

doi: 10.3799/dqkx.2010.001

南海北部秋季活体浮游有孔虫的组成与分布

向 荣, 陈木宏, 张兰兰, 陆 钧, 陈 忠, 古森昌

中国科学院边缘海地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广东广州 510301

摘要: 对 2004 年 9 月采自南海北部海区 19 个站位 40 个垂直浮游拖网样品中的活体浮游有孔虫进行了定量分析, 探讨了该区秋季现代有孔虫的组成、分布及其影响因素。研究表明, 该区秋季现代浮游有孔虫以热带暖水群落为主, 呈现出明显的区域变化。浮游有孔虫的丰度主要呈西北高、东南低的分布格局。浅层水种 *G. sacculifer* 和 *G. ruber* 的高含量主要出现在近岸带; *N. dutertrei* 的高含量主要出现在外陆架和陆坡区域; *G. menardii* 的高含量主要出现在深水区域; *G. calida* 和 *G. aequilateralis* 两水种的含量分布有明显的相似性, 主要出现在深水区。在越南岸外站位其含量远高出区域其他站位。研究认为, 南海北部秋季水体浮游有孔虫的分布主要受初级生产力和水深的共同制约, 高初级生产力水平下浮游有孔虫的丰度明显要高, 水深则对中深层水种 *G. menardii*、*G. calida* 和 *G. aequilateralis* 的分布有明显的制约作用。南海北部秋季温跃层的温盐结构对中层水种 *N. dutertrei*、*G. glutinata*、*G. calida* 和 *G. aequilateralis* 的分布有一定的影响。此外, 暖涡水体对浮游有孔虫的丰度和组成也有明显影响, 位于暖涡中心区的浮游有孔虫丰度明显增高, 特征属种 *G. sacculifer* 的含量明显高出周边站位。*P. obliquiloculata* 的高含量主要出现在东北部黑潮分支影响区。

关键词: 南海北部; 浮游拖网; 浮游有孔虫; 暖涡; 海洋学。

中图分类号: Q91; P736.2

文章编号: 1000—2383(2010)01—0001—10

收稿日期: 2009—05—25

Compositions and Distribution of Living Planktonic Foraminifera in Autumn Waters of the Northern South China Sea

XIANG Rong, CHEN Mu-hong, ZHANG Lan-lan, LU Jun, CHEN Zhong, GU Sen-chang

Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

Abstract Living planktonic foraminifera have been quantitatively analyzed on 40 plankton tow samples which were collected from 19 sites in the northern South China Sea (SCS) in September, 2004. The affecting factors on the distribution and compositions of foraminiferal faunal are then discussed. The results indicate that most foraminifera occurred in the autumn northern SCS are tropical warm water species, which apparently shows a regional distribution. The abundance of living foraminifera forms a general pattern with high abundance occurring in the northwest and relatively low values in the southeast of the studied area. The relative abundances of shallow water species *G. sacculifer* and *G. ruber* show high values near the coast area, and *N. dutertrei* are mainly distributed on the outer shelf and slope, and the high percentage of *G. menardii* mainly appeared at the southeast deep water area. *G. calida* and *G. aequilateralis* show similar distribution pattern, with high percentage at the deep water sites. Both of them show especial high values at the southernmost site off Vietnam. Our study suggests that the regional distribution of living planktonic foraminifera in the autumn northern SCS is mainly controlled by the combined impacts of primary productivity and water depth. High abundance usually appeared under high primary productivity area, and water depth also plays an important role on the distribution of subsurface dwelling species. The thickness, temperature and salinity of the mixed layer have no significant relationship with the distribution of living foraminifera in the autumn northern SCS, but the temperature and salinity structure of the lysocline do show significant relationship with the distribution of some subsurface dwelling species such as *N. dutertrei*, *G. glutinata*, *G. calida* and *G. aequilateralis*. In addition, the abundance of foraminifera is ap-

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 40676042, 40631007); 国家重点基础研究发展计划“973”项目(No. 2007CB815905); 中国科学院知识创新工程项目(Nos. KZCX2-YW-228, KZCX2-YW-211); 中国科学院南海海洋研究所知识创新工程领域前沿项目(No. LYQY200704)。

作者简介: 向荣(1972—), 男, 研究员, 主要从事微体古生物与海洋沉积古环境研究。E-mail: rxiang@scsio.ac.cn

©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

parently higher in the warm eddies, with particularly higher percentage of *G. sacculifer*, than its adjacent sites which suggests that warm eddy also has a significant influence on the distribution of planktonic foraminifera. *P. obliquiloculata* is only abundant in the northeastern part of the studied area which is affected by the branches of Kuroshio.

Key words: northern South China Sea; plankton tow; planktonic foraminifera; warm eddy; oceanography.

浮游有孔虫是广泛分布于海洋中的一类钙质微体生物,死后其壳体沉降海底,成为海洋沉积物的重要组成部分.目前浮游有孔虫分析已成为古海洋学、古气候学研究的重要手段之一.在南海的古海洋环境研究中,许多古海洋环境重建工作是以传统的浮游有孔虫种群分析及其特征种属的地球化学分析为基础(Pflaumann and Jian, 1999; Wang *et al.*, 1999; Li *et al.*, 2005; Xu *et al.*, 2005; 李前裕等, 2006, 2008),然而这些研究工作的浮游有孔虫生态学基础多是基于表层沉积物中浮游有孔虫的分布研究或其他海区的浮游有孔虫生态资料,对于南海现代水体中的浮游有孔虫生态及其与海洋环境要素之间关系的研究却相对较少.由于全球不同海区的浮游有孔虫生态有各自的地域特征,详细了解南海浮游有孔虫的环境生态特征及其海洋环境影响因素有重要意义.近年来,随着高分辨率古海洋环境研究的不断进展,南海浮游有孔虫的环境生态研究也逐渐受到重视.通过沉积物捕获器样品分析,陈荣华等(2000, 2006)对南海中部浮游有孔虫的季节性变化和通量变化进行研究,并对捕获到的浮游有孔虫、碳同位素进行了分析(成鑫荣等, 2002). Lin *et al.* (2004)和 Lin and Hsieh(2007)通过南海北部的沉积物捕获器及水平拖网对该区的浮游有孔虫季节性变化和氧碳同位素进行了研究.浮游有孔虫垂直拖网是研究现代浮游有孔虫生态的重要途径之一,然而在南海这方面的研究却相对缺乏,与沉积物捕获器相比,该方法在大区域范围内研究浮游有孔虫的分布及其垂直生活习性方面具有明显优势(Kuroyanagi and Kawahata, 2004).因此,本文拟通过南海北部 19 个站位的浮游有孔虫垂直拖网样品的定量分析,结合该区海洋环境资料,对该区的秋季活体浮游有孔虫分布特征及其影响因素进行初步探讨.

