

文章编号:1000-0550(2011)03-0572-08

# 南海北部晚更新世以来的古海洋环境演化特征<sup>①</sup>

## ——来自N-31柱样的沉积记录

李小艳<sup>1 2 3</sup> 翦知湓<sup>3</sup> 石学法<sup>1 2</sup> 程振波<sup>1 2</sup> 陈志华<sup>1 2</sup>  
李朝新<sup>1 2</sup> 吴永华<sup>1 2 3</sup> 石丰登<sup>1 2</sup>

(1. 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室 山东青岛 266061;

2. 国家海洋局第一海洋研究所 山东青岛 266061; 3. 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N-31柱状样沉积物进行了浮游有孔虫定量分析鉴定、氧碳同位素、碳酸盐含量和粒度测试以及AMS<sup>14</sup>C测年,并采用古生态转换函数计算了表层海水古温度和温跃层深度,揭示了该海区约55 ka以来的古海洋环境特征。转换函数计算的表层海水古温度结果表明,夏季温度的变化范围为27.0~29.6℃,变化幅度为2.6℃,冬季温度变化范围为18.2~27.0℃,变化幅度为8.8℃。与南海南部转换函数温度对比表明,南海南部的温度比南海北部要高,这种差异在冬季时表现更为突出。温跃层转换函数计算的温跃层深度结果表明,MIS3~MIS2期时温跃层深度没有大的变化,而从冰期向冰后期过渡时,温跃层深度逐渐增大。

**关键词** 古海洋环境 浮游有孔虫 晚更新世 南海

**第一作者简介** 李小艳 女 1979年出生 助理研究员 微体古生物学和古海洋学 E-mail: lxyan310@fio.org.cn  
中图分类号 P534.63 文献标识码 A

## 0 前言

南海作为西太平洋最大的边缘海,南北为宽阔的陆架,周边又有众多大河的注入,其高分辨率的沉积物记录了丰富的海陆环境信息,成为古海洋学研究的热点之一,并取得了大量的研究成果<sup>[1~14]</sup>。浮游有孔虫对海洋生态环境的变化十分敏感,气温的冷暖变化可直接影响生物群的迁移和演替,因此,可以利用柱状沉积物中浮游有孔虫的分布特征来分析古气候的演变<sup>[15~19]</sup>。本文对位于南海北部的N-31柱样进行粒度、碳酸盐含量、浮游有孔虫氧碳同位素测试、AMS<sup>14</sup>C测年及浮游有孔虫定量统计分析,采用古生态转换函数估算表层海水温度和温跃层深度变化,揭示了南海北部55 ka以来的古海洋环境演化特征。

## 1 材料和方法

本次研究采用的柱状样(N-31)是由“海洋四号”调查船于2005年采集,该站位于南海北部(17.7089°N、112.5056°E),采样位置见图1,水深2 090 m,柱样长5.09 m。岩芯无明显浊流沉积,上下岩性比较均一,是一套浅灰色—深灰色粉砂质黏土,

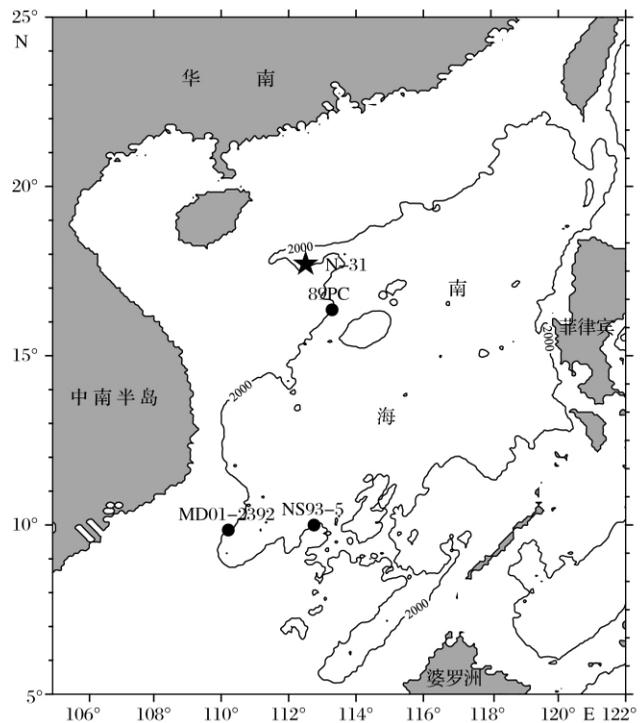


图1 南海N-31和有关钻孔的站位示意图

Fig. 1 Location map showing N-31 and other core localities

<sup>①</sup>国家海洋局青年基金(编号:2006307) 我国近海海洋底质调查研究(编号:908-ZC-I-05)资助。  
收稿日期:2010-04-05; 收修改稿日期:2010-08-09

