

李路路, 鲍宽乐, 张家强, 等. 湛江湾-雷州湾海域表层沉积物中底栖有孔虫分布特征及其环境意义[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(11): 46-56.

LI Lulu, BAO Kuanle, ZHANG Jiaqiang, et al. Distribution characteristics of benthic foraminifera in surface sediments of Zhanjiang Bay-Leizhou Bay and its environmental significance[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(11): 46-56.

湛江湾-雷州湾海域表层沉积物中底栖有孔虫分布特征及其环境意义

李路路^{1,2}, 鲍宽乐¹, 张家强¹, 张德程¹, 任开文¹, 代友旭^{1*}

(1 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 烟台 264000;

2 自然资源部黄河入海口陆海交互作用野外科学观测研究站, 烟台 264000)

摘要:于 2020 年 6 月对湛江湾-雷州湾海域 89 个站位表层沉积物进行底栖有孔虫采样分析, 共识别出 52 属 103 种, 其中, 玻璃质壳 37 属 64 种, 胶结壳 10 属 13 种, 瓷质壳 5 属 26 种。底栖有孔虫分布表现为湾内低、湾外高, 由湾内向湾外增加的特点。对底栖有孔虫进行 Q 型因子分析, 划分 4 个有孔虫组合, 组合 I 为 *Florilus scaphus* - *Pseudorotalia gaimardi*, 以暖水种为主, 指示受南海暖流影响明显的内陆架浅水环境; 组合 II 为 *Nonion belridgense* - *Hemirota foraminulosa* - *Elphidium macellum*, 以咸水种为主, 可能反映盐度值明显升高的浅水环境, 具有海陆过渡带性质; 组合 III 为 *Hanzawaia convexa* - *Rosalina bradyi*, 以浅水种为主, 指示受沿岸流与南海暖流共同影响的内陆架浅水环境; 组合 IV 为 *Neonorbina terquemi* - *Ammonia beccarii*, 以广盐种为主, 反映了受沿岸流影响明显的滨海环境。综合分析影响底栖有孔虫组合分布的各种因素, 认为温度、水深为控制研究海域底栖有孔虫分布的主要因素, 同时, 海流和底质类型也会对底栖有孔虫分布产生一定影响。

关键词:湛江湾-雷州湾; 表层沉积物; 底栖有孔虫; 因子分析; 海洋环境

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2024.163

0 引言

底栖有孔虫生活在海底中已有数亿年, 其数量丰富、形状大小各异, 由于分布广泛并对海洋环境变化响应敏锐, 是进行海洋环境分析、古环境重建的良好指示生物^[1-5]。近些年, 较多学者已在中国重点海岸及重要河口区开展了大量底栖有孔虫研究, 针对不同地区, 划分了不同的有孔虫组合分区, 并探讨了影响底栖有孔虫分布的水深、温度、盐度等

环境影响因子^[6-10]。以往对湛江湾-雷州湾周边海域底栖有孔虫的研究也有所涉及, 李顺等^[11]分析了南海北部陆坡区底栖有孔虫属种类型与分布规律, 将其划分为 3 个有孔虫组合, 并认为温度是影响该海域有孔虫分布的主要因素; 徐建等^[12]探讨了南海东北部表层沉积物中的底栖有孔虫分布特征, 发现有孔虫的垂向分布与碳酸盐的溶解作用紧密相关, 同时海水温度、南海暖流也会影响有孔虫的分布; 李保华等^[13]研究了北部湾内陆架有孔虫分布情况, 认为暖水型底栖有孔虫在研究区最为常见, 指出水深和沉积底质是控制该海域有孔虫分布的主要因子。综上发现, 前人研究主要集中在湛江湾-雷州湾以东水深 > 100 m 的外陆架和水深 > 200 m 的半深海海域, 以及研究区西侧的北部湾海域, 在湛江湾-雷州湾及湾外内陆架浅水区, 针对底栖有孔虫分布规律的研究相对较少, 对影响其分

收稿日期: 2024-07-14

资助项目: 中国地质调查局项目“雷州半岛东部海岸带综合地质调查”(DD20208011), “胶东北部海岸带与岛礁综合地质调查”(DD20220990)

第一作者: 李路路(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海洋与海岸带地质调查方面的研究工作。E-mail: 717104997@qq.com

* 通讯作者: 代友旭(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事海洋与海岸带地质调查方面的研究工作。E-mail: daiyouxu1988@126.com

布的环境因子尚不清楚。本文通过分析湛江湾-雷州湾海域 89 个站位表层沉积物中底栖有孔虫的属种类型、数量、分异度等因子, 总结其分布特征并探讨影响底栖有孔虫分布的环境因子。

1 研究海域概况

研究海域位于粤西雷州半岛东侧, 属热带北缘季风气候, 雨量充沛, 4—9 月为多雨季节, 10 月至次年 3 月雨量较少, 年均水温较高, 呈现由北向南递增趋势, 海洋动力环境优越, 潮汐类型为不规则半日潮, 潮高和潮时不等现象显著, 湾内潮差比湾外大, 是华南沿岸潮差较大的海域之一。研究海域的海流作用较为复杂, 近海海域主要受沿岸流控制, 夏季(5—9 月)由于受西南季风影响, 沿岸流沿海岸向东北流动, 影响范围一般为离岸 20 km 以内, 深度 10~15 m, 其他月份沿岸流向西南流动, 流至湛江湾后分为两支, 一支流向海南岛东部海域, 另一支沿琼州海峡流入北部湾, 在外海中外陆架区主要受东北流向的南海暖流及西南流向的黑潮南海分支流影响^[14](图 1)。

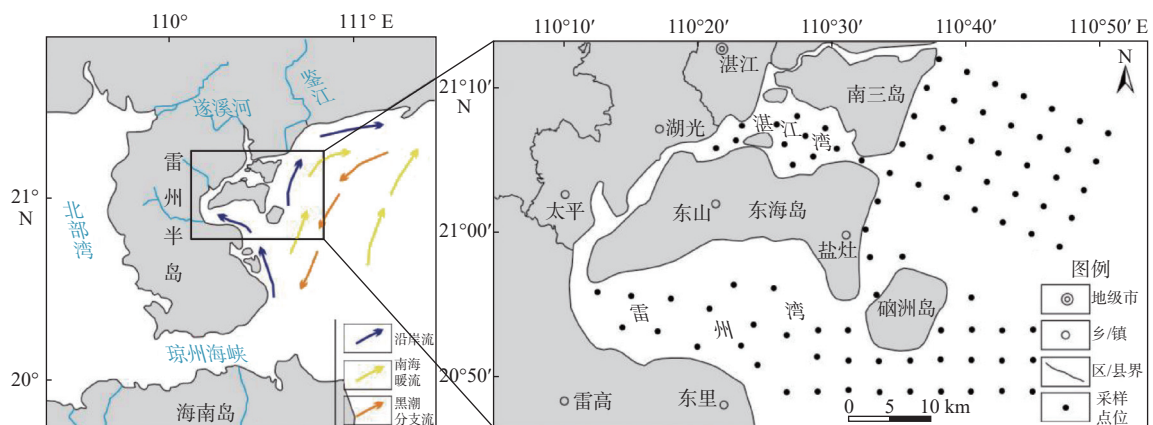
湛江湾为潮汐汉道型海湾, 湾外为落潮三角洲至内陆架缓坡平原地貌, 由中全新世在遂溪河谷的基础上经海侵发育而来。近岸水深<5 m, 湾口处水深最大可>25 m, 因受口门束紧影响, 湾内风浪不大, 但沉积水动力作用较强, 湾内海底沉积物以粉砂为主, 向外沉积粒径逐渐增大为砂和粉砂质砂^[15]。沿岸河流主要有鉴江和遂溪河, 其中, 鉴江流域面积更大, 超过 6 000 km², 年入海沙量也更多, 达 2.0×10^6 t, 对湛江湾影响更为明显^[16]。雷州湾位

