

渤海湾西部现代有孔虫群垂直分带的特征 及其对全新世海面、地质环境变化的指示

李建芬^{1,2}, 商志文², 王 宏², 裴艳东², 王 福², 田立柱^{1,2}

LI Jian-fen^{1,2}, SHANG Zhi-wen², WANG Hong²,

PEI Yan-dong², WANG Fu², TIAN Li-zhu^{1,2}

1. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083;

2. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170

1. School of Marine Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Tianjin Centre, China Geological Survey, Tianjin 300170, China

摘要:对渤海湾西部潮间带和浅海区 106 个表层底质样品的活体与死有孔虫进行分析, 筛选出 8 个优势种。利用死体有孔虫研究了优势种随水深(高程)变化的垂直分布特征, 讨论了不同属种、不同有孔虫垂直组合带与地质环境、海面的定量关系。结果表明, 有孔虫属种和组合的指示范围决定其作为地质环境及海面变化指标的灵敏性和精度。确立了研究区有孔虫海相性评价指数及与水深(高程)的相关性。根据对研究结果的实例应用的分析, 恢复了研究区一个局部地点的相对海面变化曲线, 为全新世地质环境和海面变化研究提供了一个新的尝试案例。

关键词:渤海湾; 有孔虫; 优势种; 垂直分带; 水深(高程); 海平面变化

中图分类号: P736

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2010)05-0650-10

LI J F, Shang Z W, Wang H, Pei Y D, Wang F, Tian L Z. Modern foraminifera assemblages: vertical zonation and its indication for Holocene sea level and geoenvironmental reconstruction in Bohai Bay, China. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(5):650-659

Abstract: 8 dominant species were chosen based on the living and dead foraminifera analyses from 106 surface samples, taken from the intertidal zone and shallow sea on the west of Bohai Bay. The vertical distribution features of the dead foraminifera depending on the water depth (altitude) were studied, and a quantitative relation of different foraminiferal species between vertical assemblage zones and sea level and geoenvironment was discussed. The results show that the indicative scope of the foraminiferal species and assemblages defines its sensitivity and precision as an indicator of geoenvironment and sea level (altitude) change. The marine index of the foraminifera and its relativity with altitude were constructed. The relative sea level curve of the study area was obtained by a case study. It has further proved that foraminifera can be an indicator for the sea level and geoenvironmental reconstruction.

Key words: Bohai Bay; foraminifera; dominant species; vertical zones; water depth(alitude); sea level change

海平面变化是全球变化研究的重点问题之一。提取地质记录中的海面变化信息、了解全新世海平面状况对认识现代海平面具有重要的指示意义。有

孔虫作为地质环境变化的记录者, 受到了人们的广泛关注, 自 Scott^[1]在加利福尼亚开展盐沼有孔虫垂直分带与海平面关系的研究以来, 在欧美及其他一

收稿日期: 2010-01-25; 修订日期: 2010-02-02

地调项目: 中国地质调查局项目《环渤海湾重点地段环境地质调查及脆弱性评价》(编号: 1212010540501)和国家 908 专项(编号: TJ908-02)资助

作者简介: 李建芬(1967-), 女, 副研究员, 从事微体古生物及海岸带地质环境变化研究。E-mail: tjlianfen@cgs.gov.cn

些地区开展了类似的研究^[2-13]。这些研究结合盐沼植物分带,把最高高潮位(HHW)处的有孔虫组合作为精确的海平面指示物,但多局限于海湾、河口湾或障蔽岛后泻湖等隐蔽条件下盐沼植物发育的地区。同时,这些盐沼有孔虫多为胶结质壳,在地层中不易被保存。另一方面,中国对滨海沼泽、海岸带及海区有孔虫的研究也取得了不少成果^[14-26],集中探讨了分布特征与环境意义的关系,研究了水深和有孔虫组成的关系^[14-15],但关于现代潮间带有孔虫垂直分带的特征,仅见尤坤元等^[27]、李建芬^[28]等少量报道。虽然这些研究作为地层中古地质环境的研究打下了基础,但各海区有孔虫的分布存在差异性,而且渤海湾地区属于开放潮滩,近现代人类活动强烈,致使盐沼不发育,少见具有指示意义的胶结壳体的盐沼有孔虫如 *Trochammina inflata*(胖砂轮虫)、*Trochammina macrescens*(瘦瘪砂轮虫)等。因此,在现代开放潮滩和浅海区探讨有孔虫与环境、海面的关系具有更重要的意义。本文拟通过讨论渤海湾西部潮间带及近岸浅海区现代有孔虫垂直分带的特征,探讨与环境、海面的定量关系。

研究区位于渤海湾西部的天津市岸段,包括潮间带及近岸浅海水域。底质以粘土质粉砂为主,仅在驴驹河潮间带见有砂质沉积;潮汐以不正规的半日潮为主;波浪作用较弱,平均波高 0.6m;河流入海水量主要集中在汛期,在平枯水年几乎无水入海;年平均温度 12.9℃、盐度 27.96‰,无温盐跃层^[29]。

1 样品采集和分析方法

在渤海湾西部的天津市潮滩沿垂直岸线的 8 条剖面采集表层底质样品,样品采集时间为 2005 年 6—9 月;同时利用捷创力 610 型全站仪对 6 条剖面(由南至北编号为 1、2、3、6、7、8)进行了水准测量,每条剖面测量点水平间距约 100m(剖面下部站位的高程值是通过潮滩实测坡度推测的),各点高程与国家 85 高程联网。在水深小于 5m 的近岸浅海区以 5~10km 的网格间距采集底质样品(图 1),样品采集时间为 2007 年 7 月;同时利用测深仪测量采样点的水深,并通过实时潮位校正,将水深数据统一换算为国家 85 高程,以便与潮滩数据构成统一的高程(水深)系统。因此,本文所指的高程及水深 0 点均为黄海高程基准点。潮滩及近岸浅海区共采集分析样品 106 个。其中,87 个样品具有水深(高程)值,

分布在(-7.7~+2.5m 之间,平均间距 0.1m)。潮滩剖面属开敞的海岸潮滩,潮滩向陆一侧与人工养殖池的外缘(剖面 1)、河流闸口(剖面 2)或海堤(其余剖面)相连,向海为平缓的泥质潮滩。研究区平均高潮位(MHW)为+1.2m,测量结果显示剖面 1、2 向陆延伸到平均高潮位以上,其余剖面向陆最高点均在平均高潮位以下。

