

# 晚上新世南海北部底栖有孔虫 *Bulimina alazanensis* 含量变化及其原因探讨

黄宝琦 翦知湓 汪品先

( 北京大学地球与空间科学学院史前生命研究所, 北京 100871; 同济大学海洋学院, 上海 200092. E-mail: bqhuang@pku.edu.cn)

**摘要** 南海北部大洋钻探 184 航次 1146 站晚上新世以来的研究发现, 底栖有孔虫 *Bulimina alazanensis* 的含量 3.2~2.0 Ma BP 逐渐减少, 并在 2.1 Ma BP 前后发生锐减, 其变化幅度达 90%。其他底栖有孔虫属种如 *Globobulimina subglobosa* 和 *Cibicides wuellerstorfi* 的含量则是在 2.1 Ma BP 之前较低, 而 2.1 Ma BP 之后增加。对比浮游、底栖有孔虫的氧、碳同位素变化, 发现 *B. alazanensis* 的含量变化与氧、碳同位素的波动相对应: 当氧同位素值较轻, 即暖期时, 该种含量处于峰值; 而当氧同位素值变重时, 该种含量也降低。与碳同位素变化对比, 该种的高峰值分别与底栖有孔虫碳同位素的高值、浮游有孔虫碳同位素的低值对应。结合北极冰盖扩张、东亚冬季风加强、表层生产力增加等诸多因素, 认为晚上新世由巴士海峡进入南海的深层水由较暖、溶解氧含量较高的西太平洋深层水团, 在 2.1 Ma BP 前后, 变为溶解氧含量较低的中层水团, 同时随着北极冰盖的扩张, 东亚季风的加强, 南海表层海水生产力增加, 底层海水逐渐富营养且缺氧, 逐渐对 *B. alazanensis* 的生产形成压力, 导致该种自 3.2 Ma BP 开始含量逐渐降低, 并在 2.1 Ma BP 前后达到最低。

**关键词** 古海洋学 底栖有孔虫 *Bulimina alazanensis* 晚上新世 南海北部

对于晚上新世的研究, 大多集中于 3.1~2.5 Ma BP 北半球冰盖的形成及演化对全球变化的影响, 但是大西洋、太平洋、印度洋以及非洲大陆的研究都发现在 2.1 Ma BP 前后, 海洋环流、海洋古生产力、季风系统以及北半球冰盖都发生了很大变化。目前的研究认为, 这一变化与印度尼西亚海道的关闭和巴拿马地峡的隆起相关: 如巴拿马地峡隆起过程中, 北大西洋深层水在 2.0 Ma BP 前后逐渐变浅, 导致冰期期间经向热传递减弱<sup>[1]</sup>; 印度尼西亚海道的最后关闭, 使纳米比亚岸外的表层海水温度在 2.1~1.9 Ma BP 期间降低, 南非大陆的人出现, 适应放牧及干旱环境的哺乳动物种类增加<sup>[2]</sup>; 1.8 Ma BP 前后南亚季风的强化可能是导致印度洋表层海水初级生产力增加的原因<sup>[3]</sup>。

底栖有孔虫是一类分布广泛的海洋微体生物。早期研究认为, 其属种分异度和含量主要受海水深度、温度及盐度的影响<sup>[4,5]</sup>, 然而最近的研究表明底层水的溶解氧和有机质含量是影响底栖有孔虫生产和分布的主要因素<sup>[6-12]</sup>。对于南海这样的边缘海, 其底层水有机质和溶解氧含量不但受表层海水初级生产

力控制, 还与底层海水的来源相关<sup>[13]</sup>。

南海的古海洋学研究表明, 东亚季风不但控制了南海表层的海流方向和营养分布, 也影响了底层海水的化学性质<sup>[14-17]</sup>。而南海表层以下的水体是通过东北部的巴士海峡, 来源于西太平洋的相应水层<sup>[13]</sup>, 由于巴士海槛水深 2500 m, 所以 2500 m 以深的西太平洋海水不能进入南海。