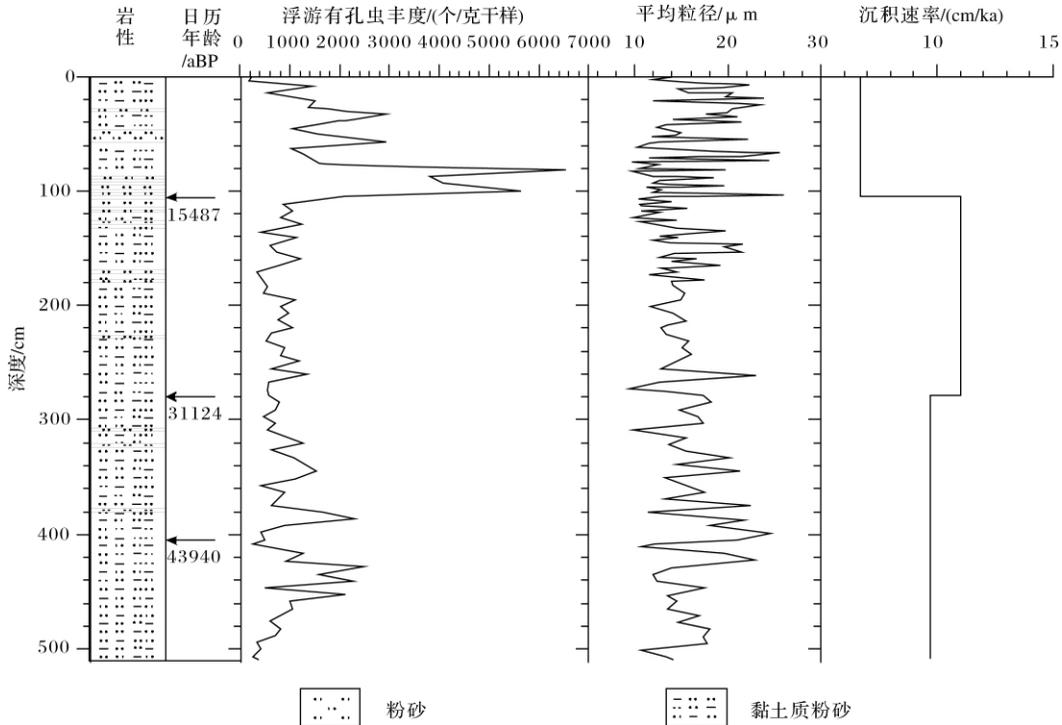


图 2 南海北部 N-31 柱状样沉积物岩性、有孔虫丰度、平均粒径、沉积速率和测年结果

Fig. 2 Lithology, abundance of foraminifera, mean grain size, sedimentation rate and AMS<sup>14</sup>C dating of Core N-31 from northern South China Sea

中间夹有薄层的粉砂层, 具体的岩性见图 2 所示。

对该柱状样按 6 cm 间隔取样, 共获 88 个样品。样品的室内处理方法如下: 沉积物样品置于烘箱在 60℃ 温度下干燥后, 用自来水浸泡, 对于难分散的样品加入几滴 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 然后在孔径 63 μm 的筛子上冲洗, 冲洗剩下的砂样放在温度不超过 60℃ 下干燥。取大于 0.154 mm 的粗组分进行浮游有孔虫及其碎壳的定量统计。当样品中浮游有孔虫含量丰富时, 采用对角线划分法进行分样, 直至样品中所含完整浮游有孔虫壳体数量不少 200 枚。并运用转换函数 FP-12E<sup>[20]</sup> 计算样品所反映的夏季和冬季海水古温度, 运用温跃层转换函数<sup>[21]</sup> 计算出温跃层深度。从大于 154 μm 的粒级中挑取保存好的(清洁、完整、无溶解)、大小在 0.30 ~ 0.36 mm 的 *Globigerinoides ruber* 壳体置于无水酒精中, 用震荡频率 40 KHz 超声波清洗器处理数秒钟, 倒去浊液后, 将有孔虫样品放在 55 ~ 60℃ 的烘箱中干燥, 尔后放入碳酸盐自动制备装置( Kiel III) 的样品瓶中, 经磷酸溶解后释放出 CO<sub>2</sub> 在 MAT252 稳定同位素质谱仪测定 δ<sup>18</sup>O 和 δ<sup>13</sup>C 比值。上述处理过程是在同济大学海洋地质国家重点实验室进行。

## 2 结果和讨论

### 2.1 地层年代框架和沉积速率

在 N-31 柱状样的 104 ~ 106 cm、278 ~ 280 cm、404 ~ 406 cm 层位挑选足量的 *Globigerinoides ruber* 和 *Globigerinoides sacculifer* 送到美国伍兹霍尔海洋研究所进行 AMS<sup>14</sup>C 测年, 测年结果见表 1。

表 1 N-31 柱状样 AMS<sup>14</sup>C 测年数据

Table 1 AMS<sup>14</sup>C dating of Core N-31

| 深度/cm     | 测试材料                                        | <sup>14</sup> C 年龄/aBP | 日历年龄/aBP    | 年龄校正软件 <sup>[22]</sup> |
|-----------|---------------------------------------------|------------------------|-------------|------------------------|
| 104 ~ 106 | <i>Gs. ruber</i>                            | 13300 ± 70             | 15487 ± 132 | Fairbanks0107          |
| 278 ~ 280 | <i>Gs. ruber</i> +<br><i>Gs. sacculifer</i> | 25900 ± 120            | 31124 ± 184 | Fairbanks0107          |
| 404 ~ 406 | <i>Gs. ruber</i>                            | 39100 ± 430            | 43940 ± 417 | Fairbanks0107          |

依据日历年龄计算该柱的沉积速率及其变化如图 2 所示。全柱的平均沉积速率为 9.6 cm/ka, 其中约 1.5 cal. kaBP 之前的沉积速率最低(6.8 cm/ka), 随后沉积速率明显增加, 在 1.5 ~ 3.1 cal. kaBP 期间沉积速率高达 11.1 cm/ka, 3.1 cal. kaBP 之后沉积速率降至 9.8 cm/ka。由于沉积速率的差异, 样品的时

