

晚上新世以来南海北部深部水团演化

黄宝琦^{1,2}, 翦知湓², 赵泉鸿², 汪品先²

1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

2. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

摘要: 对南海北部大洋钻探 184 航次 1146 站晚上新世以来底栖有孔虫属种组合的 Q 型因子分析, 发现底栖有孔虫组合以 2.1 Ma, 1.5 Ma 和 0.7 Ma 为界, 分为 *Stilostomella-Globocassidulina subglobosa-Nodogenerina*, *Bulimina alazanensis*, *Uvigerina perigrina* 和 *Melonis barleeanus-Globobulimina affinis-Bulimina aculeata* 4 个组合. 结合底层水溶解氧含量和浮游、底栖有孔虫碳同位素分析, 认为底栖有孔虫组合的变化是南海底层水影响所致, 以及南海北部表层和底层海水营养盐含量变化的共同结果.

关键词: 晚上新世; 南海北部; 深部水团; 底栖有孔虫组合.

中图分类号: P53; P73

文章编号: 1000-2383(2005)05-0529-05

收稿日期: 2005-06-29

Variations in Deep-Water Masses from the Northern South China Sea since the Late Pliocene

HUANG Bao-qi^{1,2}, JIAN Zhi-min², ZHAO Quan-hong², WANG Pin-xian²

1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: Through the Q-mode factor analysis of benthic foraminifera from ODP Site 1146 in the northern South China Sea since 4 Ma, we identified four assemblages of benthic foraminifera. These are the *Stilostomella-Globocassidulina subglobosa-Nodogenerina* assemblage, the *Bulimina alazanensis* assemblage, the *Uvigerina perigrina* assemblage, and the *Melonis barleeanus-Globobulimina affinis-Bulimina aculeata* assemblage, divided respectively at 2.1 Ma, 1.5 Ma and 0.7 Ma. Combined with the results of the benthic foraminiferal oxygen index (BFOI) and carbon isotopes of planktonic and benthic foraminifera, we consider that the variations in the benthic foraminiferal assemblages in the area were mainly controlled by nutrient changes in surface and bottom waters.

Key words: Late Pliocene; northern South China Sea; deep water mass; assemblages of benthic foraminifera.

底栖有孔虫是深水微体化石属种最多的类别之一, 底栖有孔虫的研究最初用来指示水深 (Culver, 1988), 后来研究发现大洋中不同的水团具有不同的物理、化学性质, 而这些性质, 尤其是海水中的溶解氧含量恰恰是决定底栖有孔虫分布的主要因素之一 (McDougall, 1996; Loubere, 1996, 1997; Jian and Wang, 1997; Den Dulk, 1998; Kaiho, 1999; Murray, 2001).

南海是一个近于半封闭的深水海盆, 主要通过民都洛、卡里马塔、马六甲、巴士海峡等与周围其他海区相通, 其中位于南海东北部的巴士海峡最深 (2 600 m), 控制着南海中一深层水与外海的交换. 南海中部 63 个表层样的底栖有孔虫分析表明: 南海 480~1 200 m 的中层团主要为 *Globocassidulina subglobosa*, 1 200~2 600 m 的深层水团的底栖有孔虫组合为 *Astrononion novozelandicum*, 而 *Bulim-*

ina aculeata 和 *Eggerella bradyi* 为 2 600~3 500 m 的海盆水团组合,其中 *B. aculeata* 代表非溶解型, *E. bradyi* 代表溶解型(Jian and Wang, 1997)。

ODP 1146 站位于南海北部,水深 2 091 m,本次工作通过对该站 4 Ma 以来底栖有孔虫组合变化的研究,讨论南海北部底层水营养和含氧量的变化,并进一步讨论影响底栖有孔虫组合变化的主要影响因素。