本次研究是通过晚上新世南海北部底栖有孔虫的研究, 结合浮游、底栖有孔虫氧、碳同位素的变化, 讨论南海表层和底层海水化学性质的变化, 并进一步探讨 2.1 Ma BP 前后, 南海底层海水性质变化的机制。

## 1 材料与方法

大洋钻探(ODP)184 航次, 1146 站位于南海北部陆坡(19°27.40'N, 116°16.37'E), 水深 2092 m, 刚好位于巴士海槛和南海现代跃面之上。该站共取得 3 个孔, 合成深度达 642.25 m, 底部年龄达 19 Ma<sup>[18]</sup>。本次工作选取 0~247 m 约 4 Ma 以来的沉积物为研究对象, 其中 242.68 m 以上主要由灰绿色钙质超微黏土

组成; 242.68~247 m, 主要由浅灰棕色有孔虫黏土及钙质超微软泥和有孔虫黏土的混合沉积组成. 本次研究的样品先后在“JOIDES·决心号船上”和美国德克萨斯农工大学 ODP 岩芯库采得. 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, 每个样品 20 cm<sup>3</sup>, 其中 10 cm<sup>3</sup> 用于微体化石和有孔虫氧、碳同位素分析.

用于微体化石分析的样品 10 cm<sup>3</sup> 采集称其湿重后, 放入坩锅中烘干、称重, 不加任何化学分散剂, 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, 将粒径 > 0.063 mm 的粗组分收集、放置在烘箱中低温(小于 60 )烘干、称重. 共处理样品 460 块. 用 100 目的铜筛(孔径为 0.154 mm)干筛粗组分, 从大于 0.154 mm 的样品中挑尽底栖有孔虫. 底栖有孔虫的分类鉴定主要依据 Loeblich 等人<sup>[19]</sup>, Ujiie<sup>[20]</sup>, Lutze<sup>[21]</sup>的分类标准.

为了讨论表层海水初级生产力以及底层水含氧量, 分别根据 Den Dulk 等人<sup>[22]</sup>和 Kaiho<sup>[11]</sup>的分类标准, 计算了底栖有孔虫富氧种(oxic indicator, *Cibicides* spp. *Cibicides* spp. *Globocassidulina subglobosa*, *Laticarinina pauperata*, *Nuttaloides*, *Osangulina*, *Stensioeina*, *Gavelinella*, *Miliolids*)和缺氧种(dysoxic indicator, *Alabamina* spp., *Astrononion pusillum*, *Bolivinita striata*, *Cancris inaequalis*, *Cassidulina* spp., *Ceratobulimina pacifica*, *Favocassidulina favus*, *Bentalina* spp., *Ehrenbergina pacifica*, *Fissurina*, *Stsinfor-*

*thia*, *Tosaia hanzawai*, *Trifarina*, *Uvigerina*, *Gyroidina*, *Gyroidinoides*, *Hoeglundina elegans*, *Lagena*, *Lenticulina*, *Melonis*, *Nonoin*, *Oridorsalis*, *Pullenia*, *Rosalina*, *Sphaeroidina*, *Valvulineria*, *Bulimina aculeate*, *Elphidium excavatum*, *Nonionella*)的相对百分含量.

本次工作的年龄框架, 主要采用 Huang 等人<sup>[23]</sup>和 Li 等人<sup>[24]</sup>的研究结果.

## 2 结果与讨论

### 2.1 底栖有孔虫属种组合的变化

ODP1146 站底栖有孔虫的含量变化显示, *Bulimina alazanensis* 的含量在 2.1 Ma BP 前后发生显著变化: 2.1 Ma BP 之前, 其为底栖有孔虫的主要属种, 含量高达 90%; 2.1 Ma BP 后, 该种的含量骤减, 只在零星层位出现(图 1). 其他底栖有孔虫属种如 *G. subglobosa* 和 *Cibicides wuellerstorfi* 的含量则是在 2.1 Ma BP 之前较低, 之后增加. 此外, 2.1 Ma BP 后, 底栖有孔虫缺氧属种含量减少, 富氧属种含量增加(图 1).

