

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.014>



渤海西部晚第四纪地层层序特征及沉积响应

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

1. 青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266071

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东青岛 266071

摘要: 渤海是一个仅通过渤海海峡与北黄海相接的半封闭陆架浅海, 晚第四纪以来的地层演化过程复杂, 目前尚不清楚, 且海相地层的形成时代存在争议。为了研究渤海西部晚第四纪以来的地层层序, 对高分辨率浅地层剖面声学地层与典型钻孔沉积地层的进行对比分析。研究表明: 高分辨率浅地层剖面自下而上划定的7个声学地层单元(U5、U4-2、U4-1、U3、U2、U1-2、U1-1)与钻孔岩心划分的沉积地层单元具有良好的对应关系。与MIS4期、MIS2期低海面时期的沉积间断密切相关的两个层序界面R5、R3, 将渤海西部晚第四纪(MIS5期)以来的地层层序自下而上划分为3个层序(SQ3、SQ2、SQ1): SQ3识别出下部海侵体系域与高水位体系域、上部海退体系域, 分别对应MIS5期海平面相对较高时期的滨—浅海相交替沉积(U5)、MIS4期早期滨海相沉积(U4-2); SQ2自下而上由低水位体系域[MIS4期中晚期与黄河、滦河相关的河湖相沉积(U4-1)]与海侵体系域[MIS3期早中期滨海相沉积(U3)]组成; SQ1自下而上包括低水位体系域[末次冰盛期与滦河相关的河湖相沉积(U2)]、海侵体系域[全新世早中期滨海相沉积(U1-2)]高水位体系域[全新世高海面以来的浅海相沉积(U1-1)]。研究区的地层发育受控于海平面变化、沉积物供应、渤海海峡地形及活动构造的共同作用。

关键词: 渤海西部; 晚第四纪; 海平面变化; 地层层序; 海洋地质。

中图分类号: P736

文章编号: 1000-2383(2020)07-2684-13

收稿日期: 2020-02-09

Late Quaternary Stratigraphic Sequence and Depositional Response in the Western Bohai Sea

Chen Xiaohui^{1,2}, Li Rihui^{1,2}, Lan Xianhong^{1,2}, Xu Xiaoda^{1,2}

1. *Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China*

2. *Laboratory for Marine Mineral Resources, National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China*

Abstract: The Bohai Sea (BS) is a semi-enclosed sea connected to the North Yellow Sea only via the Bohai Strait. Its stratigraphic evolution during the Late Quaternary has been complex and unresolved. Moreover, the timing of Late Quaternary transgression has been a matter of controversy. In order to study the stratigraphic sequence in the western BS during the Late Quaternary, high-resolution seismic reflection data in conjunction with depositional stratigraphy of typical cores were analyzed. The results indicate that high-resolution seismic profiles from the study area were subdivided into seven seismic units (U5, U4-2, U4-1, U3, U2, U1-2, U1-1 in ascending order), which were clearly correlated with the depositional units of core TJC-1. These units constitute three distinctive sequences (SQ3, SQ2, SQ1 from bottom to up) bounded by two sequence boundaries (R5, R3) with obvious depositional hiatus, correlated with sea-level lowstands of MIS4 and MIS2, respectively. SQ3 consists of the lower transgressive systems tract (TST) and highstand systems tract (HST) (U5, interactive deposits of littoral and neritic facies in MIS5), and the

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41406077); 国土资源大调查项目(Nos. GZH201400205, 1212011220113, DD20160139); 东部海区区域地质志项目(No. DD20190377)。

作者简介: 陈晓辉(1981—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事陆架地层层序与环境地质研究。ORCID: 0000-0002-8487-5343. E-mail: hongzi1982@163.com

引用格式: 陈晓辉, 李日辉, 蓝先洪, 2020. 渤海西部晚第四纪地层层序特征及沉积响应. 地球科学, 45(7):2684—2696.

upper regressive systems tract (RST) (U4-2, littoral facies in early MIS4). SQ2 is composed of lowstand systems tract (LST) (U4-1, fluvial and lacustrine facies in middle-Late MIS4 correlating with the Huanghe River and Luanhe River) and TST (U3, littoral facies during the early-middle MIS3) from the bottom up. SQ1 comprises LST (U2, fluvial and lacustrine during Last Glacial Maximum correlating with Luanhe River), TST (U1-2, littoral facies during the early-middle Holocene) and HST (U1-1, neritic facies since the sea-level highstand of Holocene). Stratigraphy development in the study area during the Late Quaternary was governed mainly by sea-level changes, provenance, the Bohai Strait topography and the active faults.

