

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018052302

南海南部上层水体浮游有孔虫的组成与分布特征

安佰正^{1,2,3}, 李铁刚^{3,4}, 刘健^{1,3}, 孙晗杰^{2,3}, 于心科^{2,3}, 常凤鸣^{2,3}

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071
2. 中国科学院海洋研究所, 海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071
3. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266061
4. 自然资源部第一海洋研究所, 海洋沉积与环境地质重点实验室, 青岛 266061

摘要:通过分析2012年4月在南海南部获取的浮游生物拖网样品,对水体中浮游有孔虫的区域分布特征及其影响因素进行了初步探讨。南海南部上层水体中共鉴定出现代浮游有孔虫19种,其中优势种为*Globigerinoides sacculifer*、*Globigerinoides ruber*、*Globigerinella calida*、*Globigerinella siphonifera*、*Globorotalia menardii*、*Orbulina universa*、*Neogloboquadrina dutertrei*。浮游有孔虫种属组成整体上呈现为热带-亚热带群落特征,浮游有孔虫生物丰度与西太平洋北赤道流区域的生物丰度相当。南海南部春季上层水体中浮游有孔虫整体表现为西高东低的区域分布特征,在垂直分布上浮游有孔虫集中分布在上部0~50m水层中,50m以深水体中浮游有孔虫生物丰度迅速降低。认为浮游有孔虫的分布受到温度、水体层化、初级生产力等多方面环境因子的综合作用。个别深水种(如*Globorotalia menardii*)出现了主要分布在0~50m水深的特殊现象。

关键词:浮游生物拖网;浮游有孔虫;垂直分布;南海南部

中图分类号:P736.2 **文献标识码:**A

Assemblage and distribution of planktonic foraminifera in the upper water layer of southern South China Sea

AN Baizheng^{1,2,3}, LI Tiegang^{3,4}, LIU Jian^{1,3}, SUN Hanjie^{2,3}, YU Xinke^{2,3}, CHANG Fengming^{2,3}

1. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China
2. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China
3. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China
4. Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China

Abstract: Modern planktonic foraminifera are quantitatively analyzed for 30 stratified towing samples collected from 6 sites in the southern South China Sea (SCS) in April, 2012. 19 planktonic foraminifera species are identified from the upper 250m of water column, and most of them are tropical and subtropical warm water species. The faunal assemblage is dominated by *Globigerinoides sacculifer*, *Globigerinoides ruber*, *Globigerinella calida*, *Globigerinella siphonifera*, *Globorotalia menardii*, *Orbulina universa*, *Neogloboquadrina dutertrei*. The foraminiferal abundance is higher in the west part of area than that in the east region. High abundance value occurs in the upper 0~50m of water column, and then quickly decrease with water depth. Some subsurface dwellers, such as *Globorotalia menardii*, are also found in high abundance in the upper 0~50m water column. This distribution pattern is believed to be influenced by various factors, such as temperature, water stratification and primary production.

Key words: plankton tow; planktonic foraminifera; vertical distribution; southern South China Sea

资助项目:国家自然科学基金项目“15 万年以来热带西太平洋颗石藻碳酸钙输出通量演变及其影响因素”(41706070);国家自然科学基金项目“80 万年来热带西太平洋上层水体 pH 和 pCO₂ 演变及影响机理”(41230959);青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划项目(2016ASKJ13);中国科学院海洋地质与环境重点实验室开放基金“西太平洋上层水体现代颗石藻碳酸钙分布特征”(MGE2017KG03);山东省自然科学基金面上项目“山东半岛东部近岸中、晚全新世高分辨率环境演化过程研究”(ZR2016DM12)

作者简介:安佰正(1984—),男,博士,主要从事古海洋学与古环境研究,E-mail: an_baizheng@126.com

通讯作者:李铁刚,研究员,主要从事古海洋与古环境方面研究,E-mail: tgli@fio.org.ac.cn

收稿日期:2018-05-23;**改回日期:**2018-08-08. 周立君编辑

浮游有孔虫是开放大洋上层水体中生源碳酸钙的主要生产者^[1]。其群落组成特征、壳体化学元素比值以及同位素特征等,是古海洋环境重建工作中常用的替代指标^[2,3]。现代有孔虫的分布存在着区域差异。现代大洋中,浮游有孔虫属种 *Globigerinoides sacculifer*, *Globigerinoides ruber* 和 *Pulleniatina obliquiloculata* 等在热带和亚热带水体中具有很高的生物丰度^[4,5];而某些种属能够适应并生存在高纬度低温水体中,如 *Neogloboquadrina pachyderma*^[6];还有一些种属如 *Globigerina bulloides* 则属于机遇种,常常在受上升流影响的高生产力区域出现高丰度值^[4]。因此,依据浮游有孔虫不同种属的丰度和组合特征,可以有效地重建过去海水的温度、盐度、生产力等环境参数^[7,8]。比如利用现代类比技术重建古海水温度,其基本原理是通过建立现代浮游有孔虫群落组合与海水温度之间的某种函数关系,进而把该关系类比到过去大洋中,即根据沉积物中的有孔虫群落组合来推断当时的海水温度^[9,10]。另外,使用浮游有孔虫壳体的氧、碳同位素和 Mg/Ca 比等指标还原古海水温度和盐度,全球冰体积,以及大洋表层生产力等,已成为常用的成熟手段。近年来,浮游有孔虫壳体的 Ba/Ca、B/Ca、U/Ca 和壳体标准化重量等指标也被广泛开发和应用到重建大洋碳酸钙离子浓度、海水 pH 和地表径流输入等方面^[11-19]。

