

DOI:10.3724/SP.J.1140.2010.05083

全新世北黄海泥质区环境演化的底栖有孔虫记录

孙荣涛¹, 李铁刚², 常凤鸣²

(1 山东理工大学 资源与环境工程学院, 淄博 255049; 2 中国科学院 海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071)

摘要:对取自北黄海泥质沉积区的3个柱状沉积物样品中的底栖有孔虫群落进行了分析,结果表明,研究区附近全新世以来的海洋环境演化受控于海平面的上升过程和周围陆源淡水的强烈影响,13.7 cal. kaBP以来底栖有孔虫群落变动可以划分为3个阶段:13.7~9.2 cal. kaBP以近岸广温广盐种为主,代表了低温低盐的滨岸环境;9.2~5 cal. kaBP *Elphidium magellanicum* 成为绝对优势种,代表了受到陆源淡水强烈作用的缺氧富营养环境;5 cal. kaBP以来以 *Buccella frigida* 和 *Protelphidium turberculatum* 为优势种,代表了与目前相似的冷涡边缘的冷水环境。

关键词:底栖有孔虫;环境演化;全新世;北黄海

中图分类号:P736.2

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2010)05-0083-07

黄海是冰后期海侵形成的典型陆架海,在全新世期间接受了大量的陆源物质,形成了3块集中的泥质沉积区,即北黄海中部泥质沉积区、南黄海中部泥质沉积区和黄海东部泥质沉积区,是研究海洋古环境演化的理想区域。过去的几十年间,中外学者对于南黄海泥质区和黄海东部泥质区进行了大量的研究工作,分别利用沉积结构^[1]、粒度、矿物组成^[2-3]、地球化学^[4-7]、古地磁学^[8]、微体古生物^[9-11]等方法,对泥质沉积的物质来源以及环境演化记录进行了恢复,对于冰后期黄海海平面变化、黄海流系和水团的演化过程等都有了深入的了解。但是相对而言,对于北黄海泥质区的研究程度则十分薄弱,尤其针对古环境演化的研究几乎空白,研究证明北黄海泥质区为一个多元泥质沉积,其物源包括了山东沿岸流物质(黄河物质)、辽东半岛河流物质、黄海暖流物质(南黄海物质)等^[12],而且泥质区的形成又与北黄海环流的形成过程息息相关,可见北黄海泥质区的沉积物中包含了区域环流和水团演化的重要信息,对于该区域古环境演化记录的恢复是了解黄、渤、东海环境变迁过程的重要环节。本文以北黄海泥质区的3个重力柱状样为研究对象,在对样品中的底栖有孔虫群落统计鉴定的基础上恢复该区域全新世以来的海洋环境演化过程。

基金项目:我国近海海洋综合调查与评价专项(20062209)

作者简介:孙荣涛(1980—),男,博士,主要从事海洋微体古生物与古海洋学研究,E-mail:rtsun@sdut.edu.cn

收稿日期:2010-01-16;改回日期:2010-04-26. 文凤英编辑

1 水文与沉积环境

现代北黄海流系主要包括黄海暖流余脉和沿岸流系,基本流向终年比较稳定,流速皆有夏弱冬强的变化。黄海暖流及其余脉北上,而黄海沿岸流南下,形成气旋式的流动(图1)。夏季在北黄海,此气旋式的流动因黄海冷水团密度环流的出现而趋于封闭,与此同时,黄海环流的流速也得到加强。水团主要是沿岸水团和黄海中央水团,沿岸水团指沿岸约20~30 m等深线以内的入海淡水与海水混合,形成的辽南沿岸水、鲁北沿岸水和西朝鲜沿岸水,共同特征是盐度终年较低,海水混浊,温度和盐度的季节变化大,水团的水平范围夏大而冬小,但厚度是夏浅而冬深。黄海中央水团是由进入大陆架浅海的外海水

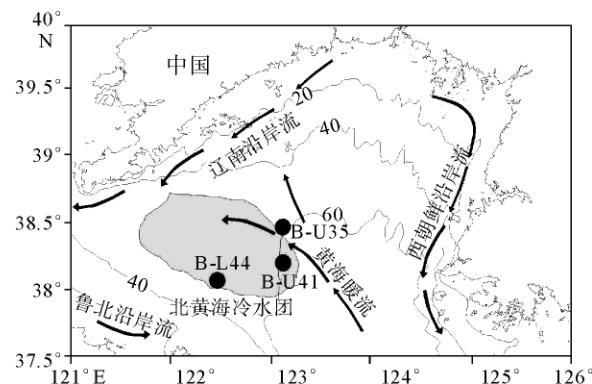


图1 北黄海水文环境和柱状样位置(根据文献[15]绘制)

Fig. 1 The regional hydrography of the northern Yellow Sea and the sampling locations (modified from reference[15])

