

文章编号:1000-0550(2016)01-0102-09

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2016.01.009

MIS3 中期以来北黄海中部陆架古环境演化

陈晓辉^{1,2} 李日辉^{1,2} 蓝先洪^{1,2} 王燕^{1,2}

(1.国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室 山东青岛 266071;2.青岛海洋地质研究所 山东青岛 266071)

摘要 通过对北黄海中部陆架 DLC70-2 孔的岩性、粒度、微体古生物以及 AMS¹⁴C 年代学的分析,探讨了研究区 MIS3 中期以来的古环境演化。研究表明,北黄海中部陆架 MIS3 中期以来的沉积环境演化与海平面变化存在良好的对应关系,具有明显的阶段性特征:岩芯 22.89~18.50 m 段(43 639~42 558 cal yr B.P.)对应 MIS3 中期海平面上升过程中形成的河口湾相,与上覆地层之间存在明显的沉积间断;随着海平面的逐渐上升,海水自 14 602 cal yr B.P. 开始侵入研究区,形成了 18.50 m 以上的沉积地层,自下而上可划分为末次冰盛期以来海平面上升过程中的河口充填相(18.50~10.02 m,14 602~12 602 cal yr B.P.)—新仙女木事件中晚期海平面停滞期间的河流泛滥平原相(10.02~5.10 m,12 602~10 357 cal yr B.P.)—全新世早中期海平面上升过程中的滨海、浅海相(5.10~0 m,10 357~4 913 cal yr B.P.)。岩芯 10.02~5.10 m 段(12 602~10 357 cal yr B.P.)记录的源自河流泛滥平原沉积的硬质黏土层与新仙女木事件的全球效应密切相关,可作为新仙女木事件在北黄海陆架响应的一个重要证据。

关键词 MIS3 中期 北黄海 古环境 新仙女木事件

第一作者简介 陈晓辉 男 1981 年出生 博士 助理研究员 晚第四纪沉积研究 E-mail:hongzi1982@163.com

中图分类号 P736.2 **文献标识码** A

0 引言

北黄海为一半封闭陆架浅海,每年从中国大陆和朝鲜半岛接纳大量河流搬运入海的陆源碎屑物质^[1-10],第四系厚度为 100~300 m^[11];冰期—间冰期旋回中伴随的季风变迁与海平面的波动控制着陆源沉积物的入海通量和北黄海的沉积格局^[4-5,12-13];同时,北黄海是渤海与南黄海物质和能量交换的重要通道^[14]。因此,北黄海陆架沉积记录了丰富的地质和古环境信息,是研究晚第四纪海平面变化、海陆相互作用和沉积环境演化的典型区域之一。

近年来国内外学者针对北黄海陆架陆续开展了沉积物的粒度^[15-16]、矿物学^[8-9,17-20]、地球化学^[2-3,10,21-22]、微体古生物^[23-25]等方面的研究,取得了丰富的研究成果,基本已查明北黄海西部全新世海侵以来的沉积地层可划分为滨海相—浅海相的沉积。然而这些研究多集中在山东半岛与辽东半岛近岸海域,时代局限于全新世,针对北黄海中部陆架晚更新世以来沉积环境的研究至今仍未见报道。

本文以位于北黄海中部陆架区的 DLC70-2 钻孔为研究对象,通过沉积物粒度特征的研究,结合沉积物岩性、微体古生物及 AMS¹⁴C 测年数据,对晚更新

世 MIS3 中期以来北黄海中部陆架的古环境演化进行了恢复。

1 材料与方法

本研究所分析的北黄海中部 DLC70-2 孔(122°24.15' E,38°27.00' N,岩芯长 70.6 m,水深 52.8 m)(图 1)是由青岛海洋地质研究所于 2009 年 10 月利用“勘 407”所采集。在室内对该岩芯进行了详细描述和精细分样,本文研究层段为 DLC70-2 孔的 0~22.89 m 段,共采集不同层位的岩芯样品 101 个(大致 20 cm 间隔取样,避开生物碎屑含量多的层位,岩性分层时加密)。粒度分析在国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室完成,粒度分析预处理分别采用 10%的 H₂O₂和 0.1 N HCl 去除有机质和碳酸盐,处理后的样品在英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer2000 型激光粒度仪上进行测试,测量范围 0.5~2 000 μm,重复测量相对误差小于 1%,采用矩法^[26]计算了 DLC70-2 孔沉积物各粒度参数。微体古生物鉴定在中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室完成,样品充分浸泡后过 250 目(0.063 mm)的标准筛冲洗并烘干,之后用 CCl₄ 浮选,鉴定时过 120 目(0.125 mm)标准筛,显微镜下对粗样(>0.125

收稿日期:2014-11-06;收修改稿日期:2015-04-07

基金项目:国家自然科学基金项目(41406077);国土资源大调查项目(1212011220113,GZH201500203,GZH201400205)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41406077; China Geological Survey Project, No.1212011220113,GZH201500203,GZH201400205]

mm)中的有孔虫和介形虫进行统计。由于 DLC70-2 孔中介形虫含量极低,仅在个别层位出现,个数过少而不具有统计意义,本研究仅对底栖有孔虫的数据资料进行了分析。

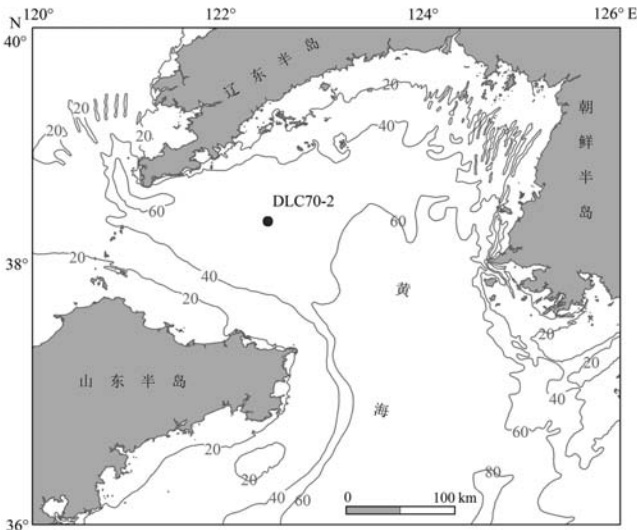


图1 研究区及钻孔位置图

Fig.1 Location of the study area and core site

选取混合底栖有孔虫样品送美国 Woods Hole 海洋研究所 AMS¹⁴C 实验室完成年代测试,本文原始测年数据采用 CALIB6.0.2 软件进行日历年校正,采用的海洋碳储库差值 $\Delta R = -127 \pm 29$ yr (依据 CALIB 6.0.2提供的渤海西部 (Map No. 415)、南黄海西部 (Map No. 416)^[27]与南黄海东部 (Map No. 417)^[28] 3个海洋库存储存年龄的加权平均获得)。本文所用的日历年龄均从公元 1950 年向前推算,以 cal yr B.P. 标识。数据结果见表 1。