1 研究材料与方法

ODP 1146 站位于南海北部中陆坡(19°27.40' N, 116°37' E),水深 2 091 m,位于现代巴士海槛(2 600 m)和南海溶跃面(约 3 000 m)之上。该站位共有 3 个钻孔(1146A, 1146B, 1146C),岩心总长 1 452.22 m(Wang *et al.*, 2000)。本次工作着重对 1146 站上部 0~265 m 的连续沉积物进行研究。样品于 1999 年 4 月在“JOIDES·决心号”船上采得,采样间距为 0.1~1.5 m,时间分辨率约 1~10 ka,共取得 460 个样品,用于底栖有孔虫分析的样品体积为 10 cm³。

样品采集后,不添加任何化学分散剂,在自来水中浸泡 1~2 d 至完全散开,用 250 目的铜筛(孔径为 0.063 mm)冲洗干净、烘干、称重,再用 100 目(0.154 mm)的铜筛干筛粗组分,将大于 0.154 mm 的样品分样至所得样品中底栖有孔虫的数量不少于 100 枚。参照 Loeblich and Tappan(1988)、Ujii(1990)、Barker(1960)和 Lutze(1980)的分类标准对底栖有孔虫进行分类、鉴定。计算了底栖有孔虫的相对百分含量,进行 Q 型因子分析,并根据 Kaiho(1999)的公式利用底栖有孔虫相对百分含量估算了底层海水含氧量(BFOI)。

2 结果

ODP 1146 站底栖有孔虫 Q 型因子分析的结果表明,南海北部水体 4 Ma 以来,以 2.1 Ma、1.5 Ma 和 0.75 Ma 为界线,分为 4~2.1 Ma、2.1~1.5 Ma、1.5~0.75 Ma 和 0.75~0 Ma 四段,分别被因子 2、因子 1、因子 3 和因子 4 控制(图 1)。其中因子 1 为 *Stilostomella-Globocassidulina subglobosa-Nodo-*