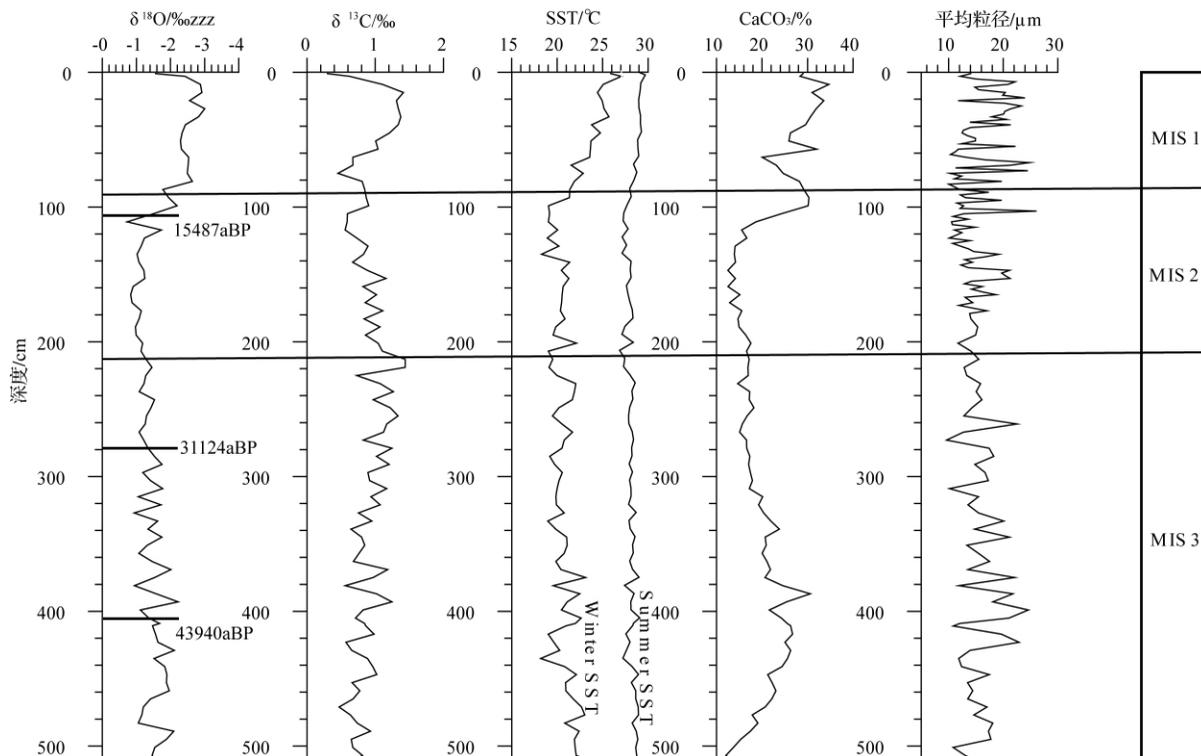


图3 南海北部 N-31 柱状样沉积地层划分图

Fig. 3 Stratigraphy of Core N-31: evidences from data of planktonic foraminiferal  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$ , SST estimated by transfer function FP-42E, calcium carbonate content, mean grain size and AMS<sup>14</sup>C dating

间分辨率有所差异, 1.5 kaBP 以来的沉积顶部(105 cm 之上) 约为 800 a, 1.5 ~ 3.1 kaBP 时期的中部(105 ~ 279 cm) 约为 500 a, 下部(280 ~ 509) 约为 600 a。

N-31 柱状样的地层年代主要依据 AMS<sup>14</sup>C 测年, 碳酸盐地层学和氧同位素地层学。从图 3 中可以看出, N-31 柱状的碳酸钙含量曲线与  $\delta^{18}\text{O}$  曲线大致平行, 表现为冰期低, 间冰期高的特征, 属于典型的“大西洋型”碳酸盐旋回。综合 *Globigerinoides ruber* 的  $\delta^{18}\text{O}$  曲线、碳酸钙含量曲线和冬夏季表层海水古温度曲线及 AMS<sup>14</sup>C 测年结果, 认为该柱样为氧同位素 3 期以来的沉积, 且认为柱深 91 cm 和 213 cm 分别为 MIS1/MIS2 和 MIS2/MIS3 的界线, 根据测年结果推算 N-31 柱样底部年龄约为 5.5 cal. kaBP。

## 2.2 浮游有孔虫丰度变化及组合特征

N-31 柱样含有丰富的浮游有孔虫, 经鉴定有 22 种, 常见种的百分含量随深度的变化如图 4 所示, 其中数量最丰富的种是 *Gs. ruber*, 平均含量为 21.1%。其它常见种及其平均含量依次为: *N. dutertrei* (13.8%), *N. pachyderma* (13.5%), *Gs. sacculifer* (7.9%), *Gl.*

*glutinata* (7.3%), *Gr. inflata* (6.7%), *P. obliquiloculata* (6.1%), *G. bulloideis* (6.5%), *Gr. menardii* (6.2%)。其余种平均含量均在 5% 以下。

图 5 是 N-31 柱样中热带种、亚热带种和温带种百分含量随深度的变化曲线, 从图中可以看出, 浮游有孔虫种群以亚热带种和温带种为主, 其平均百分含量分别为 31.8% 和 40.5%, 而热带种的平均百分含量为 18.9%。

热带种包括了 *Gs. sacculifer*, *P. obliquiloculata*, *Gr. menardii*。总体上, 热带种的平均百分含量较低, 呈现出冰期时含量低, 间冰期时含量高的基本规律。MIS1 期平均百分含量为 32.0%, MIS2 期平均百分含量为 16.6%, MIS3 期平均百分含量为 15.5%。

亚热带种包括 *Gs. ruber*, *Gs. conglobatus*, *Gl. glutinata* 和 *Orbulina. universa* 等, MIS1 ~ MIS3 期的平均百分含量分别为 35.4%, 28.8% 和 31.7%, 平均丰度变化不大, 在 MIS1 期时含量最高, 说明亚热带种更适合于间冰期的温暖环境。

温带种包括了 *N. dutertrei*, *N. pachyderma*, *G. bulloides* 和 *Gr. inflata*。温带种的分布趋势与热带