1 材料和方法

研究材料来源于 2004 年 9 月中国科学院南海海洋研究所“实验 3 号”船首次执行南海北部开放航次科学调查期间所取得的浮游有孔虫垂直分层拖网样品.样品使用小型浮游生物拖网获取,网口直径

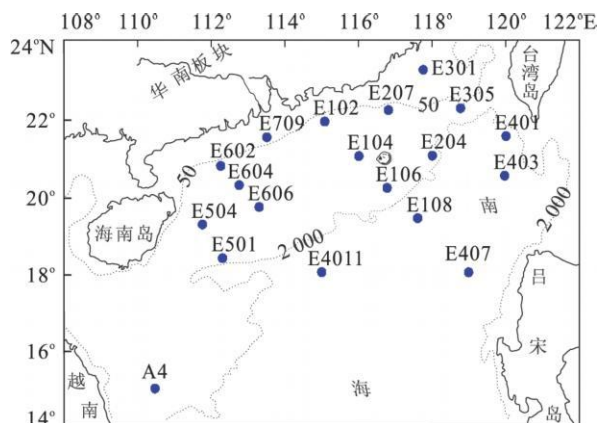


图 1 表层水体浮游拖网采样站位

Fig. 1 Location map for plankton tow samples collected in this study

37 cm, 网眼直径 77 μm , 每个站位分 0 ~ 75 m、0 ~ 150 m 和 0 ~ 250 m 三层进行采集,部分水深较浅站位则按两层或一层进行采集.在 19 个站位(图 1)共取得 40 个拖网样品(表 1),同时进行 CTD 数据的现场观测.

拖网样品用 5% 的福尔马林固定液保存,带回实验室内,经 125 μm 的标准网筛冲洗去盐,然后在实体显微镜下把所有大于 125 μm 的浮游有孔虫个体全部挑出,鉴定并统计,根据统计结果计算了各站位的浮游有孔虫丰度及浮游有孔虫属种的相对百分含量.

2 结果

2.1 浮游有孔虫的种群结构

对南海北部 19 个站位 40 个拖网样品中的浮游有孔虫的鉴定统计共发现 16 种,其中平均百分含量占样品总数 4% 以上的优势属种有 8 种,分别为 *Globigerinoides sacculifer*, 占 29.7%, *Neoglobobulimina dutertrei*, 占 18.2%, *Globigerinoides ruber*, 占 14.6%, *Globorotalia menardii*, 占 9.9%, *Globigerina calida*, 占 9.1%, *Globigerinella aequilateralis*, 占 4.7%, *Globigerina glutinata*, 占 4.3%, *Pulleniatina obliquiloculata*, 占 4.1%. 以上 8 种优势分子占该区浮游有孔虫总群落的 94.7%,

表 1 取样站位经纬度、水深、拖网层次及取样时间

Table 1 Geographic location (latitude, longitude, water depth) of the investigated samples, tow depth and sampling time

站位	经度	纬度	水深(m)	浮游拖网水层(m)	取样时间(2004 年)
E102	115°04.340'E	21°53.628' N	71	0~65	9 月 18 日 19 时
E104	116°00.117'E	21°00.155' N	326	0~75, 0~150, 0~250	9 月 19 日 03 时
E106	116°46.150'E	20°10.850' N	847	0~75, 0~150, 0~250	9 月 19 日 12 时
E108	117°36.047'E	19°23.925' N	3 553	0~75, 0~150, 0~250	9 月 20 日 00 时
E204	117°59.884'E	21°00.876' N	1 576	0~75, 0~150, 0~250	9 月 20 日 15 时
E207	116°48.301'E	22°11.416' N	66	0~60	9 月 21 日 10 时
E301	117°45.106'E	23°13.830' N	43	0~35	9 月 21 日 20 时
E305	118°45.861'E	22°14.338' N	147	0~75	9 月 22 日 05 时
E401	120°00.245'E	21°31.126' N	3 010	0~75, 0~150, 0~250	9 月 22 日 14 时
E403	119°57.862'E	20°29.763' N	3 347	0~75, 0~150, 0~250	9 月 22 日 23 时
E407	118°59.044'E	17°59.987' N	4 140	0~75, 0~150, 0~250	9 月 23 日 18 时
E4011	114°59.510'E	18°00.306' N	3 708	0~75, 0~150, 0~250	9 月 24 日 12 时
A4	110°27.587'E	14°59.980' N	737	0~75, 0~150, 0~250	9 月 26 日 21 时
E501	112°17.774'E	18°21.922' N	1 564	0~75, 0~150, 0~250	9 月 30 日 00 时
E504	111°45.022'E	19°14.181' N	129	0~75	10 月 01 日 08 时
E602	112°14.748'E	20°44.947' N	65	0~60	10 月 01 日 19 时
E604	112°44.905'E	20°15.106' N	95	0~75	10 月 01 日 23 时
E606	113°17.461'E	19°41.306' N	202	0~75, 0~150	10 月 02 日 02 时
E709	113°30.050'E	21°29.340' N	42	0~40	10 月 03 日 14 时

与 Lin and Hsieh(2007)根据 100 m 水平拖网得出的南海北部暖季(5~10 月)浮游有孔虫优势种群基本一致.其他在个别站位零星出现的低含量属种有 *Globigerinoides conglobatus*、*Orbulina uinversa*、*Hastigerina pelagica*、*Globigerina rubescens*、*Globigerinoides tenellus*、*Globigerina bulloides*、*Globorotalia scitula* 和 *Candeina nitida* .