随着越来越多古海洋环境新指标的使用,以及高分辨率古海洋学研究的开展,对现代水体中浮游有孔虫分布特征和生态机制的深入研究也就更加迫切。比如,在重建海洋上层水体结构时,常用的指标包括浮游有孔虫表层种和次表层种的壳体氧同位素差值,以及 Mg/Ca 比值所反映的水体温度差值。这就需要选择相应生活水深的有孔虫种属进行测试,目前经常使用的表层水种属一般为 *Globigerinoides ruber* 和 *Globigerinoides sacculifer*,而可选的次表层水种属则相对较多,有 *Pulleniatina obliquiloculata*, *Globorotalia menardii*, *Neogloboquadrina dutertrei*, *Globorotalia tumida* 等。然而,要想选择可靠的种属进行研究,需要现代水体浮游有孔虫调查提供全面的信息。随着调查的深入,发现影响浮游有孔虫生长水深以及分布情况的因素很多^[20],其分布、组合往往具有区域特色;某些种属还会出现季节性变动或者在生命周期中发生垂向转移,例如通常认为的深层水种 *Globorotalia menardii*,在南海南部主要分布在上部 0~50m 水

深,且该调查中 *Globorotalia menardii* 幼体较多,认为可能与该种的幼体生活水深较浅而成体生活水深较深有关^[21]。

近年来,南海和西太平洋海区古海洋学研究取得了丰硕成果,但大多研究集中在南海中北部区域,对南海南部的研究相对较少,对应海域的现代水体浮游有孔虫区域分布特点及其生活水深等的研究也很匮乏。崔喜江等^[21]首次在南海南部开展浮游有孔虫拖网调查工作,利用 0~50m 及 0~200m 水深范围水样样品,初步探讨了该区浮游有孔虫分布特征及其影响因素,并与表层沉积物中浮游有孔虫组合进行对比,提出了沉积作用对其环境指示意义。本研究进一步细化了浮游拖网取样分层,分别采集 0~50、50~100、100~150、150~200 和 200~250m 水样。通过南海南部的浮游有孔虫分层垂直拖网的样品分析,结合海洋环境资料,尝试进一步探讨南海南部现代浮游有孔虫的区域分布特征及其影响因素。

1 材料和方法

本研究使用的研究材料来源于 2012 年 4 月中国科学院海洋研究所“科学一号”科考船在南海南部进行的科研航次(图 1),使用浮游生物拖网(德国 HydroBios 的 MultiNet 浮游生物分层拖网)采集了 6 个站位共 30 个上层海水垂直分层拖网样品(表 1),拖网网口面积 0.25m²,网眼直径 63 μ m。每个站位分 0~50、50~100、100~150、150~200 和 200~250m 五层进行采集。海水的温度、盐度通过浮游生物拖网自带的温盐探头实时获得。浮游拖网获得的样品被迅速转移到 1L 塑料瓶中,并加入适量虎红溶液(RoseBengal)染色,随后立即加入适量福尔马林溶液并低温保存。实验室中,使用湿式挑选

表 1 南海南部各站位采样信息

Table 1 Sampling information in the Southern South China Sea

站位	取样位置	取样日期和时间
DS10	7.2°N, 112.3°E	2012-05-08-21:01
DS17	7.2°N, 114.2°E	2012-04-20-16:16
DS19	7.2°N, 114.7°E	2012-04-21-10:39
DS13	6.7°N, 113.1°E	2012-05-04-17:14
DS02	6.4°N, 110.3°E	2012-05-03-01:17
DS15	5.6°N, 113.7°E	2012-04-25-13:30

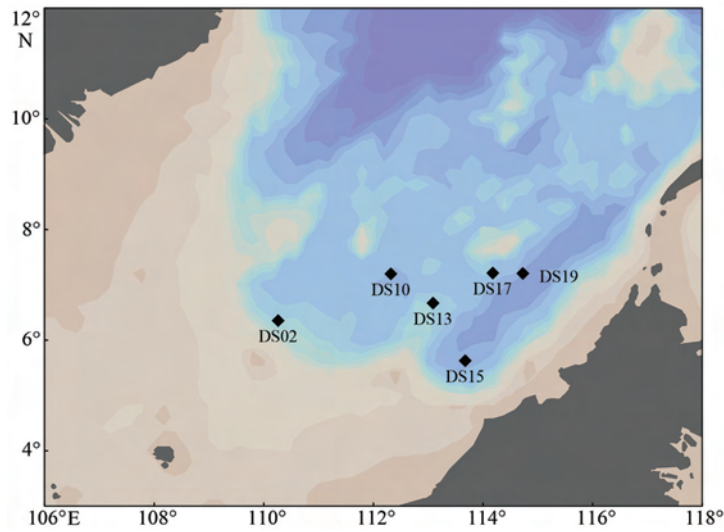


图1 南海南部采样站位分布图

Fig.1 Sampling locations in the Southern South China Sea

法将浮游拖网样品中被染为红色的浮游有孔虫个体全部挑出,进行属种鉴定并统计。根据统计结果计算浮游有孔虫属种组成和生物丰度。

2 结果

2.1 浮游有孔虫种属组成特征

对南海南部6个站位30个浮游生物拖网样品中的浮游有孔虫进行鉴定统计,共发现浮游有孔虫19种(图2)。其中优势种为 *Globigerinoides sacculifer*, *Globigerinoides ruber*, *Globigerinella calida*, *Globigerinella siphonifera*, *Globorotalia menardii*, *Orbulina universa*, *Neogloboquadrina dutertrei*, 相对百分含量分别为49.2%、19.2%、11.7%、4.1%、2.9%、2.4%和1.8%。其他12个

浮游有孔虫种属的相对百分含量共占8.7%,包括 *Globorotalia inflata*, *Candeina nitida*, *Globoturbotalita tenella*, *Pulleniatina obliquiloculata*, *Globigerina falconensis*, *Globoquadrina conglomerata*, *Hastigerina pelagica*, *Globigerina bulloides*, *Globigerinella adamsi*, *Globorotalia truncatulinoides*, *Neogloboquadrina incompta*, *Globigerinella glutinata* 等。这些浮游有孔虫中, *Globigerinoides sacculifer*, *Globigerinoides ruber*, *Globigerinella calida*, *Globigerinella siphonifera* 等优势种均为热带亚热带种属, *Globorotalia inflata*, *Globigerinella glutinata*, *Globigerina bulloides* 等相对百分含量较低的为过渡带种属。调查结果表明该区的浮游有孔虫是以热带暖水种为主的群落。在本研究中,常被用作黑潮指示种的 *Pulleniatina obliquiloculata* 的相对百分含量为1.1%。