在潮滩站位直接用内径 5.1cm、厚 1cm 小圆盒采集表层 1cm 厚的样品,或利用挖泥斗将浅海区底质样品提取到船甲板后,以同样方法采集挖泥斗耳盖处表层约 1cm 厚的样品(样品体积为 20.4cm³)。所采样品立即装入样品瓶,加入溶有虎红(Rose Bengal, C₂O₄H₂O₅T₄Cl₄Na₂)的酒精,并充分搅拌,对活体有孔虫染色。样品在实验室过 240 目(0.063mm)的湿铜筛。筛上部分根据样品中有孔虫数量的多少,按 1/2、1/4……1/64 的比例在显微镜下进行挑选、鉴定、统计,对有孔虫活体和死亡个体分别进行了统计。

2 结果与讨论

渤海湾西部潮间带及近岸浅海区 106 个底质沉积物样品中的有孔虫由 40 属 114 种组成。其中,95 个站位出现活体有孔虫,计 14 属 32 种。各站位无论活体抑或死体有孔虫的丰度不同,活体丰度为 0~2673 个,死体有孔虫丰度为 4~45568 个。

死体有孔虫聚合体代表了研究站位有孔虫在几年内的平均状况,消除了活体有孔虫的季节性及埋藏过程中产生的影响,能够更准确地提供该站位的环境信息^[30]。因此,以下仅讨论死体有孔虫的分布特征。研究区现代沉积速率在海区一般为 0.3~0.8cm/a、潮间带一般约 1cm/a,仅在研究区个别靠近河口或紧邻岸堤的地方,沉积速率大于 1cm/a^{①②},因此样品中的死体组合代表了 1~4 年的有孔虫平均状况,对于地层古环境的恢复更具指示意义。

各站位有孔虫组成的优势度均较高,含量较高的前 3 种一般可达 70%以上。以各站位含量最高的前 3 个种有孔虫作为该站位有孔虫群的优势种,106 个站位共计 13 种(表 1)。为使数据分析更具有代表性,选择优势种出现频率(该种作为优势种出现的次数占 106 个样品百分数)和含量(作为优势种)较高的 *Cribronion porisuturalis* Zheng(孔缝筛九字虫)、*Elphidium simplex* Cushman(简单希望虫)、

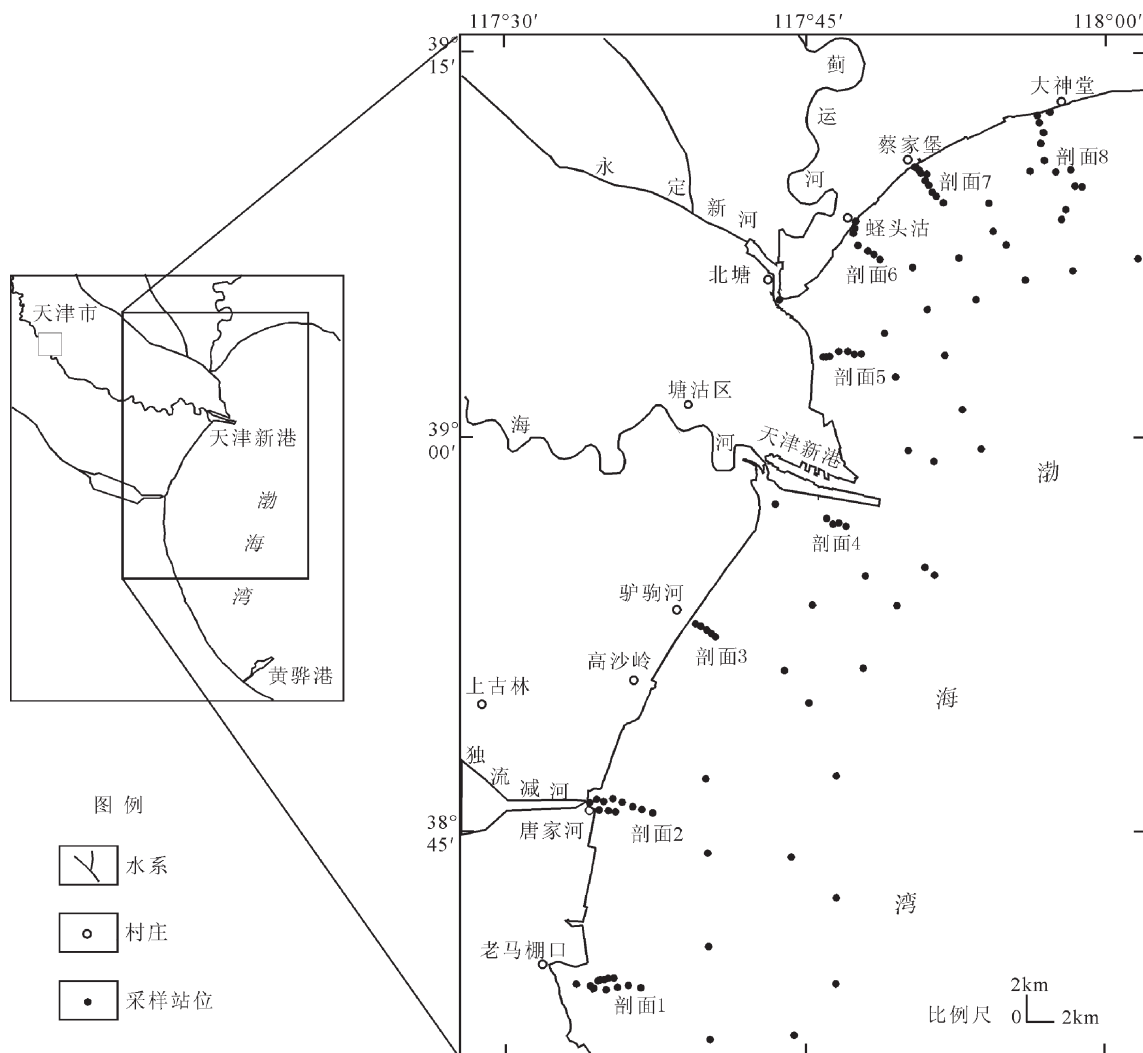


图1 渤海湾西部潮间带及浅海区底质样品取样位置图

Fig. 1 The sampling location within the intertidal and shallow sea zones on the western Bohai Bay

Ammonia beccarii (Linné) vars. (毕克卷转虫变种)、*Ammonia limbatobeccarii* McLean (凸镶边卷转虫)、*Protelphidium tuberculatum* d'Orbigny (具瘤先希虫)、*Quinqueloculina akneriana rotunda* d'Orbigny (圆形短五块虫)、*Pseudogyroidina sinensis* Zheng (中华假圆旋虫) 和 *Ammonia granulumbilica* Zheng (粒脐卷转虫) 8 种进行详细分析。