于湛江湾以南, 北以东海岛与湛江湾相隔, 西北侧有一水道与其相连, 湾口向东南敞开, 水域宽阔, 为台地溺谷型海湾, 面积约 640 km²。湾内地形较为复杂, 分布 3 条较为明显的海槽, 并延伸至湾外, 水深整体由沿岸至湾内再至湾外逐渐变深, 与湛江湾类似, 近岸水深<5 m, 湾内>10 m, 湾口处>20 m。雷州湾底质以泥沙为主, 在硇洲岛周边及湾口处粒径增大, 以砂质为主^[17]。沿岸主要入海河流有通明河、南渡河、雷高河以及城月河, 其中以通明河和南渡河对其影响更为显著^[18]。

2 材料与方法

中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心于 2020 年 6 月在湛江湾-雷州湾海域作业, 使用抓斗取样器采集研究海域底栖有孔虫样品共计 89 站位, 使用多参数多联采水器同步采集底层海水并测试温度与盐度。待船舶稳定后, 缓慢下放抓斗取样器, 使取样器以自身的重量深入海底抓取样品, 然后缓慢提出海底, 快速提出海面, 慢速放至甲板, 倒掉上部积水, 选取样品表层 0~10 cm 位置沉积物不少于 300 g 进行有孔虫测定。在抓斗取样器下放至海底取样时, 同步测量取样站位水深。多联采水器的单瓶取水容量为 5 L, 待底层海水取出后, 立即使用温度计测量温度, 使用 SX-650 型笔式盐度计测量盐度。

有孔虫鉴定工作按照《海洋调查规范》第 8 部分: 海洋地质地球物理调查(GB/T 12763.8—2007)规范操作, 由青岛斯八达分析测试有限公司完成。具体步骤为: 选取部分表层沉积样品在约 60 °C 温



据文献 [14-15] 修改

图 1 湛江湾-雷州湾海域采样站位

Fig.1 Sampling stations in Zhanjiang Bay-Leiqzhou Bay area

度下烘干,从烘干样品中选 50 g 干样用自来水浸泡 2~3 d,然后在 63 μm 的样品筛下充分冲洗,将冲洗后的样品再次在约 60 $^{\circ}\text{C}$ 温度下烘干,结束后,在样品中选取 > 150 μm 的因子在体视显微镜 (Olympus-SZ61) 下进行鉴定^[1,19],并统计属种数量。对于有孔虫含量丰富的样品,采用缩分法,同时每个站位中底栖有孔虫鉴定数量不少于 100 个。统计样品中不同属种底栖有孔虫的丰度与分异度,并使用 PAST3.15 软件计算各底栖有孔虫样品的复合分异度 $H(S)$,最后采用 SPSS25 软件进行 Q 型因子分析,划分底栖有孔虫主因子组合,并进行环境因素分析。

3 结果与讨论

3.1 水深、温度、盐度特征

湛江湾水深呈现北部浅、南部深的特点,沿岸海域水深 < 5 m,平均水深 10 m,湾口处深度 > 39 m。雷州湾平均水深较湛江湾深,在湾南岸出现最大值。湛江湾-雷州湾湾外水深普遍大于湾内,东部海域 > 20 m 等深线(图 2a)。湛江湾底层海水温度呈现湾内低、湾外高的特点,湾内水温 23~24 $^{\circ}\text{C}$,湾外水温明显升高,为 24~26 $^{\circ}\text{C}$ 。雷州湾底层海水温度高于湛江湾,为 24~25 $^{\circ}\text{C}$,最高值达 26 $^{\circ}\text{C}$,出现在湾内南部海域(图 2b)。湛江湾-雷州湾底层海水盐度值变化范围较大,整体呈现西低东高的特征,最小值为 18‰,出现在湛江湾和雷州湾西侧与陆表连接处,说明受陆表河流注入影响明显,最大值 > 27‰,分布在湾外陆架区以及硇洲岛周边海域(图 2c)。

3.2 底栖有孔虫群落结构

经统计,湛江湾-雷州湾海域 89 个站位样品中,共鉴定出底栖有孔虫 52 属 103 种,其中,玻璃质壳底栖有孔虫有 37 属 64 种,胶结壳底栖有孔虫有 10 属 13 种,瓷质壳底栖有孔虫有 5 属 26 种。筛选出超过底栖有孔虫总量 1% 的 17 个优势种,以上优势种占研究海域底栖有孔虫总量的 86.7%,为绝大多数,可反映其分布规律,具体优势种见表 1。

底栖有孔虫按壳体物质成分可分为玻璃质壳、瓷质壳与胶结壳 3 类。研究海域玻璃质壳底栖有孔虫占底栖有孔虫总量的 70.8%,在大多数站位中

也都 > 70%,在滨岸浅水区、湾内及湾外陆架区分布广泛,处于主导地位,与中国浅海底栖有孔虫以玻璃质壳为主相一致^[1],湛江湾及南三岛、东海岛周边海域 > 90%(图 3a)。胶结壳底栖有孔虫占底栖有孔虫总量的 19.9%,在大多数站位中占比 < 20%,高值区分布在湛江湾外海与雷州湾西部海域(图 3b)。瓷质壳底栖有孔虫占底栖有孔虫总量的 9.3%,数量最少,在雷州湾湾外硇洲岛南部海域出现高值区,数量上占比达到 40%(图 3c)。