### 2.2 有孔虫壳体氧、碳同位素变化

南海北部 ODP1148 站浮游(*G. sacculifer*)与底栖(*C. wuellerstorfi*)有孔虫的氧、碳同位素分析结果表明, 在 2.1 Ma 前后, 浮游有孔虫的氧、碳同位素值发生较大变化, 其中氧同位素从 2.1 Ma BP 之前的约-3‰, 增加到之后的约-2‰; 碳同位素从 2.1 Ma BP 之前的

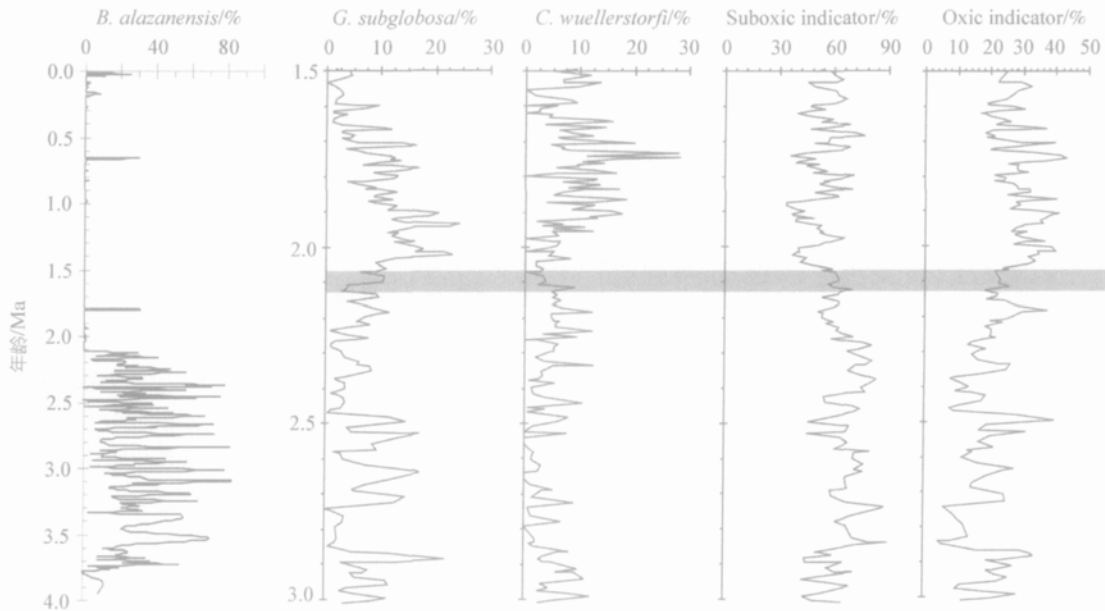


图 1 南海北部 ODP1146 站底栖有孔虫属种含量变化

约 1‰, 减少到之后的约 0.5‰, 并在 3.2~2.0 Ma BP 期间, 浮游有孔虫碳同位素逐渐减少. 与浮游有孔虫的氧、碳同位素变化相比, 底栖有孔虫的氧、碳同位素变化幅度相对较小, 但是在 2.1 Ma BP 前后仍然可以看到氧同位素增重, 碳同位素减轻的变化<sup>[25]</sup>(图 2).

