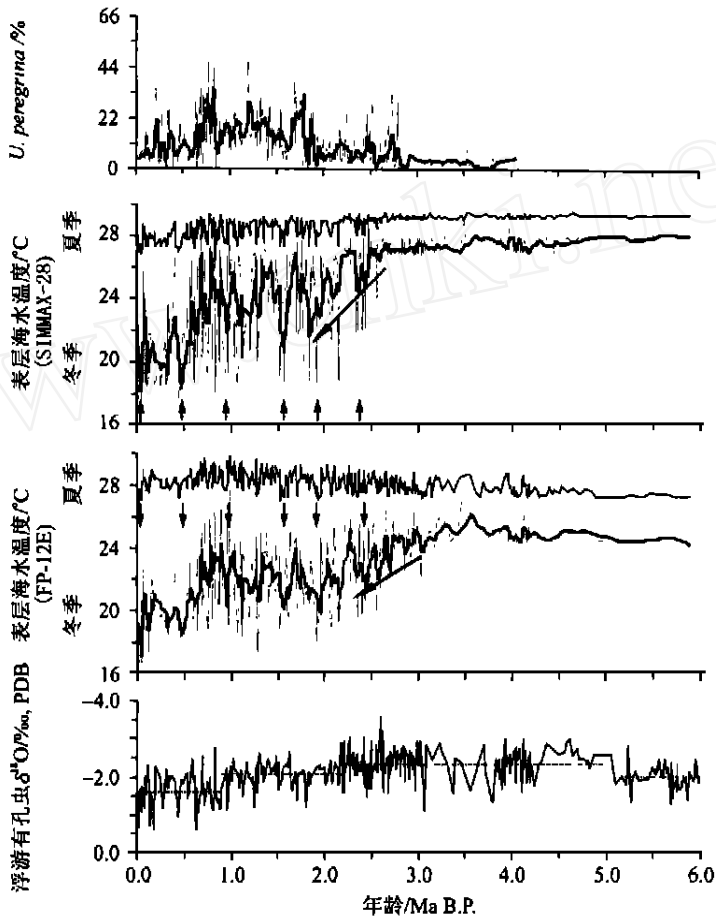


图 3 ODP1148 站近 6Ma 以来浮游有孔虫 *G. ruber* 的 ^{18}O 、转换函数估算的表层海水温度以及高生产力属种 *U. peregrina* 的含量变化
黑色粗线条示 5 点滑动平均结果, 水平虚线示各阶段 ^{18}O 平均值,
垂直的小箭头指示降温事件, 斜箭头示意东亚冬季风的增强

Fig. 3 Variations in the planktonic foraminiferal ^{18}O (*G. ruber*), sea surface temperature estimated by transfer functions and relative abundance of *U. peregrina* indicative of high productivity during the last 6 Ma at ODP Site 1148

不仅如此,ODP1148站的底栖有孔虫 *Uvigerina peregrina* 的含量在约 3.1Ma B. P. 以来明显增大(见图3),由于该种常常与沉积物中富有机碳含量和高的表层生产力相联系^[20],说明随着东亚冬季风在 3.1~2.2Ma B. P. 之间的急剧增强,南海北部受巴士海峡方向来的富营养水体影响更大,不仅使得浮游有孔虫 *G. ruber* 的 ^{13}C 值降低,表层古生产力也明显增高。

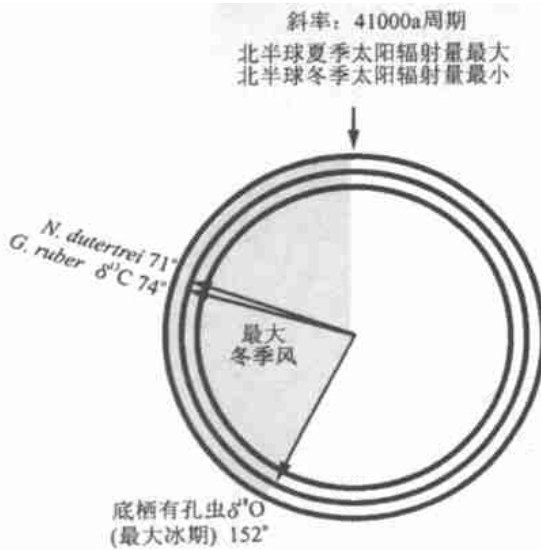


图4 南海北部东亚冬季风替代性指标(*G. ruber* 的 ^{13}C 和 *N. dutertrei* 相对丰度)与太阳辐射量(ETP)和冰盖体积(底栖有孔虫 ^{18}O)变化在斜率频段上的相位关系
阴影区示东亚冬季风最大范围