研究海域底栖有孔虫丰度差异很大,少则几枚,多则上千枚,高值区出现在湛江湾湾外海域,在湛江湾-雷州湾湾内,丰度值则较小(图 4a)。简单分异度相差也较为明显,在 1~200 变化,高值区出现在雷州湾湾外海域,湾内简单分异度则较小(图 4b)。复合分异度可反映底栖有孔虫种属数量及分布均匀程度,值越大,说明数量越多,分布越均匀,更适适合底栖有孔虫生存。在研究海域复合分异度变化范围为 0.5~3.5,高值区分布在雷州湾湾外海域(图 4c),与底栖有孔虫简单分异度分布存在一致性。综上认为,底栖有孔虫丰度、简单分异度和复合分异度都大致表现为湾内低、湾外高的特点,并由湾内向湾外增大,说明湛江湾-雷州湾的湾外较湾内更适合底栖有孔虫生存。

3.3 底栖有孔虫组合

对研究海域底栖有孔虫进行 Q 型因子分析,进一步查清其分布规律与环境影响因素。首先对原始数据进行全面分析,剔除只在个别样品中出现的稀有种,然后选取至少在 5 个站位中含量 > 2% 的底栖有孔虫,最后获得有效属种 28 个。经统计,以上有效属种占总数的 90.0%,经方差最大化旋转获得 4 个贡献值 > 5% 的主因子组合,这 4 个主因子解释了总方差的 70.7%,各有孔虫因子荷载值见表 2。以最高得分的属种命名各自的有孔虫组合,共识别出 4 个底栖有孔虫组合。

主因子组合 I (*Florilus scaphus* - *Pseudorotalia gaimardi* 组合)解释了总方差的 34.4%,其中, *Florilus scaphus*(船状花朵虫)、*Pseudorotalia gaimardi*(多疣假轮虫)、*Hanzawaia mantaensis*(曼顿半泽虫)、*Bigenerina nodosaria*(节房双串虫)、*Textularia foliacea*(叶状串珠虫)为高因子荷载正值的主要属种。主因子组合 II (*Nonion belridgense* - *Hemirota foraminulosa* - *Elphidium macellum* 组合)解释了总方差的 21.3%,*Nonion belridgense*(九字虫)

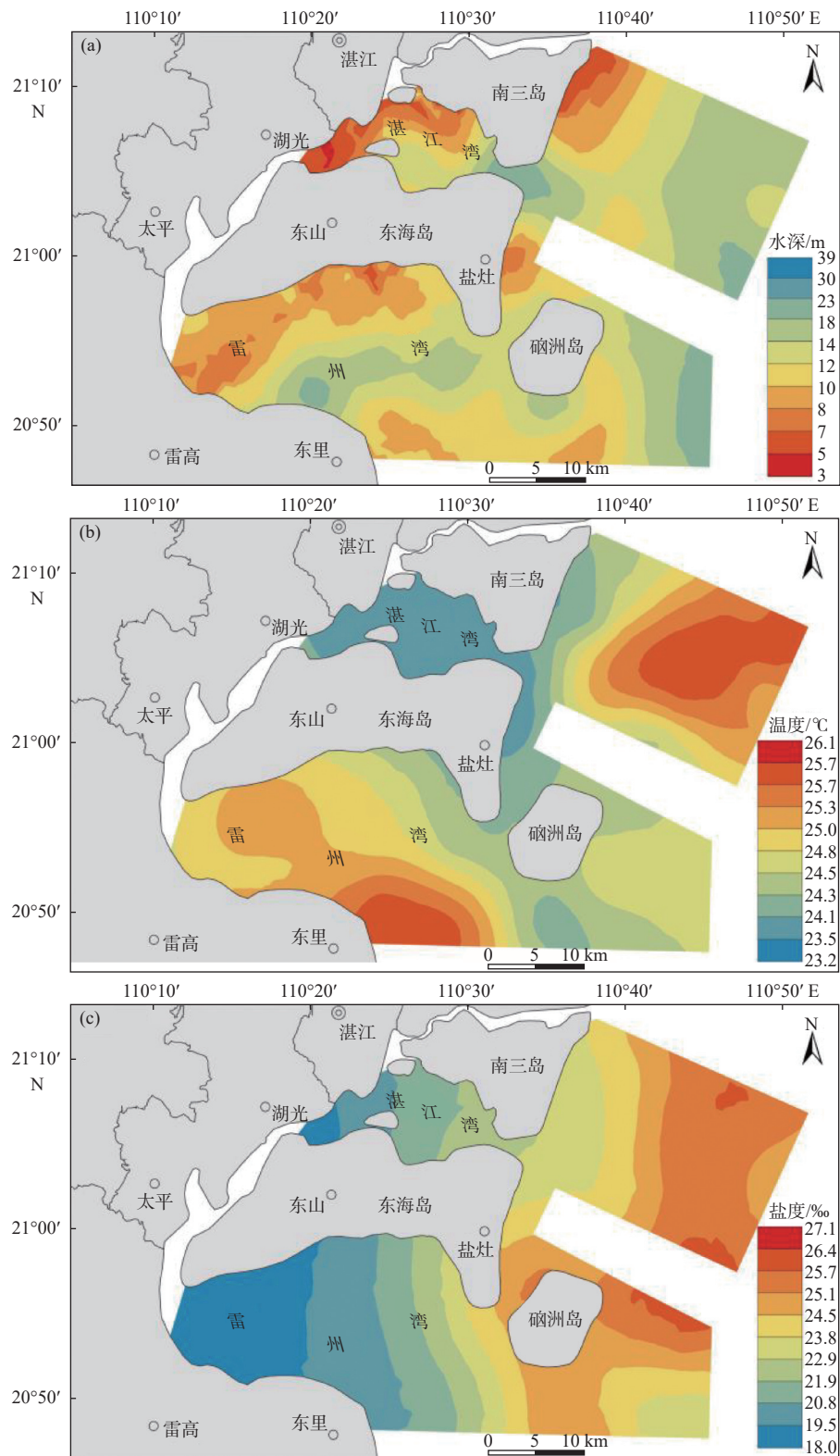


图 2 研究区水深 (a)、海底水温 (b) 和盐度 (c) 分布

Fig.2 Water depth (a), bottom water temperature (b) and salinity (c) distribution maps of the study area

在该组合中因子荷载值最高, 其次是 *Hemirootalia foraminulosa* (有孔半轮虫)、*Elphidium macellum* (尖锄希望虫)、*Quinqueloculina agglutinans* (胶结五珧虫)。主因子组合 III (*Hanzawaia convexa* - *Rosalina*

bradyi 组合) 解释了总方差的 8.2%, 在该组合中最具代表性属种是 *Hanzawaia convexa* (隆拱半泽虫), 其次是 *Rosalina bradyi* (布腊德玫瑰虫)、*Elphidium hispidulum* (茸毛希望虫)。主因子组合 IV (*Neocon-*

表 1 研究区底栖有孔虫优势种及环境指示意义

Table 1 Dominant benthic foraminifera species in the study area and their environmental significance