2.1 渤海湾西部潮间带及浅海区有孔虫属种的垂直分布特征及其与海面的关系

8 个优势种百分含量变化具有垂直分带的特征 (图 2), 显示每个优势种都占据一定水深 (高度) 范围。虽然有些种在高含量区域内有一定的变化幅度, 可能是有孔虫分布的成群性、不均匀性^[31-32]或水动

力差异等原因造成的, 但总趋势具有明显的沿高程垂直分布的规律。各优势种具体分布状况详述如下。

C. porisuturalis 垂直分布范围为 +1.2~+2.1m (向下零星出现, 含量不足 1%, 忽略不计), 出现在独流减河和马棚口剖面上部 (其他剖面由于未采到该部位的样品而无法体现); 而在渤海湾西南部的老狼坨子高含量垂直分布范围为 +0.7~+1.9m^[28]。高含量集中在 +2.0~+2.3m, 含量为 8%~28%。在独流减河富集的高程明显高于老狼坨子, 可能是由于前者位于河口, 受到潮水沿河口上溯的影响。老狼坨子剖面代表了正常开放潮滩, 具有更好的代表性, 研究区平均高潮位 (MHW) 为 1.2m, 表明在平均高潮位附近含量最高, 向上可达 +1.9m, 在河口地

区可达+2.3m。因此,该种分布在高潮位及以上的盐沼环境,它的大量出现可以作为开放的潮滩环境下平均高潮位的标志特征。

E. simplex 的垂直分布范围为-1.6~+2.5m,高含量区集中分布在+0.6~+1.4m,含量为 6%~67%,向上向下含量明显减少,0m 以下一般含量不足 1%。这表明该种在 MSL 以上至 MHW 之间的高程范围内生存,特别富集在潮间带上部。因此,在由海向陆的变化过程中,*E. simplex* 可作为潮间带上部的标志,它的含量突然降低可作为平均高潮位的标志。

A. beccarii vars.的垂直分布范围最广,几乎出现在各站位,在 94%的站位作为优势种出现。但随水深的变化含量不同,仍然具有明显的垂直分布特征,含量大于 20%的高含量段,富集在-1.2~+2.5m 之间,在-3.0m 以下的浅海区一般含量小于 20%,这种变化特征仍具有沉积环境变化的标志意义。这表明该种虽然可以在潮间带及浅海区广泛分布,但在潮间带地区含量高,特别是在潮间带上部甚至可达 80%,而在浅海区随水深增加含量降低为 20%以下。

P. sinensis 的垂直分布范围为-1.5~+2.0m(向下零星出现,含量不足 1%,忽略不计),富集在+0.6~+0.9m 之间,含量 17%~20%,表明该种分布在潮间

表 1 渤海湾西部潮间带及近岸浅海区优势种有孔虫出现频率和百分含量

Table 1 Frequency and percentage of the dominant foraminiferal species occurs in the intertidal zone and shallow sea on the western Bohai Bay

有孔虫名称	出现频率/%	平均含量/%
<i>Ammobaculites</i> sp.	2	5.26
<i>Ammonia beccarii</i> (Linné) vars.	94	26.6
<i>Ammonia limbatoecccarii</i> Mclean	8	6.9
<i>Ammonia granulumbilica</i> Zheng	7	10.1
<i>Ammonia maruhasii</i> Kuwano	1	8.6
<i>Cribrononion porisuturalis</i> Zheng	3	17.8
<i>Cribrononion</i> sp.	1	3.1
<i>Cribrononion vitreum</i> Wang	2	9.0
<i>Elphidium limpidum</i> Ho Hu et Wang	1	3.67
<i>Elphidium simplx</i> Cushman	13	43.6
<i>Pseudogyroidina sinensis</i> Zheng	3	16.1
<i>Protelphidium tuberculatum</i> d'Orbigny	59	15.9
<i>Quinqueloculina akneriana rotunda</i> Gerke	86	33.7

带上部。但该种在整个研究区分布不均匀,在应用时要适当考虑。

A. granulumbilica 的垂直分布范围为+2.1~+0.6m(向下零星出现,一般含量不足 1%,忽略不计),含量 2%~13%,表明该种分布在潮间带中下部。

P. tuberculatum 的垂直分布范围较广,在研究

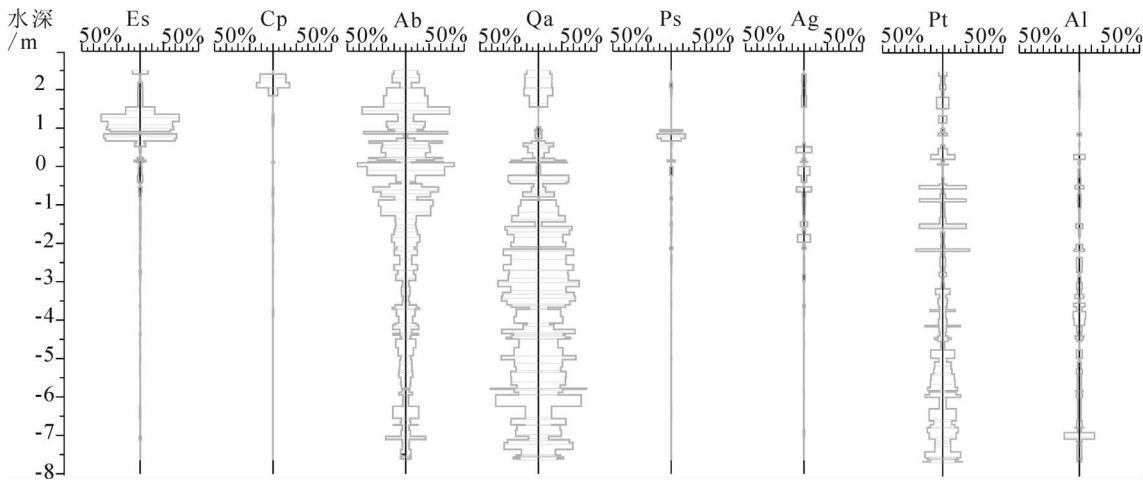


图 2 渤海湾西部潮间带及浅海区有孔虫(死体)优势种的垂直变化特征

Fig. 2 The vertical distribution change features of the dead dominant foraminifera in the intertidal zone and shallow sea on the western Bohai Bay