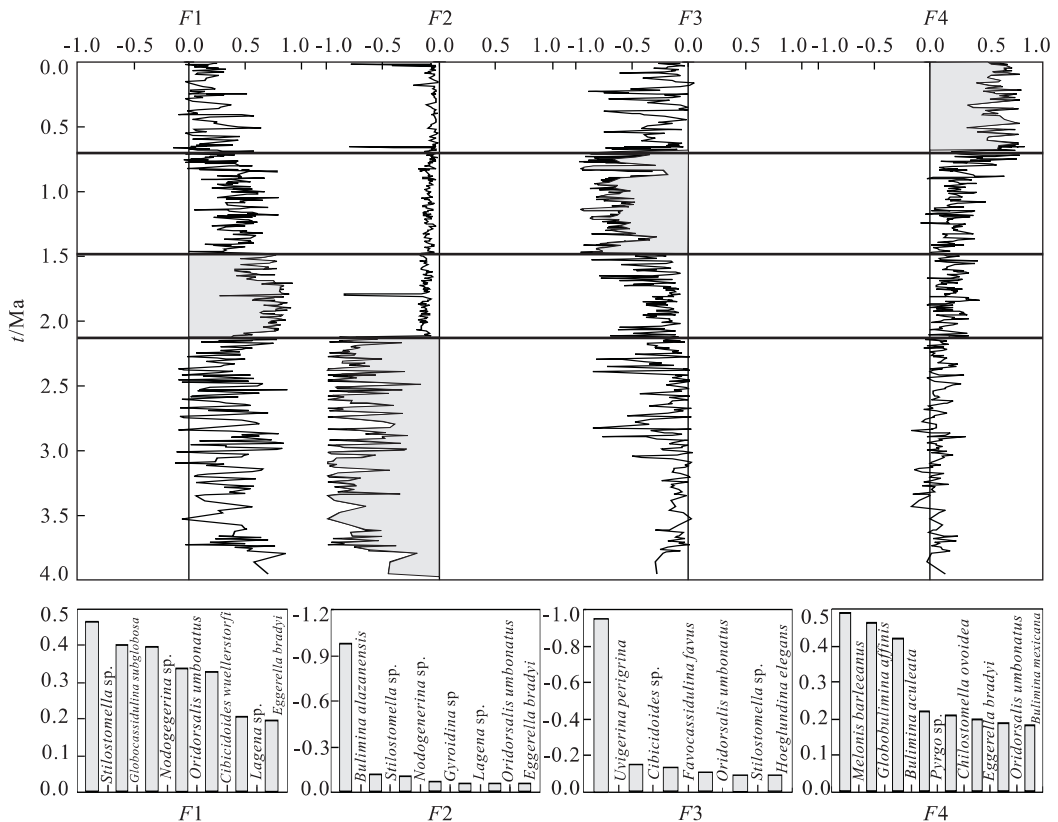


图 1 ODP 1146 站底栖有孔虫 Q 型因子分析结果

Fig. 1 Q-mode factor analysis results of benthic foraminifera from ODP 1146

generina 组合,主要为 *Stilostomella* sp., *Globocassidulina subglobosa* 和 *Nodogenerina* sp., 其他包括: *Oridorsalis umbonatus*, *Cibicidoides wuellerstorfi*, *Lagena* sp. 和 *Eggerella bradyi*; 因子 2 为 *Bulimina alazanensis* 组合,主要控制种为 *Bulimina alazanensis*, 其他包括: *Stilostomella* sp., *Nodogenerina* sp., *Gyroidina* sp., *Lagena* sp., *Oridorsalis umbonatus* 和 *Eggerella bradyi*; 因子 3 为 *Uvigerina perigrina* 组合,主要控制种为 *Uvigerina perigrina*, 其他还包括: *Cibicidoides* sp., *Favocassidulina favus*, *Oridorsalis umbonatus*, *Stilostomella* sp. 和 *Hoeglundina elegans*; 因子 4 为 *Melonis barleeanus-Globobulimina affinis-Bulimina aculeata* 组合,主要控制种为 *Melonis barleeanus*, *Globobulimina affinis* 和 *Bulimina aculeata*, 其他还包括: *Pyrgo* sp., *Chilostomella ovoidea*, *Eggerella bradyi*, *Oridorsalis umbonatus* 和 *Bulimina mexicana*.

BFOI 是 Kaiho (1999) 基于底栖有孔虫的生活和生产与底层水的含氧量和有机质含量密切相关这一前提,将底栖有孔虫划分为富氧指标(oxic indica-

tor)、低氧指标(suboxic indicator)和缺氧指标(dysoxic indicator),其计算公式为:

$$BFOI = O / (O + D) \times 100, \quad (1)$$

其中: $O > 0$, O, D 分别为底栖有孔虫的富氧种和缺氧种;

$$BFOI = [S / (S + D) - 1] \times 50, \quad (2)$$

其中: $O = 0$, $S, D > 0$; 当无 BF 时, $BFOI = -55$, 含氧量为 $0 \sim 0.1 \text{ mol/L}$.

根据底栖有孔虫相对百分含量计算得到的 BFOI 值,在 0.75 Ma 前,尽管出现频繁波动,但平均值在 90 附近;而 0.75 Ma 后,该指数迅速减小,平均值约为 60,表明南海北部底层海水含氧量在 0.75 Ma 前后发生很大变化,即 0.75 Ma 之前,底层海水含氧量较高,而 0.75 Ma 之后底层海水缺氧(图 2).

3 讨论

ODP 1146 站底栖有孔虫的组合以 2.1 Ma, 1.5 Ma 和 0.75 Ma 为界分为 4 段. 在 2.1 Ma 前,底栖有孔虫组合主要以 *Bulimina alazanensis* 为主. *Bulimina* 主要分布在现代太平洋 $22^\circ \sim 60^\circ \text{S}$, 现代