Fig. 4 Phase relationship of the East Asian winter monsoon proxy indicators (^{13}C of *G. ruber* and relative abundance of *N. dutertrei*) with insolation (ETP) and ice volume (^{18}O of benthic foraminifer) at obliquity band

的时间段 3.0~2.0Ma B. P. 之间,采用 SPECTRUM 软件^[24]进行交叉频谱分析,研究冬季风各种替代性指标的周期及其与太阳辐射量和冰盖体积变化的关系。结果发现在地球轨道斜率频段上,东亚冬季风替代性指标(*G. ruber* 的 ^{13}C 和 *N. dutertrei* 相对丰度)的相位介于太阳辐射量(用 ETP 代表)和冰盖体积(用底栖有孔虫 ^{18}O 代表)^[2]变化之间(图4),说明尽管东亚冬季风主要受与地球轨道偏心率长周期有关的冰盖体积大小变化的控制^[25,26],但太阳辐射量变化也起着一定作用^[26]。至于各种驱动力机制如何引起东亚冬季风的变化,特别是变化的过程还有待进一步研究。

5 东亚冬季风的驱动力

根据南海北部 ODP1148 站替代性指标 *G. ruber* 的 ^{13}C 和浮游有孔虫 *N. dutertrei* 相对丰度的变化,推断东亚冬季风在 3.1~2.2Ma B. P. 之间急剧增强。实际上,约 2.2Ma B. P. 以来,东亚冬季风还有数次明显的加强,表现为 *G. ruber* 的 ^{13}C 降低、*N. dutertrei* 相对丰度增大(见图2)以及表层海水温度降低和高生产力属种 *U. peregrina* 相对丰度增大(见图3)。有意思的是,近 3Ma 以来这些替代性指标反映的南海东亚冬季风增强大约有 0.4Ma 的周期,相当于地球轨道偏心率的长周期^[21]。尽管冬季风最明显的几次变化发生在约 1.7Ma B. P., 1.3Ma B. P., 0.9Ma B. P., 0.6Ma B. P. 和约 0.2Ma B. P., 与青藏高原近 2Ma 以来的快速隆升期^[22]在时间上吻合,但构造与气候的关系十分复杂^[23],也很难用构造运动揭示冬季风变化的约 0.4Ma 周期。

为探讨东亚冬季风驱动力的机制,我们选择样品分辨率相对高(约 5 000a)

6 结论

(1) 约 3.1 ~ 2.2Ma B. P. 之间,南海北部浮游有孔虫 *G. ruber* 的 ^{13}C 值显著降低,而 *N. dutertrei* 的相对丰度明显增大,指示东亚冬季风在这一时期急剧增强。同时,伴随有表层海水温度和古生产力的变化,表现为转换函数估算的表层海水温度降低和底栖有孔虫高生产力属种 *U. peregrina* 含量指示的表层古生产力增高。此后,东亚冬季风还有几次明显的增强,特别是在约 1.7Ma B. P., 1.3Ma B. P., 0.9Ma B. P., 0.6Ma B. P. 和约 0.2Ma B. P.。

(2) 采用频谱分析研究东亚冬季风各种替代性指标(*G. ruber* 的 ^{13}C , *N. dutertrei* 和 *U. peregrina* 的相对丰度等)的周期性变化及其与地球轨道驱动力的关系,揭示东亚冬季风可能主要受冰盖体积大小变化的控制,近 3.0Ma B. P. 以来具有地球轨道偏心率的约 0.4Ma 周期,而太阳辐射量变化也起一定作用。