与沿岸水混合后形成的混合水团,夏半年由于增温降盐作用明显地分为上、下两层:上层为高温、低盐水,厚度约为 15~35 m;下层为低温、高盐水,称为“黄海冷水团”,两者之间出现明显的跃层。北黄海冷水团中心位置较稳定,约位于北黄海中部偏西,水深大于 50 m 范围内,最低温度变化范围为 4.6~9.3 °C。北黄海泥质区的分布范围大致与冷水团的分布区域一致,因而,此泥质沉积区通常被归入“冷涡沉积”^[13]或“涡旋泥质沉积”^[14]。

2 材料与方法

对中科院海洋所“科学一号”考察船在 2006 年 8 月取自北黄海泥质沉积区的 3 个重力柱状岩心 B-U35(38°28.18' N, 122°41.23' E, 水深 52.7 m, 柱长 4.54 m)、B-U41(38°11.84' N, 122°41.38' E, 水深 51.05 m, 柱长 4.38 m) 和 B-L44(38°03.82' N, 122°10.05' E, 水深 53.12 m, 柱长 3.22 m) 进行了底栖有孔虫分析。按照 10 cm 间隔取样,3 个岩心分别选取 46 个、44 个和 29 个共 119 个样品,样品先在 60 °C 的恒温下烘干,称取 25 g 干样,放入烧杯中加清水浸泡 24 h,使样品充分分散。然后利用孔径为 0.063 mm 的铜筛反复冲洗,筛上部分在 60 °C 下烘干并称重后进行鉴定统计。按样品含化石的具体情况,对样品缩分后取其中一份进行鉴定统计,有孔虫的种属鉴定和统计在实体显微镜下进行,一般统计的个体数在 200 粒以上,不足 200 粒的样品则全样统计,样品鉴定标准主要参考研究区附近有关文献^[16-19]。

3 地层年代

3 个钻孔的年代标尺主要依据 AMS ¹⁴C 和 ²¹⁰Pb 数据建立。其中 AMS ¹⁴C 数据利用贝壳样品在美国 Woods Hole 海洋研究所测定, ²¹⁰Pb 数据则是在中国科学院海洋地质与环境重点实验室完成,其中 AMS ¹⁴C 测年数据利用 Calib4.3^[20] 软件校正到日历年,以日历年数据作为年代控制点,控制点之间和控制点之外分别采用线性内插和线性外插方法建立了 3 个岩心的年代框架(表 1)。

4 结果

根据 3 个柱状样中底栖有孔虫丰度和复合分异度的变化(图 2),可以将北黄海泥质区 13.7

cal. kaBP 以来的古环境演化分为 13.7~9.2 cal. kaBP, 9.2~5 cal. kaBP 和 5 cal. kaBP 以来的 3 个阶段(图 2)。底栖有孔虫丰度在 9.2~5 cal. kaBP 这一阶段达到峰值。值得注意的是 3 个柱状样中记录的底栖有孔虫丰度和复合分异度的曲线呈现明显的负相关关系,即在 9.2~5 cal. kaBP 底栖有孔虫丰度激增的时期分异度反倒显著降低,而另外两个丰度较低的时期复合分异度却比较高,这种现象明显异于其他海区。

表 1 北黄海 3 个柱状岩心所用年代控制点

Table 1 AMS ¹⁴C and ²¹⁰Pb ages of the three cores

站号	层位 /cm	测试 样品	绝对年龄 /ka	日历年 /ka	测试 方法
B-L44	8~10	沉积物	0.015±0.05	0.015	²¹⁰ Pb
	22~24	沉积物	0.039±0.05	0.039	²¹⁰ Pb
	28~30	沉积物	0.049±0.05	0.049	²¹⁰ Pb
	34~36	沉积物	0.115±0.05	0.115	²¹⁰ Pb
	38~40	沉积物	0.167±0.05	0.167	²¹⁰ Pb
	230~232	贝壳	9.85±0.055	10.739	AMS ¹⁴ C
	280~282	贝壳	10.65±0.055	11.982	AMS ¹⁴ C
	0~3	沉积物	0.005±0.05	0.005	²¹⁰ Pb
	4~6	沉积物	0.027±0.05	0.027	²¹⁰ Pb
	6~8	沉积物	0.037±0.05	0.037	²¹⁰ Pb
B-U35	12~14	沉积物	0.069±0.05	0.069	²¹⁰ Pb
	16~18	沉积物	0.090±0.05	0.090	²¹⁰ Pb
	18~20	沉积物	0.101±0.05	0.101	²¹⁰ Pb
	288~290	贝壳	5.46±0.05	5.832	AMS ¹⁴ C
	422~424	贝壳	9.88±0.05	10.790	AMS ¹⁴ C
	4~6	沉积物	0.018±0.05	0.018	²¹⁰ Pb
	8~10	沉积物	0.033±0.05	0.033	²¹⁰ Pb
	12~14	沉积物	0.047±0.05	0.047	²¹⁰ Pb
	18~20	沉积物	0.069±0.05	0.069	²¹⁰ Pb
	24~26	沉积物	0.091±0.05	0.091	²¹⁰ Pb
B-U41	28~30	沉积物	0.105±0.05	0.105	²¹⁰ Pb
	38~40	沉积物	0.142±0.05	0.142	²¹⁰ Pb
	232~234	贝壳	2.94±0.03	2.722	AMS ¹⁴ C
	422~424	贝壳	5.31±0.04	5.666	AMS ¹⁴ C