表 1 北黄海中部陆架 DLC70-2 孔 AMS¹⁴C 年代数据
Table 1 AMS¹⁴C data of Core DLC70-2
in the central shelf of NYS

深度 /m	测试材料	AMS ¹⁴ C 年龄	日历年龄 / cal yr B.P. (1 σ)
0.42	底栖混合种有孔虫	4 560±35	4 913 (4 843~4 960)
1.72	底栖混合种有孔虫	8 550±55	9 346 (9 279~9 425)
2.32	底栖混合种有孔虫	9 140±55	10 085 (10 003~10 185)
2.82	底栖混合种有孔虫	9 200±45	10 168 (10 122~10 223)
3.38	底栖混合种有孔虫	9 120±50	10 060 (9 996~10 164)
4.62	底栖混合种有孔虫	9 370±85	10 357 (10 237~10 445)
10.25	底栖混合种有孔虫	10 935±55	12 602 (12 550~12 654)
17.82	底栖混合种有孔虫	12 450±60	14 602 (13 970~14 148)
19.62	底栖混合种有孔虫	38 860±390	42 558 (42 318~42 850)
22.87	底栖混合种有孔虫	40 300±320	43 639 (43 289~43 954)

2 数据结果

2.1 沉积特征

年代数据表明(表 1), DLC70-2 孔 0~22.89 m 段地层记录了北黄海中部陆架晚更新世 (MIS3 中期) 以来的沉积历史。依据沉积物颜色、岩性、沉积构造等特征的分析,将该段岩芯沉积物自老至新划分为 4 层(图 2):

(1) 层 3 (22.89~18.50 m): 岩性主要为灰褐色粉砂,局部夹黏土质条带,含水量较高(图 3E), 21.43~21.50 m 段及 22.10~22.20 m 段发育两层贝壳碎屑层,见虫孔构造,与上覆地层为侵蚀不整合接触。

(2) 层 2b (18.50~10.02 m): 岩性自上而下由黄褐色细粉砂过渡至灰褐色粉砂,局部夹黏土质条带,其中 16.10~16.60 m 段为粉砂质黏土,夹薄粉砂层(图 3D), 17.70~18.50 m 段为灰色粉砂,含水量较上下地层高,岩性均一,与上覆地层为渐变接触。

(3) 层 2a (10.02~5.10 m): 岩性主要为灰褐色、黄褐色粉砂质黏土,含水量较低,质地坚硬(图 3C), 该段地层中可见大量植物根孔,上部发育有机质条带及炭质斑点,无明显层理,呈块状构造,其中 5.77~5.95 m 段及 6.25~6.28 m 段发育贝壳碎片。

(4) 层 1 (5.10~0 m): 岩性可分为三段: 下段 (5.10~3.16 m) 岩性整体为灰褐色黏土质粉砂,其中 3.70~4.40 m 段为深灰色粉砂质黏土,含水量自上而下,由低到高再到低,生物扰动强,无明显层理,其中 3.23~3.16 m 段与 5.10~4.95 m 段发育两层贝壳碎屑层,与下伏地层为侵蚀接触;中段 (3.16~1.32 m) 岩性主要为灰褐色、黄褐色黏土质粉砂,含水量较低,生物扰动强,其中 2.47~2.42 m 段与 2.85~2.80 m 段均发育厚 5 cm 的贝壳碎屑层(图 3B),与下伏地层为侵蚀不整合接触;上段 (1.32~0 m) 岩性为深灰色粉砂质黏土,岩性均一,含水量高(图 3A)。

2.2 沉积物的粒度组成与粒度参数

北黄海中部 DLC70-2 孔沉积物依据 Udden-Wentworth 粒度标准可划分为砂(-1~4 ϕ)、粉砂(4~8 ϕ)、黏土(>8 ϕ) 三种粒度组分。根据沉积物粒度组成和各粒度参数垂向变化,亦可将北黄海中部陆架 DLC70-2 孔自下而上划分为 4 层(图 2):

层 3 (22.89~18.50 m): 该段沉积物以砂为主,平均含量可达 78.98%,黏土含量最低,平均值为 4.19%。该段沉积物粒度较粗,平均粒径介于 3.09~4.72 ϕ , 平均值为 3.51 ϕ , 标准偏差介于 0.56~2.20 ϕ , 分选