3.2~2.0 Ma BP 期间, *B. alazanensis* 的含量变化呈现逐渐减少的趋势. 与 ODP1146 站 3.2~2.0 Ma BP 阶段浮游、底栖有孔虫氧、碳同位素结果<sup>[25]</sup>对比发现, 2.1 Ma BP 之前, *B. alazanensis* 的含量变化与氧、碳同位素的波动相对应: 当氧同位素值较轻, 即暖期时, 该种的含量处于峰值, 最高达 90%左右; 而当氧同位素值变重时, 该种含量也降低, 平均含量在 10%左右; 与碳同位素对比, 该种的高峰值分别与底栖有孔虫碳同位素的高值、浮游有孔虫碳同位素的低值对应(图 3). 说明 *B. alazanensis* 生活的底层水环境为温暖、低盐, 且生产力相对较低, 溶解氧相对较高.

对于南海这样半封闭的边缘海, 海水底层的物理、化学性质与上部水体的结构变化息息相关. 南海表层以下的水体是西太平洋相应水层的海水通过北部 2500 m 深的巴士海槛进入南海, 南海的构造研究认为, 巴士海槛在 4 Ma BP 前后就达到 2500 m 水深<sup>[26]</sup>, 所以底栖有孔虫 2.1 Ma BP 前后的变化可能与南海的构造运动没有直接的联系. 此外, 南海 ODP1143 站底栖有孔虫的研究发现, *B. alazanensis* 的含量在

2.1 Ma BP 也发生相似的变化<sup>[27]</sup>.

现代西太平洋, 南海及西太平洋表层沉积物中底栖有孔虫组合的研究发现, 南海中层水团(480~1200 m)、深层水团(1200~2600 m)和海盆水团(>2600 m)的底栖有孔虫组合分别为: *G. subglobosa*, *Astrononion novozealandicum* 和 *B. aculeate*, *E bradyi* 组合; 而西太平洋<2500 m 为 *Uvigerina* 组合, >2500 m 为 *E. exigua* 组合<sup>[6]</sup>. 1146 站底栖有孔虫 Q 型因子分析的结果发现<sup>[28]</sup>, 2.1 Ma BP 之前, *B. alazanensis* 为底栖有孔虫属种组合中的主要控制种, 但是在 2.1~1.6 Ma BP 时, 底栖有孔虫的主要属种为 *Stilostomella* sp., *G. subglobosa*, *Nodogenerina* sp., *Oridorsalis umbonatus* 和 *C. wuellerstorfi*, 其中 *G. subglobosa*, *O. umbonatus* 和 *C. wuellerstorfi* 种主要代表低营养、较高溶解氧含量的底层海水环境. 有研究认为晚上新世北太平洋中层水加强<sup>[29]</sup>, 其深度大约位于 2500 m(现代为 1500 m), 并且在 2.1 Ma BP 时, 太平洋深层水表现为温暖而低盐, 而太平洋水团的这种变化又与北极冰盖的扩张和巴拿马海道的关闭密切相关<sup>[7]</sup>. 此外, 在现代大洋中, *B. alazanensis* 主要分布在墨西哥北部、欧洲和非洲边缘的陆架和斜坡区, 在太平洋海区, *Bulimina* 主要分布在南太平洋<sup>[30]</sup>, 其底层海水氧含量为 3.6 ml/L, 高于现带南海<sup>1)</sup>. 在印度洋中, 该种的分布主要与较暖的底层水相关<sup>[3]</sup>. 同时,