各站位浮游有孔虫的简单分异度在 6~14 之间,与南海南部 5 月的分异度数值相当(崔喜江等, 2006),在近岸浅水区和东南部深水区相对较低,其他区域相对较高(图 2a).由于活体浮游有孔虫高丰度主要出现在 100 m 以上的水层,向下生活丰度急剧降低(徐学东等, 1999),为了便于对比向沉积物中输送的浮游有孔虫壳体通量,本文计算了各站位浮游有孔虫的面积生活丰度(枚/m²),其中深水站位据 0~250 m 层数据计算.从图 2b 可以看出,浮游有孔虫的面积生活丰度有明显的区域变化,介于 241~2 177 枚/m².该区浮游有孔虫的丰度与简单分异度的分布格局基本一致,在近岸浅水区 E301、E709 和 E602 站丰度较低,在近河口 E102 和 E207 站则明显增高.在区域的东南部为另一个浮游有孔虫丰度低值区(E403 站除外).在近海南岛的西部区域浮游有孔虫丰度明显增加(图 2b).0~75 m 水层的浮游有孔虫体积丰度显示除远离河口的 E301 和 E602 近岸站较低外,整体上呈西北高、东南低的分布格局

(图 2c).
从深水站几个层位浮游有孔虫的数量(枚/样品)来看,0~150 m 样品中的有孔虫数量显著比同站位 0~75 m 中的要高,反映了 75~150 m 有较多的中层水分子,但是 0~250 m 有孔虫数量相对同站位 0~150 m 相差不大,表明分布在 150~250 m 层位的浮游有孔虫非常稀少(图 3).0~150 m 比 0~75 m 浮游有孔虫数量的增加主要体现在 *N. dutertrei*、*G. menardi*、*G. calida* 和 *G. aequilateralis* 属种上,表明它们在南海北部秋季主要生活在次表层水体中.它们具体的水层生活习性有待于进一步细致的水体分层拖网采样研究.

2.2 优势属种的分布特征

图 4 显示了 8 个主要的典型优势属种的相对百分含量分布(根据各站位深层拖网计算). *G. sacculifer* 和 *G. ruber* 是典型的热带和亚热带浅层水分子,主要生活在 50 m 水层以上(Bé, 1977).这两个种在本区所有站位均有分布,外表有明显的壳刺,其中 *G. sacculifer* 的含量普遍比 *G. ruber* 要高,与南海北部 100 m 拖网得出的夏季有孔虫组成较一致(Lin and Hsieh, 2007).这两个属种在同站位 0~75 m、0~150 m 和 0~250 m 的个体数基本相差很小,表明它们在秋季南海北部主要生活在 0~75 m 水层中. *G. sacculifer* 的百分含量也在近岸浅水区最高,随水深增加含量逐渐降低,但在东南部深水区域含量

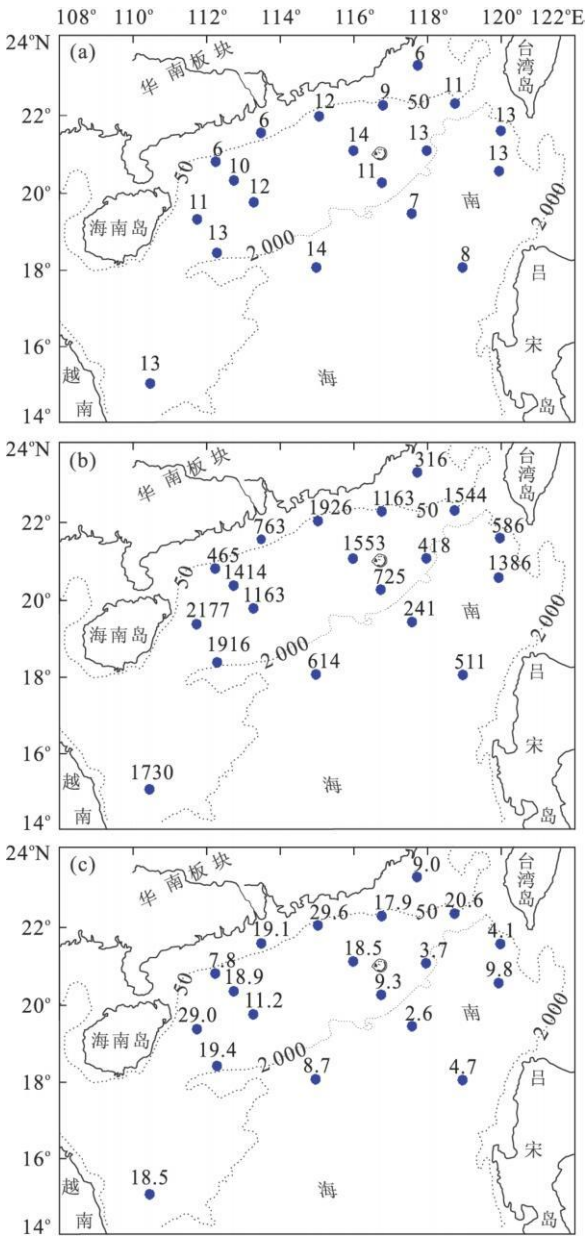


图 2 南海北部秋季表层水体浮游有孔虫简单分异度(a)和丰度分布(b, c)

Fig. 2 Distributions of simple diversity (a) and abundances (b, c) of planktonic foraminifera in autumn surface waters of the northern South China Sea

各站上方数字分别为: a. 浮游有孔虫种数; b. 浮游有孔虫平面丰度(枚/ m², 深水站据 0~250 m 层数据计算); c. 浮游有孔虫体积丰度(枚/ m³, 据 0~75 m 层数据计算); 单位: m

又迅速回升(图 4a). *G. ruber* 的百分含量在近岸处最高, 随水深的增加含量迅速降低(图 4b).