Cp、Es、Ab、Qa、Ps、Ag、Pt、Al 分别代表有孔虫 *C. porisuturalis*、*E. simplex*、*Ammonia beccarii* vars.、*Q. akneriana rotunda* (包括少量的 *Q. complanata*、*Q. bellatula*)、*P. sinensis*、*A. granulumbilica*、*P. tuberculatum*、*A. limbatoecccarii*
水深 0m 以黄海高程起算点(相当于 MSL 的位置)为准(下文图表中有孔虫表示方法相同)

区大部分站位出现,59%的站位作为优势种。高于10%的含量主要分布在-3.2m以下,向下随水深加深含量增加,-5m以下含量大于20%。在-3.2m以上,该种断续分布,含量一般小于10%,但在驴驹河剖面的站位3-1、3-2、3-3、3-4和3-5含量大于20%,甚至高达45%,可能由于这里是研究区仅有的砂质底质或水动力作用强等因素^[3],不利于其他有孔虫的保存,致使其含量相对集中,作为特例考虑。在渤海湾北部该种含量大于25%的区域水深在10~20m之间^[25]。因此,水深分布范围表明该种为近岸浅海区特征种。

A. limbatobeccarii 的垂直分布范围较广,几乎出现在所有站位,但含量较小,一般小于10%,仅在8%的站位以优势种出现。在-2.4m以下含量较高,为4%~10%,且连续出现。-2.4m以上断续出现,含量一般小于2%。水深分布范围表明该种为浅海区特征种。

Q. akneriana rotunda 的垂直分布范围很广,几乎出现在所有站位,在86%的站位以优势种出现。但随水深的变化含量不同,仍然具有明显的垂直分布特征。在1.4m以下,随深度加深含量增高,1.4~0.6m,含量为0或小于10%;0.6~0.1m含量10%~20%;0m以下,含量大于30%,最高达73%。这表明该种主要分布在低于0m水深的近岸浅海区。但在

1.4~2.5m含量却增高为15%~24%,是由于在平均大潮高潮位以上,原生本地种有孔虫较少,多为风暴潮或特大潮等事件带来的异地埋藏的有孔虫,该种由于壳壁厚易于保存,所以含量较高。水深分布范围表明该种为潮间带下部及近岸浅海区的特征种。

总之,在大潮高潮位以下范围内,每个有孔虫属种均有一定的垂直分布指示范围。在研究区水深(高度)对有孔虫的分布具有明显的控制作用,可以作为环境及海面指示的标尺,不同属种对水深的敏感度不同,其标尺的指示精度也不同。垂直分布范围越窄,对环境及海面变化的灵敏度越高。因此,*C. porisuturalis*、*E. simplex*、*P. sinensis* 的指示精度相对较高;*A. beccarii* vars.、*A. limbatobeccarii*、*P. tuberculatum* 和 *Q. akneriana rotunda* 分布范围广,指示精度相对较低,但这些属种开始大量出现及含量随水深而变化的特征仍具有重要的环境指示意义。

2.2 渤海湾西部潮间带及浅海区有孔虫组合的垂直分布特征及其与海面的关系

渤海湾西岸潮间带及浅海区表层样品按照高程排列,利用 Tilia 软件分别对8种有孔虫优势种进行聚类分析,将有孔虫群分为4个组合带、6个亚带(图3),各组合带有孔虫组成不同,指示的高程范围不同。有孔虫的组合带是各单种有孔虫在不同水深(高程)范围内的交集,比每一个单种垂

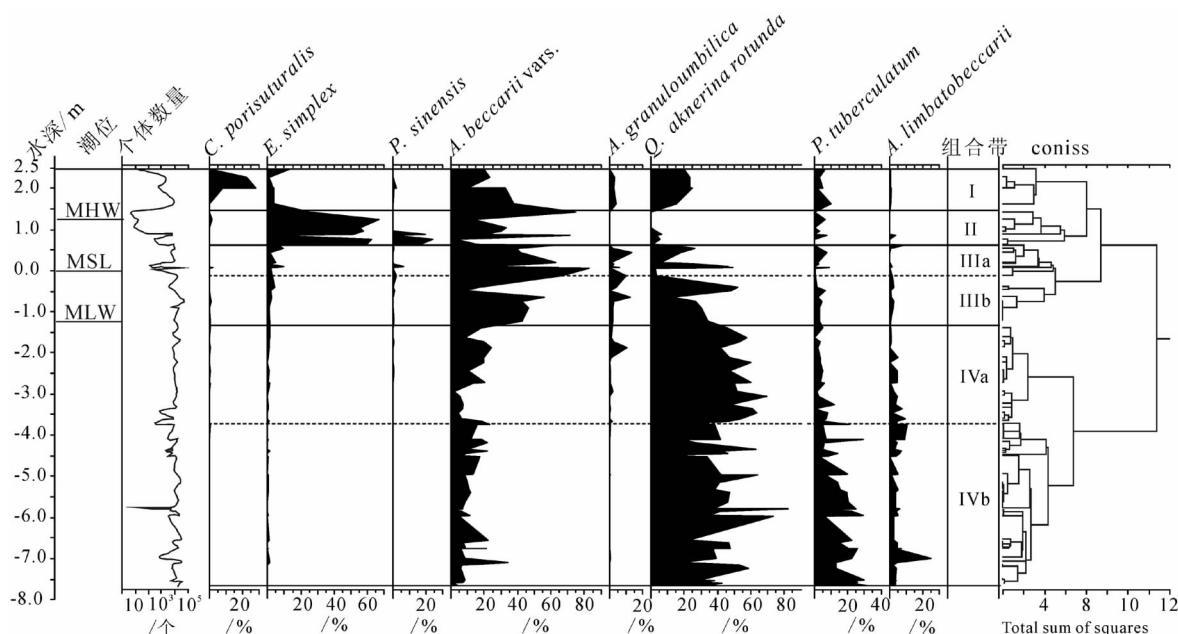


图3 渤海湾西部潮间带及近岸浅海区死体有孔虫群的聚类分析特征

Fig. 3 Clustering plots showing the dead foraminifera in the intertidal zone and shallow sea on the western Bohai Bay

直分布的范围要减小,因此,对海面及地质环境的指示精度更高。

组合 I 带,以 *A. beccarii* vars. - *C. porisuturalis* - *Q. akneriana rotunda* 为组合特征,3 种有孔虫含量可达 75% 以上;其他有孔虫有 *P. tuberculatum*、*E. simplex*、*A. granuloumbilica*、*P. sinensis*、*A. limbatobeccarii* 等,表现为盐沼、潮间带及浅海种的混合特征。有孔虫丰度较低,一般小于 1000 个;复合分异度较高,为 2.2~2.6。水深分布范围为 +1.4m 以上,位于平均高潮位(MHW)附近及以上。