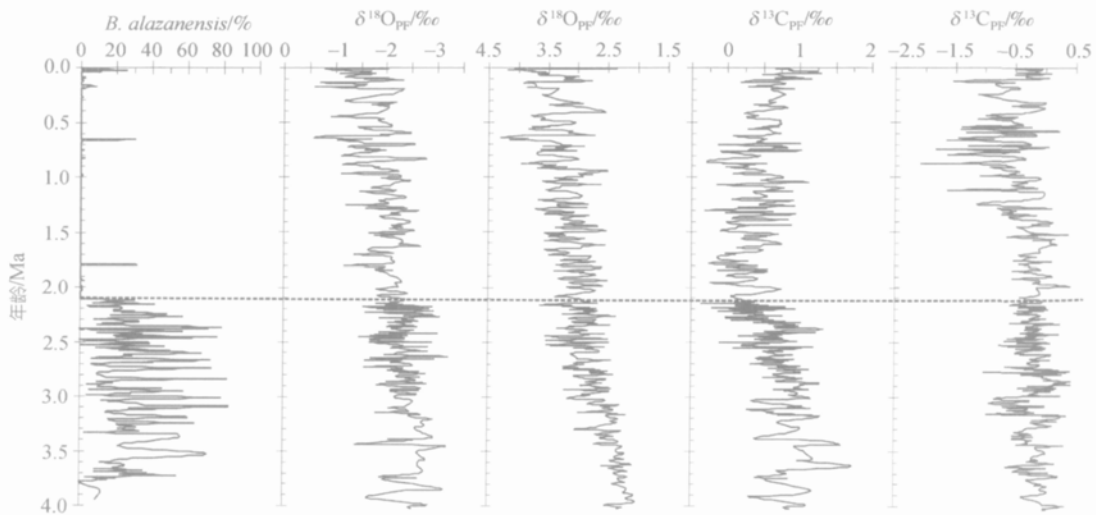


图 2 南海北部 ODP1146 站底栖有孔虫 *B. alazanensis* 含量变化与 ODP1148 站浮游/底栖有孔虫氧、碳同位素变化对比

1) <http://www.nodc.noaa.gov/general/getdata.html>

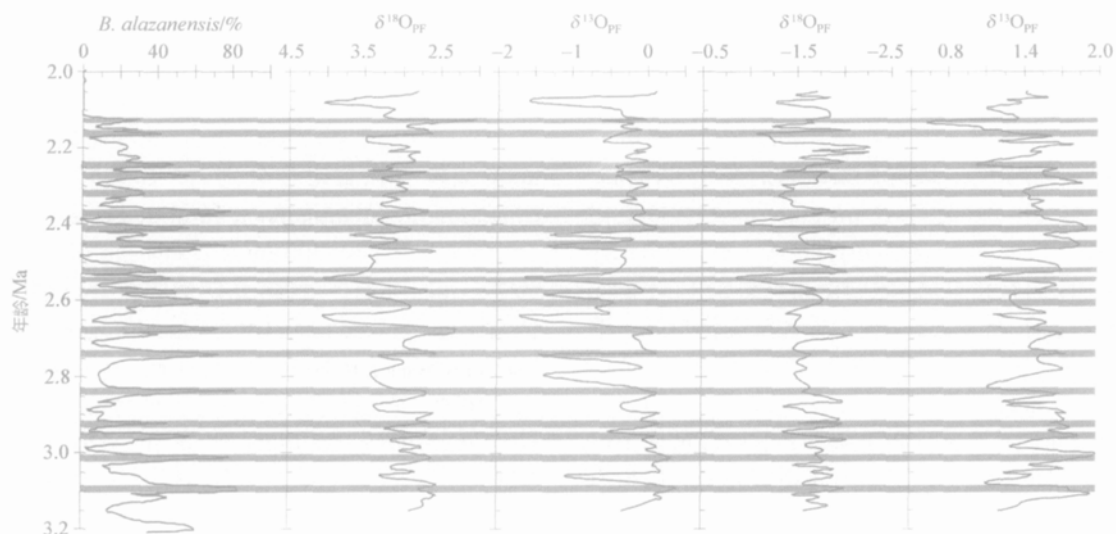


图3 南海北部 ODP1146 站 3.2~2.0 Ma BP 期间底栖有孔虫 *B. alazanensis* 含量与浮游、底栖有孔虫氧、碳同位素变化对比

1146 站浮游有孔虫的研究发现, 表层海水古温度 4 Ma BP 以来逐渐降低, 而生产力逐渐增加, 2.1 Ma BP 以来变化尤其明显, 认为是北极冰盖扩大、东亚冬季风加强的结果<sup>[30]</sup>。