3 个柱状样中的底栖有孔虫种群面貌同样呈现出 3 个演化阶段(图 3、4、5)。在 9.2 cal. kaBP 之前, B-L44 和 B-U35 两个柱状样中的底栖有孔虫优势种是 *Protelphidium turberculatum* (d'Orbigny)、

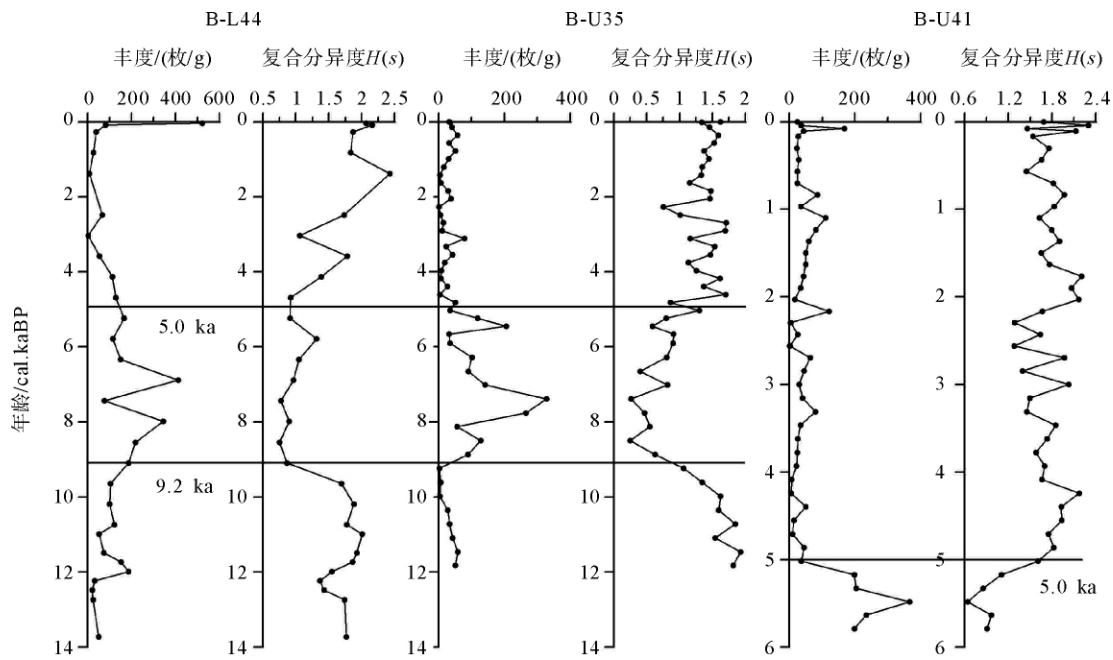
图 2 北黄海 3 孔底栖有孔虫丰度和复合分异度 $H(s)$ 变化

Fig. 2 Foraminiferal abundance and diversity variations of the study cores

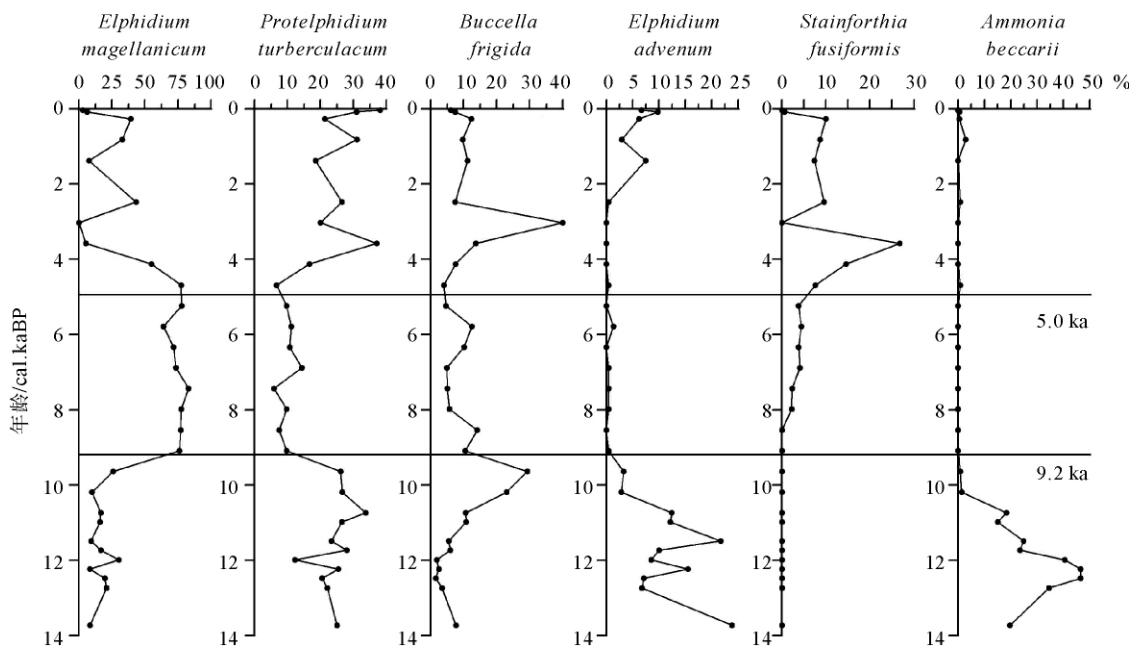


图 3 北黄海 B-L44 柱样中底栖有孔虫优势种百分含量

Fig. 3 Percentage variations in dominant benthic foraminiferal species in core B-L44

Ammonia beccarii (Linné) var.