致谢 本次研究承大洋钻探第 184 航次全体科学家和技术人员提供样品,同济大学方定元、夏佩芬、黄宝琦、徐建和周震等参加了实验室工作,特致感谢。

参 考 文 献

- 1 Wang P, Prell W, Blum P *et al.* Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports 184. College Station: Ocean Drilling Program, 2000. 1 ~ 77
- 2 Clemens S, Prell W, Murray D *et al.* Forcing mechanisms of the Indian Ocean monsoon. *Nature*, 1991, **353**:720 ~ 725
- 3 Kroon D, Steens T, Troelstra S R. Onset of monsoonal related upwelling in the western Arabian Sea. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 1991, **117**:257 ~ 263
- 4 Prell W L, Murray D W, Clemens S C. Evolution and variability of the Indian Ocean summer monsoon: Evidence from the western Arabian Sea drilling program. *Geophysical Monograph*, 1992, **70**:447 ~ 469
- 5 Pflaumann U, Jian Z. Modern distribution patterns of planktonic foraminifera in the South China Sea and West Pacific: A new transfer technique to estimate regional sea-surface temperatures. *Marine Geology*, 1999, **156**:41 ~ 83
- 6 陈荣华, 翦知訢, 郑玉龙等. 南海中部浮游有孔虫通量的季节变化及其古海洋学意义. 同济大学学报(自然科学版), 2000, **28**(1):73 ~ 77
- 7 Wang L, Sarnthein M, Erlenkeuser H *et al.* East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: High-resolution sediment records from the South China Sea. *Marine Geology*, 1999, **156**:245 ~ 284
- 8 Sun X, Li X, Beug H-J. Pollen distribution in hemipelagic surface sediments of the South China Sea and its relation to modern vegetation distribution. *Marine Geology*, 1999, **156**:211 ~ 226
- 9 Cannariato K G, Ravelo A C. Pliocene-Pleistocene evolution of eastern tropical Pacific surface water circulation and thermocline depth. *Paleoceanography*, 1997, **12**(6):805 ~ 820
- 10 Whitman J M, Berger W H. Pliocene-Pleistocene carbon isotope record, Site 586, Ontong Java Plateau. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 1993, **130**:333 ~ 348
- 11 Maslin M A, Haug G H, Sarnthein M *et al.* Northwestern Pacific Site 882: The initiation of Northern Hemisphere glaciation. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 1995, **145**:315 ~ 329
- 12 Prell W L. Covariance pattern of foraminiferal ^{18}O : An evaluation of Pliocene ice volume change near 3.2 million years ago. *Science*, 1984, **226**:692 ~ 693
- 13 Shackleton N J, Backman J, Zimmerman J *et al.* Oxygen isotope calibration of the onset of rafting and history of glacia-

- tion in the North Atlantic region. *Nature*, 1984, **307**:620 ~ 623
- 14 Tiedeman R, Sarnthein M, Shackleton N J. Astronomic timescale for the Pliocene Atlantic ^{18}O and dust flux records of Ocean Drilling Program Site 659. *Paleoceanography*, 1994, **9**(4):619 ~ 638
- 15 An Zhisheng, Kutzbach J E, Prell W L *et al.* Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since late Miocene times. *Nature*, 2001, **411**:62 ~ 66
- 16 Thompson P R. Planktonic foraminifera in the western North Pacific during the past 150 000 years: Comparison of modern and fossil assemblages. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1981, **35**:241 ~ 279
- 17 Andersson C. Transfer function vs. Modern analog technique for estimating Pliocene sea-surface temperatures based on planktonic foraminiferal data, western equatorial Pacific Ocean. *Journal of Foraminiferal Research*, 1997, **27**(2):123 ~ 132
- 18 Shackleton N J, Hall M A, Pate D. Pliocene stable isotope stratigraphy of ODP Site 846. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 1995, **138**:337 ~ 355
- 19 Wang L. Sea surface temperature history of the low latitude western Pacific during the last 5.3 million years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1994, **108**(3 ~ 4):379 ~ 436
- 20 Jian Z, Wang L, Kienast M *et al.* Benthic foraminiferal paleoceanography of the South China Sea over the last 40 000 years. *Marine Geology*, 1999, **156**:159 ~ 186
- 21 Clemens S C, Tiedemann R. Eccentricity forcing of Pliocene- Early Pleistocene climate revealed in a marine oxygen isotope record. *Nature*, 1997, **385**:801 ~ 804
- 22 Li J. The environmental effects of the uplift of the Qinghai-Xizang Plateau. *Quaternary Science Review*, 1991, **10**:479 ~ 483
- 23 Jian Z, Wang P, Chen M-P *et al.* Foraminiferal responses to major Pleistocene paleoceanographic changes in the southern South China Sea. *Paleoceanography*, 2000, **15**(2):229 ~ 243
- 24 Schulz M, Stettin K. Spectrum: Spectral analysis of unevenly spaced paleoclimatic time series. *Computers & Geosciences*, 1997, **23**:929 ~ 945
- 25 Ding Z, Liu T, Rutter N W *et al.* Ice-volume forcing of East Asian winter monsoon variations in the past 800 000 years. *Quaternary Research*, 1995, **44**:149 ~ 159
- 26 Jian Z, Huang B, Lin H *et al.* Late Quaternary upwelling intensity and East Asian monsoon forcing in the South China Sea. *Quaternary Research*, 2001, **55**(3):363 ~ 370