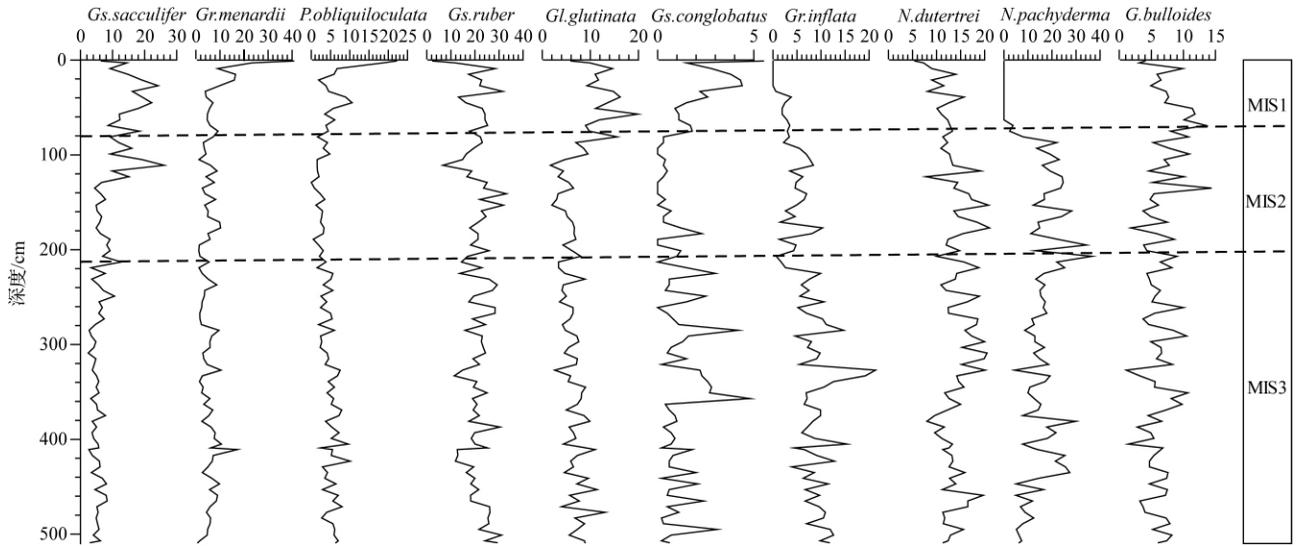


图 4 N-31 柱样中主要浮游有孔虫百分含量分布曲线图

Fig. 4 Relative abundance of major species of planktonic foraminifera in Core N-31

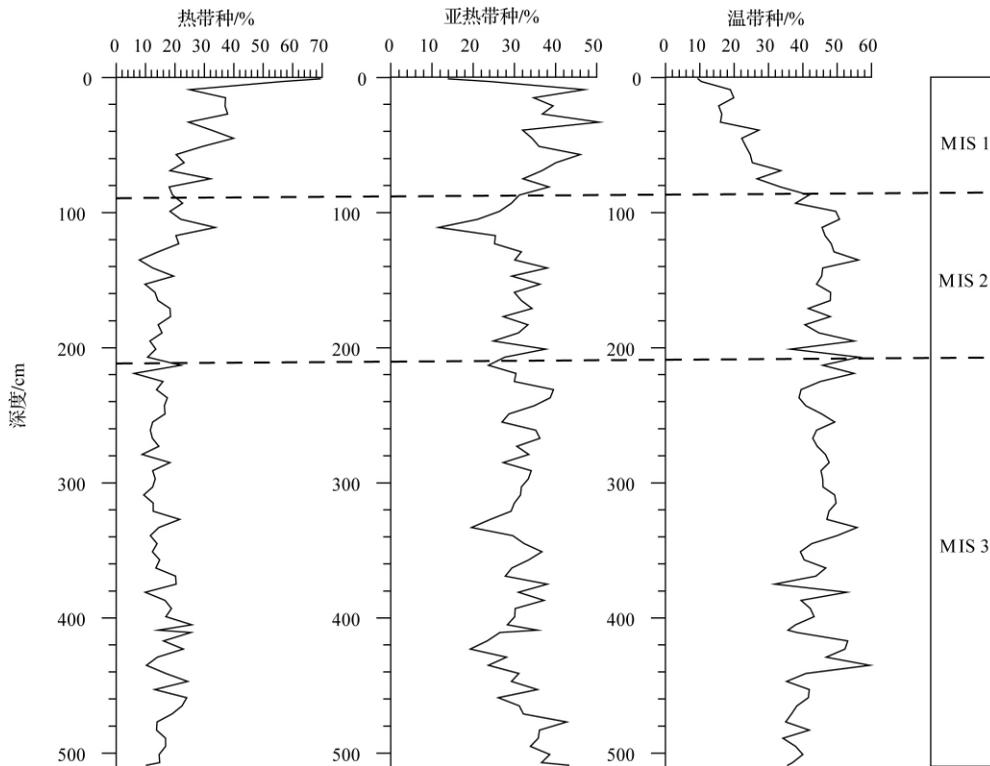


图 5 N-31 柱样热带种、亚热带种和温带种百分含量分布图

Fig. 5 Relative abundance of tropical , subtropical and temperate species of planktonic foraminifera in Core N-31

种恰好相反,表现出冰期时含量高,间冰期时含量低的规律。MIS1 ~ MIS3 期的平均百分含量分别为 23.7%、47.2% 和 43.5%,可见虽然温带种的百分含量最高,但 MIS1 期时其百分含量是三类种群中最低的,尤其顶部样品中含量最低,仅达 9.5%。

总的来说,N-31 柱样中浮游有孔虫种群以亚热

带种和温带种为主,热带种的平均百分含量仅在 MIS1 期时超过 30%。但是热带种和温带种的百分含量随冰期—间冰期的变化较亚热带种明显,在 MIS1 期,主要以热带种和亚热带种为主,而 MIS2 和 MIS3 期,则是温带种占绝对优势。