N. dutertrei 和 *G. menardii* 均为无壳刺的浮游有孔虫分子, 其中前者主要生活在次表层水体中, 在温跃层通常丰度最高(Fairbanks *et al.*, 1982; Curry *et al.*, 1983), 后者则被认为是生活在 100 m

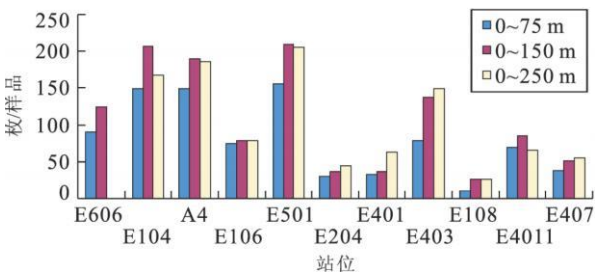


图 3 深水站位不同拖网层的有孔虫数量对比

Fig. 3 Comparison of foraminiferal numbers in 3 different plankton tow layers from the deep water sites

以下的深层水种(Bé, 1977). *N. dutertrei* 的百分含量在近岸浅水区和东南部深水区域含量均较低, 在最东南的 E407 站位含量为 0, 其高含量主要出现在外陆架和陆坡区(图 4c). *G. menardii* 的百分含量具有明显的随水深变化增加的趋势, 在近岸浅水区含量为 0, 随水深增加含量迅速增加, 在东南部深水区域含量最高(图 4d). 该种的含量在南海中部的拖网研究中被认为高丰度主要出现在冬季东北季风盛行期(陈荣华等, 2000, 2006), 但在南海北部的 100 m 层的水平拖网研究中, 却认为该种的高含量主要出现在暖月份(6~8 月)(Lin and Hsieh, 2007), 这种认识差异可能是由于点和面的区域差异造成的, 有待于进一步研究.

具壳刺的 *G. aequilateralis* 在热带和亚热带水体里面普遍存在, 该种主要出现在 50~100 m 水深范围, 被认为是中层水分子(Bé, 1977; Hemleben and Spindler, 1983). 在南海北部, *G. calida*、*H. Pelagica* 和 *G. aequilateralis* 3 种有孔虫具有相似的分布, 这 3 种有孔虫外形也较相似, 其中 *G. calida* 以较松散的房室为特征, 在南海北部秋季水体的含量比 *G. aequilateralis* 高, *H. Pelagica* 的含量相对很低. 它们的水层分布与 *N. dutertrei* 较相似, 在 75~150 m 水层仍有一定量分布. 其中 *G. calida* 和 *G. aequilateralis* 的百分含量分布有较好的相似性($r^2=0.68$), 在近岸浅水区含量较低, 其高含量主要出现在外陆架和陆坡区. 在最西南的越南岸外 A4 站位, 该两种成为该站的绝对优势分子, 含量占该站总种群的 48%, 远远高出南海北部其他站位(图 4e, 4f). 这一特征也同样证实了 Lin and Hsieh (2007) 的发现, 南海 18°~14°N 的 3 个站位夏季 *G. aequilateralis* 的含量同样达到 50% 左右, 与南海北部 18°N 以北区域明显不同.