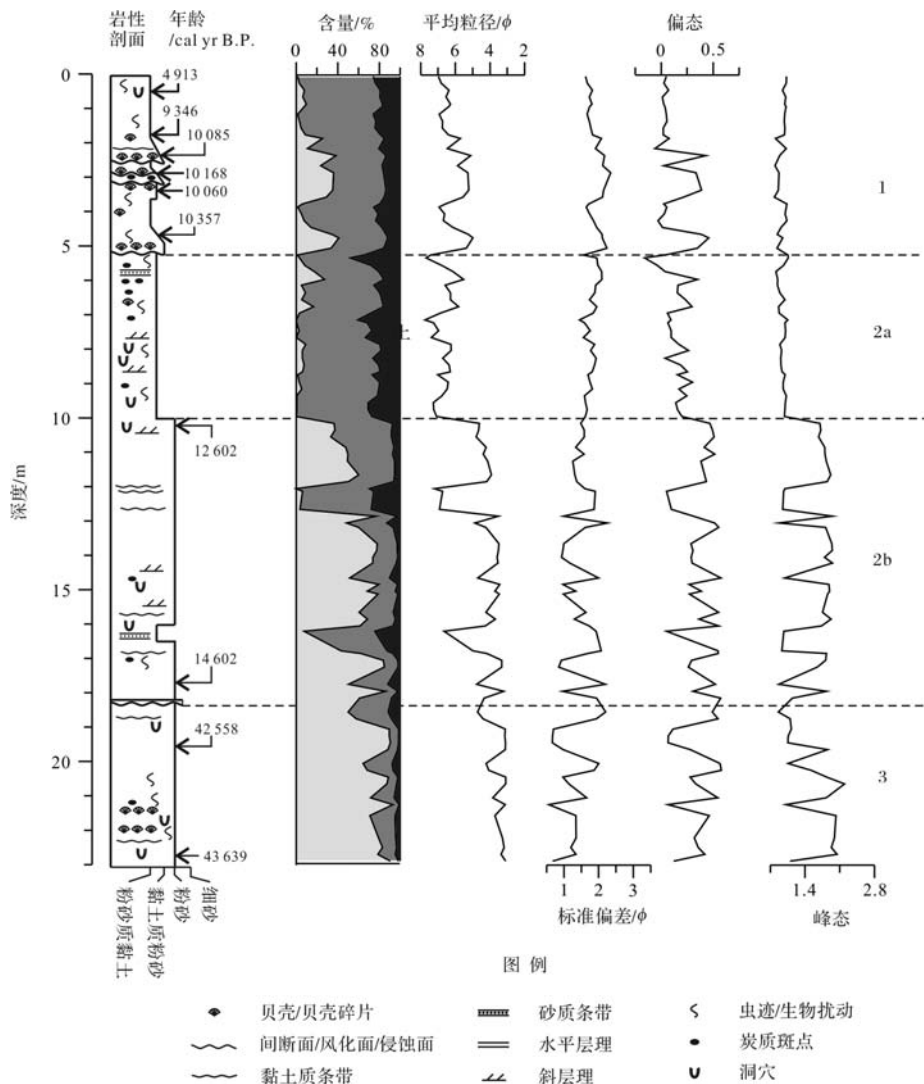


图2 MIS3中期以来北黄海中部 DLC70-2孔岩性、粒度组成及粒度参数综合图(钻孔位置见图1)

Fig.2 Lithology, grain size composition and parameters of Core DLC70-2 (see location in Fig.1) in the central shelf of NYS since mid-MIS3

较差,偏态与峰态波动较大,偏态介于0.06~0.58,为正偏,峰态中等尖锐,介于0.86~2.20。该段沉积物砂含量自下而上逐渐减少,粉砂含量逐渐增加,黏土含量基本不变,平均粒径逐渐变细,分选变差,反映了水动力由强到弱的变化趋势。

层2b (18.50~10.02 m):该段沉积物砂含量仍占主导,较层3含量有所降低,平均含量为54.92%,黏土含量最低,平均含量为8.41%。该段沉积物粒度较层3变细,平均粒径平均值为4.39 ϕ ,标准偏差介于0.85~2.25,分选较层3变差,偏态与峰态与层3基本类似,平均值分别为0.38与1.59。该段沉积物自下而上,砂含量明显减少,粉砂含量逐渐增加,黏土含量变化趋势不明显,粒度逐渐变细,反映了水动力逐渐

减弱的过程。

层2a (10.02~5.10 m):该段沉积物粉砂含量为研究剖面最高,平均含量68.61%,其次为黏土,平均含量25.68%,砂含量最低,平均含量为5.71%。该段沉积物粒度为研究区段最细,平均粒径平均值为6.73 ϕ ,标准偏差平均为1.78,分选较层2b变差,偏态与峰态较层2b有所降低,平均值分别为0.14与0.95。该段沉积物自下而上,砂含量有所增加,粉砂含量逐渐减少,黏土含量基本不变,粒度变粗,分选变差,反映了水动力逐渐增强的过程。

层1 (5.10~0 m):该段沉积物以粉砂为主,平均含量65.10%,其次为黏土与砂,平均含量分别为18.97%与15.93%。该段沉积物粒度较细,平均粒径

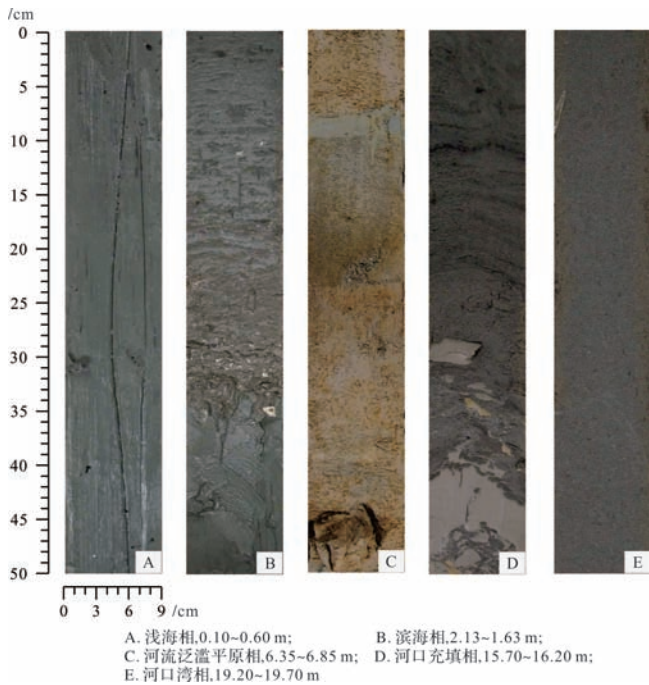


图3 MIS3 中期以来北黄海中部陆架 DLC70-2 孔不同沉积环境典型岩芯照片

Fig.3 Photographs of typical facies of Core DLC70-2 in the central shelf of NYS since mid-MIS3

平均值为 6.16ϕ , 标准偏差平均值为 1.90ϕ , 分选为研究剖面最差, 偏态与峰态平均值分别为 0.12 与 0.94 。该段沉积物自下而上砂含量明显减少, 粉砂含量与其呈现此消彼长的变化趋势, 黏土含量变化不大, 粒度呈现变细的趋势, 分选逐渐变好, 反映了水动力由强到弱的变化过程。

2.3 沉积物粒度频率分布曲线与概率累积分布曲线

图4给出了 MIS3 期以来北黄海中部陆架 DLC70-2 孔不同沉积阶段的沉积物粒度频率分布曲线和粒度概率累积分布曲线, 详述如下:

层3 (22.89~18.50 m): 频率分布表现出明显的单峰细尾特征, 主峰众数值为 $3.25 \sim 3.50 \phi$, 细尾主峰值为 $6.00 \sim 6.25 \phi$, 且自下而上细尾影响有增加的趋势, 表现出除强动力沉积环境之外, 不同动力叠加的效果, 且叠加的影响自下而上有所加强。概率累积曲线是典型的两段式, 以跃移组分为主, 含量超过 65%, 某些层段可达 95%, 悬移组分含量相对较低, 两组分的分界点为 $3.75 \sim 4.00 \phi$ 。该段沉积物概率累积曲线及两组分分选均变化较小, 且跃移组分分选较悬移组分要好, 反映了相对较强的水动力环境, 且沉积环境相对稳定。

层 2b (18.50~10.02 m): 频率分布变化较大, 主

要为单峰细尾分布, 主峰众数值为 $3.50 \sim 4.00 \phi$, 细尾主峰值为 $6.50 \sim 6.75 \phi$, 少数层位为单峰分布, 主峰众数值为 6.75ϕ , 反映了水动力条件总体较强, 沉积环境不稳定。概率累积曲线是典型的两段式, 大部分层位以跃移组分为主, 含量超过 60%, 悬移组分含量相对较低, 两组分的分界点为 $4.00 \sim 4.25 \phi$; 少数层位以悬移组分含量为主, 而跃移组分含量低于 5%, 两组分的分界点为 3.00ϕ 。该段沉积物两组分分选均变化较小, 且跃移组分分选较悬移组分要好, 较层 3 水动力环境减弱, 且沉积环境相对动荡。

层 2a (10.02~5.10 m): 该阶段频率分布主要为单峰细尾分布, 单峰主峰众数值变化较大, 介于 $3.75 \sim 7.50 \phi$ 之间, 上部层位出现双峰分布, 众数值为 $3.75 \sim 5.25 \phi$ 、 7.50ϕ , 水动力环境较上段有所减弱, 沉积环境不稳定。概率累积曲线为典型的两段式, 悬移组分含量较上段明显增加, 含量超过 50%, 部分层位超过 95%, 与跃移组分的分界点为 $3.00 \sim 4.25 \phi$, 两组分的分选系数变化较大, 反映出该阶段水动力条件变化较大, 沉积环境较不稳定。

层 1 (5.10~0 m): 该阶段频率分布下部层位主要为双峰分布, 众数值为 3.75ϕ 、 $7.25 \sim 7.50 \phi$, 而上部层位主要为单峰细尾分布, 主峰众数值为 $7.25 \sim 7.50 \phi$ 。概率累积曲线表现为两段式特征, 以悬移组分含量为主, 下部层位含量可达 60%, 上部层位含量增加至 95% 以上, 两组分分界点为 $3.25 \sim 4.25 \phi$, 分选变化较大, 表明该阶段水动力条件自下而上逐渐减弱, 沉积环境趋于稳定。

2.4 底栖有孔虫组合特征

研究剖面共鉴定出底栖有孔虫 39 属 80 种, 底栖有孔虫丰度变化非常明显, 范围介于 $0 \sim 392$ 枚/g, 简单分异度与复合分异度变化相似, 且波动幅度大, 变化范围分别为 $1.7 \sim 20.2$ 种与 $0.3 \sim 2.3$ 。研究剖面中底栖有孔虫化石群的一个显著特点为优势种多为冷水种与广盐性浅水种, 主要出现的属种为: 缝裂希望虫 *Elphidium magellanicum*、具瘤先希望虫 *Protelphidium tuberculatum*、冷水面颊虫 *Buccella frigida*、毕克卷转虫 *Ammonia becarrii vars.*、葡萄虫 *Ammonia dominicana*、异地希望虫 *Elphidimu advenum* 等。

依据不同深度中有孔虫丰度、简单分异度、复合分异度与主要优势种的变化特征, 研究剖面共识别出 4 个不同的有孔虫组合(图 5)。自下而上详述如下:

组合 III (22.89~18.50 m): 该组合底栖有孔虫的丰度较低, 平均值为 3.2 枚/g, 简单分异度与复合分

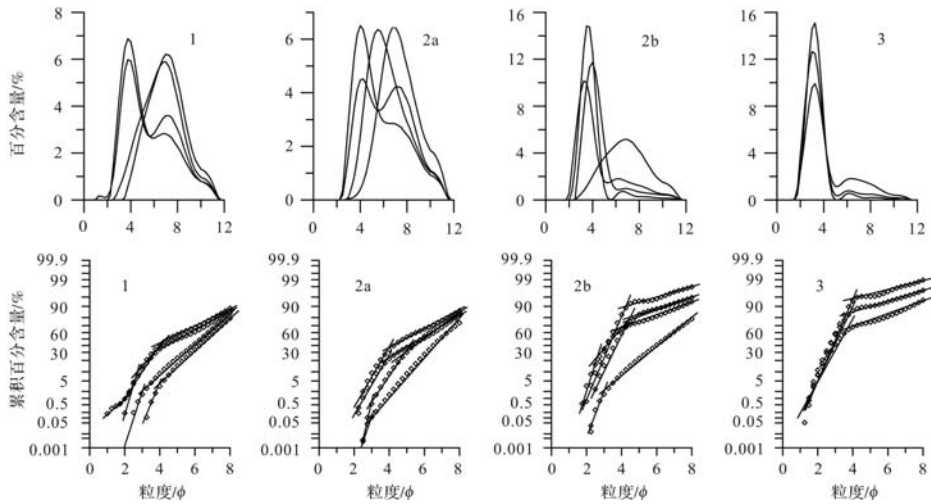


图4 MIS3中期以来北黄海中部陆架 DLC70-2 孔不同沉积阶段粒度概率累积曲线和频率分布曲线
Fig.4 Probability accumulation and frequency distribution curves at different stages of Core DLC70-2
in the central shelf of NYS since mid-MIS3