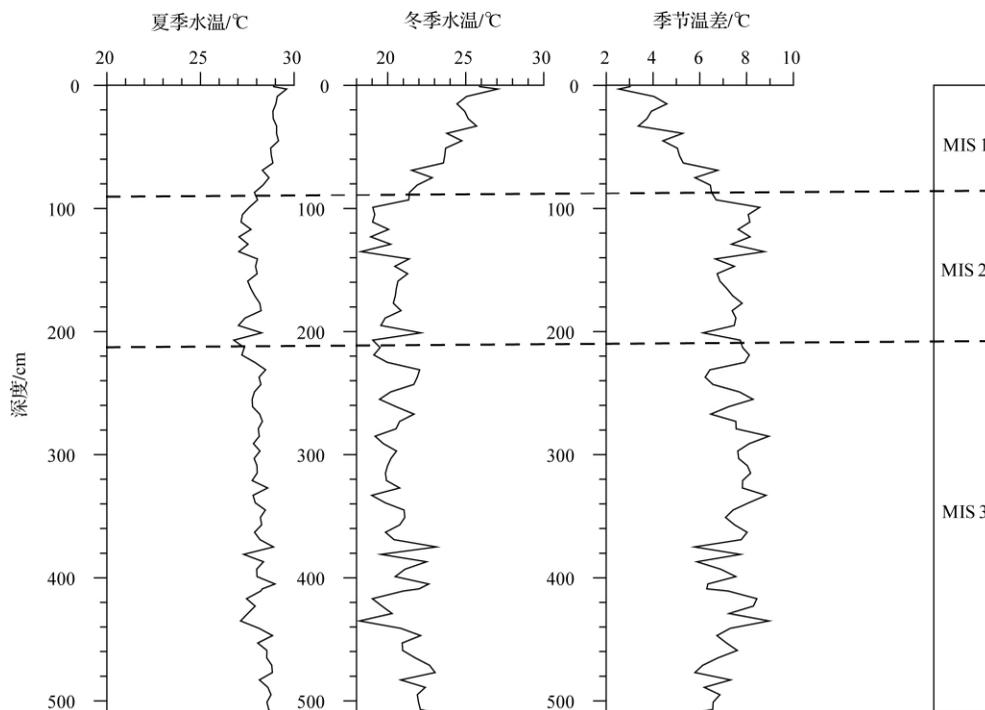


图6 N-31柱状样表层海水古温度及季节性温差曲线图

Fig. 6 The sea surface paleotemperature and seasonal SST difference in Core N-31

## 2.3 表层海水古温度及上层水体结构变化

### 2.3.1 表层海水古温度

对于海水表层古温度的定量研究,尤其是要区分冬夏季古温度变化,需要借助有孔虫古生态转换函数。目前较为通用的是Thompson(1981)在西北太平洋建立的浮游有孔虫古温度转换函数。图6是用FP-42E计算出的N-31柱样所反映的冬季和夏季海水表层温度及季节温差,从图上来看,冬季温度和夏季温度变化的趋势大致相同,冬季温度变化的幅度更大。

从图6可以看出,用转换函数计算出来的表层海水古温度整体变化趋势与氧同位素曲线变化趋势基本一致,具有明显的冰期—间冰期旋回,冬季最低温度为18.3°C,夏季最低温度为26.8°C,都出现在MIS2期;冬季最高温度达25.9°C,夏季最高温度达29.6°C,均出现在MIS1期。南海共有20几个钻孔有温度数据,本文选用了4个用转换函数方法获得的钻孔古温度数据进行对比(见表2),用转换函数方法恢复的N-31柱状样的表层海水古温度与前人用同样方法获得的南海北部温度记录基本一致<sup>[23-24]</sup>,且与前人用 $U^{k37}$ 计算出来的南海北部温度记录也有很好的可对比性<sup>[13]</sup>。

表2 南海南部和北部转换函数平均表层海水古温度对比

Table 2 Comparison of SST data between the southern and northern South China Sea

| MIS | 海水表层温度及<br>季节温差/°C | 南海南部                      |                        | 南海北部                 |         |
|-----|--------------------|---------------------------|------------------------|----------------------|---------|
|     |                    | MD01-2392 <sup>[16]</sup> | NS93-5 <sup>[25]</sup> | 89PC <sup>[24]</sup> | N-31    |
| 1   | 夏季                 | 29.3                      | 29.0                   | 29.1                 | 28.7    |
|     | 冬季                 | 25.8                      | 25.6                   | 25.1                 | 23.7    |
|     | 季节温差               | 2.5~4.6                   | 2.5~4.3                | 3.0~5.9              | 2.5~8.6 |
| 2   | 夏季                 | 29.4                      | 29.0                   | 28.3                 | 27.6    |
|     | 冬季                 | 25.9                      | 25.3                   | 22.1                 | 20.1    |
|     | 季节温差               | 2.0~5.8                   | 2.5~5.0                | 5.1~7.0              | 6.1~8.8 |
| 3   | 夏季                 | 29.7                      | 29.6                   | 28.8                 | 28.2    |
|     | 冬季                 | 26.8                      | 27.4                   | 22.5                 | 20.9    |
|     | 季节温差               | 1.2~5.1                   | 1.5~4.8                | 5.1~7.4              | 5.8~8.9 |

### 2.3.2 上层水体结构变化

对现代浮游有孔虫生态的大量研究帮助我们建立了浮游有孔虫各个属种的生存深度<sup>[26]</sup>,一般认为适合某属种生存的水团厚度越大,其相对百分含量也应该越高。因此,可以利用*Gr. memardii*,*N. pachyderma*和*N. dutertrei*等深水种,与*Gs. sacculifer*,*Gs. ruber*和*Gl. glutinata*等浅水种含量的相对变化作为探讨上层水团演化的定性指标:当温跃层变深时,深水种生存空间变小,含量相应降低,当温跃层变浅时,深水种含量升高,而浅水种含量降低<sup>[27]</sup>。