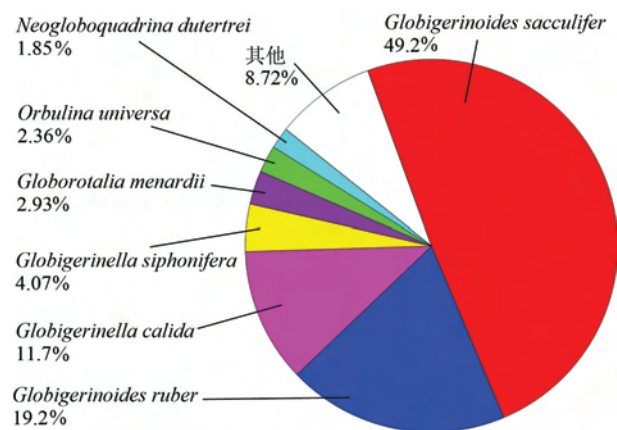


图2 调查区浮游有孔虫各种属百分含量

Fig.2 Relative abundances of planktonic foraminifera in the southern South China Sea

各站位浮游有孔虫的简单分异度(浮游有孔虫物种数)在 12~18 之间(图 3),与南海其他海域现代浮游有孔虫分异度数值相当^[21-23],研究海域西部的简单分异度略高于东部。

2.2 浮游有孔虫区域分布和垂直分布特征

根据各站位不同水层鉴定统计的浮游有孔虫数量,结合浮游拖网的采样水体体积,可以获得各站位浮游有孔虫单位体积的有孔虫丰度(inds·m⁻³)。南海南部海域各站位上层 0~250m 水体中的现代浮游有孔虫平均丰度具有明显的区域差异,其中 DS13 站位的 0~50m 水层出现最大值 44.08inds·m⁻³,DS10 和 DS02 站位的有孔虫丰度最大值为 10~20inds·m⁻³,其他站位的有孔虫丰度最大值均低于 10inds·m⁻³,呈现出斑状分布特征(图 4,图 5)。研究区域浮游有孔虫主要生活在上层 0~50m 水体中,随着水层逐渐变深,浮游有孔虫丰度逐渐降低。各站位的简单分异度为 12~18,DS10 和 DS13 的简单分异度最高,分别为 18 和 16,其他站位较低。各站位浮游有孔虫分布特征如下:

DS10 站位浮游有孔虫主要分布在上层 0~100m 水体中,共发现浮游有孔虫 18 种,以 *Globigerinoides sacculifer*、*Globigerinoides ruber* 和 *Globigerinella calida* 为优势种。其中 *Globigerinoides sacculifer* 和 *Globorotalia menardii* 主要分布在 0~50m 水层,*Globigerinoides ruber* 在 0~100m 均有较高生物丰度。*Globigerinella calida* 的高生物丰度主要出现在 50~100m 水层。其中 *Globigerinoides ruber*、*Globigerinoides sacculifer*、*Globigerinella calida*、*Globorotalia menardii*、*Globorotalia inflata*、*Neogloboquadrina dutertrei*、*Globigerinella siphonifera* 相对百分含量分别为 26.5%、24.4%、16.6%、9.2%、3.6%、3.0%。其他种属共占 13.6%。

DS17 站位浮游有孔虫主要分布在 0~50m 水层,共发现浮游有孔虫 13 种,以 *Globigerinoides sacculifer* 为优势种,其他种属相对丰度很低。其中 *Globigerinoides sacculifer*、*Globigerinoides ruber*、*Neogloboquadrina dutertrei*、*Globigerinella siphonifera*、*Globorotalia inflata*、*Candeina nitida* 相对百分含量分别为 61.7%、13.0%、6.1%、3.5%、3.5%、2.6%,其他种属共占 9.57%。

DS19 站位浮游有孔虫分布在 0~150m 水层,并在次表层的 50~100m 出现高生物丰度。共有浮游有孔虫 12 种,群落以 *Globigerinoides sacculifer*

为优势种,*Globigerinoides sacculifer* 的高生物丰度也出现在 50~100m 深度。*Globigerinoides sacculifer*、*Globigerinoides ruber*、*Neogloboquadrina dutertrei*、*Globigerinella calida*、*Candeina nitida*、*Orbulina universa*、*Pulleniatina obliquiloculata*、*Globigerinella siphonifera* 相对百分含量分别为 61.4%、16.6%、4.8%、3.4%、2.8%、2.8%、2.8%、2.1%,其他种属共占 3.45%。

DS13 站位浮游有孔虫主要分布在 0~50m 深度,共有浮游有孔虫 16 种,以 *Globigerinoides sacculifer*、*Globigerinoides ruber* 和 *Globigerinella calida* 为优势种。*Globigerinoides sacculifer*、*Globigerinella calida*、*Globigerinoides ruber*、*Globigerinella siphonifera*、*Orbulina universa* 相对百分含量分别为 55.6%、15.5%、13.9%、5.0%、2.2%,其他种属共占 7.69%。

DS02 站位的浮游有孔虫生物丰度较低,主要分布在 0~50m 水层,共有浮游有孔虫 14 种,以 *Globigerinoides sacculifer* 和 *Globigerinoides ruber* 为优势种。*Globigerinoides sacculifer*、*Globigerinoides ruber*、*Globigerinella calida*、*Globigerinella siphonifera*、*Orbulina universa* 相对百分含量分别为 58.0%、19.5%、6.3%、3.9%、2.4%,其他种属共占 9.76%。

DS15 站位的浮游有孔虫生物丰度较低,主要分布在 0~50m 水层,共有浮游有孔虫 14 种,以 *Globigerinoides sacculifer* 和 *Globigerinoides ruber* 为优势种。*Globigerinoides sacculifer*、*Globigerinoides ruber*、*Globigerinella calida*、*Globigerinella siphonifera*、*Candeina nitida* 相对百分含量分别为 38.0%、37.2%、5.4%、4.7%、3.1%,其他种属共占 11.63%。