壳质类型	优势种	占总含量百分比/%	环境指示意义 ^[1]
玻璃质壳	<i>Pseudorotalia gaimardi</i> (多疣假轮虫)	20.90	暖水种
	<i>Hanzawaia mantaensis</i> (曼顿半泽虫)	15.02	中外陆架半深水种
	<i>Ammonia beccarii</i> (毕克卷转虫)	6.58	广盐性滨岸种
	<i>Florilus scaphus</i> (船状花朵虫)	4.68	内陆架浅水种
	<i>Elphidium advenum</i> (异地希望虫)	4.11	内陆架浅水种
	<i>Cavarotalia annectens</i> (同现孔轮虫)	3.34	内陆架浅水种
	<i>Elphidium asiaticum</i> (亚洲希望虫)	2.23	内陆架浅水种
	<i>Elphidium limpidum</i> (清晰希望虫)	1.69	内陆架浅水种
	<i>Elphidium hispidulum</i> (茸毛希望虫)	1.26	内陆架浅水种
	<i>Hemirootalia foraminulosa</i> (有孔半轮虫)	1.25	内陆架浅水种
	<i>Pararotalia nipponica</i> (日本纺轮虫)	1.24	内陆架浅水种
	<i>Hanzawaia convexa</i> (隆拱半泽虫)	1.24	中外陆架半深水种
	<i>Ammonia pauciloculata</i> (少室卷转虫)	1.18	内陆架浅水种
瓷质壳	<i>Quinqueloculina subungeriana</i> (亚恩格五块虫)	1.61	近岸浅水种
	<i>Quinqueloculina lamarckiana</i> (拉马克五块虫)	1.29	近岸浅水种
胶结壳	<i>Textularia foliacea</i> (叶状串珠虫)	12.42	近岸浅水种
	<i>Bigenerina nodosaria</i> (节房双串虫)	6.65	暖水种

orbina terquemi - *Ammonia beccarii* 组合)解释了总方差的 6.8%, 在该组合中 *Neoconorbina terquemi* (特奎新圆锥虫)、*Ammonia beccarii* (毕克卷转虫) 是高因子荷载正值的主要属种, 其次是 *Triloculina trigonula* (三棱三块虫)(表 2)。

3.4 影响底栖有孔虫分布的主要因素

前人研究证明, 底栖有孔虫的分布往往受多种因素影响, 包括水深、温度、盐度、水流等, 在不同海域影响底栖有孔虫分布的主要因素往往不同^[2,20-23]。现对因子分析得到的 4 个底栖有孔虫主因子组合进行影响因素分析。

主因子组合 I 荷载高值区主要分布于湛江湾以东的湾外海域(图 5a), 水深 > 18 m(图 2a), 研究海域有孔虫丰度、简单分异度、复合分异度及荷载值都较大, 在湛江湾、雷州湾湾内, 水深较浅 < 12 m, 有孔虫丰度、分异度及荷载值则较低(图 4a—c、5a), 以上变化在浙江、福建、广东沿岸的河口区和湾内区都表现出同样的趋势^[6,24-25], 说明该组合受水深影响明显。有孔虫属种以暖水种为主, 例如荷载值达 0.969 的 *Florilus scaphus* 是世界性广布种, 集中分布在南黄海、东海等低纬度海域, 在水深约 40 m 处达到最高值^[13]; *Pseudorotalia gaimardi* 是南海海域较典型的暖水标志种, 在内陆架、中陆架分布最为集中^[19]; *Hanzawaia mantaensis* 主要分布在中国

东海、南海外陆架现代沉积中, 以中陆架最为丰富; *Bigenerina nodosaria* 为暖水指示种, 主要分布在热带、亚热带地区, 常见于中国台湾、南海北部等低纬度海域^[1]。以上广泛分布的暖水种与该区域高温高盐环境相对应(图 2b), 原因为受南海暖流影响明显, 因此, 该组合的分布也与高温高盐的南海暖流紧密相关。以上分析说明, 该组合底栖有孔虫组合以暖水种为主, 分布主要受水深、温度和海流的控制, 指示受南海暖流影响明显的内陆架浅水环境。

主因子组合 II 荷载高值区主要分布于雷州湾湾外海域(图 5b)。在该组合集中分布区, 具有盐度值大、瓷质壳底栖有孔虫百分比高(图 2c、3c)的特点, 研究认为, 瓷质壳类有孔虫在高盐环境中含量较高, 其对异常盐度环境有很强的适应能力^[26], 例如 *Quinqueloculina agglutinans* 是中国陆架区分布广泛的瓷质壳类有孔虫, 为现代太平洋常见种^[1], 在该组合中荷载值高达 0.793。此海域广盐性底栖有孔虫数量迅速减小, 相对应的窄盐性底栖有孔虫如 *Hanzawaia nipponica* 明显增加(由组合 IV 中荷载值 -0.018 变为组合 II 中的 0.661)^[6]。以上分析说明, 该组合受盐度影响较大。该组合中因子荷载值高值区底质以砂质为主, 粒径比雷州湾湾内大^[17]。研究认为, 适当含量的砂粒有利于有孔虫壳体特别是瓷质壳类有孔虫的生成, 更有利于瓷质壳类有孔虫的富集^[6], 说明该组合还受底质类型影响。在有孔