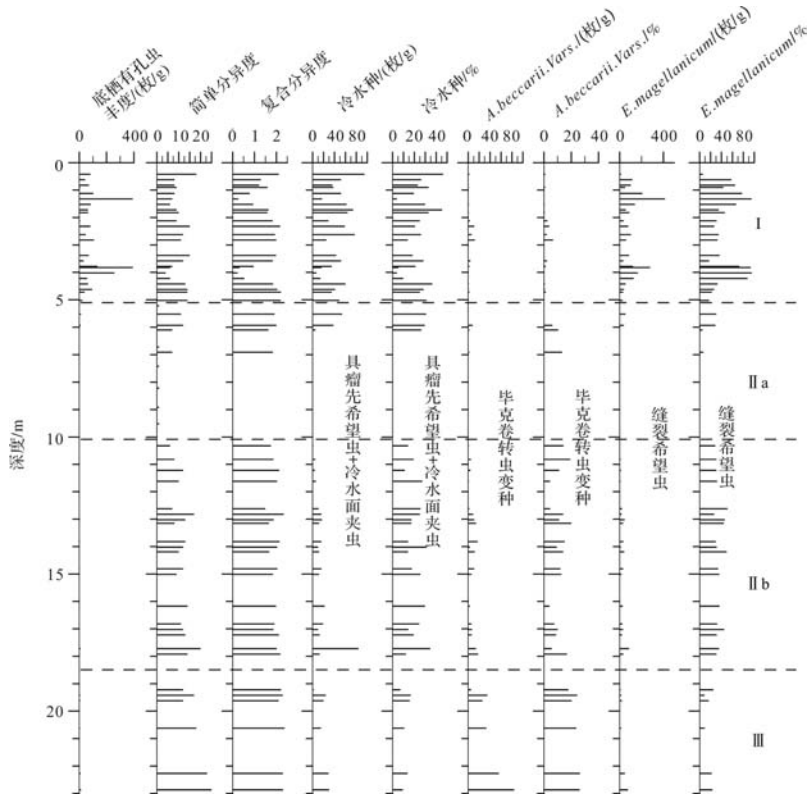


图5 MIS3中期以来北黄海中部陆架 DLC70-2 孔沉积物中底栖有孔虫的垂向变化

Fig.5 Vertical variations of benthic foraminifera from sediments of Core DLC70-2 in the central shelf of NYS since mid-MIS3

异度分别为 6.3 种与 0.8。优势种以典型的广盐性滨岸浅水种毕克卷转虫 *Ammonia beccarii vars.* 为主, 该属种主要生活在潮间带、潟湖、河口与海湾等半咸水环境^[29-31]; 其次为近岸低温低盐类型缝裂希望虫 *Elphidium magellanicum* 与冷水种(具瘤先希望虫 *Pro-*

telphidium tuberculatum+冷水面颊虫 *Buccella frigida*)。

组合 IIb (18.50~10.02 m): 该组合底栖有孔虫丰度与组合 III 相当, 平均值为 3.0 枚/g, 简单分异度与复合分异度均有所增加, 分别为 20.2 种与 2.3。优势种以其次为近岸低温低盐类型缝裂希望虫 *Elphidi-*

um magellanicum 为主,其次为冷水种(具瘤先希望虫 *Protelphidium tuberculatum*+冷水面颊虫 *Buccella frigida*)与广盐性滨岸浅水种毕克卷转虫 *Ammonia becarii vars.*。

组合 IIa(10.02~5.10 m):该组合中底栖有孔虫丰度、简单分异度与复合分异度均为研究剖面最低,大部分层位未发现底栖有孔虫,仅上部出现少量的以近岸低温低盐类型缝裂希望虫 *Elphidium magellanicum* 与冷水种(具瘤先希望虫 *Protelphidium tuberculatum*+冷水面颊虫 *Buccella frigida*)为主要的特征种。

组合 I(5.10~0 m):该组合中底栖有孔虫的丰度为研究剖面最高,平均值为 100.0 枚/g,简单分异度与复合分异度的平均值分别为 10.0 种与 1.5。优势种以近岸低温低盐类型缝裂希望虫 *Elphidium magellanicum* 与冷水种(具瘤先希望虫 *Protelphidium tuberculatum*+冷水面颊虫 *Buccella frigida*)为主,且两种优势种在垂向上呈此消彼长的变化趋势,显示了沉积环境的转变。

3 沉积相分析

研究剖面底部年龄为 43 639 cal yr B.P.,即该剖面保存了 MIS3 中期以来的沉积记录。研究表明, MIS3 期以来北黄海陆架的海平面一直处于波动之中^[4,32],使沉积环境发生相应的变化。依据北黄海中部 DLC70-2 孔 0~22.89 m 段的岩性、粒度、微体古生物分布特征,结合年代数据及海平面变化曲线,自下而上识别出 MIS3 中期以来北黄海中部陆架 4 种沉积相:河口湾相、潮控河口湾相、河流泛滥平原相、滨海—浅海相。

3.1 河口湾相(22.89~18.50 m, 43 639~42 558 cal yr B.P.)

该段沉积物岩性以粉砂为主,下部层位出现两处贝壳层,上部层位出现黏土质条带(图 3E),自下而上,砂含量减少,粒度逐渐变细,分选变差,表现出细粒物质的影响逐渐增强,反映了水深逐渐增加、水动力条件逐渐变弱的趋势。频率分布为较为一致的众数值 3.25~3.50 ϕ 的单峰细尾分布,而概率累积曲线也显示了较为一致的跃移组分占主导的两段式结构,表明该阶段水动力条件强且较为稳定的特征。该段地层沉积物中底栖有孔虫以广盐性近岸浅水种毕克卷转虫 *Ammonia becarii vars.*、缝裂希望虫 *Elphidium magellanicum* 及冷水种(具瘤先希望虫 *Protelphidium tuberculatum*+冷水面颊虫 *Buccella frigida*)作为优势

种,自下而上,冷水种(具瘤先希望虫 *Protelphidium tuberculatum*+冷水面颊虫 *Buccella frigida*)的丰度及颗粒数有所增加,而毕克卷转虫 *Ammonia becarii vars.* 的丰度及颗粒数逐渐减少(图 5)。19.62 m 与 22.87 m 处的混合底栖有孔虫的 AMS¹⁴C 测年的日历年龄分别为 42 558 cal yr B.P.与 43 639 cal yr B.P.,该段地层底部沉积埋深 22.89 m,位于现代海平面以下 75.69 m,略低于当时的海平面或与之相持平(图 6),显示该段为 MIS3 中期海平面上升过程中的河口湾相沉积。

3.2 河口充填相(18.50~10.02 m, 14 602~12 602 cal yr B.P.)