组合 II 带,以 *E. simplex* - *A. beccarii* vars. - *P. sinensis* 为组合特征,3 种有孔虫含量达 80%,甚至单种含量可达 50% 以上;其他有孔虫有 *P. tuberculatum*、*Q. akneriana rotunda* 等,表现为以潮间带有孔虫种为主的组合特征。有孔虫丰度较低,一般不足 500 个;复合分异度较低,一般为 1.0 左右,最高值小于 2.0。水深分布范围为 +0.7~+1.4m,位于潮间带上部。

组合 III 带,以 *A. beccarii* vars. - *Q. akneriana rotunda* 为组合特征,一般二者含量可达 60%;另外常见 *A. granuloumbilica*、*E. simplex*、*P. tuberculatum*、*A. limbatobeccarii* 等。水深分布范围为 -1.3~+0.7m,位于潮间带中、下部。可进一步分为 2 个亚带。

组合 IIIa 带,以 *A. beccarii* vars. - *Q. akneriana rotunda* 为组合特征,含量分别达 30% 和 20% 以上。有孔虫丰度值变化较大,可以从几百个至上万个个体不等;复合分异度变化较大,一般小于 2.0,变化范围 1.0~2.5。水深分布范围为 -0.2~+0.7m,位于平均海面以上的潮间带中、上部。

组合 IIIb 带,以 *Q. akneriana rotunda* - *A. beccarii* vars. 为组合特征,二者含量接近。另外,*P. tuberculatum* 和 *A. limbatobeccarii* 较 IIIa 带略有增加。有孔虫丰度值较大,一般几千至近万个个体;复合分异度 2.0~2.4。水深分布范围为 -1.3~ -0.2m,位于平均海面以下至平均低潮位之间的潮间带下部。

组合 IV 带,以 *Q. akneriana rotunda* - *A. beccarii* vars. - *P. tuberculatum* - *A. limbatobeccarii* 为组合特征。分布在 -1.3m 以下至研究区最深部的潮下带及浅海区。可进一步分为 2 个亚带。

组合 IVa 带,以 *Q. akneriana rotunda* - *A. beccarii* vars. - *P. tuberculatum* 为组合特征,常见 *A. limbatobeccarii*、*A. granuloumbilica* 等。较 III 带 *P. tubercu-*

latum 的含量明显增加,一般小于 10%。有孔虫丰度较高,一般为几千至上万个个体;复合分异度高,一般为 2.2~2.6。水深分布范围为 -3.7~-1.3m,位于潮下带的近岸浅水环境。

组合 IVb 带,以 *Q. akneriana rotunda* - *P. tuberculatum* - *A. beccarii* vars. 为组合特征,*P. tuberculatum* 的含量可达 20%。常见 *A. limbatobeccarii*。有孔虫丰度较高,一般为几千至上万个个体,甚至达两万多个;复合分异度高,一般为 2.2~2.6。水深分布范围为 -3.7m 以下的浅海环境。

2.3 渤海湾西部潮间带及近岸浅海区

有孔虫海相性指数

每一种有孔虫都有特定的生存环境,所代表的海相性意义不同。渤海湾西部潮间带及近岸浅海区有孔虫的垂直变化规律表明,8 种优势属种的海相性由弱到强依次为 *C. porisuturalis*、*E. simplex*、*A. beccarii* vars.、*P. sinensis*、*A. granuloumbilica*、*Q. akneriana rotunda*、*A. limbatobeccarii* 和 *P. tuberculatum*。其中,前 4 种代表了弱海相的潮间带及其以上环境(*A. beccarii* vars. 虽然可以在浅海区出现,但在潮间带含量高,随水深增大含量减低,因此仍将其归入弱海相性种),后 4 种代表了中等海相性的潮下带及近岸浅海区环境。在判定地层中某一地层的环境特征时,要综合考虑有孔虫组合的特征。为了定量地对比海相性的变化特征,根据各属种海相性的强弱及丰度特征,给每一个属种赋予不同的值,建立埋藏有孔虫海相性综合评价指数。评价指数的大小代表海相性的强弱程度。海相性综合评价指数(M)计算公式:

$$M = (0.01 \sum_{i=1}^n P_i + 0.05 \sum_{k=1}^n P_k + 0.10 \sum_{j=1}^n P_j) \times H_s$$

式中, P_i 代表潮间带环境的弱海相性有孔虫种的百分含量,研究区的优势种有 *C. porisuturalis*、*E. simplex*、*Ammonia beccarii* vars. 和 *P. sinensis*; P_k 代表潮下带及近岸浅海环境的中等海相性有孔虫种的百分含量,研究区的优势种有 *A. granuloumbilica*、*Q. akneriana rotunda*、*A. limbatobeccarii* 和 *P. tuberculatum*; P_j 代表水深大于 20m 的陆架浅海环境的强海相性有孔虫种的百分含量,如 *Elphidium magellanicum*^[25,34],在研究区没有作为优势种出现; H_s 代表该样品有孔虫的复合分异度。

渤海湾西部潮间带及浅海区表层样品死体有孔虫的海相性综合评价指数(图 4),呈现了随水深加

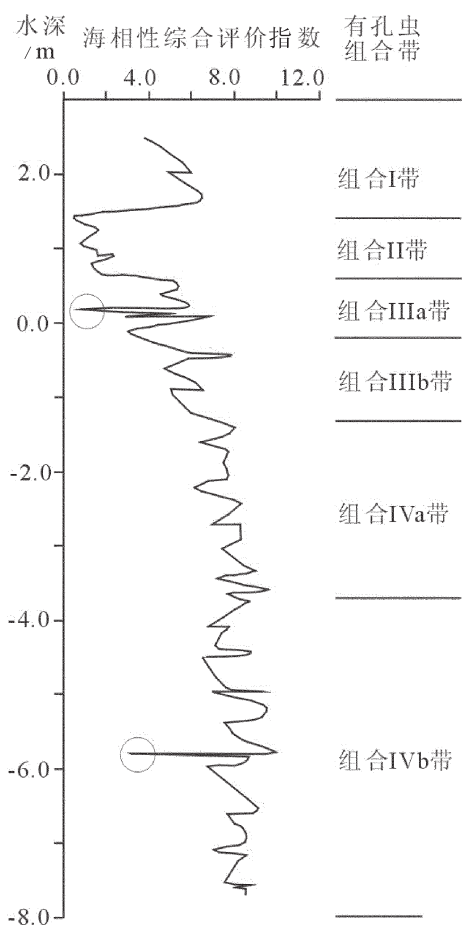


图4 研究区海相性综合评价指数与水深、有孔虫组合带的关系

Fig. 4 The relationship between the marine index and water depth, foraminiferal assemblages in the study area