、*Elphidium advenum* (Cushman)、*Cribrozonion subincertum* (Asano)、*Ammonia compressiuscula* (Brady)、*Ammonia ketienziensis* (Kuwano) 等种, 其中 *A. beccarii*、*E. advenum*、*C. subincertum* 都是东黄海典型的近岸浅水种^[16-19]; *P. turberculatum* 在南黄海主要见于沿岸流冷水分布区, 东海则在内、中、外大陆架均有分

布; 而 *A. compressiuscula* 和 *A. ketienziensis* 两个种则多分布在中、外大陆架^[16-19], 但根据我们的调查, 在北黄海表层沉积物中这两个种从近岸浅水到水深大于 60 m 的海区都有分布^[21]。

9.2~5 cal. kaBP 之间, 底栖有孔虫种群面貌发生了极大的变化, 此前的几个优势种丰度骤降, 而 *Elphidium magellanicum* 丰度激增, 达到整个种群

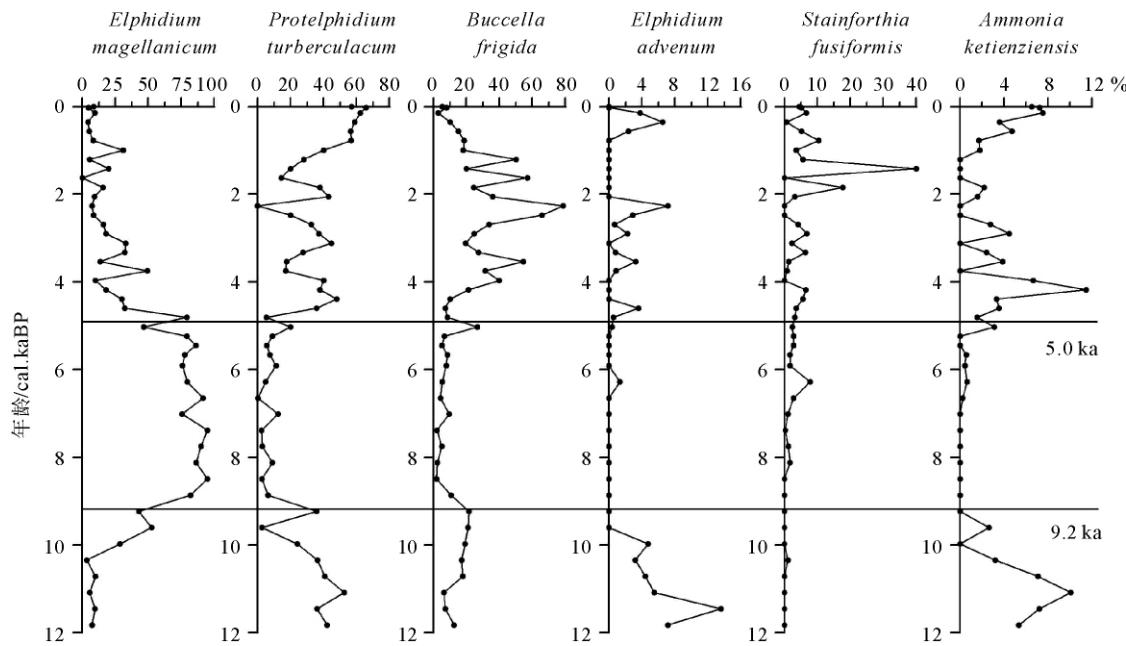


图 4 北黄海 B-U35 柱样中底栖有孔虫优势种百分含量

Fig. 4 Percentage variations in dominant benthic foraminiferal species in core B-U35