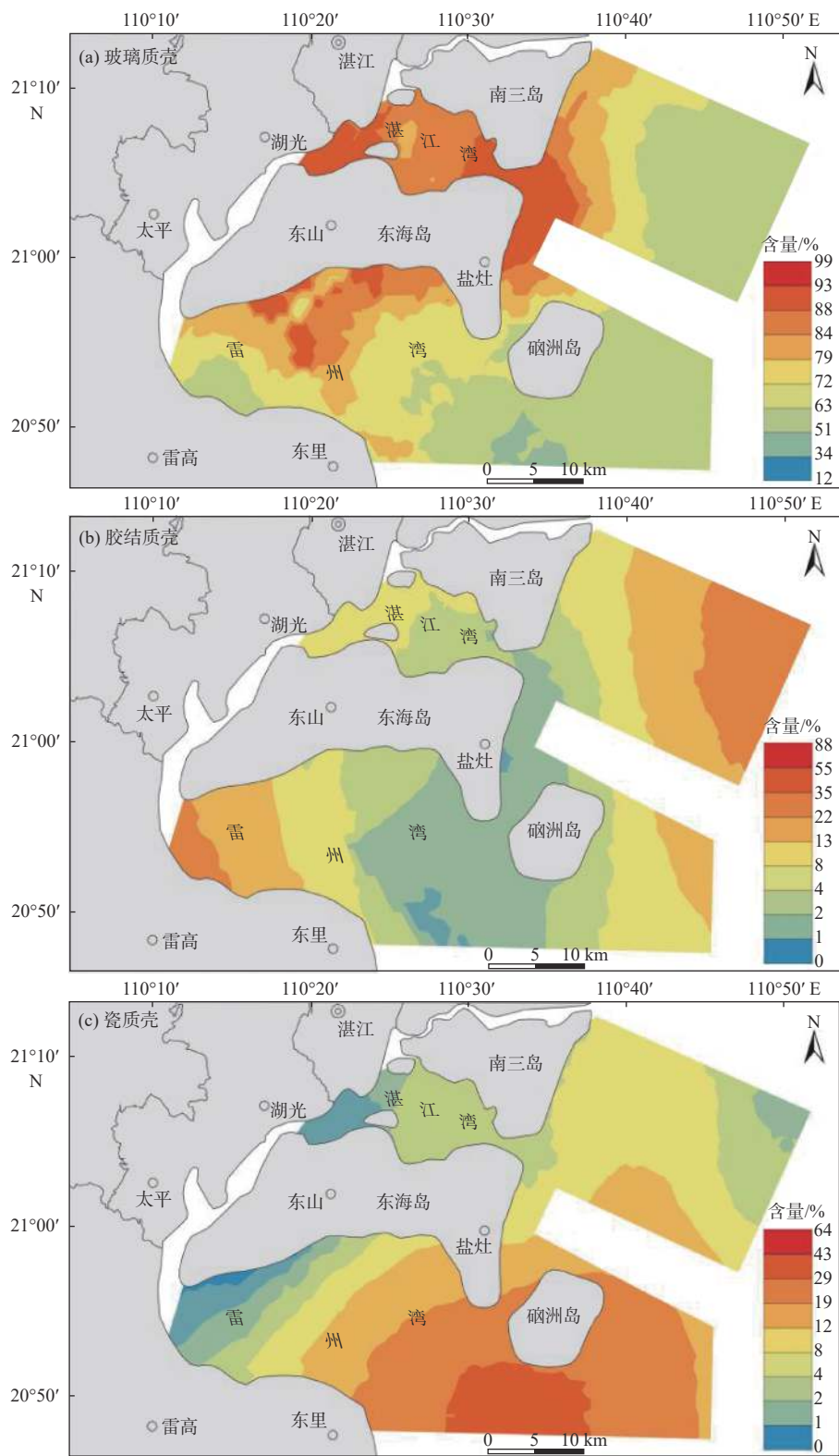


图 3 研究区玻璃质壳 (a)、胶结质壳 (b)、瓷质壳 (c) 底栖有孔虫含量分布
Fig.3 Distributions of benthic foraminifera with calcareous hyaline (a), agglutinated (b), and calcareous porcelainous (c) tests in the study area

虫属种上, *Nonion belbridense* 主要分布在东海、黄海的内陆架及近岸地区; *Elphidium macellum* 主要分布在中国东部沿海内陆架现代沉积中^[1], 以上荷

载值高的底栖有孔虫主要分布在近岸浅水区, 说明该组合分布与水深关系紧密。综上所述, 该有孔虫组合以咸水种为主, 分布主要受盐度、底质类型、水

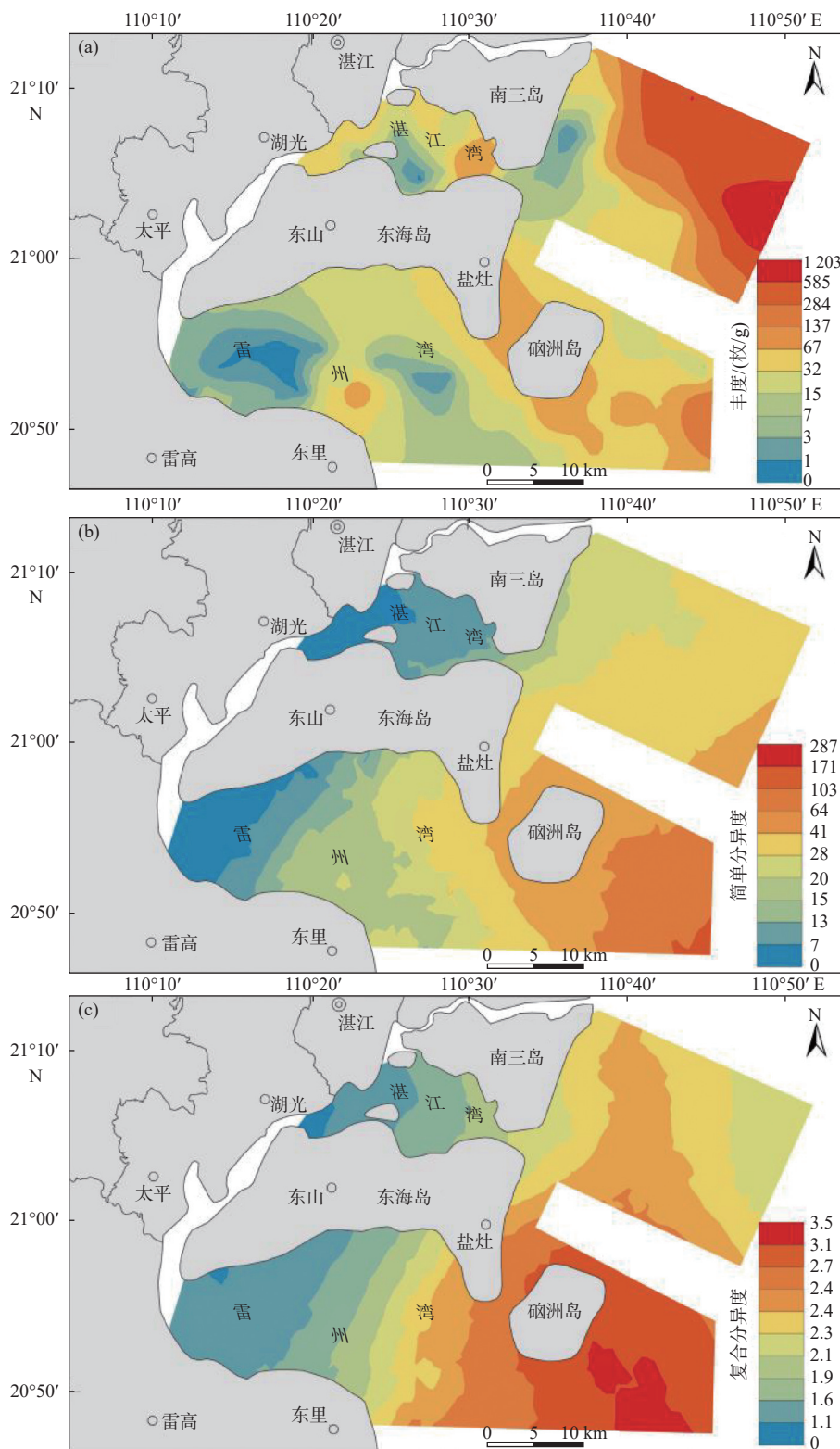


图 4 研究区底栖有孔虫丰度 (a)、简单分异度 (b)、复合分异度 (c) 分布

Fig.4 Distributions of benthic foraminifera abundance (a), species number (b), and compound diversity (c) in the study area