LATE PLIOCENE ENHANCED EAST ASIAN WINTER MONSOON: EVIDENCE OF ISOTOPE AND FORAMINIFERS FROM THE NORTHERN SOUTH CHINA SEA

Jian Zhimin Wang Pinxian Zhao Quanhong Cheng Xinrong Wang Jiliang
(Key Laboratory of Marine Geology, Ministry of Education of China, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract

In order to reconstruct the evolution and variability of the East Asian winter monsoon, this study proposes the ^{13}C of *Globigerinoides ruber* and relative abundance of *Neoglobobulimina dutertrei* as the winter monsoon proxy indicators based on their modern distribu-

tion as well as the research results of sediment trap in the South China Sea (SCS).

ODP Site 1148 has yielded an almost continuous record of the Pliocene-Pleistocene paleoclimatic and paleoceanographic history in the northern SCS. Based on the stable isotopic analyses of more than 400 samples of planktonic foraminifers at this site, Pliocene-Pleistocene isotope stratigraphy and events have been unraveled. Compared with the records of the equatorial Pacific Ocean, the decrease in planktonic (*G. ruber*) ^{13}C during 3.1 ~ 2.2Ma B. P. at Site 1148 is very striking, indicating that the fertility of surface water remarkably increased. Meanwhile, the relative abundance of *N. dutertrei* obviously increased at the same time. It is inferred that the East Asian winter monsoon remarkably strengthened during 3.1 ~ 2.2Ma B. P. Consequently, the enhanced winter monsoon resulted in (1) stepwise decrease in winter sea surface temperature (SSTw) since 2.2Ma B. P., estimated by planktonic foraminiferal transfer functions; (2) increased surface productivity, reflected by the increased abundance of benthic foraminifer *Uvigerina peregrina* indicative of high organic carbon flux. The evolution of East Asian winter monsoon in the northern SCS is well correlated to land-based records from the Tibetan Plateau and Chinese loess sections.

Since then, the East Asian winter monsoon were remarkably strengthened further again several times, reflected by low ^{13}C of *G. ruber* and SSTw, and high abundance of *N. dutertrei* and *U. peregrina*, that is, about every 0.4Ma, particularly at about 1.7Ma B. P., 1.3Ma B. P., 0.9Ma B. P. 0.6Ma B. P. and 0.2Ma B. P. Spectral analyses reveal that East Asian winter monsoon is probably forced by changes in ice volume but with less important insolation forcing.

Key words East Asian winter monsoon, late Pliocene, isotope, foraminifer, South China Sea

会 讯

全新世期间的环境灾难与恢复 (Environmental Catastrophes and Recovery in the Holocene) 学术会议将于 2002 年 9 月 2 ~ 7 日在英国 Brunel 大学召开。会议主要讨论过去的地质与环境灾难对人类和社会的影响。详细情况请参见: <http://www.brunel.ac.uk/depts/geo/catastrophes>。

Suzanne Leroy
(英国 Brunel 大学)