Key words: the western Bohai Sea; Late Quaternary; sea-level changes; stratigraphic sequence; marine geology.

0 引言

渤海是一个典型的半封闭陆架浅海,通过渤海海峡与北黄海相邻,平均水深18 m. 黄河、辽河、滦河等河流入海带来的巨量陆源碎屑物质在渤海陆架堆积(秦蕴珊等,1985; Liu *et al.*, 2009; 蓝先洪等,2016),第四系厚度介于300~600 m,海陆交互沉积是这一地质时期的重要沉积特征(秦蕴珊等,1985);第四纪冰期一間冰期转换引起的海平面波动与气候变化、渤海海峡地形控制着渤海的沉积格局(Marsset *et al.*, 1996; Liu *et al.*, 2009; Yi *et al.*, 2012);晚更新世以来甚至全新世以来的构造活动强烈(李西双等,2010; 王洪聚等,2011). 充足的物源供应、频繁的海平面变化、新构造活动等因素使得渤海陆架沉积蕴含了丰富的地层和古环境信息.

近年来,不同学者针对渤海陆架及邻近地区晚第四系地层开展了大量的研究,主要成果多集中在海侵层的研究方面. 关于渤海及周边平原地区晚第四纪以来曾发生过3次大规模的海侵的事实基本不存争议,然而对3次海侵发生的时间存在两种不同的观点:一种观点认为渤海地区晚第四纪以来3次大规模海侵事件分别发育于MIS7、MIS5和MIS1的高海面时期,受全球海平面及渤海海峡地形共同影响MIS3期发生大规模海侵的可能性较小(姚政权等,2006; 肖国桥等,2008; Yi *et al.*, 2012);另一种观点则认为渤海地区晚第四纪以来3次大规模海侵分别对应MIS5、MIS3和MIS1期的高海面时期(秦蕴珊等, 1985; Liu *et al.*, 2009, 2016),并认为MIS3期海侵范围明显大于MIS5期高海面时期(王强等, 1999). 截止目前,有关渤海晚第四纪地层层序的研究鲜有报道,大部分研究多局限于MIS3期以来,前人研究渤海晚第四纪地层的两个典型钻孔Bc-1孔与BH08孔揭示的地层厚度相差较大[如MIS3期海相层的厚度分别为63.40 m(104.50~41.10 m)与13.31 m(28.20~14.89 m)],对两钻孔地层表现的不同特征尚缺乏系统的分析和研究,其根

本原因是缺乏良好的年代地层钻孔及高分辨率过孔浅地层剖面的记录.

本文通过对渤海西部TJC-1孔上部51.5 m沉积地层与高分辨率浅地层剖面声学地层的综合对比分析,揭示了渤海晚第四纪以来的地层格架,建立了渤海地区晚第四纪以来的地层层序模式. 该成果对中国东部海域晚第四纪地层层序的研究具有重要的指示意义.