深控制,可能反映盐度值明显升高的浅水环境,具有海陆过渡带性质。

主因子组合Ⅲ载荷高值区主要分布于雷州湾东侧硇洲岛以东海域,与主因子组合Ⅱ载荷高值区

大致相同(图 5c),该海域水深增加、盐度值增大,但温度升高不显著(图 2a—c),说明该海域受低温低盐的沿岸流与高温高盐的南海暖流共同作用影响。在有孔虫属种上,以浅水种为主,例如 *Hanzawaia*

表 2 研究区主要底栖有孔虫属种 Q 型因子分析

Table 2 Q-mode factor analysis of major benthic foraminifera species in the study area

属 种	因子1	因子2	因子3	因子4
<i>Hanzawaia nipponica</i>	-0.032	0.661	0.469	-0.018
<i>Quinqueloculina argunica</i>	-0.056	0.467	0.469	-0.188
<i>Rosalina bradyi</i>	-0.075	0.576	0.739	-0.051
<i>Cribronion vitreum</i>	-0.150	0.723	0.113	-0.009
<i>Elphidium macellum</i>	-0.088	0.799	0.177	0.017
<i>Neonorbina terquemi</i>	0.139	-0.193	0.057	0.819
<i>Nonion belridgense</i>	-0.049	0.941	0.151	-0.018
<i>Quinqueloculina agglutinans</i>	0.076	0.793	-0.026	-0.026
<i>Triloculina tricarinata</i>	0.027	0.327	0.235	0.204
<i>Reussella pluchra</i>	0.593	0.251	0.460	0.330
<i>Triloculina trigonula</i>	0.040	0.314	-0.006	0.665
<i>Spiroloculina laevigata</i>	0.132	0.332	-0.113	0.371
<i>Triloculina disparilis</i>	0.337	-0.081	0.075	0.215
<i>Ammonia pauciloculata</i>	0.809	0.214	-0.043	0.144
<i>Hanzawaia convexa</i>	-0.031	0.216	0.888	-0.029
<i>Hemirota lia foraminulosa</i>	-0.017	0.84	-0.013	0.042
<i>Elphidium hispidulum</i>	0.187	-0.069	0.720	0.238
<i>Quinqueloculina lamarckiana</i>	0.600	-0.153	0.079	0.098
<i>Elphidium limpidum</i>	0.853	-0.057	0.082	0.341
<i>Elphidium asiaticum</i>	0.853	-0.006	-0.031	0.321
<i>Cavartalia annectens</i>	0.749	-0.066	0.082	-0.134
<i>Elphidium advenum</i>	0.649	-0.004	0.212	0.490
<i>Florilus scaphus</i>	0.969	-0.109	-0.063	-0.004
<i>Ammonia beccarii</i>	0.493	-0.057	0.024	0.717
<i>Bigenerina nodosaria</i>	0.896	-0.064	0.069	-0.243
<i>Textularia foliacea</i>	0.896	-0.083	0.019	0.170
<i>Hanzawaia mantaensis</i>	0.899	-0.127	-0.011	0.242
<i>Pseudorotalia gaimardi</i>	0.954	-0.114	-0.049	0.073

注: 表中粗体数据为4个主因子组合中的最大值。

convexa 荷载值最大, 为 0.888, 其次是 *Rosalina bradyi*, 荷载值为 0.739, 以上属种都是在内陆架浅水中分布最为丰富, 说明该组合底栖有孔虫同样受水深控制。综上认为, 该有孔虫组合以浅水种为主, 分布主要受海流、水深控制, 指示受沿岸流与南海暖流共同影响的内陆架浅水环境。

主因子组合 IV 载荷高值区主要分布在南三岛-东海岛-硃洲岛一线近海海域及湛江湾湾内(图 5d), 该海域离岸较近, 盐度值、水温都比较低(图 2b、c), 底栖有孔虫丰度也较小(图 4a), 说明由于距岸距离近, 受低温低盐沿岸流影响明显。在有孔虫属种上, 以广盐种为主, 该组合中 *Ammonia beccarii* 荷载值较大, 可达 0.717, 是世界上分布最广的广盐性滨岸

种, 在盐度值较低的海域也能生存, 主要分布在离陆表较近, 受地表河水注入影响的半咸水环境^[26], 在杭州湾、台湾海峡、北部湾水深 0~10 m 处分布广泛^[10,13,24]。在南三岛东部近海海域出现极高值, 可能与研究区内最大河流鉴江在其北侧入海, 河水混入降低了海水的盐度值, 使其适宜广盐性底栖有孔虫的生存有关。综上分析认为, 该有孔虫组合以广盐种为主, 分布主要受海流、盐度、温度控制, 反映了受沿岸流影响明显的滨海环境。