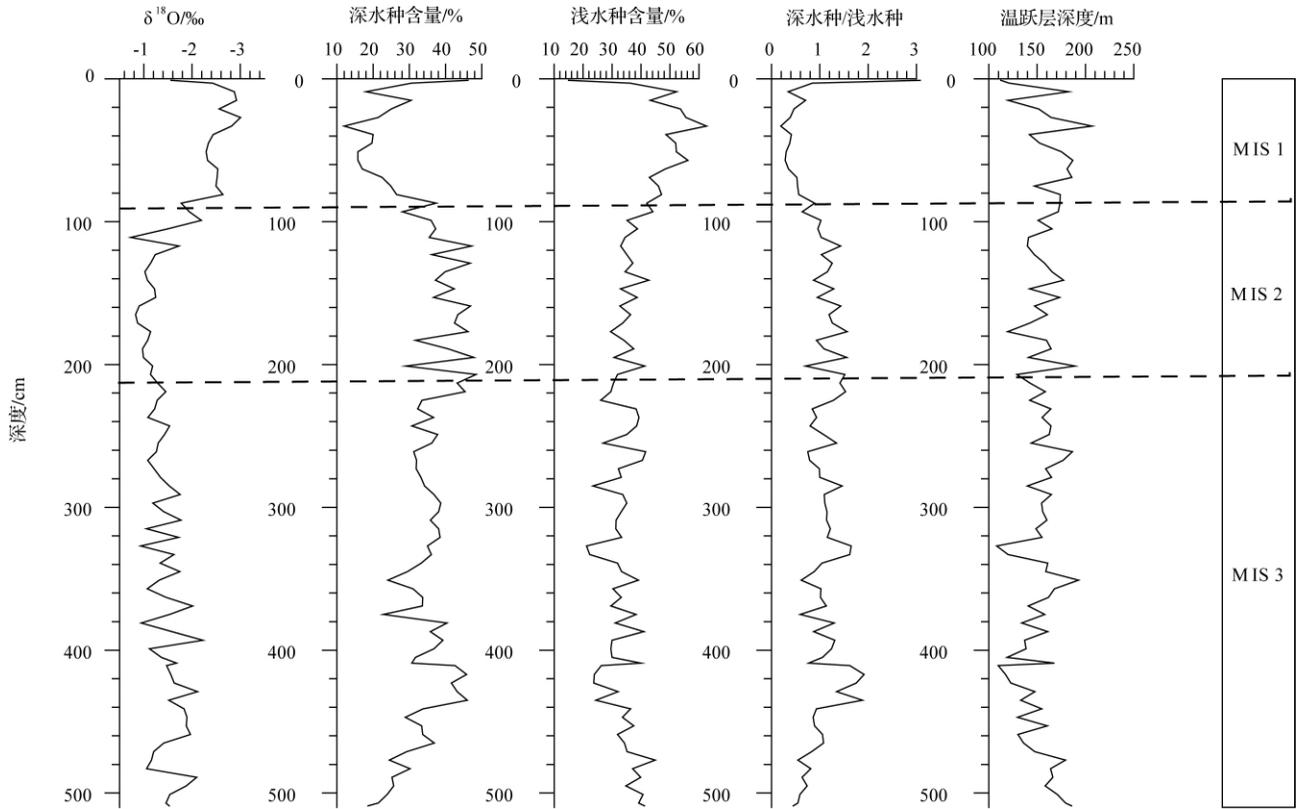


图 7 N-31 柱样浮游有孔虫深水种、浅水种及温跃层深度变化图

Fig. 7 Variations in abundance and ratios of deep-dwelling species and shallow-dwelling species and thermocline depth in Core N-31

Andreasen 和 Ravelo 对介于北纬  $24^{\circ}$  和南纬  $24^{\circ}$  之间, 小于 3 800 m 水深的热带太平洋 189 个沉积柱状样顶部样品中浮游有孔虫组合进行分析, 结合现代温跃层深度的情况, 建立了温跃层深度的转换函数, 为定量研究古温跃层深度提供了依据, 且在南海的古气候和古海洋学研究中得到了广泛的应用<sup>[24-28]</sup>。本文即利用此估算公式来定量恢复 N-31 沉积柱状样反映的温跃层深度变化。

温跃层深度转换函数的估算结果见图 7, 温跃层最深为 206.9 m, 最浅为 108.1 m, MIS1 期温跃层的平均深度为 161 m, MIS2 期和 MIS3 期时的温跃层平均深度分别为 153 m 和 152 m。

末次盛冰期以来, 温跃层逐渐加深, 这与前人在对冲绳海槽以及赤道西太平洋末次盛冰期以来温跃层深度变化的研究成果一致<sup>[21-27, 28]</sup>。

### 3 结论

通过对南海北部 N-31 柱样沉积物进行粒度、碳酸盐含量、浮游有孔虫属种鉴定和氧碳同位素分析, 并结合 AMS<sup>14</sup>C 测年数据, 得出以下结论:

(1) N-31 柱样的底部年龄约为 55 ka BP, 代表了氧同位素 3 期以来的沉积。

(2) 浮游有孔虫属种分析结果表明有孔虫丰度变化随着冰期—间冰期旋回的变化而变化, 热带种和亚热带种在间冰期时大量出现, 最大值出现在 MIS1 期或 MIS3 期, 而温带种则在冰期时大量出现。

(3) 转换函数计算的表层海水古温度表明, MIS1、MIS2 和 MIS3 期的平均夏季温度分别为:  $28.7^{\circ}\text{C}$ ,  $27.6^{\circ}\text{C}$ ,  $28.2^{\circ}\text{C}$ ; 平均冬季温度分别为:  $23.7^{\circ}\text{C}$ ,  $20.1^{\circ}\text{C}$ ,  $20.9^{\circ}\text{C}$ 。并与南海南部转换函数古温度对比表明南部的温度比北部要高, 这种差异在冬季时表现更为突出。

(4) 温跃层转换函数计算的温跃层深度结果表明, 在 MIS3 ~ MIS2 期时, 温跃层平均深度基本没有大的变化, 而从冰期到冰后期过渡时, 温跃层深度逐渐增大。