深而增大的规律。但在+1.4m 以上却出现指数增高的异常显现,原因是在大潮高潮位以上的地区,原生本地种有孔虫较少,多为风暴潮或特大潮等事件带来的异地埋藏有孔虫,致使海相性指数偏高,为非正常环境。在+1.4m 以下的+0.2m 和-5.8m 处存在 2 个异常低值(图 4 中圆圈所在点),可能由于受到采样点旁边的海洋工程建设中人工堆土的影响,如果

忽略这些异常点,则海相性综合评价指数随水深的增加而增大,与水深、有孔虫组合带具有明显的相关性(图 4,表 2),相关系数 $R^2=0.78$ 。因此,海相性综合评价指数可以反映海相性的强弱。海相性指数越大,水深越深。

3 有孔虫指示渤海湾西岸全新世海面变化的实例

将现代潮间带及近岸浅海区有孔虫群的垂直分带性与地质环境、海面的关系应用于地层,是现代有孔虫群研究的最终目的。本文以位于天津东北部的兴坨 H1 孔有孔虫为例说明。H1 孔口高程约 1.6m,孔深 28m,在埋深 0~16.1m 段取样 85 个,其中 0~6.15m 段 47 个,间隔 3~30cm 不等;6.15m 以下取样 38 个,间隔 12cm 至数十厘米不等,每个样品厚度为 2cm^[35]。

以每个样品中含量最高的前 3 个有孔虫种作为该样品有孔虫群的优势种,主要优势种有 10 种:A. beccarii vars.、E. simplex、Pseudononionella variabilis Zheng(多变假小九字虫)、P. tuberculatum、Q. akneriana rotunda、P. sinensis、A. granuloumbilica、C. porisuturalis、E. magellanicum 和 E. nakanokawae-nese。优势种与渤海湾西部潮间带、浅海区底质沉积物中现代有孔虫对比,缺少了 A. limbatobeccarii,增加了 P. variabilis、E. magellanicum 和 E. nakanokawae-nese,其他成分类似。P. variabilis 含量最高可达 65%,该种的分布与 C. porisuturalis 接近^[27],利用有孔虫组合特征判断古环境及高程位置时参考 C. porisuturalis。

用 Tilia 软件对兴坨 H1 孔的 10 种有孔虫优势种进行聚类分析,划分为 13 个有孔虫组合带,各带有孔虫组成不同。计算每个样品的海相性综合评价指数,结合各组合带的有孔虫组成与渤海湾西岸潮滩、浅海区现代埋藏有孔虫海相性指数、组合特征对比,确定各带(图 5)。其中由下至上有 4 个特殊组合

表 2 研究区表层样品各有孔虫组合带的海相性综合评价指数
Table 2 The marine index of the foraminiferal assemblages in the surface samples of the study area

有孔虫分带	I	II	IIIa	IIIb	IVa	IVb
海相性指数平均值	5.2	1.7	4.3	5.9	7.7	8.0
海相性指数范围	3.7~6.3	0.6~3.2	1.8~7.4	5.1~7.6	6.4~9.9	
		一般 1~2	一般 3~6	一般 5~6	一般 7~9	

带:①第 13 带,在底部 15.62m 见有孔虫 *A. beccarii* vars.48 个,见介形虫 *Sinocytheridea impressa* 和 *Neomonocerotina dongtaiensis*12 瓣,表明该带受海洋的影响,属于有孔虫组合 I 带;②第 12 带,15.3~14.5m 段则未见任何有孔虫及介形虫,说明该段处于未受海水影响的潮上带,14.6m 以上又进入埋藏 I 带,预示着在该时间段内可能存在一次海面下降,但无法准确确定当时的海面位置,只能根据该沉积层至少应高于当时的大潮高潮位来推测当时的海面;③第 2 带,有孔虫丰度高,复合分异度低(<1.5),海相性弱,优势度高,*P. variabilis* 含量最高可达 65%,为潮间泻湖环境,不能直接确定当时的海面位置,只能根据其下部的第 3 带为有孔虫组合 II 带,代表了潮间带上部环境,来推测海面的位置;④第 1 带,有孔虫丰度低,复合分异度低(<1.5),海相性弱,组成与第 2 带类似,但有孔虫个体小,表面由于被搬运而磨蚀成“毛玻璃状”,含大量陆相介形虫,为受河流泛滥影响的沿海低地环境,同样无法准确确定当时的海面位置,只能根据该沉积层至少应高于当时的大潮高潮位来推测当时的海面。

各组合带指示了不同的沉积环境,根据各带的水深分布范围即可恢复当时的相对海面位置,由于各带的分布是在一定的垂直方向上的误差范围内,存在一个最高值和一个最低值,依此确定的海面位置因而也存在一个区间范围(图 5)。这里并未考虑排除构造、沉积物压实等因素可能的影响,获得的仅是区域性的相对海面曲线。范围越小精度越高,显然,由 I—IIIa 带确定的环境及海面精度较高。

16.7m 处的炭质泥 ¹⁴C 年龄为 9486cal BP^[35],根据李凤林等^[36]所确定的 13.98m 作为全新世中期的开始,年龄 7500BP,按沉积速率推测 15.3m 处