1 材料与方法

本文采用的3 445 km高分辨率浅地层剖面资料是青岛海洋地质研究所于2012年9月在渤海海域采集(图1). 海上作业采用美国Trimble公司制造

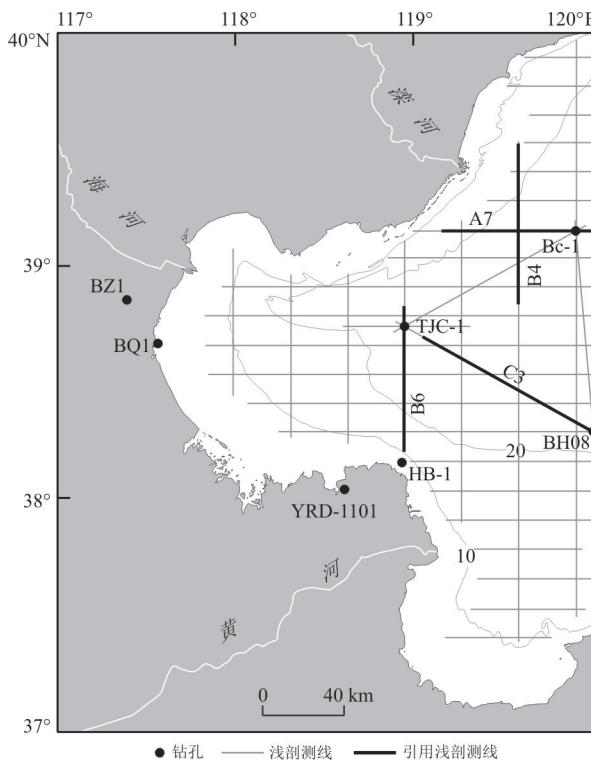


图1 渤海西部浅地层剖面测线与钻孔位置

Fig.1 Locations of shallow seismic profiles and cores in the western Bohai Sea

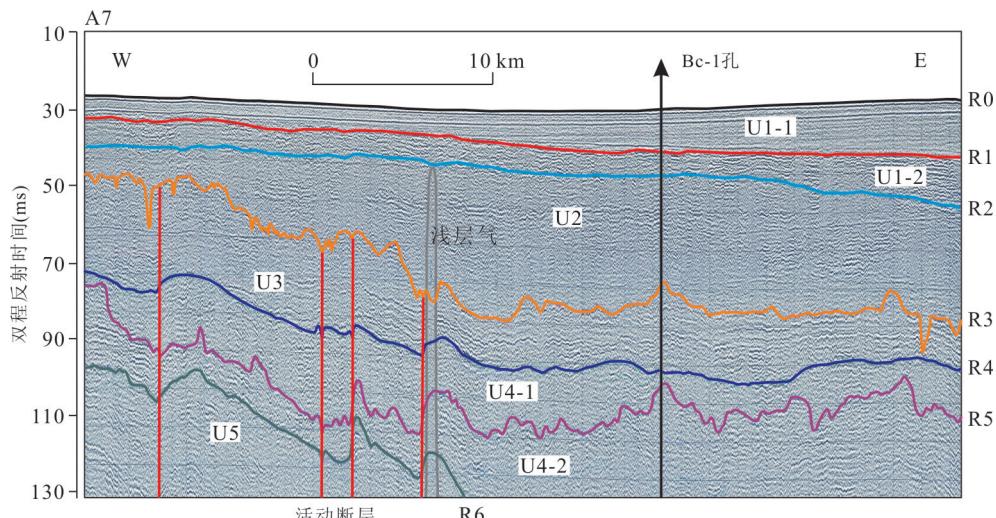


图 2 研究区 W-E 向过 Bc-1 孔典型浅地层剖面(剖面位置见图 1)

Fig.2 W-E seismic profile through core Bc-1 in the study area

的 DSM132 亚米级 DGPS 导航定位系统,定位精度的中误差小于 1 m。浅地层剖面测量使用英国 AAE 公司制造的 SBP/AAE 浅地层剖面系统,采用的震源激发能量为 400~500 J,触发间隔为 1 000 ms,滤波为 600~5 000 Hz,作业期间,施工船速控制在 5 节以下。本文厚度计算时,声学平均速度统一采用 1 600 cm/s。

本研究所分析的渤海西部 TJC-1 孔(118°57.16' E, 38°43.93' N, 岩心长 200.3 m, 水深 26.0 m)(图 1)是由青岛海洋地质研究所于 2009 年 10 月利用“勘 407”轮所采集。在室内对岩心进行了详细描述和精细分样,本文研究层段为 TJC-1 孔的 0~51.50 m 段,粒度分析与微体古生物鉴定分别大致以 40 cm 与 20 cm 的间隔取样,分别采集不同层位的样品 121 个与 340 个。

粒度分析在自然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 H_2O_2 和 0.1 NHCl 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 (Folk and Ward, 1957) 计算了 TJC-1 孔沉积物各粒度参数。

微体古生物鉴定在山东理工大学完成,样品充分浸泡后过 250 目 (0.063 mm) 的标准筛冲洗并烘干,鉴定时过 120 目 (0.125 mm) 标准筛,显微镜下对粗样 ($>0.125 mm$) 中的有孔虫和介形虫进行统计,对于微体化石含量较大的样品采用二分法进行缩

分,每样统计底栖有孔虫不少于 100 枚、介形类不少于 50 枚,含量较低的样品则统计全样。有孔虫、介形虫的鉴定主要依据汪品先等 (1980, 1988)、赵泉鸿等 (1988)、李淑莺等 (1994) 等文献。