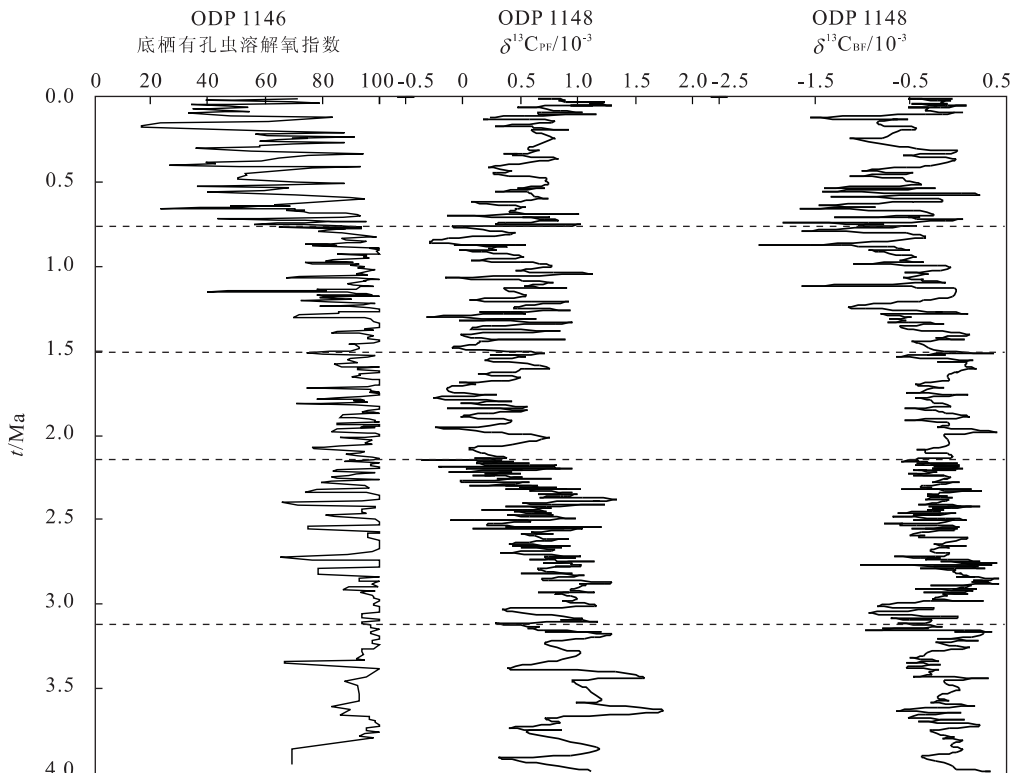


图 2 ODP 1146 站底栖有孔虫溶解氧指数与 ODP 1148 站碳同位素值比较 (Zhao et al., 2001)

Fig. 2 Comparison between benthic foraminifer oxygen index from ODP 1146 and $\delta^{13}\text{C}$ from ODP 1148

大洋表层沉积中 *B. alazanensis* 主要分布在澳大利亚西南隅、大西洋东海岸和墨西哥湾附近 (Murray, 1991). 根据 NOAA (1994) 的资料, 这些地区 2 000 m 水深的含氧量 $> 3.6 \text{ mol/L}$, 高于南海和 30°S 以北的太平洋海区, 说明 2.1 Ma 前南海深层水含氧量较高, 其底层水化学性质接近现代南极和大西洋东海岸地区. 从 2.1~1.5 Ma, 底栖有孔虫组合以太平洋深层水—南极底层水 *G. subglobosa*, *O. umbonatus* 和 *C. wuellerstorfi* 为主, 代表底层海水低营养、高含氧量的特征 (McDougall, 1996). 从 1.5~0.75 Ma, *Uvigerina* 组合控制了南海北部, 该种为太平洋中层水种, 氧含量低, 有机碳含量高 (McDougall, 1996). 在 0.75 Ma 以来, 底栖有孔虫组合中的 *M. barleeanus* 为太平洋深层水种, 氧含量低 (McDougall, 1996), 而 *G. affinis* 和 *B. aculeata* 为南海高生产力属种 (Jian and Wang, 1997).

南海现代北部的表层水主要来源于西太平洋表层水, 而南海表层以下的水团均由西太平洋相应的水团经巴士海峡进入南海后变性而成 (韩舞鹰, 1998). 1146 站底栖有孔虫组合的变化揭示了南海上新世以来深部水团及西太平洋深部水流的变化, 即 2.1 Ma 之前, 南海的深部水团主要来源于太平洋的南部深层水团, 2.1 Ma 之后, 尤其是 1.5 Ma 之后, 发源于北太平洋的太平洋中层—深层水团成为南海深部水团的主要来源.