4 结论

(1)在对湛江湾-雷州湾海域的底栖有孔虫分析

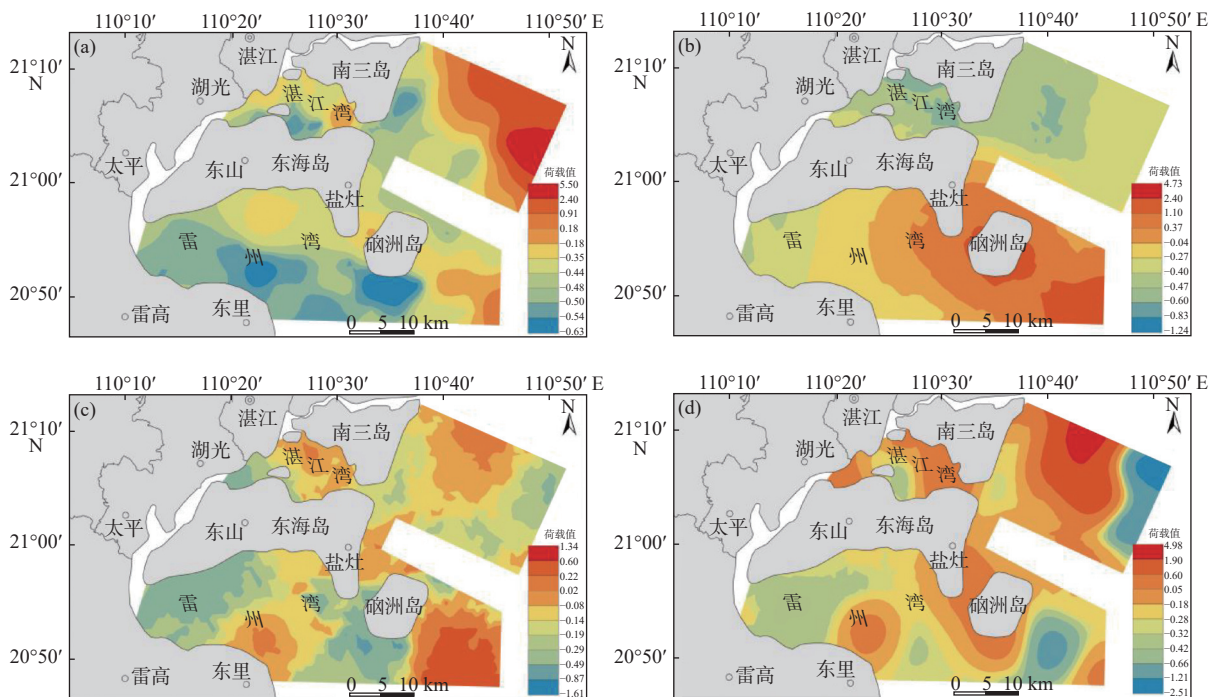


图5 研究区底栖有孔虫站位因子荷载值分布

Fig.5 Distribution of the varimax factor of benthic foraminifera stations in the study area

中,共鉴定出 52 属 103 种,其中,玻璃质壳 37 属 64 种,胶结壳 10 属 13 种,瓷质壳 5 属 26 种。底栖有孔虫分布表现为湾内低、湾外高,由湾内向湾外增加的特点。

(2) 依据底栖有孔虫的分布情况共划分 4 个有孔虫组合:组合 1 为 *Florilus scaphus* - *Pseudorotalia gaimardi*,以暖水种为主,分布主要受水深、温度和海流的控制,指示受南海暖流影响明显的内陆架浅水环境;组合 2 为 *Nonion belridgense* - *Hemirota foraminulosa* - *Elphidium macellum*,以咸水种为主,分布主要受盐度、底质类型、水深控制,可能反映盐度值明显升高的浅水环境,具有海陆过渡带性质;组合 3 为 *Hanzawaia convexa* - *Rosalina bradyi*,以浅水种为主,分布主要受海流、水深控制,指示受沿岸流与南海暖流共同影响的内陆架浅水环境;组合 4 为 *Neonorbina terquemi* - *Ammonia beccarii*,以广盐种为主,分布主要受海流、盐度、温度控制,反映了受沿岸流影响明显的滨海环境。

(3) 湛江湾-雷州湾海域水深较浅,水温较高,底栖有孔虫大都以内陆架浅水种、暖水种为主,说明温度、水深对研究海域底栖有孔虫分布的影响最为显著。此外,海流通过改变海水盐度及温度以及底质类型,影响有孔虫壳体发育,也会对底栖有孔虫分布产生一定影响。

致谢:感谢吴淑玉高级工程师在成文过程中

的指导。

参考文献:

- [1] 汪品先,章纪军,赵泉鸿,等. 东海底质中有孔虫和介形虫 [M]. 北京:海洋出版社,1988.
WANG Pinxian, ZHANG Jijun, ZHAO Quanhong, et al. Foraminifera and Ostracoda in Bottom Sediments of the East China Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 1988.
- [2] 张江勇,汪品先. 深海研究中的底栖有孔虫:回顾与展望 [J]. 地球科学进展, 2004, 19(4): 545-550.
ZANG Jiangyong, WANG Pinxian. Benthic foraminifera in deep-sea research: retrospect and prospect[J]. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(4): 545-550.
- [3] MIAO Q M, THUNELL R C. Late Pleistocene-Holocene distribution of deep-sea benthic foraminifera in the South China Sea and Sulu Sea: paleoceanography implications[J]. *Journal of Foraminifera Research*, 1996, 26(1): 9-23.
- [4] GOODAY A J, RATHBURN A E. Temporal variability in living deepsea benthic foraminifera: a review[J]. *Earth-Science Reviews*, 1999, 46(1): 187-212.
- [5] WANG P X, LI Q Y, TIAN J, et al. Monsoon influence on planktonic $\delta^{18}\text{O}$ records from the South China Sea[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 142: 26-39.
- [6] 李涛,向荣,李团结. 珠江口表层沉积物底栖有孔虫分布及环境指示 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(6): 91-98.
LI Tao, XIANG Rong, LI Tuanjie. Benthic foraminiferal distribution in surface sediments of Zhujiang Estuary and its environmental implications[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*,