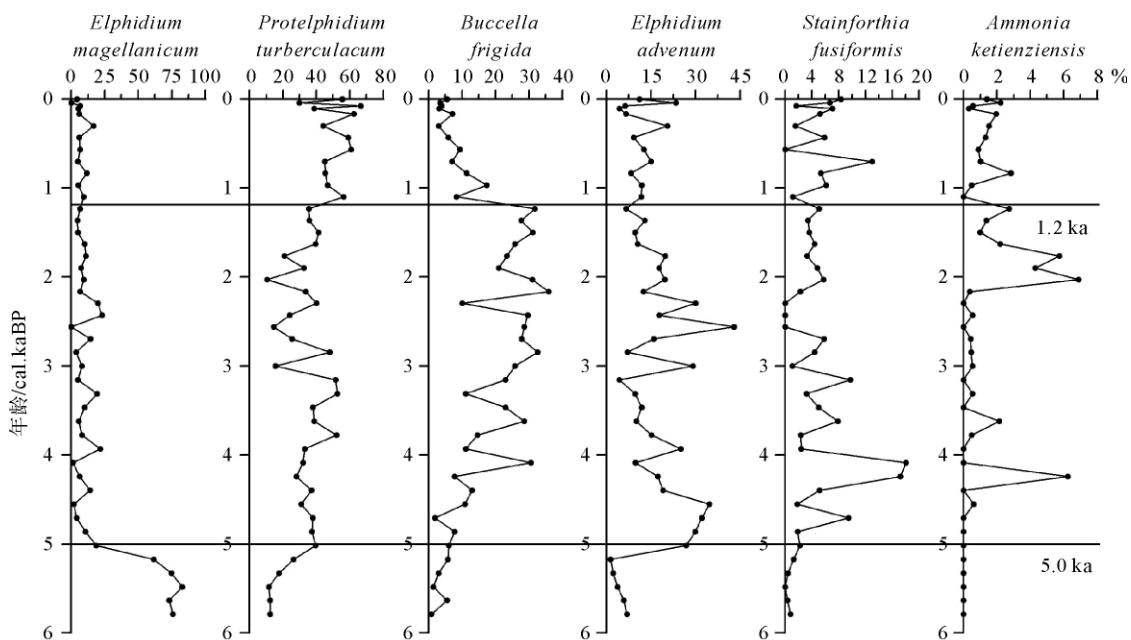


图 5 北黄海 B-U41 柱样中底栖有孔虫优势种百分含量

Fig. 5 Percentage variations in dominant benthic foraminiferal species in core B-U41

的 75% 以上,且在数千年的时间内含量相当稳定,这种变化在 B-L44 和 B-U35 中的记录完全一致,B-U41 虽然只记录了最近 6 cal. kaBP 以来的古环境演化历史,但很明显在 5 cal. kaBP 之前, *E. magellanicum* 同样是绝对的优势种, *E. magellanicum* 是我国近海沿岸的常见种,属于低温低盐的类型^[16-19],在北黄海表层沉积中主要分布在近岸浅水和水深

>60 m 的黄海冷水团控制的细粒沉积区。

在 5 cal. kaBP 之后, *E. magellanicum* 的优势地位突然下降,而 *Buccella frigida*、*P. turberculatum*、*Stainforthia fusiformis* (Williamson) 等成为优势属种,其中 *B. frigida* 在 4~1.2 cal. kaBP 的优势地位非常突出, *B. frigida* 是典型的冷水种,在北黄海表层沉积中主要分布在黄海冷水团边缘的

沿岸冷水控制区, 而 *S. fusiformis* 是一个喜营养的近岸浅水种^[22], 在 1.2 cal. kaBP 之后 *B. frigida* 的丰度逐渐下降, *P. turberculacum* 成为 3 个柱状样中的绝对优势种, 这也与目前该海区表层沉积中的分布结果相符。

5 讨论

北黄海泥质区 3 个柱状样中的底栖有孔虫群落变化显然是与冰后期的海侵过程息息相关的。随着末次冰消期海平面的迅速上升, 冰期中出露成陆的黄东海陆架开始接受海相沉积, B-L44 孔记录的底栖有孔虫记录至少可以延伸到 13 cal. kaBP 之前, 当时的海平面大约为 -70 m ^[23], 北黄海泥质区当时所处的应当是一种低温低盐的滨岸浅水环境, 这一点从当时底栖有孔虫群落以 *A. beccarii*、*E. advenum*、*C. subincertum*、*P. turberculacum* 等为优势种的组合可以看出, 进入全新世之后, B-L44 孔中浅水种 *A. beccarii* 和 *E. advenum* 的含量呈现下降趋势, 而 *B. frigida* 的含量则逐渐上升, 这种变化意味着该区域仍然受到冷水的强烈影响, 但是水深是稳定增加的。