P. obliquiloculata 通常被认为是典型的热带

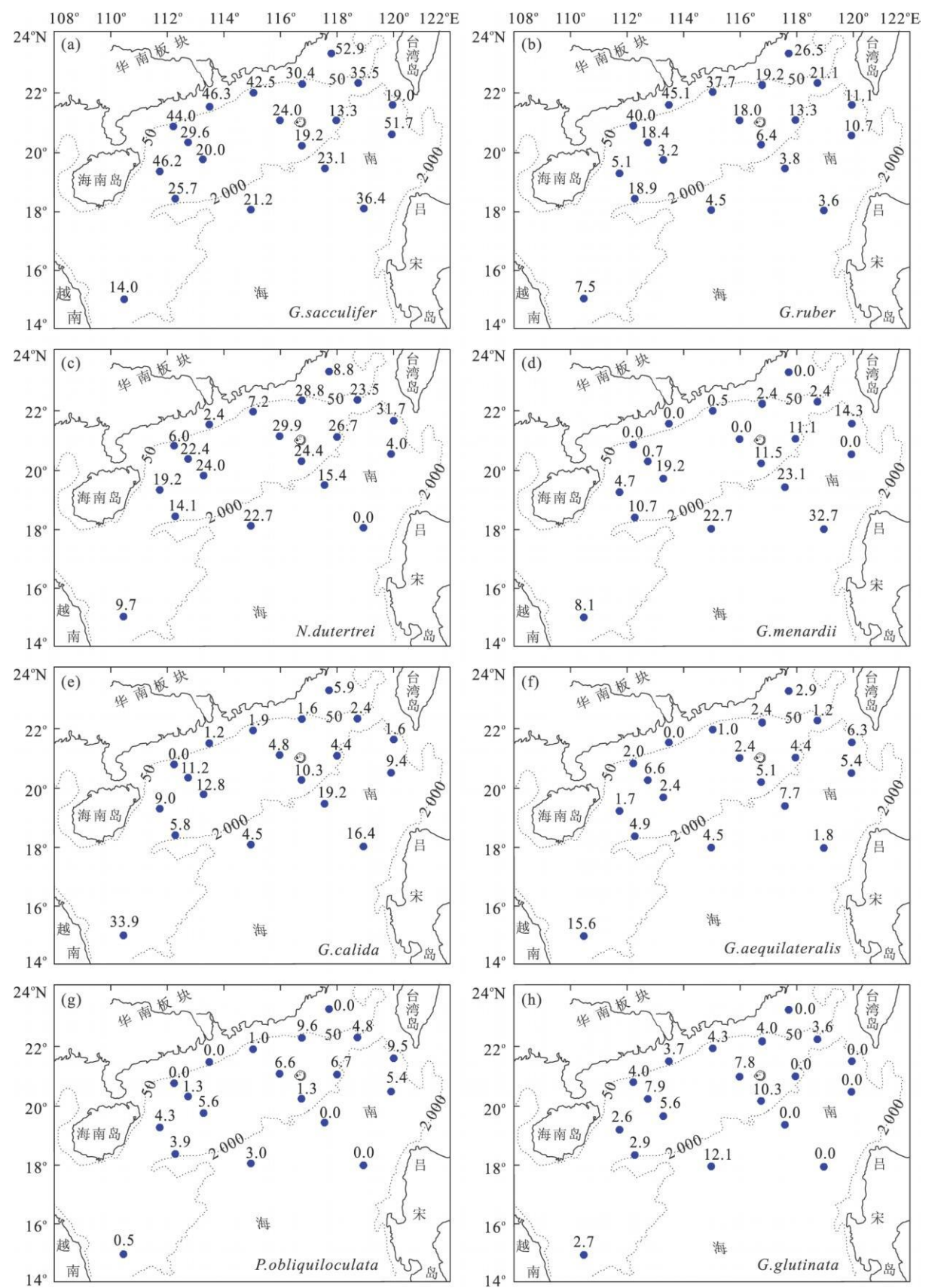


图 4 南海北部秋季 8 种优势浮游有孔虫属种相对含量的区域变化(单位: m)

Fig. 4 Distributions of the relative abundance of 8 major foraminiferal species in autumn surface waters of the northern South China Sea

©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

种,其高含量主要出现在黑潮暖流区和墨西哥湾暖流区(Prell and Damuth, 1978; Li *et al.*, 1997),被认为是黑潮暖流的一个指示标志种(Jian *et al.*, 2000).南海北部沉积物捕获器和 100 m 层的水平拖网研究一致表明,该种的高含量主要出现在冬季(陈荣华等, 2000, 2006; Lin and Hsieh, 2007).在南海北部秋季水体中,该种的含量总体较低,其高含量主要出现在东部,与黑潮水体进入南海的通道比较吻合(图 4g). *G. glutinata* 是亚热带水体中中层水的代表分子(Bé, 1977),在东海表层沉积物中无论在陆架还是海槽含量几乎都大于 20% (Xu and Oda, 1999),被认为是能够忍受较大温盐变化幅度的一种浮游有孔虫(Hemleben *et al.*, 1989).在秋季南海北部,其含量相对较低,主要分布在西北部区域,在东南部深水区含量很低(图 4h).

3 浮游有孔虫分布与海洋环境之间的关系

南海北部秋季表层水体的浮游有孔虫具有明显的区域分布特征.在古海洋环境研究中通常利用沉积物中的浮游有孔虫组合来重建表层海洋环境变化.那么南海北部秋季现代浮游有孔虫和海洋环境的关系到底如何?在这里,笔者根据同步实测的CTD温盐资料来探讨两者之间的关系^①.南海北部秋季表层水体混合层的水温总体变化不大(28.1~29 °C),混合层的深度在近岸浅水站位最浅,总体随水深变化逐渐加深,在东部的 E401、E403 和 E407 站和西部的 E501 和 E504 站较深,其中 E403 站和 E504 站 75 m 层的水温度明显高于其他站位(分别为 27 和 25.4 °C,图 5),表明这两个站位为暖涡.该区混合层的深度及其温盐与 0~75 m 层有孔虫体积丰度(枚/m³)变化以及特征属种含量变化无明显的相关性.但是 75 m 层的盐度(S_{75})以及 75 m 与混合层的盐度差(ΔS_{75-mix})和 *N. dutertrei* 的百分含量分布呈正相关(图 6, 相关系数分别为 $r^2=0.41$ 和 $r^2=0.40$),可能表明温跃层盐度梯度的增加有利于 *N. dutertrei* 的生存.75 m 层的盐度(S_{75})与 *G. calida* 以及 *G. calida*+*G. aequilateralis* 的含量分布呈弱的负相关(图 6, 相关系数分别为 $r^2=0.44$ 和 $r^2=0.34$),可能表明低盐的次表层水体非常有利于

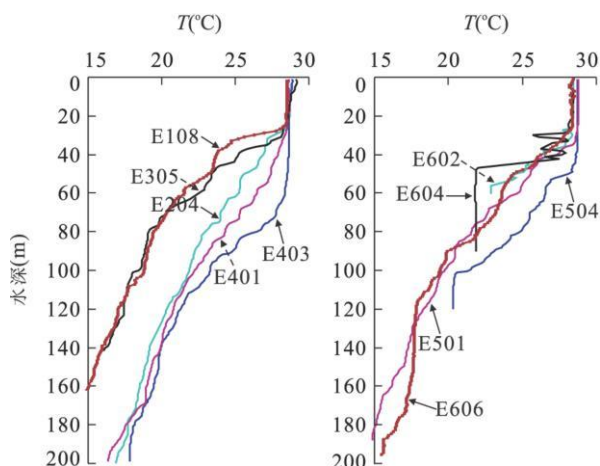


图 5 南海北部秋季部分研究站位温度随水深的变化

Fig. 5 Distributions of temperature with depth at 10 stations in the autumn water of the northern South China Sea

G. calida 和 *G. aequilateralis* 的生存.这也许是它们在越南岸外丰度异常高的原因.此外 75 m 与混合层的温度差(T_{75-mix})和 *G. glutinata* 的百分含量呈正相关(图 6, $r^2=0.39$),可能表明 *G. glutinata* 在南海适合于生活在温跃层梯度较大的水体中.