根据 1146 站底栖有孔虫的组合以及南海北部浮游、底栖有孔虫氧、碳同位素变化, 综合 *B. alazanensis* 的现代生态学信息、该站的浮游、底栖有孔虫研究结果<sup>[28,30,31]</sup>, 以及晚上新世西太平洋深部水团的变化, 认为南海北部 ODP1146 站底栖有孔虫 *B. alazanensis* 含量在 2.1 Ma BP 的变化反映了该时期底层水由间冰期温暖、低盐、生产力较低、溶解氧含量较低的环境变化为整体较冷、生产力较高的中层水团。

### 3 结论

综合站底栖有孔虫属种组合和氧、碳同位素的变化及浮游有孔虫的研究结果, 1146 站底栖有孔虫 *B. alazanensis* 的含量变化表明, 2.1 Ma BP 前后, 由巴士海峡进入南海的深层水由较暖、溶解氧含量较高的西太平洋深层水团变为溶解氧含量较低的中层水团。随着北极冰盖的扩张和东亚季风的加强, 南海表层海水生产力增加, 底层海水逐渐富营养且缺氧, 对 *B. alazanensis* 的生产逐渐产生压力, 导致该种自 3.2 Ma BP 开始含量逐渐降低, 直到 2.1 Ma BP 前后达到最低。

致谢 感谢 M. Cane 博士对本文提出的建议和意见。

### 参 考 文 献

- 1 Raymo M E, Ruddiman W F, Shackleton N J, et al. Evolution of Atlantic-Pacific  $\delta^{13}C$  gradients over the last 2.5 m.y.. *Earth Planet Sci Lett*, 1990, 97: 353—368
- 2 Marlow J R, Lange C B, Wefer G, et al. Upwelling intensification as part of the Pliocene-Pleistocene climate transition. *Science*, 2000, 290: 2288—2291
- 3 Gupta A K, Thomas E. Latest Miocene-Pleistocene productivity and deep-sea ventilation in the northwestern Indian Ocean (Deep Sea Drilling Project Site 219). *Paleoceanography*, 1999, 14: 62—73
- 4 Culver S. New foraminiferal depth zonation of the northwestern Gulf of Mexico. *Palaios*, 1988, 3: 69—85
- 5 Wang P, Min Q, Gao J. A Preliminary study of foraminiferal and ostracod assemblages in the Huanghai Sea. In: Wang P, Min Q, Zhao Q, et al, eds. *Marine Micropaleontology of China*. Beijing: China Ocean Press, 1985. 115—133
- 6 Jian Z, Wang L. Late Quaternary benthic foraminifera and deep-water paleoceanography in the South China Sea. *Mar Micropaleontol*, 1997, 32 (1-2): 127—154
- 7 McDougall K. Benthic foraminiferal response to the emergence of the Isthmus of Panama and coincident paleoceanographic changes. *Mar Micropaleontol*, 1996, 28: 133—169
- 8 Loubere P. The surface productivity and bottom water oxygen signals in deep water benthic foraminiferal assemblages. *Mar Micropaleontol*, 1996, 28(3-4): 247—261
- 9 Loubere P. Benthic foraminiferal assemblage formation, organic carbon flux and oxygen concentrations on the outer continental shelf and slope. *J Foraminifer Res*, 1997, 27 (2): 93—100