该段沉积物岩性自下而上由灰褐色粉砂过渡至黄褐色细粉砂,局部夹黏土质条带(图 3D),与下部地层为侵蚀接触。该阶段自下而上,砂含量逐渐减少,粒度细化,反映了水动力条件逐渐变弱的特征。频率分布主要为众数值 3.50~4.00 ϕ 的单峰细尾分布,少数层位为众数值 6.75 ϕ 的单峰分布,概率累积曲线显示多数层位为跃移组分占主导的两段式结构,少数层位为悬移组分占优势的两段式结构,表明该阶段水动力条件强且不稳定的特征。该段地层沉积物中底栖有孔虫以近岸低温低盐类型缝裂希望虫 *Elphidium magellanicum* 作为优势种,其次为冷水种(具瘤先希望虫 *Protelphidium tuberculatum*+冷水面颊虫 *Buccella frigida*)与广盐性近岸浅水种毕克卷转虫 *Ammonia becarii vars.*(图 5),17.82 m 与 10.25 m 处的混合底栖有孔虫的 AMS¹⁴C 测年的日历年龄分别为 14 602 cal yr B.P.与 12 602 cal yr B.P.,该段地层底部沉积位于现代海平面以下 71.30 m,与当时的海平面相当(图 6),而该段沉积下覆地层由于末次冰盛期低海面甚至陆架裸露过程中^[4,32],长时期遭受侵蚀,导致与该段地层之间存在明显的沉积间断,总体显示该段为末次盛冰期以来海平面上升过程中的河口充填相沉积。

3.3 河流泛滥平原相(10.02~5.10 m, 12 602~10 357 cal yr B.P.)

该阶段沉积物岩性为粉砂质黏土,颜色自下而上由黄褐色逐渐过渡至灰褐色,发育大量植物根孔,上部地层可见有机质条带及贝壳碎片,该段地层为硬质黏土层(图 3C)。该阶段自下而上,砂含量增加,粒度粗化,分选变差,反映了水动力逐渐增强的特征。频率分布主要为众数值 3.75~7.50 ϕ 的单峰细尾分布,众数值变化较大,上部层位出现双峰分布,概率累积

曲线为悬移组分占优势的两段式结构,表明该阶段水动力条件稳定性较差。该段地层沉积物中底栖有孔虫丰度为研究剖面最低,仅上部层位见冷水种(具瘤先希望虫 *Protelphidium tuberculatum* + 冷水面颊虫 *Buccella frigida*)和近岸低温低盐类型缝裂希望虫 *Elphidium magellanicum*(图5),高含量的淡水藻类(环纹藻、盘星藻)与水生草本香蒲的出现表明该阶段地层沉积物形成环境主要为淡水水域,源自河流泛滥平原的沉积^[33]。据上覆与下伏地层中底栖有孔虫 AMS¹⁴C 测年可知,该阶段地层形成时代介于 12 602 ~ 10 357 cal yr B.P. 之间,年代学角度上,与发生 12.9 ~ 11.6 ka 的末次冰消气候回冷事件——新仙女木事件^[34]相吻合,可作为新鲜仙女木事件在北黄海陆架响应的一个重要证据。该段地层底部沉积位于现代海平面以下 62.80 m,略高于当时海平面(图6),反应了该阶段主要为新仙女木事件中晚期海平面停滞或回落期间的河流泛滥平原相沉积,地层上部由于海平面的上升受到海水的影响。

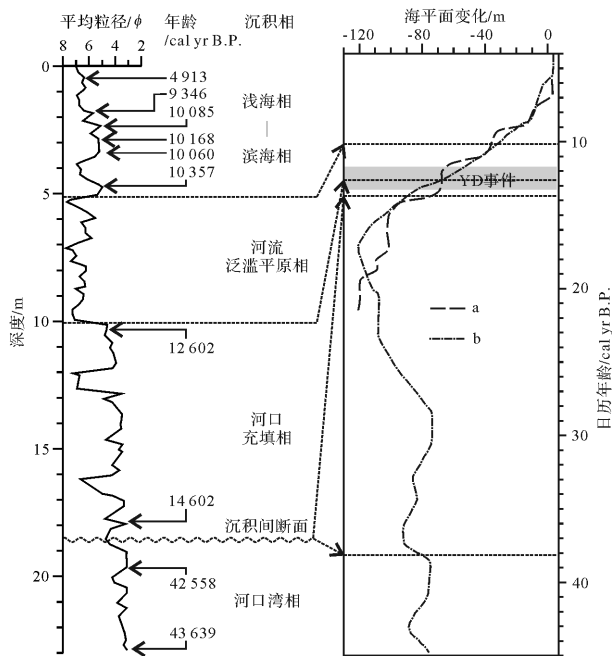


图6 MIS3中期以来北黄海中部陆架 DLC70-2 孔的沉积环境演化(a^[4], b^[32])

Fig.6 Sedimentary environmental evolution of Core DLC70-2 in the central shelf of NYS since mid-MIS3

3.4 滨海—浅海相(5.10~0 m, 10 357~4 913 cal yr B.P.)

该阶段沉积物岩性自下而上由黄褐色、灰褐色黏土质粉砂过渡至深灰色粉砂质黏土(图3B, A),地层

下部粒度参数波动较大,变化趋势不明显,地层上部,自下而上,砂含量减少、粒度细化、分选变好,反映了下部水动力较强,向上水深逐渐增加、水动力逐渐减弱的过程。频率分布下部层位主要为双峰分布,向上过渡至众数值 7.25~7.50 φ 的单峰细尾分布,概率累积分布曲线为悬移组分占优势的两段式结构,自下而上,悬移组分含量逐渐增加,表明水动力条件自下而上逐渐减弱,沉积环境趋于稳定。该阶段地层沉积物中底栖有孔虫丰度含量为研究剖面最高,优势种为冷水种(具瘤先希望虫 *Protelphidium tuberculatum* + 冷水面颊虫 *Buccella frigida*)与近岸低温低盐类型缝裂希望虫 *Elphidium magellanicum*,两优势种在垂向上呈此消彼长变化特征,且冷水种丰度在该阶段地层上部自下而上逐渐增加(图5)。冷水种(具瘤先希望虫 *Protelphidium tuberculatum* + 冷水面颊虫 *Buccella frigida*)在北黄海主要分布在黄海冷水团边缘的冷水控制区^[25],代表了与目前相似的冷涡边缘的冷水环境。0.42 m、1.72 m、2.32 m、2.82 m、3.38 m 与 4.62 m 处的混合底栖有孔虫的 AMS¹⁴C 测年的日历年龄分别为 4 913 cal yr B.P.、9 346 cal yr B.P.、10 085 cal yr B.P.、10 168 cal yr B.P.、10 060 cal yr B.P.与 10 357 cal yr B.P.,显示该段为全新世早中期海平面上升过程中的滨海—浅海相沉积(图6)。