13 个混合底栖有孔虫或植物碎屑样品、9 个沉积物样品分别在美国 Woods Hole 海洋研究所、中国科学院盐湖研究所完成 AMS¹⁴C 与 OSL 年代测试 (蓝先洪等, 2018)。

2 结果

2.1 声学地层分析

基于高分辨率浅地层剖面的地质解释,渤海西部晚第四纪以来的声学地层自下而上被 7 个声学反射界面 (R6、R5、R4、R3、R2、R1、R0) 划分为 7 个声学地层单元或亚单元 (U5、U4-2、U4-1、U3、SU2、U1-2、U1-1)(图 2~4)。这些声学地层单元反射特征与赋存状态变化较大,存在明显的规律性。

U5 单元以 R6 侵蚀面为顶界面,是研究区可识别出的最下部的声学地层单元,表现为振幅较弱、内部反射连续性好、近似平行的反射层。由于浅地层剖面穿透深度的局限性,该地层单元未能揭示其分布特征。其顶界面埋深大部分介于 80~100 m,研究区西部、南部及北部埋深逐渐变浅,大部分埋深介于 55~65 m。

U4-2 声学地层单元以层序界面 R5 为顶界面,主要表现为强振幅、连续性较好、产状呈波状的反射层。研究区该地层单元分布范围相对较广,厚度变化较大,介于 0~25 m,其中黄河口东部与滦河口

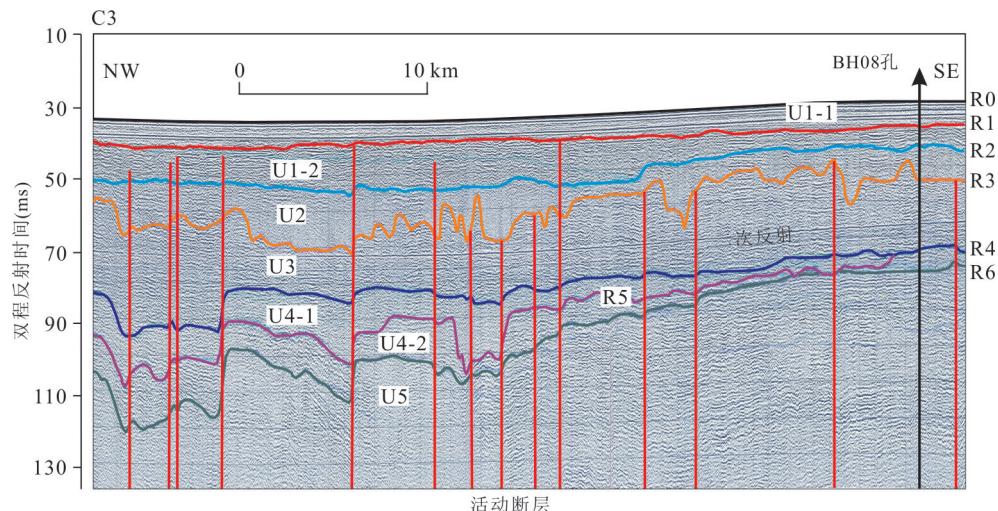


图3 研究区NW-SE向过BH08孔典型浅地层剖面(剖面位置见图1)