与温盐不同,水深和 0~75 m 层水体的浮游有孔虫丰度有较好的相关性($r^2=0.41$),表明南海北部秋季浮游有孔虫丰度随水深增加显著降低(图 6).浮游有孔虫丰度随水深的这种变化其实可能是受表层水体初级生产力的制约.在南海北部,初级生产力有明显的随离岸距离的增加而减小的趋势(郝锵等, 2007),2004 年 8 月遥感资料反映的叶绿素含量变化也表明在近岸区域高,而在本研究区域的东南部深水区为明显的低值区(Zhang *et al.*, 2006).叶绿素含量和初级生产力的这种变化趋势与有孔虫丰度西北高、东南低的趋势非常的相似,可能表明海洋初级生产力对浮游有孔虫丰度的制约. *N. dutertrei* 通常被认为和高营养的上升流有关(Bé, 1977; Pflaumann *et al.*, 1996),该种在南海北部的分布表明了它同时受制于水深和营养水平的控制:在陆架浅水区,虽然初级生产力高,但由于水深太浅,它的含量较低;当在水深大于 75 m 的陆架和陆坡时,由于水深条件满足,初级生产力仍有较高水平,此时它的含量达到最高;而到了远离陆架的东南部深水区时,由于初级生产力显著下降,虽然水深条件满足,它的含量迅速降低.南海北部秋季 *G. menardii* 的百分含量和水深有较好的正相关($r^2=0.54$),在东南部深水区含量最高,表明该种的分布受初级生

①毛华斌,王东晓,陈荣裕. 2004 年 9 月“实验 3”号船执行南海北部开放航次科学调查物理海洋数据报告.

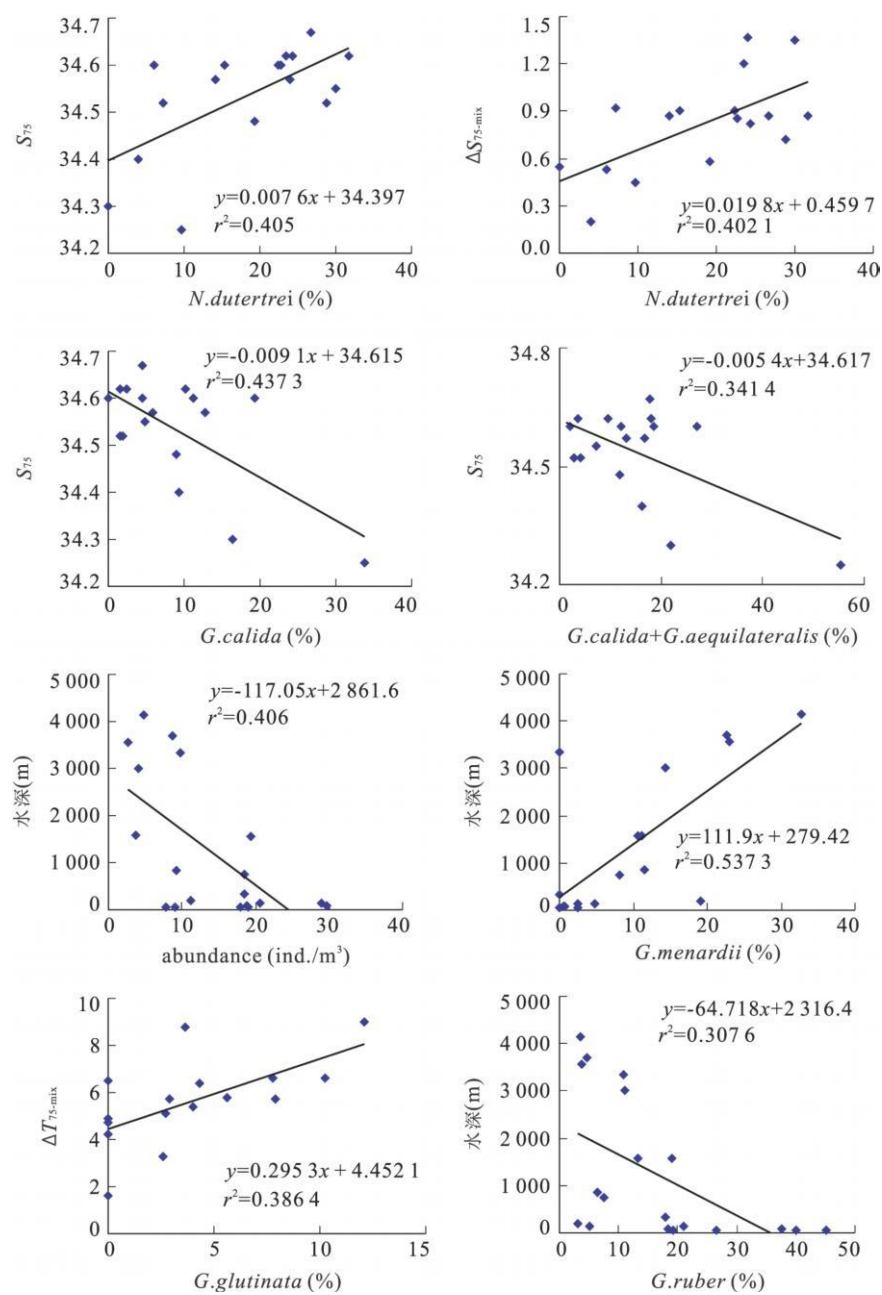


图 6 浮游有孔虫丰度和优势属种相对含量与南海北部水深和温盐参数的相关性

Fig. 6 Relationship of foraminiferal abundance and relative abundances of several dominant species versus water depth, temperature and salinity in the northern South China Sea
 S_{75} . 75 m 水层的盐度; ΔS_{75-mix} . 75 m 水层与上部混合层的盐度差; ΔT_{75-mix} . 75 m 水层与混合层的温度差

产力的影响较小(图 4d, 图 6). 表层水种 *G. ruber* 的含量分布和水深也有弱的负相关(图 6, $r^2 = 0.31$), 这是由于在近岸它是主要的两个优势种之一, 而随水深增加, 随着中深层水种 *N. dutertrei*、*G. calida*、*G. aequilateralis* 和 *G. menardii* 等的出现, 它的含量迅速降低.

在南海北部, 暖涡水对浮游有孔虫的丰度和组成有着明显的影响. 从图 2 可以看出, E403 站的浮

游有孔虫丰度比周边站位显著要高, 浮游有孔虫组合也有明显变化, 其中 *G. sacculifer* 的含量明显高出邻近站位许多(图 4a), 而且 *G. menardii* 在该站位没有出现. 西部的 E504 站的有孔虫丰度和 *G. sacculifer* 的含量同样也较周边站位要高, 显示出了暖涡对浮游有孔虫群落的影响.