整体来看,本研究区的 *Globigerinoides sacculifer* 主要分布在 DS13 站位和 DS02 站位的 0~50m 水深范围。*Globigerinoides ruber* 主要分布在 DS10、DS13、DS02 和 DS15 站位的 0~100m 水深范围。*Globigerinella calida* 主要分布在 DS13 和 DS10 站位的 0~100m 水深。*Globorotalia menardii* 主要分布在 DS10 站位的 0~50m 水深。研究发现,在古海洋学研究中常被用作黑潮指示种的 *Pulleniatina obliquiloculata* 在南海南部的站位(除 DS02)均以低生物丰度零星出现,主要分布在 50~150m 水层范围。作为深水种的 *Globorotalia menardii* 在 0~250m 水层范围均有分布,但主要集中在 0~50m 水层。另一深水种 *Globigerinella cali-*

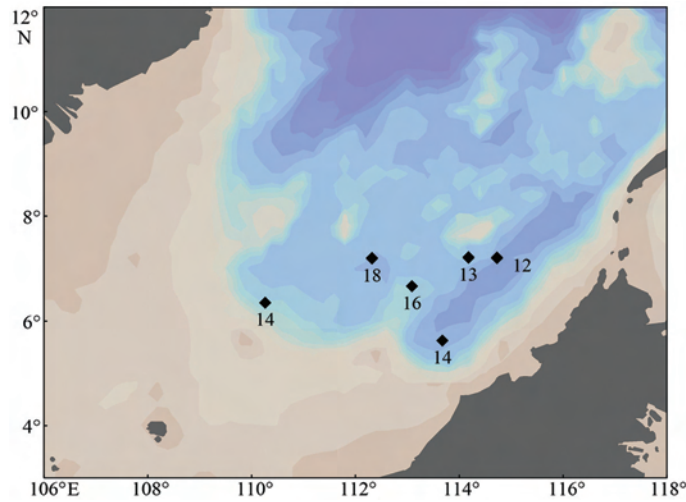


图3 调查区不同站位浮游有孔虫群落简单分异度

Fig.3 Simple diversity of planktonic foraminifera in each study station

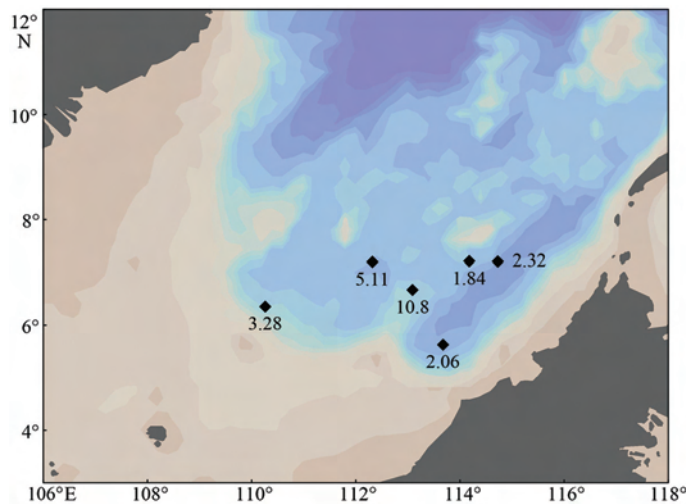


图4 调查区不同站位浮游有孔虫生物丰度(单位:inds·m⁻³)

Fig.4 Planktonic foraminifera abundance in each study station

在 DS10 站位生物丰度高值出现在 50~100m 水层,在其他站位生物丰度高值则出现在 0~50m 水层。

3 讨论

3.1 浮游有孔虫平均生物丰度受控因素

本文中研究站位现代浮游有孔虫平均生物丰度与崔喜江等得到的平均生物丰度值(2.9~22.4inds·m⁻³)接近,均远远低于南海北部和黑潮流域等海域的浮游有孔虫生物丰度^[2,21,22]。这恰好与调查时期南海南部上部水体异常稳定的水文特征相对应(根据航次工作日志的天气记录)。南海南部在区域

上属于亚洲季风区,冬季和夏季分别受到东亚冬季风和东亚夏季风的影响,但在春末夏初的时候,冬季风已经减弱,而夏季风尚未形成,因此季风的影响力变弱,使得海洋上部水体混合程度很弱^[24]。本研究中实测的温盐数据显示(图6),6个取样站点的温度、盐度随水深的变化相似,均表现为上层高温低盐、深层低温高盐的趋势,且混合层主要位于上层0~100m水深。基于 WOA2009 多年平均温盐等数据资料(图7),也呈现出类似状态,南海南部区域在4—6月之间整体呈现为水体层化状态^[25]。在水深1003m以浅为高温低盐的表层水,且伴随着低营养盐浓度。南沙海区多年沉积物捕获器研究显示,南海南部浮游有孔虫具有明显的季节变化,表现为