- 2011, 31(6): 91-98.
- [7] 李越, 李波, 李涛. 南海北部海域表层沉积物底栖有孔虫分布特征及影响因素 [J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(2): 30-36.
- LI Yue, LI Bo, LI Tao. Distribution pattern and influence factors of benthic foraminifera in the surface sediments of northern South China Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(2): 30-36.
- [8] 方惠瑛. 闽南-台湾浅滩表层沉积物中底栖有孔虫分布及其环境特征 [J]. 热带海洋, 1992, 11(2): 54-61.
- FANG Huiying. Benthic foraminifera in the surface sediments of the Minnan-Taiwan bank region and its environmental characteristics[J]. Tropical Geography, 1992, 11(2): 54-61.
- [9] 袁洁琼, 丁旋, 邹欣庆. 南海辐射沙脊群表层沉积物中底栖有孔虫埋葬群分布特征及其环境意义 [J]. 地学前缘, 2020, 27(6): 276-288.
- YUAN Jieqiong, DING Xuan, ZOU Xinqing. Distribution of benthic foraminiferal taphocoenose in surface sediments and the environmental implication in the radial sand ridge of the South Yellow Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(6): 276-288.
- [10] 李小艳, 石学法, 程振波, 等. 杭州湾表层沉积物中有孔虫分布特征及其环境意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(1): 121-127.
- LI Xiaoyan, SHI Xuefa, CHENG Zhenbo, et al. Distribution of foraminifera in surface sediments of the Hangzhou Bay and its environmental implication[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(1): 121-127.
- [11] 李顺, 张江勇, 钟和贤, 等. 南海北部陆坡 ZSQD196PC 柱状样末次间冰期以来的古海洋学记录: 氧同位素、有孔虫和硅藻 [J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(11): 32-38.
- LI Shun, ZHANG Jiangyong, ZHONG Hexian, et al. Paleocceanographic records of core ZSQD196PC from the northern South China Sea: oxygen isotope, foraminifera and diatom[J]. Marine Geology Frontiers, 2013, 29(11): 32-38.
- [12] 徐建, 黄宝琦, 陈荣华, 等. 南海东北部表层沉积中有孔虫的分布及其环境意义 [J]. 热带海洋学报, 2001, 20(4): 6-13.
- XU Jian, HUANG Baoqi, CHEN Ronghua, et al. Distribution of foraminifera in surface sediments of northeastern South China Sea and its environmental implications[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2001, 20(4): 6-13.
- [13] 李保华, 孔晓敏, 王晓燕, 等. 北部湾中部海域底质沉积物中的有孔虫 [J]. 微体古生物学报, 2010, 27(2): 99-108.
- LI Baohua, KONG Xiaomin, WANG Xiaoyan, et al. Foraminifera in surface sediments of the Tonkin Gulf, northern South China Sea[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2010, 27(2): 99-108.
- [14] 杨毅, 徐艳东, 王发云, 等. 粤西沿岸流和物质输移模型研究及应用 [J]. 科学技术与工程, 201, 15(19): 80-85.
- YANG Yi, XU Yandong, WANG Fayun, et al. A numerical hydrodynamic and transport model in the west coast of Guangdong Province[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(19): 80-85.
- [15] 郝连成, 远继东, 郑立龙, 等. 湛江湾海域表层沉积物粒度特征及沉积环境 [J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(8): 1-10.
- HAO Liancheng, YUAN Jidong, ZHENG Lilong, et al. Grain-size characteristics of surface sediment and sedimentary environment in Zhanjiang Bay[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(8): 1-10.
- [16] 李栓虎. 湛江湾外航道二侧浅滩冲淤变化的成因分析 [J]. 科学技术与工程, 2013, 13(35): 10595-10599.
- LI Shuanhu. Cause analysis of erosion and deposition two side of channel sandbar outside of Zhanjiang Bay[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(35): 10595-10599.
- [17] 陈新庚. 湛江港和雷州湾的生态环境分析与污染现状评价 [J]. 中山大学学报论丛, 1989(3): 210-225.
- CHEN Xingeng. Ecological environment analysis and assessment of the present state of pollution in Zhanjiang Harbor and Leizhou Bay[J]. Sun Yatsen University Forum, 1989(3): 210-225.
- [18] 陈春亮, 张才学. 雷州湾浮游植物群落结构特征及其环境影响分析 [J]. 应用海洋学报, 2016, 35(2): 174-182.
- CHEN Chunliang, ZHANG Caixue. Community structure of phytoplankton in the coastal waters of Leizhou Bay with its relationships to environmental factors[J]. Journal of Applied Oceanography, 2016, 35(2): 174-182.
- [19] 何炎, 胡兰英. 广东雷州半岛上新世有孔虫 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001: 1-189.
- HE Yan, HU Lanying. Pliocene Foraminifera from Leizhou Peninsula, Guangdong Province[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2011: 1-189.
- [20] IJIRIA A, WANG L, OBA T, et al. Paleoenvironmental changes in the northern area of the East China Sea during the past 42 000 years[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2005, 219: 239-261.
- [21] CULVER S. New foraminiferal depth zonation of the northwestern Gulf of Mexico[J]. Palaios, 1988, 3: 69-85.
- [22] JIAN Z M, WANG L J. Late Quaternary benthic foraminifera and deep-water paleoceanography in the South China Sea[J]. Mar Micropaleontol, 1997, 32: 127-154.
- [23] 汪品先, 闵秋宝. 我国第四纪海侵研究中的几个基本问题 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1985, 5(1): 15-25.
- WANG Pinxian, MIN Qiubao. Quaternary marine transgressions in China: some basic questions[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1985, 5(1): 15-25.
- [24] 周洋, 陈芳, 孙桂华, 等. 台湾海峡西北部平潭岛海域表层沉积物中底栖有孔虫分布及其环境控制因素 [J]. 微体古生物学报, 2014, 31(1): 54-63.
- ZHOU Yang, CHEN Fang, SUN Guihua, et al. Benthic foraminiferal distribution in surface sediments of the northwest Taiwan strait near the Pingtan Island and its environmental controlling factors[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2014, 31(1): 54-63.
- [25] 陈荣华. 浙江海岸带表层沉积物中有孔虫的分布及其影响因素 [J]. 东海海洋, 1990, 8(3): 35-48.
- CHEN Ronghua. Distribution of foraminifera in surface sedi-

- ments of the coastal zone of Zhejiang Province and its influencing factors[J]. Donghai Marine Science, 1990, 8(3): 35-48.
- [26] 汪品先, 闵秋保, 卞云华. 南黄海西北部底质中有孔虫、介形虫分布规律及其地质意义 [C]//海洋微体古生论文集, 北京: 海洋出版社, 1980: 61-83.
- WANG Pinxian, MIN Qiubao, BIAN Yunhua. Distribution and geological significance of foraminifera and ostracoda in the sediment of northwest South Yellow Sea[C]//Proceedings of Marine Micropaleozoic, Beijing: China Ocean Press, 1980: 61-83.

Distribution characteristics of benthic foraminifera in surface sediments of Zhanjiang Bay-Leizhou Bay and its environmental significance

LI Lulu^{1,2}, BAO Kuanle¹, ZHANG Jiaqiang¹, ZHANG Decheng¹, REN Kaiwen¹, DAI Youxu^{1*}

(1 Yantai Center of Coastal Zone Geological Survey, China Geological Survey, Yantai 264000, China; 2 Ministry of Natural Resources Observation and Research Station of Land-Sea Interaction Field in the Yellow River Estuary, Yantai 264000, China)

Abstract: Benthic foraminifera from the surface sediments were sampled at 89 points in June 2020 in the Zhanjiang Bay-Leizhou Bay, Guangxi, SW China, and analyzed. A total of 103 species from 52 genus were identified, including 64 species from 37 genus with hyaline tests, 13 species from 10 genus with agglutinated tests, and 26 species from 5 genus with porcelaneous tests. The abundance of benthic foraminifera was characterized by an increase from inner bay to outer bay. Four assemblages were recognized based on Q-type factor analysis. Assemblages I, *Florilus scaphus* - *Pseudorotalia gaimardi*, was dominated by warm water species, indicating the shallow water environment of the inland shelf, which was obviously influenced by the South China Sea warm current. Assemblages II, *Nonion belridgense* - *Hemirootalia foraminulosa* - *Elphidium macellum*, was mainly a salt-water species, which reflected a shallow water environment with significantly increased salinity in ocean-land transition zone. Assemblages III, *Hanzawaia convexa* - *Rosalina bradyi*, was dominated by shallow-water species, indicating the shallow water environment of inland shelf affected by coastal current and South China Sea warm current. Assemblages IV, *Neoconorbina terquemi* - *Ammonia beccarii*, consisted mainly of euryhaline species, reflecting the coastal environment that obviously affected by the coastal current. A comprehensive analysis on various factors on the distribution of benthic foraminiferal assemblages showed that bottom water temperature and water depth are main impact factors on the distribution of benthic foraminifera assemblages in the study area. In addition, the distribution of benthic foraminifera is also influenced by ocean current and substrate type.

Key words: Zhanjiang Bay-Leizhou Bay; surface sediments; benthic foraminifera; factor analysis; marine environment