Fig.3 NW-SE seismic profile through core BH08 in the study area

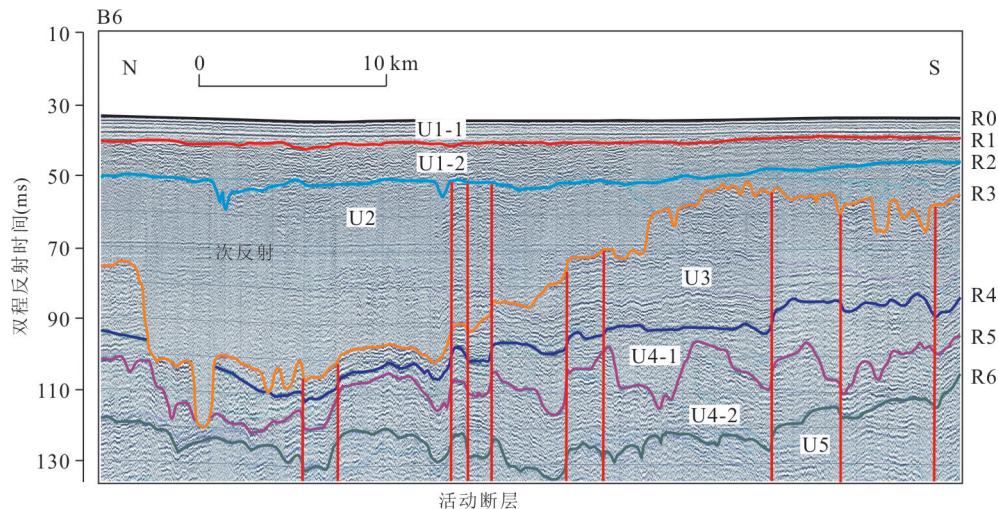


图4 研究区N-S向典型浅地层剖面(剖面位置见图1)

Fig.4 N-S seismic profile in the study area

东南部海域厚度较大,普遍超过10 m,而研究区东北部与西部海域厚度较小,局部海域小于5 m(图5f).

U4-1声学地层亚单元介于层序界面R5与海进侵蚀面R4之间,其内部反射显示振幅弱的杂乱结构、局部似层状的反射特征.该地层单元厚度变化范围介于0~20 m,厚度最大区域位于黄河口东北部海域,呈NW-SE向展布,大部分厚度介于10~18 m,其次,滦河口外、渤海湾北部该地层单元厚度普遍介于6~10 m(图5e).

U3声学地层单元底界面为海进侵蚀面R4,对下伏地层表现为明显的削截,主要表现为连续性较好、近似水平或缓波状的反射层,自上而下振幅逐

渐增强,局部地区上部显示弱振幅东南向进积下超的反射特征.U3地层单元与U4-2地层单元类似,受后期低海面期间强振幅的层序界面R3下切侵蚀造成厚度变化较大,总体表现为NW-SE向展布,中部厚、两翼薄的特征,其中滦河口外厚度最大,最大厚度超过25 m,而研究区东北部与东南部的莱州湾厚度较薄,大部分厚度小于5 m(图5d).

U2声学地层单元以层序界面R3为底界面、以海进侵蚀面R2为顶界面,内部反射主要表现为弱振幅、杂乱,上部或表现为强振幅、弱水平成层的反射特征.研究区U2声学地层单元区域厚度变化较大,介于0~30 m,其中渤海湾东北部海域厚度较大,呈SW-NE向展布,大部分厚度介于12~20 m,