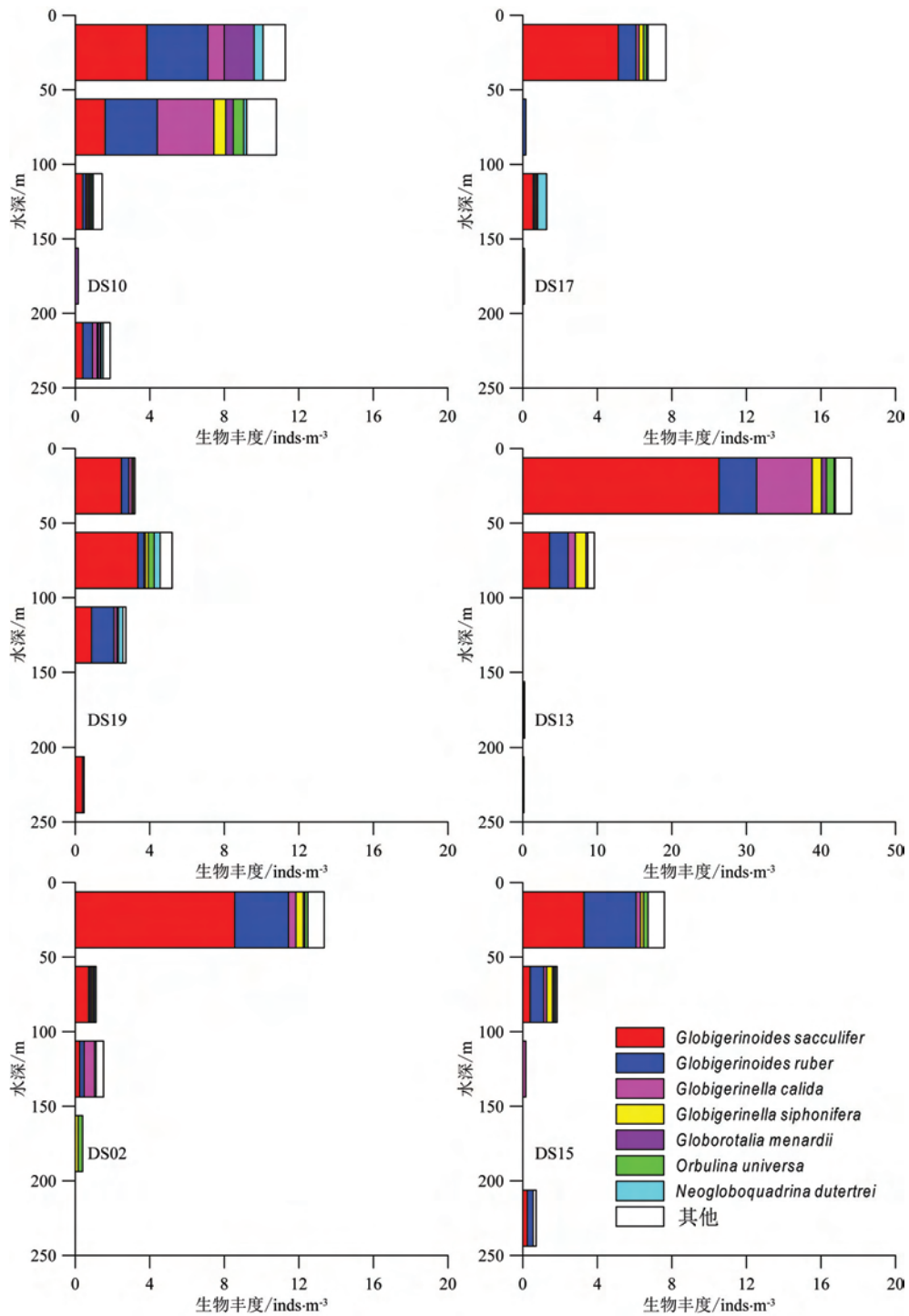


图 5 调查区不同站位浮游有孔虫常见种属垂直分布特征
(横坐标为研究站位浮游有孔虫生物丰度,纵坐标为浮游拖网取样深度,各种属丰度采用不同图例表示)

Fig.5 Vertical distribution of living planktonic foraminifera

X-axis denotes the abundance of planktonic foraminifera, and the Y-axis represents sampling depth.

The bars indicate the absolute abundance (individuals · m⁻³) of species

冬季风和夏季风盛行期出现有孔虫通量高值,在春末夏初的时期出现低值的典型特征^[26]。而本研究中,浮游有孔虫的采样时间正好在沉积物捕获器显示的浮游有孔虫低通量月份^[26]。

3.2 浮游有孔虫分布受控因素

浮游有孔虫的分布和生物丰度通常受到周遭环境的影响,如温度、盐度、水深和食物来源等。本研

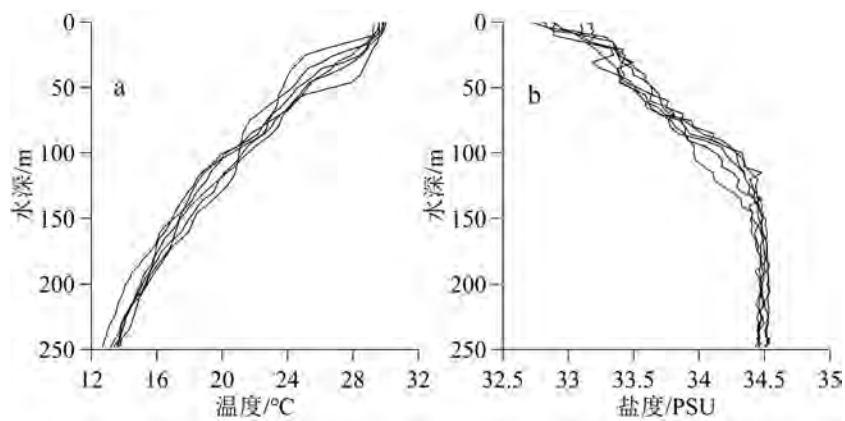


图6 各站位实测温盐数据(a.温度;b.盐度)

Fig.6 Temperature and salinity of sampling stations(a.temperature; b.salinity)