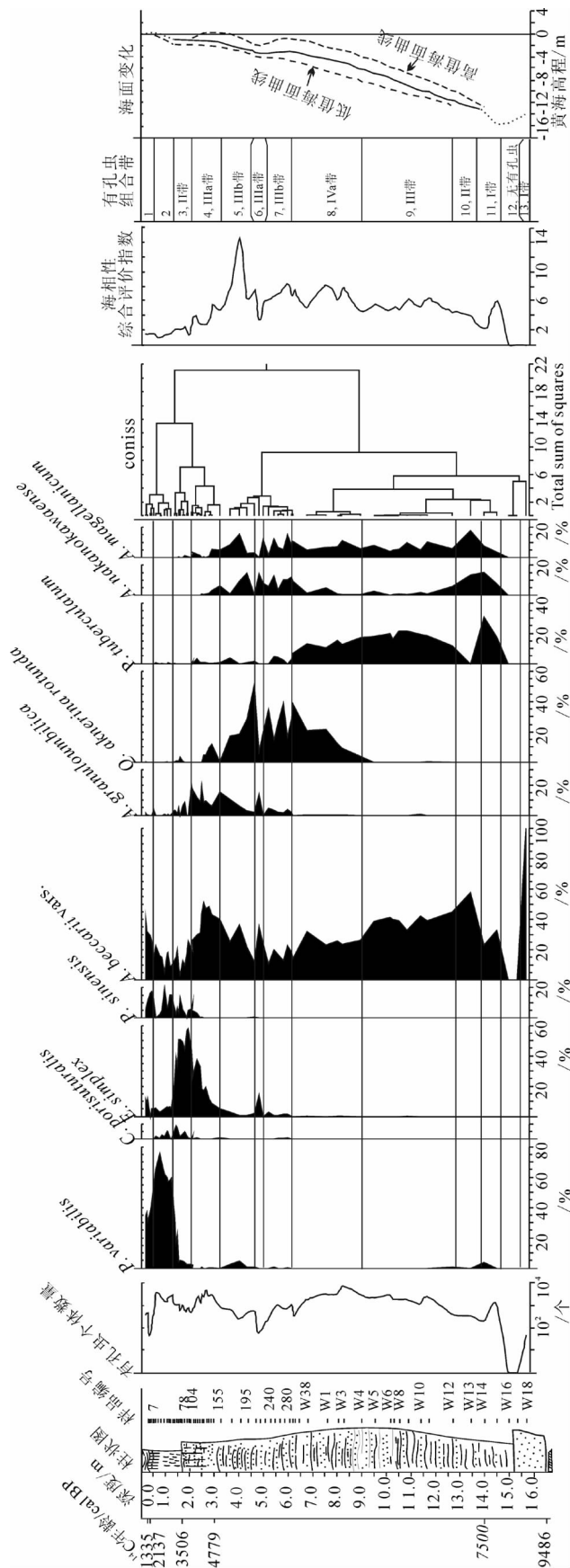


图 5 兴坨 H1 有孔虫组合分带特征和深度-海面变化曲线的恢复
Fig. 5 Zonation of the foraminiferal assemblages and a reconstructed depth-sea level change curve of the Xingtuo H1 borehole
图中 ¹⁴C 年龄, 正体为实测年龄^[35], 斜体为推测年龄^[36]

可能的海面开始下降至 14.6m 处,海面恢复上升时的年龄为 8000~8500BP。这恰与在格陵兰冰心中得到证实的 8200cal BP 前后的气候转冷事件基本一致^[37]。如果确实如此,就为这次气候突变的广泛性提供了证据。但该次海面波动还需要对更多的钻孔资料的深入研究。

另外,相对海面变化曲线表明,在 8000~4696BP 期间海面快速上升,平均上升速率为 4.0mm/a;之后,上升速率明显减缓,潮间带环境在现在的宁河中部兴坨—七里海一线停留逾千年,自那时至今,海面平均上升速率为 0.34mm/a。海面的快速上升可能与全新世暖期(Megathermal)有关。目前多数研究趋向于 8000~5000BP 经历了全新世最温暖阶段^[38~39],海面也快速升高,之后海面上升速率趋缓。区域性的相对海面变化趋势与全球变化基本一致,进一步证明了有孔虫对环境和海面变化指示作用的可行性。

4 结 语

渤海湾西部潮间带及近岸浅海区底栖有孔虫表现出明显的垂直分带特征,表明水深(高程)对研究区有孔虫的分布有重要作用,在开放的潮间带及浅海区可以作为地质环境和海面变化的有孔虫标尺。将结果应用于全新世海面变化的实例——H1 孔相对海面变化曲线,表明有孔虫作为渤海湾西岸全新世地质环境和海面变化指示是可行的,但恢复海面仅限于开放的潮间带及近岸浅海环境,不能在河口、泻湖等环境应用,而且指示的精度随属种和组合的不同而存在差异。

单个属种的指示:分布水深(高程)范围越窄,海面变化的灵敏度越高,指示精度也越高,分布在较高位置的 *C. porisuturalis*、*E. simplex* 和 *P. sinensis* 高于 *A. beccarii* vars. *A. limbatobeccarii*、*P. tuberculatum*、*Ammobaculites* sp. 和 *Q. akneriana rotunda*。

有孔虫组合的指示:有孔虫组合特征作为海面变化的标尺,I—IIIa 带的精度高于 IIIb~IVb 带。

海相性综合评价指数:有孔虫的海相性综合评价指数可以评价不同环境下海相性的强弱,与水深(高程)变化的相关性较好,可以作为不同环境、海面变化的一个定量评价指标。但是,平均高潮位以上的潮上带下部是一个特殊地带,由于受到风暴潮等特殊事件的影响,海相性指数偏高,在具体分析时应予以特别的注意。

致谢:中国地质科学院矿产资源研究所范昌福博士参加部分样品采集,中国地质科学院地质研究所林景星研究员对部分有孔虫种属进行复核鉴定并审阅全文提出修改意见,在此一并表示衷心的感谢!

参考文献

- [1]Scott D B. Quantitative studies of marsh foraminiferal patterns in southern California and their application to Holocene stratigraphic problems[C]//First International Symposium on Benthonic Foraminifera of Continental Margins, Part A, Ecology and Biology. Maritime Sediments, Special Publication 1, 1976:153-170.
- [2]Scott D B, Medioli F S. Vertical zonations of marsh foraminifera as accurate indicators of former sea levels[J]. Nature, 1978, 272 (5653): 528-531.
- [3]Scott D B, Medioli F S. Quantitative studies of marsh foraminiferal distributions in Nova Scotia: Implications for sea level studies[C]//Cushman Foundation for Foraminiferal Research. Special Publication, 1980:17, 58.
- [4]Scott D B, Medioli F S. Foraminifera as sea-level indicators, in Van de plassche, Sea-level Research[C]//A Manual for the Collection and Evaluation of Data. Geo Books, 1986:435-456.
- [5]Scott D K, Leckie M R. Foraminiferal zonation of Great Sippewissett Salt Marsh (Falmouth, Massachusetts)[J]. Journal of Foraminiferal Research, 1990, 20:248.
- [6]Scott D B, Hsasegawa S, Saito T, et al. Marsh foraminiferal and vegetation distribution in Nemuro Bay wetland areas, eastern Hokkaido [J]. Transactions and Proceedings of the Paleontological Society of Japan, 1995, 180: 282-295.
- [7]Scott D B, Collins E S, Duggan J ,et al. Pacific rim marsh foraminiferal distributions: implications for sea-level study[J]. Journal of Coastal Research , 1996, 12 (4): 850-861.
- [8]Williams H F L. Foraminiferal zonations on the Fraser River delta and their application to paleoenvironmental interpretations[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1989, 73: 39-50.
- [9]Culver S J. Benthic Foraminifera of Puerto Rican Mangrove - Lagoon Systems: Potential for Paleoenvironmental Interpretations [J]. Palaios, 1990, 5: 31-51.
- [10]Hippensteel S P, Martin R E, Nikitina D, et al. The formation of Holocene marsh foraminiferal assemblages, middle Atlantic coast, USA: Implication for Holocene sea level change[J]. Journal of Foraminiferal Research, 2000, 30: 272-293.
- [11]Hayward B W, Grenfell H R, Cairns G, et al. Environmental controls on benthic foraminiferal and thecamoebian associations in a New Zealand tidal inlet[J]. Journal of Foraminiferal Research, 1996, 26: 150-171.
- [12]Hayward B W, Grenfell H R, Scott D B. Tidal range of marsh foraminifera for determining former sea -level heights in New Zealand[J]. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 1999,