在南海东北部, 多个航次声学多普勒海流剖面仪(ADCP)的测流资料表明有黑潮分支流经巴士海

峡进入南海北部(蒲书箴等, 1992), 称黑潮南海分支. 赵伟等(2007)通过环流数值模拟发现 500 m 以上水体在秋、冬季有明显的黑潮分支进入南海, 而在春、夏季黑潮南海分支消失或者较弱. 在表层沉积物研究中, *P. obliquiloculata* 被认为是黑潮的标志种(Jian *et al.*, 2000), 在南海东北部存在含量大于 20% 的高值区(徐建等, 2001). 虽然秋季不是 *P. obliquiloculata* 的繁盛季节, 但是表层水体浮游有孔虫的高含量分布区与黑潮南海分支影响区域相对应(图 4g). Lin and Hsieh(2007)通过 100 m 层的水平拖网同样发现 *P. obliquiloculata* 的高含量只出现在该区, 表明黑潮的入侵确实对南海北部 *P. obliquiloculata* 的分布有明显影响.

4 结论

通过对南海北部 2004 年 9 月上层水体的浮游有孔虫的分析, 结合海区地形、温盐和生产力资料, 探讨了该区浮游有孔虫的分布特征及影响因素, 得出以下结论:

(1)南海北部秋季水体的浮游有孔虫的主要优势属种依次为 *Globigerinoides sacculifer*、*Neoglobobulimina dutertrei*、*Globigerinoides ruber*、*Globorotalia menardii*、*Globigerina calida*、*Globigerinella aequilateralis*、*Globigerina glutinata* 和 *Pulleniatina obliquiloculata* 属热带暖水群落.

(2)南海北部秋季浮游有孔虫丰度西北高、东南低的分布格局可能主要受初级生产力和水深的共同控制. 在其影响下, 浅层水种 *G. sacculifer* 和 *G. ruber* 的高含量主要出现在近岸带, *N. dutertrei* 的高含量主要出现在外陆架和陆坡区域, *G. menardii* 的高含量主要出现在深水区域.

(3)*G. calida* 和 *G. aequilateralis* 两种的含量分布有明显的相似性, 主要出现在深水区. 在最西南的越南岸外站位它们成为绝对优势分子, 含量远远高出南海北部其他站位, 有可能和该区次表层水体的较低盐度相关.

(4)南海北部秋季混合层的深度及其温盐与该区有孔虫的分布无明显相关, 但是温跃层的温盐结构对中层水种 *N. dutertrei*、*G. glutinata*、*G. calida* 和 *G. aequilateralis* 的分布有一定的影响.

(5)暖涡水对浮游有孔虫的丰度和组成有着明显的影响. 位于暖涡中心区的浮游有孔虫丰度明显增高, 特征属种 *G. sacculifer* 的含量明显高出临近

站位. 此外 *P. obliquiloculata* 的高含量主要出现在东北部黑潮分支影响区.

致谢: 中国科学院热带海洋环境动力学重点实验室提供了本研究站位温盐环境数据, 在此表示衷心感谢.

References

- Bé, A. W. H., 1977. An ecological, zoogeographic and taxonomic review of recent planktonic foraminifera. In: Ramsay, A. T. S., ed., *Oceanic micropaleontology*. Academic Press, London, 1—100.
- Chen, R. H., Jian, Z. M., Zheng, Y. L., et al., 2000. Seasonal variations of the planktonic foraminiferal flux in the central South China Sea. *Journal of Tongji University*, 28(1): 73—77 (in Chinese with English abstract).
- Chen, R. H., Zheng, Y. L., Wiesner, M. G., et al., 2006. Seasonal and annual variations of marine sinking particulate flux during 1993—1996 in the central South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 28(3): 72—80 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, X. R., Chen, R. H., Jian, Z. M., et al., 2002. Preliminary report of the stable isotopic change of planktonic foraminifera from the sediment traps in the Central South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 22(4): 73—78 (in Chinese with English abstract).
- Cui, X. J., Xiang, R., Zheng, F., 2006. A preliminary study of living planktonic foraminiferal distribution and its affecting factors in the southern South China Sea. *Journal of Tropical Oceanography*, 25(4): 25—30 (in Chinese with English abstract).
- Curry, W. B., Thunell, R. C., Honjo, S., 1983. Seasonal changes in the isotopic composition of planktonic foraminifera collected in Panama basin sediment traps. *Earth and Planetary Science Letters*, 64: 33—43.
- Fairbanks, R. G., Sverdrup, M., Free, R., et al., 1982. Vertical distribution and isotope fractionation of living planktonic foraminifera from the Panama basin. *Nature*, 298: 841—844. doi: 10.1038/298841a0
- Hao, Q., Ning, X. B., Liu, C. G., et al., 2007. Satellite and in situ observations of primary production in the northern South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 29(3): 58—68 (in Chinese with English abstract).
- Hemleben, C., Spindler, M., 1983. Recent advances in research on living planktonic foraminifera. *Utrecht Micropaleontological Bulletin*, 30: 141—170.
- Hemleben, C. H., Spindler, M., Anderson, O. R., 1989. *Modern planktonic foraminifera*. Springer-Verlag, Berlin, 363.