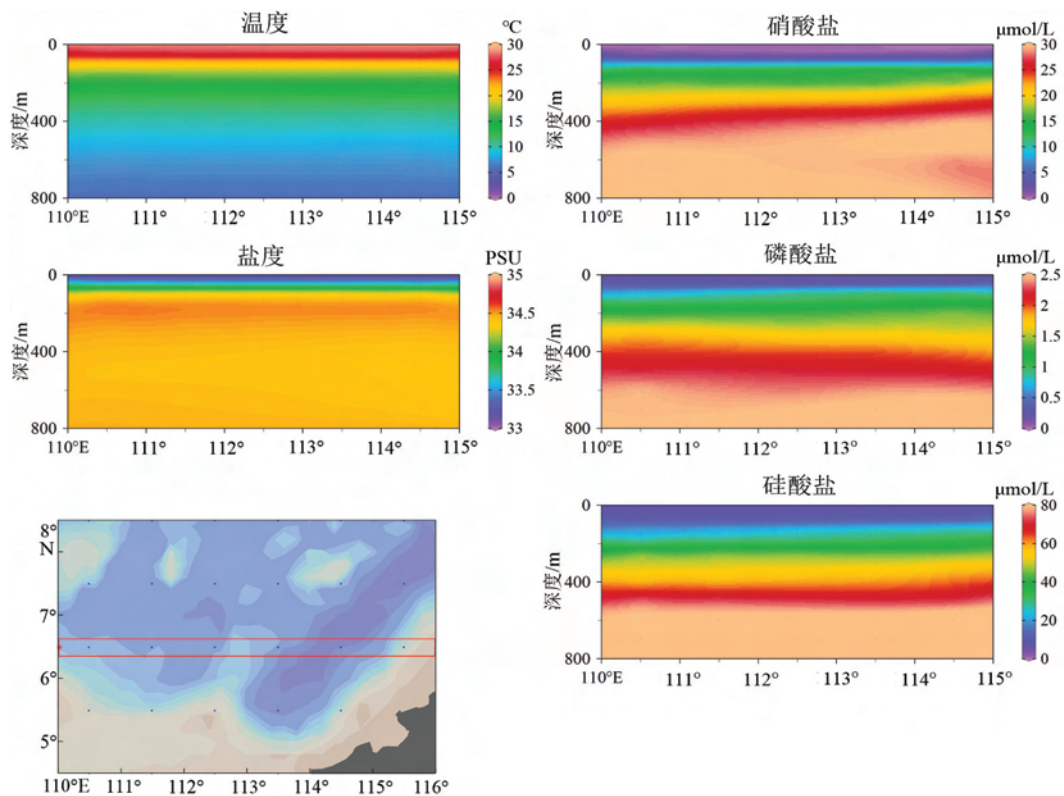


图7 基于 WOA2009 的环境参数剖面(纬度 6.5°N,使用 Ocean DataView 软件绘制)

Fig.7 Profiles of environmental conditions (temperature, salinity, nitrate, phosphate and silicate^[25] in April-June based on the WOA2009 (followthe 6.5°N section; created by Ocean Data View)

究中,调查站位的温度均较高,是典型的热带海域,而浮游有孔虫的优势种也以适于在高温水体中生活的热带亚热带种属为主。这与前人在南海北部和南沙海域进行的浮游有孔虫生态调查的结果一致^[21,22,27]。但由于各个站位在调查期间的温度盐度分布特征很接近,因此,认为海水温度并非是造成本次研究中浮游有孔虫站位之间分布差异的主要因素。

浮游有孔虫作为微体浮游动物,其分布特征除了受到温盐影响之外,还受到初级生产力、其他类群浮游动物等其他环境因子的影响。在同一调查航次开展的海洋上层水体悬浮体研究结果显示,可以把南海南部划分为不同水团进行研究^[28]。DS02、DS10 和 DS13 站位所在的研究区西部海域,被认为主要受到中南半岛沿岸混合水的控制,并受南沙中央表层水的影响。中南半岛混合水为研究区的表层

海水带来较丰富的营养物质,刺激了水团中浮游生物的生长,导致在海洋表层水体中有大量生源颗粒存在,而在深层水中悬浮体浓度迅速下降^[28]。在浮游拖网调查区域北部则受营养物质匮乏的南沙中央表层水控制,表现为以 100~500 μm 粒径的悬浮体颗粒为主(该粒径范围的生源颗粒主要以浮游动物为主),且主要集中在表层水体中。这与本研究 DS02、DS10、DS13 站位的浮游有孔虫分布特点有很好的对应关系,浮游有孔虫主要聚集在接近海水表面的 0~50m 层位中,并在 50m 以下生物丰度迅速下降。而在受苏禄海海水影响的研究海域东部站位,悬浮体以粒径较小的颗粒(该粒径范围的生源颗粒主要是硅藻甲藻等浮游植物)为主,大粒径悬浮体浓度很低^[28]。这也与本研究东部站位浮游有孔虫生物丰度较低的分布特征相对应。前人在南海南部进行的现代浮游有孔虫调查研究中,也显示出浮游有孔虫集中分布在 0~50m 水层,并有明显的西高东低这一典型分布特征^[21]。

以微体浮游植物为主体的海洋初级生产力,作为浮游有孔虫的一个重要食物来源,也对浮游有孔虫的区域分布有着重要的影响。以往的调查研究中,不论是从海洋遥感资料还是野外实地调查,均发现南海南部在春季属于叶绿素低值区,远远低于南海北部和爪哇海区域,并认为主要是受较低的陆源营养盐控制^[29,30]。针对海洋浮游植物的研究显示,南海南部西侧硅藻和甲藻生物丰度较高,而南海南部东侧硅藻和甲藻生物丰度较低^[31],并主要受到水团、环流等环境因子综合影响。前人对南海南部 2002 年获取的调查样品进行了浮游有孔虫和多孔放射虫分布特征调查研究,发现二者的水平分布均表现为在南海南部具有西高东低的特征,并且主要集中在海洋水体 0~50m 水深^[21,32]。结合叶绿素以及硅藻和甲藻在春季的特征,认为本研究区域的初级生产力在浮游有孔虫分布中具有重要的影响。

3.3 常见深水种垂向分布特征

次表层种 *Pulleniatina obliquiloculata* 常被用作黑潮指示种,其高生物丰度主要出现在黑潮流域和墨西哥暖流区^[33,34]。*Pulleniatina obliquiloculata* 无论是生物丰度还是相对百分含量,在南海南部都处于很低的水平。本研究中的 *Pulleniatina obliquiloculata* 相对百分含量为 1.1%,与崔喜江等的研究结果相当,远远低于南海北部和黑潮流域的百分含量^[21,22,35]。虽然 *Pulleniatina obliquilocula-*

ta 是常见深水种,其在垂直分布上,从表层到 250m 的水深范围均有少量出现,但高生物丰度主要出现在 50~150m 水层,这与在南海北部以及西菲律宾海的调查结果相一致^[35,36]。