底栖有孔虫的分布和丰度除了受水团的影响, 底层水的营养盐、溶解氧含量和表层海水的营养状况也是主要控制因素 (Murray, 2001; Der Zwaan *et al.*, 1999). 对比 1146 站底栖有孔虫溶解氧指数和碳同位素变化发现, 在 2.1 Ma 前后, 这 2 个指标并无明显变化, 底栖有孔虫碳同位素的变化主要发生在 1.5 和 0.75 Ma, 而溶解氧指数主要在 0.75 Ma 前后发生变化. 而反映表层海水生产力状况的浮游有孔虫碳同位素的变化在 2.1 Ma 前后发生巨大变化, 同位素值减小近 0.5×10^{-3} . 同时, 该站中浮游有孔虫高生产力属种的含量也在 2.1 Ma 前后显著增加 (黄宝琦, 2002). 一般认为浮游、底栖有孔虫碳同位素的变化受表层海水初级生产力影响, 即初级生产力增加, 浮游有孔虫碳同位素值变重, 而底栖有孔虫碳同位素值减轻; 反之亦然. 1146 站浮游、底栖有孔虫碳同位素的变化却并不同步. 南海表层沉积物中 *G. ruber* 和 *P. obliquiloculata* 碳同位素和末次盛冰期 *G. ruber* 碳同位素分布表明, 南海北部的

营养盐分别来自吕宋岛西北的上升流区和珠江的陆源输入, 尤其是末次盛冰期 *G. ruber* 的碳同位素分布可能受冬季风带来的陆源营养物质的影响 (Wang *et al.*, 1999; Cheng, 2005). 1146 站 2.1 Ma 前后底栖有孔虫组合的变化主要受表层海水生产力变化的影响. 0.75 Ma 前后底栖有孔虫组合的变化, 则可能与中更新世气候转型有关 (Jian *et al.*, 2000).

4 结论

南海 1146 站的底栖有孔虫 Q 型因子分析结果表明, 南海北部 4 Ma 以来底栖有孔虫组合发生过 3 次变化, 分为 4~2.1 Ma, 2.1~1.5 Ma, 1.5~0.75 Ma 和 0.75~0 Ma 四段, 分别被 *Bulimina alazanensis* 组合、*Stilostomella-Globocassidulina subglobosa-Nodogenerina* 组合、*Uvigerina perigrina* 组合和 *Melonis barleeanus-Globobulimina affinis-Bulimina aculeata* 组合控制. 结合底层水溶解氧含量和底栖、浮游有孔虫碳同位素变化, 发现底栖有孔虫组合的变化不但受底层水物理化学性质的影响, 还受表层海水的生产力变化的控制. 2.1 Ma 前后底栖有孔虫由 *Bulimina alazanensis* 组合变为 *Stilostomella-Globocassidulina subglobosa-Nodogenerina* 组合, 而底层水溶解氧和营养盐的含量并没有明显变化. 相反, 反映南海表层海水生产力的浮游有孔虫碳同位素却发生巨大变化, 说明此次底栖有孔虫组合的变化由表层海水生产力增加所致; 1.5 Ma 前后底栖有孔虫组合的变化受表层和底层生产力变化的影响; 而 0.75 Ma 时底栖有孔虫组合的变化是表层海水生产力、底层水营养盐和溶解氧含量共同作用的结果, 是中更新世气候转型的深海标志.

致谢: ODP 184 航次科学家和工作人员为本次工作提供了高质量的研究样品, 在此表示感谢.

References

- Barker, W. H., 1960. Taxonomic notes on the species figured by H. B. Brady in his report on the foraminifera dredged by H. M. S. 'Challenger' during the years 1873—1876. *SEPM Spec. Publ.*, 9: 1—238.
- Cheng, X. R., Huang, B. Q., Jian, Z. M., *et al.*, 2005. Foraminiferal isotopic evidence for monsoonal activity in the South China Sea: A recent-LGM comparison. *Mar. Micropaleontol.*, 54: 125—139.