大约发生在 9.2 cal. kaBP 的底栖有孔虫群落组成的突然变化是此次研究柱状样中记录的最为显著的古环境事件。B-L44 和 B-U35 中, *E. magellanicum* 在极短的时间内成为种群中的绝对优势种, 而其他底栖有孔虫属种则显著下降, 伴随着种群组成的这种变化还有底栖有孔虫丰度的激增和复合分异度的下降, 柱状样中底栖有孔虫群落的这种变化在我国近海沉积柱状样中比较罕见。事实上在我国近海表层中的 *E. magellanicum* 和 *P. turberculacum* 的分布环境并没有显著差别, 甚至曾认为这两个经常伴生的种其实都是 *E. excavatum* 的变种^[19], 现代北黄海表层沉积中两者的高丰度区也都集中在水深 $>50\text{ m}$ 的黄海冷水团影响下的细粒沉积区, 因此, 9.2 cal. kaBP 的这次变化难以用水深或者水温的变动加以解释。9.2 cal. kaBP 海平面已经上升至 -30 m 左右^[23], 3 孔所在位置是水深 $20\sim30\text{ m}$ 的浅海环境, 从全球环境来看, 9.2 cal. kaBP 之后气候开始由早全新世的干凉转向温暖湿润的全新世最适宜期, 在中国黄河中下游地区, 气候温暖湿润, 降雨丰沛, 植物繁茂, 此时辽南地区出现以榆、栎、椴、胡桃、桤木、榛等阔叶树形成的森林, 气候温暖湿润, 年平均气温 $13\text{ }^{\circ}\text{C}$, 比现在高 $3\sim5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[24], 因而对于此时的北黄海而言, 周围河流大量的淡水携

带陆源植物碎屑进入北黄海, 而植物碎屑在下沉过程中的氧化分解会耗尽水中的溶解氧, 使得北黄海的底部成为一种缺氧、富营养的还原环境, 而当时黄海暖流尚未形成, 北黄海与开放海区水体交换程度很差则进一步强化了这种还原环境, 绝大多数的底栖有孔虫并不能适应这种环境。而根据 Gustafsson 和 Nordberg 的研究结果, *E. magellanicum* 对缺氧环境适应能力很强, 且在缺氧环境下会以分解的植物碎屑为食而大量繁殖^[25], 充足的食物供应和种间竞争的缺乏, 使得在长达数千年的全新世最适宜期中 *E. magellanicum* 成为北黄海泥质区中底栖有孔虫群落的绝对主导, 这也是 B-L44 和 B-U35 两个柱状样中底栖有孔虫丰度和复合分异度出现反相变化的原因所在, 因为复合分异度除了反映种数之外还反映了群落中属种分布的均匀程度, 这种单一属种占据主导地位的群落组合对应的自然是很低的分异度。向荣等对南黄海泥质区岩心的研究也证实在 $8.4\sim5\text{ cal. kaBP}$ 之间南黄海盐度明显低于目前^[11], 说明了当时整个黄海都受到陆源淡水的强烈影响, 但是, 南黄海底栖有孔虫种群并没有像北黄海变动如此显著, 应当是与开放海区水体交换程度较高所致。

5 cal. kaBP 之后伴随着全新世气候最适宜期的结束, 气候由温暖湿润转向干冷, 中国北方夏季风降水明显减少^[26], 北黄海附近径流量显著降低, 植被带南移^[23], 陆源植物碎屑的供给明显减少, 此前海底缺氧的还原环境明显改善, Kong 等对于黄海柱状样中有机碳的分析也表明在 4.3 cal. kaBP 之前以陆源供给为主, 而在 4.3 cal. kaBP 之后以海相为主, 随着海平面高度上升到与目前大致相当, 黄海暖流开始形成, 北黄海海洋环境开始接近目前的状态^[27]。在 3 个柱状样中底栖有孔虫群落中 *E. magellanicum* 占的主导地位不复存在, 伴随着 *B. frigida* 和 *P. turberculacum* 百分含量的显著回升, 尤其是在 $4.3\sim1.2\text{ cal. kaBP}$ 期间, *B. frigida* 的优势地位十分突出。对现代北黄海表层沉积物中底栖有孔虫群落的分析表明, 在该海域 *B. frigida* 的分布与黄海暖流余脉和黄海沿岸流构成的涡旋形冷涡边缘的冷水作用密切相关, 我们认为柱状样中 $4.3\sim1.2\text{ cal. kaBP}$ 时期该种的优势地位代表着随着黄海暖流的出现, 在黄海暖流余脉与黄海沿岸流的作用下北黄海冷涡的形成时期, 而 1.2 cal. kaBP 以来 *Buccella frigida* 的减少和 *P. turberculacum* 的增加则意味着冷涡强度有所减弱。

6 结论

北黄海泥质区全新世以来的海洋环境演化与海平面的上升和北黄海附近的陆地环境演化密切相关。13.7~9.2 cal. kaBP, 北黄海泥质区附近是低温低盐的滨岸浅水环境; 9.2~5 cal. kaBP, 北黄海泥质区附近受到陆源淡水的强烈影响, 在海底形成了缺氧富营养的还原环境; 5 cal. kaBP 以来, 陆源淡水影响减弱, 北黄海泥质区附近逐渐过渡到目前的海洋环境, 其中 4.3~1.2 cal. kaBP 是北黄海冷涡的形成时期, 当时冷涡活动强度高于现在。

参考文献(References)

[1] 赵月霞, 刘保华, 李西双. 南黄海中西部晚更新世沉积地层结构及其意义[J]. 海洋科学进展, 2003, 21: 21-30. [ZHAO Yuexia, LIU Baohua, LI Xishuang. Late Pleistocene sedimentary stratum structure and meaning in the middle and western area of the South Yellow Sea[J]. Progress of Ocean Science, 2003, 21 (1): 21-230.]