- 10 Den Dulk, Reichart M, Memon G J, et al. Benthic foraminiferal response to variations in surface water productivity and oxygenation in the northern Arabian Sea. *Mar Micropaleontol*, 1998, 35: 43—66
- 11 Kaiho K. Effect of organic carbon flux and dissolved oxygen on the benthic foraminiferal oxygen index (BFOI). *Mar Micropaleontol*, 1999, 37: 67—76
- 12 Murray J W. The niche of benthic foraminifera, critical thresholds and proxies. *Mar Micropaleontol*, 2001, 41: 1—7
- 13 Jian Z M, Wang L J. Late Quaternary benthic foraminifera and deep-water paleoceanography in the South China Sea. *Mar Micropaleontol*, 1997, 32: 127—154
- 14 Wiesner M G, Zheng L, Wong H K, et al. Fluxes of particulate matter in the South China Sea. In: Ittekkot V, Schöfer P, Honjo S, et al., eds. *Particle Flux in the Ocean*. London: John Wiley & Sons Ltd., 1996. 293—312
- 15 Wang L J, Sarnthein M, Erlenkeuser H, et al. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: High-resolution sediment records from the South China Sea. *Mar Geol*, 1999, 156: 245—284
- 16 Huang B, Jian Z, Cheng X, et al. Foraminiferal responses to upwelling variations in the South China Sea over the last 220, 000 years. *Mar Micropaleontol*, 2003, 47: 1—15
- 17 Cheng X R, Huang B Q, Jian Z M, et al. Foraminiferal isotopic evidence for monsoonal activity in the South China Sea: A recent-LGM comparison. *Mar Micropaleontol*, 2005, 54: 125—139
- 18 Wang P X, Prell W L, Blum P. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports Volume 184, (CD-ROM)*, Beijing: Nat Sci Found & Joint Oceanogr Inst, Inc, 2000
- 19 Loeblich A R, Tappan J H. *Foraminiferal Genera and Their Classification*. New York: Van nostrand reinhold company, 1988. 970
- 20 Ujiie H. Bathyal benthic foraminifera in a piston core east off the Miyako Islands, Ryukyu Island Arc. *Bull Coll Sci Univ Ryukyus*, 1990, 49: 1—60
- 21 Lutze G F. Depth distribution of benthic foraminifera on the continental margin of northwest Africa. *Meteor Forschungsergeb, Reihe C*, 1980, 32: 31—80
- 22 Den Dulk M, Reichart G J, Van Heyst S, et al. Benthic foraminifera as proxies of organic matter flux and bottom water oxygenation? A case history from the northern Arabian Sea. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol* 2000, 161: 337—359
- 23 Huang B, Cheng X, Jian Z, et al. Response of upper ocean structure to initiation of the North Hemisphere glaciation in the South China Sea. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2003, 196 (3-4): 305—318
- 24 Li B, Wang J, Huang B, et al. South China Sea surface water evolution over the last 12 Myr: A south-north comparison from Ocean Drilling Program Sites 1143 and 1146. *Paleoceanography*, 2004, 19: 1—12
- 25 Zhao Q H, Jian Z M, Wang J L, et al. Neogene oxygen isotopic stratigraphy, ODP Site 1148, northern South China Sea. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2001, 44 (10): 934—942
- 26 Huang C Y, Xia K, Yuan P B, et al. Marine investigations from passive continental margin in NE South China Sea to plate convergent zone off eastern Taiwan: Comparisons with Taiwan geology. *J Asian Earth Sci*, 2001, 19: 619—639
- 27 Hess S, Kuhnt W. Neogene and Quaternary paleoceanographic changes in the southern South China Sea (Site 1143): the benthic foraminiferal record. *Mar Micropaleontol*, 2005, 54: 63—87
- 28 Huang B, Jian Z, Wang P. Paleoceanography evolution recorded in the northern South China Sea since 4 Ma. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2005, 48 (12): 2166—2173
- 29 Kwiek P B, Ravelo A C. Pacific ocean intermediate and deep water circulation during the Pliocene. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1999, 154: 191—217
- 30 黄宝琦, 翦知, 赵泉鸿等. 晚上新世以来南海北部深部水团变化. *地球科学*, 2005, 30 (5): 529—533
- 31 Murray J W. *Ecology and Palaeoecology of Benthic Foraminifera*. New York: John Wiley & Sons Inc., 1989, 43—287