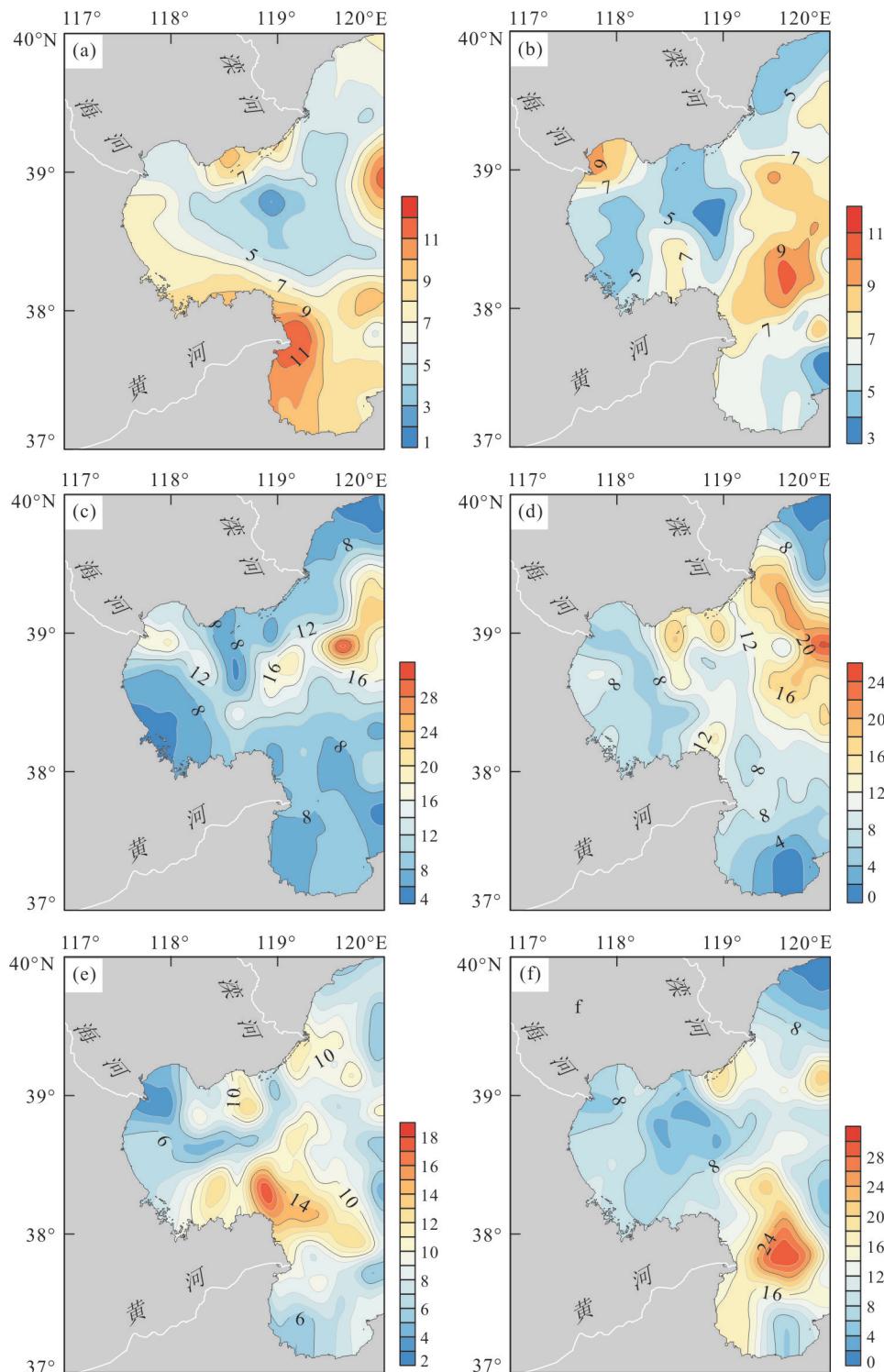


图 5 研究区地层单元 U1-1(a)、U1-2(b)、U2(c)、U3(d)、U4-1(e)、U4-2(f) 厚度图(单位:m)

Fig.5 Isopach maps of units U1-1(a), U1-2(b), U2(c), U3(d), U4-1(e), U4-2(f) in the study area

其次为海河口海域,呈 NW-SE 向展布,大部分厚度介于 8~12 m,沿两个沉积中心向北向南该地层单元厚度逐渐减小,普遍小于 8 m(图 5c).

U1-2 声学地层单元位于海进侵蚀面 R2 与最大海泛面 R1 之间,内部呈现强振幅、高频率、近水平

的反射特征.该地层单元的沉积中心位于黄河口外海域,最大厚度超过 12 m,大部分厚度变化范围为 4~8 m,此外,海河口外海区该单元的厚度较大,最大厚度可达 10 m(图 5b).

U1-1 声学地层单元底界面为最大海泛面 R1,

是研究区最上部的地层单元,其内部反射振幅较弱,多呈现声学半透明或透明反射层,呈低倾角向海进积下超于底部最大海泛面R1. U1-1属于沉积厚度变化较大,主要分布于黄河口、滦河口外,大部分厚度介于6~10 m,主要为水下三角洲沉积,此外,研究区东部存在该地层单元的一厚度中心,最大厚度超过10 m(图5a).

2.2 钻孔沉积地层分析

年代数据表明,TJC-1孔0~51.50 m段地层记录了渤海西部晚第四纪(MIS5期)以来的沉积历史.依据沉积物岩性、微体古生物等特征的分析,将该段岩心沉积物自老至新划分为8层(D8、D7、D6、D5、D4、D3、D2、D1),且依据钻孔沉积地层的划分与前述浅地层剖面声学地层的划分存在良好的对应关系(图6).