4 结论

北黄海中部陆架 MIS3 中期以来的沉积环境演化与海平面变化存在良好的对应关系,具有明显的阶段性特征:岩芯 22.89~18.50 m 段(43 639~42 558 cal yr B.P.)为 MIS3 中期海平面上升过程中的河口湾相,与上覆沉积地层存在明显的沉积间断;随着海平面的逐渐上升,海水自 14 602 cal yr B.P.开始侵入研究区,形成了 18.50 m 以上的沉积地层,自下而上分别为:末次冰盛期以来海平面上升过程中的河口充填相(18.50~10.02 m, 14 602~12 602 cal yr B.P.)—新仙女木事件中晚期海平面停滞或回落期间的河流泛滥平原相(10.02~5.10 m, 12 602~10 357 cal yr B.P.)—全新世早中期海平面上升过程中的滨海、浅海相(5.10~0 m, 10 357~4 913 cal yr B.P.)。

岩芯 10.02~5.10 m (12 602~10 357 cal yr B.P.)记录的源自河流泛滥平原沉积的硬质黏土层与新仙女木事件的全球效应密切相关,与北黄海泥炭层为同期的沉积,可作为新仙女木事件在北黄海陆架响应的一个重要证据。

参考文献 (References)

- 1 Liu J P, Milliman J D, Gao S. The Shandong mud wedge and post-glacial sediment accumulation in the Yellow Sea [J]. *Geo-Marine Letters*, 2002, 21(4): 212-218.
- 2 齐君, 李凤业, 宋金明, 等. 北黄海沉积速率及其沉积通量 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(2): 9-14. [Qi Jun, Li Fengye, Song Jinming, et al. Sedimentation rate and flux of the North Yellow Sea [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2004, 24(2): 9-14.]
- 3 Li Fengye, Li Xuegang, Song Jinming, et al. Sediment flux and source in northern Yellow Sea by ^{210}Pb technique [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2006, 24(3): 255-263.
- 4 Liu J P, Milliman J D, Gao Shu, et al. Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2004, 209(1/2/3/4): 45-67.
- 5 Liu Jian, Saito Y, Wang Hong, et al. Sedimentary evolution of the Holocene subaqueous clinof orm off the Shandong Peninsula in the Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2007, 236(3/4): 165-187.
- 6 Liu Jian, Saito Y, Kong Xianghuai, et al. Geochemical characteristics of sediment as indicators of post-glacial environmental changes off the Shandong Peninsula in the Yellow Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2009, 29(7): 846-855.
- 7 Yang Z S, Liu J P. A unique Yellow River-derived distal subaqueous delta in the Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2007, 240(1/2/3/4): 169-176.
- 8 李艳, 李安春, 万世明, 等. 大连湾近海表层沉积物矿物组合分布特征及其物源环境 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(4): 115-121. [Li Yan, Li Anchun, Wan Shiming, et al. Distribution of mineral assemblages in offshore surface sediments of Dalian Bay in the northwestern North Yellow Sea and their provenance and environmental implications [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2009, 29(4): 115-121.]
- 9 李艳, 李安春, 黄朋. 大连湾近海表层沉积物重矿物组合分布特征及其物源环境指示 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(6): 13-20. [Li Yan, Li Anchun, Huang Peng. Distribution of heavy mineral assemblages in subsurface sediments of Dalian Bay and their implications for provenance and environment [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2011, 31(6): 13-20.]
- 10 Chen Xiaohui, Li Tiegang, Zhang Xunhua, et al. A Holocene Yalu River-derived fine-grained deposit in the southeast coastal area of Liaodong Peninsula [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2013, 31(3): 636-647.
- 11 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉. 黄海地质 [M]. 北京: 海洋出版社, 1989. [Qin Yunshan, Zhao Yiyang, Chen Lirong. *The Geology of the Yellow Sea* [M]. Beijing: Ocean Press, 1989.]
- 12 刘健, 李绍全, 王圣洁, 等. 末次冰消期以来黄海海平面变化与黄海暖流的形成 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(1): 13-24. [Liu Jian, Li Shaoquan, Wang Shengjie, et al. Sea level changes of the Yellow Sea and formation of the Yellow Sea Warm Current since the last deglaciation [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 1999, 19(1): 13-24.]
- 13 李铁刚, 常凤鸣, 于心科. Younger Dryas 事件与北黄海泥炭层的形成 [J]. *地学前缘*, 2010, 17(1): 322-329. [Li Tiegang, Chang Fengming, Yu Xinke. Younger Dryas Event and formation of peat layers in the northern Yellow Sea [J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(1): 322-329.]
- 14 Liu Zhenxia, Xia Dongxing, Berne S, et al. Tidal deposition systems of China's continental shelf, with special reference to the eastern Bohai Sea [J]. *Marine Geology*, 1998, 145(3/4): 225-153.
- 15 程鹏, 高抒. 北黄海西部海底沉积物的粒度特征和净输运趋势 [J]. *海洋与湖沼*, 2000, 31(6): 604-615. [Cheng Peng, Gao Shu. Net sediment transport patterns over the northwestern Yellow Sea, based upon grain size trend analysis [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, 31(6): 604-615.]
- 16 王伟, 李安春, 徐方建, 等. 北黄海表层沉积物粒度分布特征及其沉积环境分析 [J]. *海洋与湖沼*, 2009, 40(5): 525-531. [Wang Wei, Li Anchun, Xu Fangjian, et al. Distribution of surface sediments and sedimentary environment in the North Yellow Sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2009, 40(5): 525-531.]
- 17 陈丽蓉. 渤海、黄海、东海沉积物中矿物组合的研究 [J]. *海洋科学*, 1989, 6(2): 1-8. [Chen Lirong. A study on mineral assemblages in sediments of the Bohai Sea, the Huanghai Sea and the East China Sea [J]. *Marine Sciences*, 1989, 6(2): 1-8.]
- 18 程岩, 刘月, 李富祥, 等. 鸭绿江口及邻近浅海碎屑矿物特征与物源辨识 [J]. *地理研究*, 2010, 29(11): 1950-1959. [Cheng Yan, Liu Yue, Li Fuxiang, et al. Detrital mineral characteristics and material source identification in surface sediments of Yalu River estuary and adjacent waters [J]. *Geographical Research*, 2010, 29(11): 1950-1959.]
- 19 Huang Peng, Li Tiegang, Li Anchun, et al. Distribution, enrichment and sources of heavy metals in surface sediments of the North Yellow Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 73: 1-13.
- 20 Li Yan, Li Anchun, Huang Peng, et al. Clay minerals in surface sediment of the North Yellow Sea and their implication to provenance and transportation [J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 90: 33-40.
- 21 Kim G, Yang H S, Church T M. Geochemistry of alkaline earth elements (Mg, Ca, Sr, Ba) in the surface sediments of the Yellow Sea [J]. *Chemical Geology*, 1999, 153(1/2/3/4): 1-10.
- 22 严杰, 高建华, 李军, 等. 鸭绿江河口及近岸地区稀土元素的物源指示意义 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(4): 95-103. [Yan Jie, Gao Jianhua, Li Jun, et al. Implications of REE for provenance in the Yalu estuary and its adjacent sea area [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2010, 30(4): 95-103.]
- 23 Kim J M, Kucera M. Benthic foraminifer record of environmental changes in the Yellow Sea (Hwanghae) during the last 15000 years [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(11): 1067-1085.
- 24 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.]
- 25 孙荣涛,李铁刚,常凤鸣. 全新世北黄海泥质区环境演化的底栖有孔虫记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(5): 83-90. [Sun Rongtao, Li Tiegang, Chang Fengming. Environmental evolution of the northern Yellow Sea muddy area during Holocene based on benthic foraminifera records [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2010, 30(5): 83-90.]
- 26 McManus J. Grain size determination and interpretation[M]// Tucker M. *Techniques in Sedimentology*. Oxford: Wiley-Blackwell, 1988: 63-85.
- 27 Southon J, Kashgarian M, Fontugne M, et al. Marine reservoir corrections for the Indian Ocean and Southeast Asia [J]. *Radiocarbon*, 2002, 44(1): 167-180.
- 28 Kong G S, Lee C W. Marine reservoir corrections (ΔR) for southern coastal waters of Korea [J]. *The Sea, Journal of the Korean Society of Oceanography*, 2005, 10(2): 124-128.
- 29 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]//汪品先. *海洋微体古生物论文集*. 北京:海洋出版社, 1980: 84-100. [Wang Pinxian, Min Qiubao, Bian Yunhua. A preliminary study of foraminiferal and ostracoda assemblages of the Yellow Sea [C]//Wang Pinxian. *Papers on Marine Micropaleontology*. Beijing: Ocean Press, 1980: 84-100.]
- 30 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: 1-307. [Wang Pinxian, Zhang Jijun, Zhao Quanhong, et al. *Foraminifera and Ostracoda in Surface Sediments of the East China Sea* [M]. Beijing: Ocean Press, 1988: 1-307.]
- 31 Murry J W. *Ecology and Palaeoecology of Benthic Foraminifera* [M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1991: 1-397.
- 32 Chappell J, Omura A, Esat T, et al. Reconciliation of late Quaternary sea levels derived from coral terraces at Huon Peninsula with deep sea oxygen isotope records [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 141(1/2/3/4): 227-236.
- 33 陈晓辉, 李日辉, 蓝先洪, 等. 晚更新世末北黄海中硬质粘土层的形成及其古环境意义 [J]. *第四纪研究*, 2014, 34(3): 570-578. [Chen Xiaohui, Li Rihui, Lan Xianhong, et al. Formation and Paleoenvironmental implications of hard clay in the central North Yellow Sea during the late period of Pleistocene [J]. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(3): 570-578.]
- 34 Broecker W S, Kennett J P, Flower B P, et al. Routing of meltwater from the Laurentide ice sheet during the Younger Dryas cold episode [J]. *Nature*, 1989, 341(6240): 318-321.