Globorotalia menardii 作为深水种,其在南海南部以及西太海域主要生活在水深 50~150m 的水层中^[35,36]。有趣的是,在本研究中 *Globorotalia menardii* 主要生活水深为 0~50m。前人在南沙海域发现过类似的调查结果,并认为出现在 0~50m 范围内主要是个体较小的 *Globorotalia menardii* 幼体,分布水深与其生活史中的垂向转移有关^[21]。但本文在进行属种鉴定与统计时,并未统计 *Globorotalia menardii* 幼体和成体的比例,因此,无法确定幼体比例对 *Globorotalia menardii* 分布水深的影

响程度。目前对于南海南部浮游有孔虫的区域分布和垂直分布特点,相关的野外调查研究还很缺乏。尤其是垂直分布特点的研究,由于受科研航次和科研设备的限制,尚未得到广泛开展。目前已有的两次调查(崔喜江等^[21]和本研究)均是在 4—5 月进行,因此在其他季节该研究区域浮游有孔虫的垂直分布是不是也主要集中在海洋表层 0~50m 水深范围内?这需要更多不同季节的野外调查来完善。

4 结论

(1)南海南部上层水体中共鉴定出浮游有孔虫 19 种,其中优势种为 *Globigerinoides sacculifer*, *Globigerinoides ruber*, *Globigerinella calida*, *Globigerinella siphonifera*, *Globorotalia menardii*, *Orbulina universa*, *Neogloboquadrina dutertrei*, 百分含量分别为 49.2%、19.2%、11.7%、4.1%、2.9%、2.4% 和 1.8%。热带西太平洋古海洋学研究中常用的 *Pulleniatina obliquiloculata* 也出现在南海南部的水体中,相对百分含量为 1.1%,在除 DS02 之外的其他站位均有少量分布。浮游有孔虫属种组成整体上为热带亚热带群落的特征。浮游有孔虫生物丰度与北赤道流区域的生物丰度水平相当,符合南海南部海域低营养盐的特征。

(2)浮游有孔虫在 0~250m 水深整体表现为西高东低的区域分布特征,这可能与上层水体的营养物质水平有关。在垂直分布上,浮游有孔虫主要集中在上层 0~50m 水深范围内,50~250m 水深浮游有孔虫生物丰度迅速降低。

(3)浮游有孔虫的分布主要受到水体层化、初级

生产力和海水悬浮体等的影响。南海南部的浮游有孔虫分布特征,是多方面环境因子综合作用的结果。

(4)南海南部的浮游有孔虫在春末夏初表现出集中分布在0~50m水深范围的特征,如*Globorotalia menardii*等典型的深层水种也表现为集中分布于0~50m深度,目前对其他季节浮游有孔虫垂直分布特征尚不明确。要深入研究浮游有孔虫的垂直分布特征和影响因素,还需要更多针对不同季节的野外调查研究。

致谢:感谢“科学一号”科考船的全体船员和科考船队的支持。

参考文献(References)

- [1] Schiebel R. Planktic foraminiferal sedimentation and the marine calcite budget[J]. *Glob. Biogeochem. Cycle*, 2002, 16: 1-21.
- [2] Kuroyanagi A, Kawahata H. Vertical distribution of living planktonic foraminifera in the seas around Japan[J]. *Marine Micropaleontology*, 2004, 53: 173-196.
- [3] Manno C, Pavlov A. Living planktonic foraminifera in the Fram Strait (Arctic): absence of diel vertical migration during the midnight sun[J]. *Hydrobiologia*, 2014, 721: 285-295.
- [4] Kucera M. Planktonic foraminifera as tracers of past oceanic environments[J]. *Developments in Marine Geology*, 2007, 1: 213-262.
- [5] Pflaumann U, Jian Z. Modern distribution patterns of planktonic foraminifera in the South China Sea and western Pacific: A new transfer technique to estimate regional sea-surface temperatures[J]. *Marine Geology*, 1999, 156: 41-83.
- [6] Darling K F, Kucera M, Pudsey C J, et al. Molecular evidence links cryptic diversification in polar planktonic protists to Quaternary climate dynamics[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101: 7657-7662.
- [7] Chen M T, Wang C H, Huang C Y, et al. A late Quaternary planktonic foraminifer faunal record of rapid climatic changes from the South China Sea[J]. *Marine Geology*, 1999, 156: 85-108.
- [8] Xiang R, Chen M, Li Q, et al. Planktonic foraminiferal records of East Asia monsoon changes in the southern South China Sea during the last 40000 years[J]. *Marine Micropaleontology*, 2009, 73: 1-13.
- [9] Katz M E, Cramer B S, Franzese A, et al. Traditional and emerging geochemical proxies in foraminifera[J]. *Journal of Foraminiferal Research*, 2010, 40: 165-192.
- [10] Mix A C, Morey A E, Pisias N G, et al. Foraminiferal faunal estimates of paleotemperature: Circumventing the no-analog problem yields cool ice age tropics[J]. *Paleoceanography*, 1999, 14: 350-359.
- [11] Barker S, Elderfield H. Foraminiferal calcification response to glacial-interglacial changes in atmospheric CO₂[J]. *Science*, 2002, 297: 833-836.
- [12] Bijma J, Spero H, Lea D. Reassessing foraminiferal stable isotope geochemistry: Impact of the oceanic carbonate system (experimental results)[C]// Fischer G, Wefer G, eds. *Use of proxies in paleoceanography-Examples from the South Atlantic*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1999: 489-512.
- [13] Foster G. Seawater pH, pCO₂ and [CO₃²⁻] variations in the Caribbean Sea over the last 130 kyr: a boron isotope and B/Ca study of planktic foraminifera[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 271: 254-266.
- [14] Hall J M, Chan L H. Ba/Ca in *Neogloboquadrina pachyderma* as an indicator of deglacial meltwater discharge into the western Arctic Ocean[J]. *Paleoceanography*, 2004, 19(1), doi:10.1029/2003PA000910.
- [15] Moy A D, Howard W R, Bray S G, et al. Reduced calcification in modern Southern Ocean planktonic foraminifera[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2: 276-280.
- [16] Russell A D, Hönisch B, Spero H J, et al. Effects of seawater carbonate ion concentration and temperature on shell U, Mg, and Sr in cultured planktonic foraminifera[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68: 4347-4361.
- [17] Weinkauf M F G, Kunze J G, Wanek J J, et al. Seasonal variation in shell calcification of planktonic foraminifera in the NE Atlantic reveals species-specific response to temperature, productivity, and optimum growth conditions[J]. *Plos One*, 2016, 11: e0148363.
- [18] Weldeab S, Lea D W, Schneider R R, et al. 155000 years of West African monsoon and ocean thermal evolution[J]. *Science*, 2007, 316: 1303-1307.
- [19] Yu J, Elderfield H. Benthic foraminiferal B/Ca ratios reflect deep water carbonate saturation state[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 258: 73-86.
- [20] Bé A W H. An ecological, zoogeographic and taxonomic review of recent planktonic foraminifera[M]// Ramsay A T S. *Oceanic Micropaleontology*. London: Academic Press, 1977.
- [21] 崔喜江, 向荣, 郑范, 等. 南海南部活体浮游有孔虫分布特征及其影响因素初探[J]. *热带海洋学报*, 2006, 25: 25-30. [CUI Xijiang, XIANG Rong, ZHENG Fan, et al. A preliminary study of living planktonic foraminifera distribution and its affecting factors in southern South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*. 2006, 25: 25-30.]
- [22] 向荣, 陈木宏, 张兰兰, 等. 南海北部秋季活体浮游有孔虫的组成与分布[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2010(1): 10. [XIANG Rong, CHEN Muhong, ZHANG Lanlan, et al. Compositions and distribution of living planktonic foraminifera in Autumn waters of the Northern South China Sea [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2010(1): 10.]
- [23] 罗琼一, 金海燕, 翦知潜, 等. 南海现代浮游有孔虫的垂直分布及其古海洋学意义[J]. *第四纪研究*, 2015, 35: 1342-1353. [LUO Qiongyi, JIN Haiyan, JIAN Zhimin, et al. Vertical distribution of living planktonic foraminifera in the northern