- Jian, Z. M., Wang, P. X., Saito, Y., et al., 2000. Holocene variability of Kuroshio current in the Okinawa trough, northwestern Pacific ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 184: 305—319. doi: 10.1016/S0012-821X(00)00321-6
- Kuroyanagi, A., Kawahata, H., 2004. Vertical distribution of living planktonic foraminifera in the seas around Japan. *Marine Micropaleontology*, 53: 173—196. doi: 10.1016/j.marmicro.2004.06.001
- Li, B. H., Jian, Z. M., Wang, P. X., 1997. Pulleniatina obliquiloculata as a paleoceanographic indicator in the southern Okinawa trough during the last 20 000 years. *Marine Micropaleontology*, 32: 59—69. doi: 10.1016/S0377-8398(97)00013-3
- Li, B. H., Jian, Z. M., Li, Q. Y., et al., 2005. Paleoclimatology of the South China Sea since the Middle Miocene: evidence from planktonic foraminifera. *Marine Micropaleontology*, 54: 49—62. doi: 10.1016/j.marmicro.2004.09.003
- Li, Q. Y., Li, B. H., Zhong, G. F., et al., 2006. Planktonic foraminifer and oxygen isotopic evidence of a Late Miocene western Pacific Warm Pool. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(6): 754—764 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q. Y., Zhao, Q. H., Zhong, G. F., et al., 2008. Deep water ventilation and stratification in the Neogene South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(1): 1—11 (in Chinese with English abstract).
- Lin, H. L., Hsieh, H. Y., 2007. Seasonal variations of modern planktonic foraminifera in the South China Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 54(14—15): 1634—1644. doi: 10.1016/j.dsr2.2007.05.007
- Lin, H. L., Wang, W. C., Hung, G. W., 2004. Seasonal variation of planktonic foraminiferal isotopic composition from the sediment traps in the South China Sea. *Marine Micropaleontology*, 53: 447—460. doi: 10.1016/j.marmicro.2004.08.004
- Pflaumann, U., Drprat, J., Pujol, C., et al., 1996. SIM MAX: a modern analog technique to deduce Atlantic Sea surface temperatures from planktonic foraminifera in deep-sea sediments. *Paleoceanography*, 11: 15—35. doi: 10.1016/S0025-3227(98)00173-X
- Pflaumann, U., Jian, Z. M., 1999. Modern distribution patterns of planktonic foraminifera in the South China Sea and western Pacific: a new transfer technique to estimate regional seasurface temperatures. *Marine Geology*, 156: 41—83.
- Prell, W. L., Damuth, J. E., 1978. The climate-related diachronous disappearance of Pulleniatina obliquiloculata in late Quaternary sediments of the Atlantic and Caribbean. *Marine Micropaleontology*, 3: 267—277.
- Pu, S. Z., Yu, H. L., Jiang, W. N., 1992. Branchings of Kuroshio into Bashi channel and the South China Sea. *Tropical Oceanology*, 11(2): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L., Sarnthein, M., Erlenkeuser, H., et al., 1999. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: high-resolution sediment records from the South China Sea. *Marine Geology*, 156: 245—284. doi: 10.1016/S0025-3227(98)00182-0
- Xu, J., Huang, B. Q., Chen, R. H., et al., 2001. Distribution of foraminifera in surface sediments of northeastern South China Sea and its environmental implications. *Journal of Tropical Oceanography*, 20(4): 6—13 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J., Wang, P. X., Huang, B. Q., et al., 2005. Response of planktonic foraminifera to glacial cycles: Mid-Pleistocene change in the South China Sea. *Marine Micropaleontology*, 54: 89—105. doi: 10.1016/j.marmicro.2004.09.005
- Xu, X., Oda, M., 1999. Surface-water evolution of the eastern East China Sea during the last 36,000 years. *Marine Geology*, 156: 285—304. doi: 10.1016/S0025-3227(98)00183-2
- Xu, X. D., Uda, R., Tsuchihashi, M., et al., 1999. Vertical distribution of planktonic foraminifera in Kuroshio area of NW Pacific and its paleoceanographic implications. *Quaternary Science*, 6: 502—510 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C., Hu, C., Shang, S., et al., 2006. Bridging between SeaWiFS and MODIS for continuity of chlorophyll—a concentration assessments off southeastern China. *Remote Sensing of Environment*, 102: 250—263. doi: 10.1016/j.rse.2006.02.015
- Zhao, W., Hou, Y. J., Le, K. T., et al., 2007. Numerical study on seasonal variation of water exchange in the Luzon Strait. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 38(6): 495—503 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈荣华, 翦智潜, 郑玉龙, 等. 2000. 南海中部浮游有孔虫通量的季节变化. 同济大学学报, 28(1): 73—77.
- 陈荣华, 郑玉龙, Wiesner, M. G., 等. 2006. 1993—1996 年南海中部海洋沉降颗粒通量的季节和年际变化. 海洋学

- 报, 28(3): 72—80.
- 成鑫荣, 陈荣华, 翦智溥, 等. 2002. 南海中部沉积物捕获器中浮游有孔虫的稳定同位素分析. 海洋地质与第四纪地质, 22(4): 73—78.
- 崔喜江, 向荣, 郑范, 等. 2006. 南海南部活体浮游有孔虫分布特征及其影响因素初探. 热带海洋学报, 25(4): 25—30.
- 郝锦, 宁修仁, 刘诚刚, 等. 2007. 南海北部初级生产力遥感反演及其环境调控机制. 海洋学报, 29(3): 58—68.
- 李前裕, 李保华, 钟广法, 等. 2006. 晚中新世西太平洋暖池的浮游有孔虫和氧同位素证据. 地球科学——中国地质大学学报, 31(6): 754—764.
- 李前裕, 赵泉鸿, 钟广法, 等. 2008. 新近纪南海深层水的增氧与分层. 地球科学——中国地质大学学报, 33(1): 1—11.
- 蒲书箴, 于惠苓, 蒋梧年. 1992. 巴士海峡和南海东北部黑潮分支. 热带海洋, 11(2): 1—8.
- 徐建, 黄宝琦, 陈荣华, 等. 2001. 南海东北部表层沉积中有孔虫的分布及其环境意义. 热带海洋学报, 20(4): 6—13.
- 徐学东, 宇田理重, 土桥正也, 等. 1999. 西北太平洋黑潮主轴线浮游有孔虫的垂直分布及其古海洋学意义. 第四纪研究, 6: 502—510.
- 赵伟, 侯一筠, 乐肯堂, 等. 2007. 吕宋海峡水交换季节变化的数值研究. 海洋与湖沼, 38(6): 495—503.