[2] 王红霞, 林振宏, 文丽. 南黄海西部表层沉积物中碎屑矿物的分布[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24 (1): 51-56. [WANG Hongxia, LIN Zhenhong, WEN Li. Distribution of detrital minerals in the surface sediments in the south Yellow Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2003, 24 (1): 51-56.]

[3] 蓝先洪, 张训华, 张志珣. 南黄海沉积物的物质来源及运移研究[J]. 海洋湖沼通报, 2005 (4): 53-60. [LAN Xianhong, ZHANG Xunhua, ZHANG Zhixun. Material sources and transportation of sediments in the Southern Yellow Sea[J]. Transaction of Oceanology and Limnology, 2005(4): 53-60.]

[4] 陈志华, 石学法, 王湘芹. 南黄海 B10 岩心的地球化学特征及其对古环境和古气候的反映[J]. 海洋学报, 2003, 25(1): 69-77. [CHEN Zhihua, SHI Xuefa, WANG Xiangqin. Geochemical changes in Core B10 in the southern Huanghai Sea and implications for variations in paleoenvironment and paleoclimate [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2003, 25(1): 69-77.]

[5] 蓝先洪, 王红霞, 李日辉, 等. 南黄海沉积物常量元素组成与物源分析[J]. 地学前缘, 2007, 14(4): 197-203. [LAN Xianhong, WANG Hongxia, LI Rihui, et al. Major elements composition and provenance analysis in the sediments of the South Yellow Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(4): 197-203.]

[6] 蓝先洪, 王红霞, 张志珣, 等. 南黄海表层沉积物稀土元素分布与物源关系[J]. 中国稀土学报, 2006, 26(6): 745-749. [LAN Xianhong, WANG Hongxia, ZHANG Zhixun, et al. Distributions of rare earth elements and provenance relations in the surface sediments of the South Yellow Sea[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2006, 26(6): 745-749.]

[7] Yang Shouye, Youn Jeung Su. Geochemical compositions and provenance discrimination of the central south Yellow Sea sediments[J]. Marine Geology, 2007, 243: 229-241.

[8] 刘健, 朱日祥, 李绍全. 南黄海北部末次冰期棕黄色细粒沉积物的磁学特征及其地质意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(4): 15-20. [LIU Jian, ZHU Rixiang, LI Shaoquan. Magnetic properties of the last glacial brown-yellow fine-grained sediment in the northern south Yellow Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2002, 22(4): 15-20.]

[9] 蓝先洪, 申顺喜. 南黄海中部沉积岩芯的微体古生物组合特征及古环境演化[J]. 海洋湖沼通报, 2004 (2): 16-21. [LAN Xianhong, SHEN Shunxi. Micropaleontological assemblage-characteristics of sediment cores from the central South Yellow Sea and palaeo-environmental evolvement[J]. Transaction of Oceanology and Limnology, 2004(2): 16-21.]

[10] 刘健, 王红, 李绍全, 等. 南黄海北部泥质沉积区冰后期海侵沉积记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24 (4): 1-10. [LIU Jian, WANG hong, LI shaoquan, et al. Postglacial transgressive sedimentary records of muddy sedimentary areas in the north of the South Yellow Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2004, 24(4): 1-10.]

[11] Xiang Rong, Yang Zuosheng, Saito Yoshiki, et al. Paleoenvironmental changes during the last 8 400 years in the southern Yellow Sea: Benthic foraminiferal and stable isotopic evidence[J]. Marine Micropaleontology, 2008, 67: 104-119.

[12] 程鹏. 北黄海细颗粒物质的沉积特征与输运过程[D]. 中国科学院海洋研究所博士学位论文, 2000. [CHENG Peng. Sediment Characteristics and Transport Processes of Fine-Grained Material over the Northern Yellow Sea[D]. Thesis for Ph. D. of Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2000.]

[13] 申顺喜, 陈丽蓉, 高良, 等. 南黄海冷涡沉积和通道沉积的发现[J]. 海洋与湖沼, 1993, 24 (6): 563-570. [SHEN Shunxi, CHEN Lirong, GAO Liang, et al. Discovery of Holocene cyclonic eddy sediment and pathway sediment in the southern Yellow Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1993, 24 (6): 563-570.]

[14] 李绍全, 刘健, 王圣洁, 等. 南黄海东侧陆架冰消期以来的海侵沉积特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1997, 17 (4): 1-12. [LI Shaoquan, LIU Jian, WANG Shengjie, et al. Sedimentary characters in the Eastern South Yellow Sea during the post glacial transgression[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1997, 17(4): 1-12.]