- Culver, S., 1988. New foraminiferal depth zonation of the northwestern Gulf of Mexico. *Palaios*, 3: 69—85.
- Den Dulk, M., Reichart, G. J., Van Heyst, S., et al., 2000. Benthic foraminifera as proxies of organic matter flux and bottom water oxygenation? A case history from the northern Arabian Sea. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 161: 337—359.
- Der Zwaan, V. G. J., Duijnste, I. A. P., Den Dulk, M., et al., 1999. Benthic foraminifera: Proxies or problems? A review of paleocological concepts. *Earth Sci. Rev.*, 46: 213—236.
- Han, W. Y., 1998. Marine geochemistry of the South China Sea. Science Press, Beijing, 217—223 (in Chinese).
- Huang, B. Q., 2002. Foraminiferal assemblages and East Asian monsoon evolution in the northern South China Sea: [Dissertation]. Tongji University, Shanghai (in Chinese).
- Jian, Z. M., Wang, P. X., Chen, M. P., et al., 2000. Foraminiferal responses to major Pleistocene paleoceanographic changes in the southern South China Sea. *Paleoceanography*, 15: 229—243.
- Jian, Z. M., Wang, L. J., 1997. Late Quaternary benthic foraminifera and deep-water paleoceanography in the South China Sea. *Mar. Micropaleontol.*, 32: 127—154.
- Kaiho, K., 1999. Effect of organic carbon flux and dissolved oxygen on the benthic foraminiferal oxygen index (BFOI). *Mar. Micropaleontol.*, 37: 67—76.
- Loeblich, A. R., Tappan, J. H., 1988. Foraminiferal genera and their classification. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 970.
- Loubere, P., 1996. The surface productivity and bottom water oxygen signals in deep water benthic foraminiferal assemblages. *Mar. Micropaleontol.*, 28(3—4): 247—261.
- Loubere, P., 1997. Benthic foraminiferal assemblage formation, organic carbon flux and oxygen concentrations on the outer continental shelf and slope. *J. Foraminiferal Res.*, 27(2): 93—100.
- Lutze, G. F., 1980. Depth distribution of benthic foraminifera on the continental margin of Northwest Africa. *Meteor. Forschungsergeb. Reihe C.*, 32: 31—80.
- McDougall, K., 1996. Benthic foraminiferal response to the emergence of the Isthmus of Panama and coincident paleoceanographic changes. *Mar. Micropaleontol.*, 28: 133—169.
- Murray, J. W., 2001. The niche of benthic foraminifera, critical thresholds and proxies. *Mar. Micropaleontol.*, 41: 1—7.
- Murray, J., 1991. Ecology and palaeoecology of benthic foraminifera. John Wiley & Sons Inc., New York, 312.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 1994. World ocean atlas 1994. National Oceanographic Data Center, NOAA, Washington, D. C. [www.nodc.noaa.gov/general/getdata.html].
- Ujiie, H., 1990. Bathyal benthic foraminifera in a piston core east off the Miyako Islands, Ryukyu Island arc. *Bull. Coll. Sci. Univ. Ryukyus*, 49: 1—60.
- Wang, L. J., Sarnthein, M., Erlenkeuser, H., et al., 1999. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: High-resolution sediment records from the South China Sea. *Mar. Geol.*, 156: 245—284.
- Wang, P., Prell, W. L., Blum, P., et al., 2000. Proceedings of the ocean drilling program, initial reports volume 184 (CD-ROM). Nat. Sci. Found. & Joint Oceanogr. Inst., Inc.
- Zhao, Q. H., Jian, Z. M., Wang, J. L., et al., 2001. Neogene oxygen isotopic stratigraphy, ODP Site 1148, northern South China Sea. *Science in China (Ser. D)*, 44(10): 934—942.

附中文参考文献

- 韩舞鹰, 1998. 南海海洋化学. 北京: 科学出版社, 217—223.
- 黄宝琦, 2002. 南海北部晚上新世以来的有孔虫群与东亚季风演化(博士学位论文). 上海: 同济大学.