### 参考文献 (References)

- 汪品先, 闵秋宝, 卞云华, 等. 十三万年来南海北部陆坡的浮游有孔虫及其古海洋学意义 [J]. 地质学报, 1986, 60(3): 215-225 [Wang Pinxian, Min Qiubao, Bian Yunhua, et al. Planktonic foraminifera from the continental slope of the northern South China Sea 130,000 years ago: implications for paleoceanography [J]. *Geological Journal*, 1986, 60(3): 215-225]

- minifera in the continental slope of the northern South China Sea during the last 130000 years and their paleoceanographic implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1986, 60(3): 215-225]
- 2 汪品先, 王律江, 卞云华, 等. 十五万年来的南海 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1995 [Wang Pinxian, Wang Lüjiang, Bian Yunhua, *et al.* The South China Sea Since the Last 150 ka [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1995]
  - 3 汪品先, 翦知湑, 刘志伟. 南沙海区盛冰期的气候问题 [J]. 第四纪研究, 1996, 3: 193-201 [Wang Pinxian, Jian Zhimin, Liu Zhiwei. The last glacial maximum climate problem in the sea area of the Nansha Islands, South China Sea [J]. *Quaternary Sciences*, 1996, 3: 193-201]
  - 4 赵泉鸿, 汪品先. 南海晚第四纪古海洋学研究进展 [J]. 第四纪研究, 1999, 6: 481-501 [Zhao Quanhong, Wang Pinxian. Progress in Quaternary paleoceanography of the South China Sea: a review [J]. *Quaternary Sciences*, 1999, 6: 481-501]
  - 5 赵泉鸿, 翦知湑, 王吉良, 等. 南海北部晚新生代氧同位素地层学 [J]. 中国科学: D 辑, 2001, 31(10): 800-807 [Zhao Quanhong, Jian Zhimin, Wang Jiliang, *et al.* Neogene oxygen isotope stratigraphy, ODP Site 1148, northern South China Sea [J]. *Science in China: Series D*, 2001, 44(10): 934-942]
  - 6 王律江, Sarnthein M. 南海北部陆坡近四万年的高分辨率古海洋学记录 [J]. 第四纪研究, 1999, 19(1): 27-31 [Wang Lüjiang, Sarnthein M. High-resolution paleoceanographic records during the last 40 000 years from the northern slope of the South China Sea [J]. *Quaternary Sciences*, 1999, 19(1): 27-31]
  - 7 Chen M H, Li Q, Zheng F, *et al.* Variations of the last glacial warm pool: SST contrasts between the open western Pacific and South China Sea [J]. *Paleoceanography*, 2005, 20: PA2005, doc: 10. 1029/2004PA001057
  - 8 Wang L, Sarnthein M, Erlenkeuser H, *et al.* East Asia monsoon climate during the Late Pleistocene: High-resolution sediment records from the South China Sea [J]. *Marine Geology*, 1999, 156(1): 245-284
  - 9 Wang L, Wang P X. Late Quaternary paleoceanography of the South China Sea: Glacial-interglacial contrasts in an enclosed basin [J]. *Paleoceanography*, 1990, 5: 77-90
  - 10 Jian Z M, Wang P X, Chen M B, *et al.* Foraminiferal responses to major Pleistocene paleoceanographic changes in the South China Sea [J]. *Paleoceanography*, 2000, 15(2): 229-243
  - 11 Xu J, Wang P X, Huang B Q, *et al.* Response of planktonic foraminifera to glacial cycles: Mid-Pleistocene change in the southern South China Sea [J]. *Marine Micropaleontology*, 2005, 54(1-2): 89-105
  - 12 翦知湑, 王博士, 乔培军. 南海南部晚第四纪表层海水温度的变化及其与极地冰芯古气候记录的比较 [J]. 第四纪研究, 2008, 28(3): 391-398 [Jian Zhimin, Wang Boshi, Qiao Peijun. Late Quaternary changes of sea surface temperature in the southern South China Sea and their comparison with the paleoclimatic records of polar ice cores [J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(3): 391-398]
  - 13 贺娟, 赵美训, 李丽, 等. 南海北部 MD05-2904 沉积柱状样 26 万年以来表层海水温度及陆源生物标记物记录 [J]. 科学通报, 2008, 53(11): 1324-1331 [He Juan, Zhao Meixun, Li Li, *et al.* Sea surface temperature and terrestrial biomarker records of the last 260 ka of Core MD05-2904 from the northern South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(15): 2376-2384]
  - 14 李丽, 王慧, 李建如, 等. 南海 45 万年来的表层水温变化 [J]. 科学通报, 2009, 54(9): 1269-1277 [Li Li, Wang Hui, Li Jianru, *et al.* Changes in sea surface temperature in western South China Sea over the past 450 ka [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(18): 3335-3343]
  - 15 Steinke S, Yu P S, Kucera M, *et al.* No-analog planktonic foraminiferal faunas in the glacial southern South China Sea: implications for the magnitude of glacial cooling in the western Pacific warm pool [J]. *Marine Micropaleontology*, 2008, 66: 71-90
  - 16 郑范, 李前裕, 陈木宏, 等. 南海西南部晚更新世 500ka 以来的古海洋学特征 [J]. 地球科学, 2005, 30(5): 534-549 [Zhen Fan, Li Qianyu, Chen Muhong, *et al.* Late Pleistocene paleoceanographic characteristics of the south western South China Sea since 500 ka [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2005, 30(5): 534-549]
  - 17 李保华, 赵泉鸿, 陈民本, 等. 南海海区晚第四纪浮游有孔虫演化及其古海洋学意义 [J]. 微体古生物学报, 2001, 18: 1-9 [Li Bohua, Zhao Quanhong, Chen Minben, *et al.* Late Quaternary evolution of planktonic foraminifera in the southern South China Sea and their paleoceanographic significance [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2001, 18: 1-9]
  - 18 涂霞, 郑范, 陈木宏. 南海南部陆坡区的浮游有孔虫及其所表征的表层古水温 [J]. 热带海洋, 2000, 19(3): 40-49 [Tu Xia, Zheng Fang, Chen Muhong. Paleoceanographic characters implied by Core NS93-5 in South China Sea since late Quaternary [J]. *Tropic Oceanology*, 2000, 19(3): 40-49]
  - 19 Li B H, Jian Z M, Li Q, *et al.* Paleoceanography of the South China Sea since the Middle Miocene: Evidence from planktonic foraminifera [J]. *Marine Micropaleontology*, 2005, 54: 49-62
  - 20 Thompson P R. Planktonic foraminifera in the western North Pacific during the past 150 000 years: Comparison of modern and fossil assemblages [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1981, 35: 241-279
  - 21 Andreasen D J, Ravelo A C. Tropical Pacific ocean thermocline depth reconstructions for the last glacial Maximum [J]. *Paleoceanography*, 1997, 12: 395-413
  - 22 Fairbanks R G, Mortlock R A, Chiu T, *et al.* Radiocarbon calibration curve spanning 0 to 50 000 years BP based on paired  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  and  $^{14}\text{C}$  dates on pristine corals [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24: 1781-1796
  - 23 李学杰, 江茂生. 南海西沙海槽末次冰期以来浮游有孔虫与表层水温 [J]. 中国科学: D 辑, 2002, 32(5): 423-429 [Li Xuejie, Jiang Maosheng. Planktonic foraminifera and sea surface temperature from the western South China Sea since last glacial [J]. *Science in China: Series D*, 2002, 32(5): 423-429]
  - 24 李小艳, 翦知湑, 石学法, 等. 南海西北部 89PC 柱样沉积物中浮游有孔虫特征及其古环境意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(3): 391-398