- South China Sea and its paleoceanographic implications [J]. *Quaternary Sciences*, 2015, 35: 1342-1353.]
- [24] 方文东, 黄企洲, 邱章, 等. 春夏季风转换期南海南部的异常表层水 [J]. *热带海洋学报*, 2001, 20: 77-81. [FANG Wendong, HUANG Qizhou, QIU Zhang, et al. Anomalous sea surface water in southern South China Sea during spring to summer monsoon transition [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2001, 20: 77-81.]
- [25] Garcia H, Locarnini R, Boyer T, et al. Nutrients (Phosphate, Nitrate, Silicate) [M]//World Ocean Atlas. US Gov. Printing Office, Washington, DC, 2010:71.
- [26] 万随, 翦知潜, 成鑫荣, 等. 南沙海区浮游有孔虫通量及其壳体化学性质的季节变化 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40: 881-892. [WAN Sui, JIAN Zhimin, CHENG Xinrong, et al. Seasonal variations in planktonic foraminiferal flux and the chemical properties of their shells in the southern South China Sea [J]. *Science China: Earth Science*, 2010, 40: 881-892.]
- [27] Lin H L, Hsieh H Y. Seasonal variations of modern planktonic foraminifera in the South China Sea [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2007, 54: 1634-1644.
- [28] 张凯南, 王珍岩, 王保铎. 2012 年春季南海南部不同水团上层海水中悬浮体分布特征及其物源分析 [J]. *海洋科学*, 2014, 38 (3): 26-36. [ZHANG Kainan, WANG Zhenyan, WANG Baoduo. Distribution characteristic and provenance of suspended matter in upper water of the southern South China Sea during the spring of 2012 [J]. *Marine Sciences*, 2014, 38 (3): 26-36.]
- [29] 柯志新, 黄良民, 李刚, 等. 春末夏初巽他陆架表层水体的叶绿素粒级结构及其和营养盐的关系 [J]. *海洋学报*, 2012, 34: 190-196. [KE Zhixin, HUANG Liangmin, LI Gang, et al. Size structure of chlorophyll a in relation to environmental factors in surface waters of Sunda shelf during late spring and early summer [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34: 190-196.]
- [30] 赵辉, 齐义泉, 王东晓, 等. 南海叶绿素浓度季节变化及空间分布特征研究 [J]. *海洋学报*, 2005, 27 (4): 45-52. [ZHAO Hui, QI Yiquan, WANG Dongxiao, et al. Study on the features of chlorophyll-a derived from SeaWiFS in the South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27 (4): 45-52.]
- [31] 朱根海, 宁修仁, 蔡昱明, 等. 南海浮游植物种类组成和丰度分布的研究 [J]. *海洋学报*, 2003, 25: 8-23. [ZHU Genhai, NING Xiuren, CAI Yuming, et al. Studies on species composition and abundance distribution of phytoplankton in the South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 25: 8-23.]
- [32] 张兰兰, 陈木宏, 陆钧, 等. 南海南部上层水体中多孔放射虫的组成与分布特征 [J]. *热带海洋学报*, 2005, 24: 55-64. [ZHANG Lanlan, CHEN Muhong, LU Jun, et al. Living polycystine radiolarian fauna in upper water column of southern South China Sea and its distribution [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2005, 24: 55-64.]
- [33] Li B H, Jian Z M, Wang P X. Pulleniatina obliquiloculata as a paleoceanographic indicator in the southern Okinawa Trough during the last 20000 years [J]. *Marine Micropaleontology*, 1997, 32(1-2): 59-69.
- [34] 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.
- [35] An B, Li T, Liu J, et al. Spatial distribution and controlling factors of planktonic foraminifera in the modern western Pacific [J]. *Quaternary International*, 2018, 468: 14-23.
- [36] 万随, 翦知潜, 成鑫荣. 赤道西太平洋冬季浮游有孔虫分布与壳体同位素特征 [J]. *第四纪研究*, 2011, 31: 284-291. [WAN Sui, JIAN Zhimin, CHENG Xinrong. Distribution of winter living planktonic foraminifera and characteristics to their shell's stable isotopic in the western equatorial Pacific [J]. *Quaternary Sciences*, 2011, 31: 284-291.]