- 42: 395–413.
- [13]Barbosai C F, Scott D B, Seoane J C S ,et al. Foraminiferal zonation as base lines for Quaternary sea-level fluctuations in south-southeast Brazilian mangroves and marshes[J]. Journal of Foraminiferal Research, 2005, 35 (1): 22–43.
- [14]汪品先,闵秋宝,卞云华,等. 东海表层沉积物中有孔虫、介形虫组合的初步研究[J]. 同济大学学报, 1979, (2): 90–108.
- [15]汪品先,章纪军,赵泉鸿,等. 东海底质中的有孔虫和介形虫[M].北京, 海洋出版社, 1988: 105–113.
- [16]洪雪晴. 东、黄海沿岸滨海沼泽现代有孔虫分布及其地质意义[C]//中国第四纪研究会,中国海洋学会,中国第四纪海岸线学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 1985: 66–75.
- [17]成鑫荣. 长江口表层沉积物中活有孔虫的初步研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1987, 7(1): 73–79.
- [18]赵泉鸿,卞云华,汪品先. 上海芦潮港海岸带有孔虫种群动态与埋藏群的形成[J].微体古生物学报, 1992, 9(4): 349–362.
- [19]朱晓东,施丙文,葛晨东,等. 苏北辐射沙洲沿岸有孔虫埋藏群特征及其与环境的关系[J].古生物学报, 1998, 37(4): 503–512.
- [20]朱晓东,葛晨东,蒋松柳,等. 江苏中南部潮滩有孔虫特征及其与环境的关系[J].海洋学报, 1998, 20(5): 75–82.
- [21]朱晓东,施丙文,尤坤元,等. 海州湾有孔虫埋葬群及其与沉积环境的关系[J].地理科学, 1998, 18(2): 147–155.
- [22]陈一宁,朱晓东. 苏北海岸带有孔虫 *Ammonia beccarii* 微环境分布的初步研究[J].微体古生物学报, 2004, 21(1): 58–63.
- [23]吴乃琴,汪品先. 我国海岸带胶结壳有孔虫分布的控制因素[J].科学通报, 1989, (12): 924–927.
- [24]吴乃琴. 弱海相性有孔虫群的特征及其代表的沉积环境[J].第四纪研究, 1993, (3): 267–279
- [25]陈文文,刘东生,邢军辉. 渤海湾北部底栖有孔虫的组合分布及沉积环境[J].内蒙古石油化工, 2008, 23: 135–138.
- [26]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子[J].东海地质, 1990, 8(3): 35–14.
- [27]尤坤元,陈才俊,吴小根,等.我国苏北建川潮汐沼泽有孔虫垂直分带的发现和特征[J].海洋学报, 2002, 24(1): 59–64.
- [28]李建芬. 渤海湾西岸老狼坨子现代潮坪有孔虫群的分布及地质意义[C]//前寒武纪第四纪地质文集. 北京: 地质出版社, 2002: 195–204.
- [29]第一章: 天津市滨海地区及其近海社会经济与自然条件[J].海洋通报, 1995, 14(5): 1–27.
- [30]Murray J W , Alve E. The enigma of the continued use of total assemblages in ecological studies of benthic foraminifera[J]. Journal of Foraminiferal Research, 2000, 30: 244–245.
- [31]Buzas M A. Foraminiferal densities and environmental variables: use of statistical models to examine estuarine environment (abstr.) [J]. AAPG Bull., 1969, 53(3): 710.
- [32]Lee J J. Towards understanding the niche of foraminifera[C]//Hedley R H, Adams C G. Foraminifera. 1974, 1: 207–260.
- [33]裴艳东,王云生,范昌福,等. 天津市潮间带表层沉积物的类型及其分布[J].地质通报, 2009, 28(7): 915–922.
- [34]郑守仪,郑执中,王喜堂,等. 山东省打渔张灌区第四纪有孔虫及沉积环境的初步探讨[J]. 海洋科学集刊, 1978, 13: 16–78.
- [35]李建芬,王宏,李凤林,等. 渤海湾牡蛎礁平原中部兴坨剖面全新世地质环境变迁[J].地质通报, 2004, 23(2): 169–176.
- [36]李凤林,王宏,王云生,等. 渤海湾滨海平原全新统层型剖面地层划分与建组[J].地质通报, 2005, 24(2):124–135.
- [37]Alley R B, Mayewski P A, Sowers T, et al. Holocene climatic instability: prominent, widespread event 8200yr ago[J]. Geology, 1997, 25: 483–486.
- [38]Dahl-Jensen D, Mosegaard K, Gundestrup N, et al. Past temperatures directly from the Greenland ice sheet[J]. Science, 1998, 282: 268–271.
- [39]Andresen C S, Björck S, Bennike O, et al. Holocene climate changes in southern Greenland: evidence from lake sediments [J]. Journal of Quaternary Science, 2004, 19: 783–795.
- ① 裴艳东,王宏,李凤林,等. 我国近海海洋综合调查与评价专项《天津市海岸带调查》报告.2008:84–85.
- ② 王福. 渤海湾海岸带 $^{210}\text{Pb}/^{137}\text{Cs}$ 示踪与测年研究;现代沉积及环境意义. 中国地质科学院博士学位论文, 2009:50–81.