- 2009, 29(3): 85-92 [Li Xiaoyan, Jian Zhimin, Shi Xuefa, *et al.* Planktonic foraminifera in Core 89PC from the northwestern South China Sea and their paleoenvironment significance [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2009, 29(3): 85-92]
- 25 吴庐山, 朱照宇, 邱燕, 等. 南海西南陆坡末次冰期以来的浮游有孔虫及其古气候意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(6): 1-8 [Wu Lushan, Zhu Zhaoyu, Qiu Yan, *et al.* Planktonic foraminifera from the southwestern continental slope of the South China Sea since last glacial and their paleo-climate implication [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2006, 26(6): 1-8]
- 26 BéA W H. An ecological, zoogeographic and taxonomic review of recent planktonic foraminifera [M]// Ramsay A T S, ed. *Oceanic Micropalaeontology*. London: Academic Press, 1977: 1-100
- 27 王吉良, 斋藤文纪, 大场忠道, 等. 近万年来冲绳海槽温跃层的高分辨率记录[J]. *中国科学: D 辑*, 2000, 30(3): 233-238. [Wang Jiliang, Saito Y, Oba T, *et al.* High-resolution records of thermocline in the Okinawa Trough since about 10 000 aBP [J]. *Science in China: Series D*, 2000, 30(3): 233-238]
- 28 范维佳, 陈荣华, 赵泉鸿, 等. 南海北部 191PC 柱样沉积物中浮游有孔虫特征及其古环境意义[J]. *微体古生物学报*, 2007, 24(3): 233-241 [Fan Weijia, Chen Ronghua, Zhao Quanhong, *et al.* Planktonic foraminifera in Core 191PC from the northern South China Sea and their paleoenvironmental significance [J]. *Acta Micropalaeontological Sinica*, 2007, 24(3): 233-241]

## Evolutionary Paleoceanographic Characteristics in the Northern South China Sea Since Late Pleistocene: Evidence from Core N-31

LI Xiao-yan<sup>1 2 3</sup> JIAN Zhi-min<sup>3</sup> SHI Xue-fa<sup>1 2</sup> CHENG Zhen-Bo<sup>1 2</sup> CHEN Zhi-Hua<sup>1 2</sup>  
LI Chao-xin<sup>1 2</sup> WU Yong-hua<sup>1 2 3</sup> SHI Feng-deng<sup>1 2</sup>

(1. Key Lab of Marine Sedimentology and Environmental Geology, SOA, Qingdao Shandong 266061;

2. First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao Shandong 266061; 3. Tongji University, state Key Lab of Marine Geology, Shanghai 200092)

**Abstract** The South China Sea is the largest marginal sea in the western Pacific Ocean and its north and south are wide continental shelf. There are many rivers flow into the South China Sea. The high-resolution sediment records abundant environmental information of land and sea. This area has become one of hotspots on paleoceanography research and made a lot of research results. Planktonic foraminifera are very sensitive to changes of marine environment. Sea water temperature changes can directly affect the migration and succession of biota. Therefore, research the distribution of planktonic foraminifera in core sediment to analyze the evolution of paleoclimate. In this paper, a sediment Core N-31 located in the northern South China Sea had been researched including quantitative analysis and identification of planktonic foraminifera, oxygen and carbon isotopes, carbonate content and grain size, AMS<sup>14</sup>C dating, sea surface temperature and thermocline depth calculated by paleoecological transfer function. The following conclusions have been attained:

1) The bottom age of Core N-31 was about 55ka BP and this core accepted deposition since marine isotope stage 3.

2) Planktonic foraminifera species analysis showed that changes in abundance as the glacial-interglacial cycles and change. Tropical and subtropical species appeared in larger numbers in interglacial and its maximum percentage in MIS3 or MIS1, but temperate species appeared in larger numbers in the glacial period.

3) The sea surface temperature (SST) estimated by the transfer function FP-42E shows that the summer SST ranges from 27.0 to 29.6°C and the winter SST from 18.2 to 27.0°C. The comparison of SST data between the southern and northern SCS shows that SST in the southern SCS is higher than that in the northern SCS. The SST difference is more obvious in winter.

4) The thermocline data show no obvious fluctuations during MIS3-MIS2, but the depth deepened gradually during the transitional period from the glacial to the postglacial.

**Key words** paleoceanography; planktonic foraminifera; late Pleistocene; South China Sea