Paleo-environmental Evolution in the Central Shelf of the North Yellow Sea Since mid-MIS3

CHEN XiaoHui^{1,2} LI RiHui^{1,2} LAN XianHong^{1,2} WANG Yan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marine Petroleum Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao, Shandong 266071, China;

2. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract: The North Yellow Sea is a typical semi-enclosed epicontinental sea and is characterized by strong land-sea interaction and paleoenvironmental changes during the Late Quaternary with sea-level fluctuations. In this study, based upon analysis of lithology, grain-size, micropaleontology and AMS¹⁴C dating for Core DLC70-2, located in the central shelf of the North Yellow Sea (NYS), the paleo-environmental evolution can be ascertained. The study suggests that the sedimentary environmental evolution in the central shelf of NYS since mid-MIS3, which was well corresponding to the relative sea level changes, shows prominent multistage characteristics. From 22.89 m to 18.50 m (43 639~42 558 cal yr B.P.), an estuarine facies, developed by sea level rise in the middle of MIS3, and there exists an apparent sedimentary hiatus between the facies and its overlying strata. The seawater arrived at the study area since 14 602 cal yr B.P. and a 18.50 m thick sediment formed from then on, which can be divided into estuarine filling facies (18.50~10.02 m, 14 602~12 602 cal yr B.P.), riverine floodplain facies (10.02~5.10 m, 12 602~10 357 cal yr B.P.) and littoral-neritic facies (5.10~0 m, 10 357~4 913 cal yr B.P.) from the bottom up, corresponding to the process of sea level rising since Last Glacial Maximum, the short stagnated period of sea level during the Younger Dryas event, and the process of sea level rising during the early-middle Holocene, respectively. The section from 10.02 m to 5.10 m (12 602~10 357 cal yr B.P.), a hard clay, the result of the riverine floodplain, may be closely correlated with the global impact of Younger Dryas event and can be regard as a significant evidence of the response of the NYS area to it.

Key words: mid-MIS3; North Yellow Sea; Paleo-environment; Younger Dryas event