[15] 许东禹, 刘锡清, 张训华, 等. 中国近海地质[M]. 北京: 地质出版社, 1997. [XU Dongyu, LIU Xiqing, ZHANG Xunhua, et al. China Offshore Geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997.]

[16] 何炎, 胡兰英, 王克良. 江苏东部第四纪有孔虫[J]. 中国科学院地质古生物研究所集刊, 1965(4): 51-162. [HE Yan, HU LanYing, WANG Keliang. Quaternary foraminifera in the east region of Jiangsu Province[J]. Memoirs of the Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Science, 1965(4): 51-162.]

[17] 汪品先, 闵秋宝, 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]//海洋微体古生物论文集.北京:海洋出版社,1980:61-83. [Wang Pinxian, Min Qiubao, Bian Yunhua. Distribution of Foraminifera and Ostracoda in bottom sediments of the northwestern part of the southern Yellow Sea and its geological significance[C]//Papers on Marine Micropaleontology. Beijing: China Ocean Press, 1980: 61-83.]

[18] 汪品先, 闵秋宝, 卞云华. 黄海有孔虫、介形虫组合的初步研究[C]//海洋微体古生物论文集. 北京: 海洋出版社, 1980: 84-100. [WANG Pinxian, MIN Qiubao, Gao Jianxi. A preliminary study of foraminiferal and ostracod assemblages of the Yellow Sea[C]//Papers on Marine Micropaleontology. Beijing: China Ocean Press, 1980:84-100.]

[19] 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. [WANG Pinxian, ZHANG Jijun, ZHAO Quanhong, et al. Foraminifera and Ostracoda in Surface Sediments of the East China Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 1988.]

[20] Stuiver M, Reimer P J, Bard E, et al. INTCAL98 Radiocarbon age calibration 240 000 ~ 0 cal. BP[J] Radiocarbon, 1998, 40: 1041-1083.

[21] 孙荣涛, 李铁刚, 常凤鸣. 北黄海表层沉积物中的底栖有孔虫分布与海洋环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29 (4): 21-28. [SUN Rongtao, LI Tiegang, CHANG Fengming. Distribution of benthic foraminifera and its bearing on marine environmental factors in the North Yellow Sea surface sediments[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2009, 29 (4): 21-28.]

[22] Alve E. Opportunistic features of the foraminifer *Stainforthia fusiformis* (Williamson): evidence from Frierfjord, Norway [J]. Journal of Micropalaeontology, 1994, 13:24.

[23] 李广雪. 中国东部海域海底沉积物成因环境图[M]. 北京: 科学出版社, 2005. [LI Guangxue. Genetic Environments of Sea-floor Sediments in China Eastern Sea Areas[M]. Beijing: Science Press, 2005.]

[24] 施雅风, 孔昭宸. 中国全新世大暖期气候与环境[M]. 北京: 海洋出版社, 1992: 1-18. [SHI Yafeng, KONG Zhaochen. The Climates and Environments of Holocene Megathermal in China[M]. Beijing: China Ocean Press, 1992:1-18.]

[25] Gustafsson M, Nordberg K. Living (Stained) benthic foraminifera and their response to the Seasonal hydrographic cycle, periodic hypoxia and to primary production in Havstens Fjord on the Swedish west coast[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2001, 51(6): 743-761.

[26] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. The Holocene Asian monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate[J]. Science, 2005, 308, 854-857.

[27] Kong G. S, Park S C, Han H C, et al. Late Quaternary paleoenvironmental changes in the southeastern Yellow Sea[J]. Korea Quaternary International, 2006, 144: 38-52.

ENVIRONMENTAL EVOLUTION OF THE NORTHERN YELLOW SEA MUDDY AREA DURING HOLOCENE BASED ON BENTHIC FORAMINIFERAL RECORDS

SUN Rongtao¹, LI Tiegang², CHANG Fengming²

(1 School of Resources and Environment Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

2 Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Chinese Academy of Science, Qingdao 266071, China)

Abstract: Benthic foraminiferal assemblage in the three cores taken from the northern Yellow Sea muddy area during 2006 were analyzed for reconstructing environmental evolution. Data show that the marine environment of the study area has been strongly influenced by the Post-glacial transgression process and the fresh water input of adjacent rivers. The variation in benthic foraminiferal assemblage could be divided into three stages since 13.7 cal. kaBP: Eurythermal and euryhaline species dominated the fauna during 13.7~9.2 cal. ka BP, denoting a littoral environment with low temperature and low salinity; *E. magellanicum* became the absolute imperium during 9.2~5 cal. kaBP, denoting the anoxic but nutrient environment strongly influenced by the great runoff input; *B. frigida* and *P. tuberculatum* took the dominant position after 5 cal. kaBP, indicating the affect by the marginal cold water from the northern Yellow Sea.

Key words: benthic foraminifera; environment evolution; Holocene northern Yellow Sea