D8(51.50~50.50 m)地层单元:对应U5声学地层单元的下部,岩性主要为灰褐色细—中砂,下部见贝壳碎片层与虫孔构造,平均粒径介于2.6~2.8 Φ之间,分选好,与下伏地层为明显的侵蚀接触(图6).底栖有孔虫含量介于4.0~211.0枚/50 g,优势种以暖水种*Asterorotalia trispinosa*为主(平均含量达63.6%),且自下而上呈逐渐增加的趋势,该属种现代主要见于南海海域,属于典型的暖水属种,常作为我国第四纪地层MIS5期海侵的指示种(汪品先等,1981),该属种高值得出现表明这一时期渤海西部的水温明显高于现在.此外,广温广盐浅水种*Ammonia becarii* var.在这一单元上部地层中含量明显增加,这一属种是我国东部陆架海区最为常见的滨岸浅水种,广见于潮上带、潮间带、泻湖与河口湾等半咸水及正常盐度的滨岸浅海(汪品先等,1981;杨子庚等,1998).该地层中介形虫含量相对较高(平均值为21瓣/50 g),优势种以浅水海相种*Bicornucythere bisanensis*为主,且广盐海相种*Sinocytheridea latiovata*在上部层位占一定比例,*B. bisanensis*为西太平洋海岸附近最常见的浅水海相种之一,主要分布在水深20 m以内的内陆架浅水区,而*S. latiovata*为我国分布最广、最为广盐的现生海相种.50.66 m处沉积物的OSL年龄为104.0±11 ka BP,结合岩性、微体古生物组合特征,D8地层单元对应MIS5期海平面下降过程中相对温暖的内陆架浅海相沉积.

D7(50.50~36.01 m)地层单元:对应U5声学地层单元中部,该地层岩性变化较大,平均粒径介于

2.3~6.3 Φ,分选差.其中下部50.50~48.60 m段岩性主要为灰褐色黏土,局部夹灰褐色粉砂薄层或透镜体,见炭质斑点,水平层理发育;中间48.60~40.52 m段岩性主要为灰褐色细~中砂夹红褐色粉砂薄层,见虫孔构造,上部发育贝壳碎片;上部40.52~36.01 m段岩性主要为黄褐色黏土夹粉砂透镜体,夹生物扰动与贝壳碎片,底部见植物碎屑与结壳体(图6).D7地层单元大部分层位未见底栖有孔虫与介形虫,仅在41.28~40.52 m段出现且含量较低,其中底栖有孔虫含量平均值为4.5枚/50 g,优势种为浅海类属种*Ammonia compressiuscula*、*Textularia foliacea*与广温广盐浅水种*A. becarii* var. 46.64 m、41.50 m与38.10 m这3处沉积物的OSL年龄分别为96.0±12.0 ka BP、92.0±8.0 ka BP与88.0±8.0 ka BP,总体显示该地层单元对应MIS5期中期海平面波动过程中滨海相沉积.

D6(36.01~30.30 m)地层单元:对应U5声学地层单元的上部,岩性主要为灰黑色黏土,局部夹粉砂透镜体,上部发育水平层理,下部见贝壳碎片与虫孔构造.该地层单元平均粒径介于5.4~7.1 Φ,分选较好,且自下而上呈现逐渐变细的趋势(图6,图7).D6地层单元微体古生物化石的含量较下伏地层明显增加,其中底栖有孔虫含量为23.0枚/50 g,优势种以广温广盐浅水种*A. becarii* var.为主,且自下而上逐渐减少;介形虫含量为44.6瓣/50 g,优势种主要包括浅海类属种*Echinocythereis bradyformis*、*B. bisanensis*与滨海类属种*S. latiovata*.基于岩性、微体古生物特征,结合下伏地层测年资料,D6地层单元总体对应MIS5期晚期水深逐渐增加过程中形成的滨海—浅海相沉积.

D5(30.30~27.10 m)地层单元:对应U4—2声学地层单元,岩性主要为灰褐色细—中砂,局部夹黏土质薄层,贝壳碎片发育,其中28.46~28.43 m段为一贝壳碎片层,见虫孔构造、植物碎屑与砾石.该层段沉积物平均粒径介于1.7~2.1 Φ之间,自下而上分选变差,与下伏地层为明显的侵蚀接触(图6).该地层单元未见介形虫化石,底栖有孔虫含量介于0~340.7枚/50 g之间,且含量与简单分异度自下而上逐渐减少,优势种主要包括浅海类属种*A. compressiuscula*、*T. foliacea*与广温广盐浅水种*A. becarii* var. 27.05 m处的沉积物中植物碎屑的AMS¹⁴C测年超过43 500 a BP.总体显示该地层单元对应MIS4期早期海平面下降过程中的滨海相沉积.

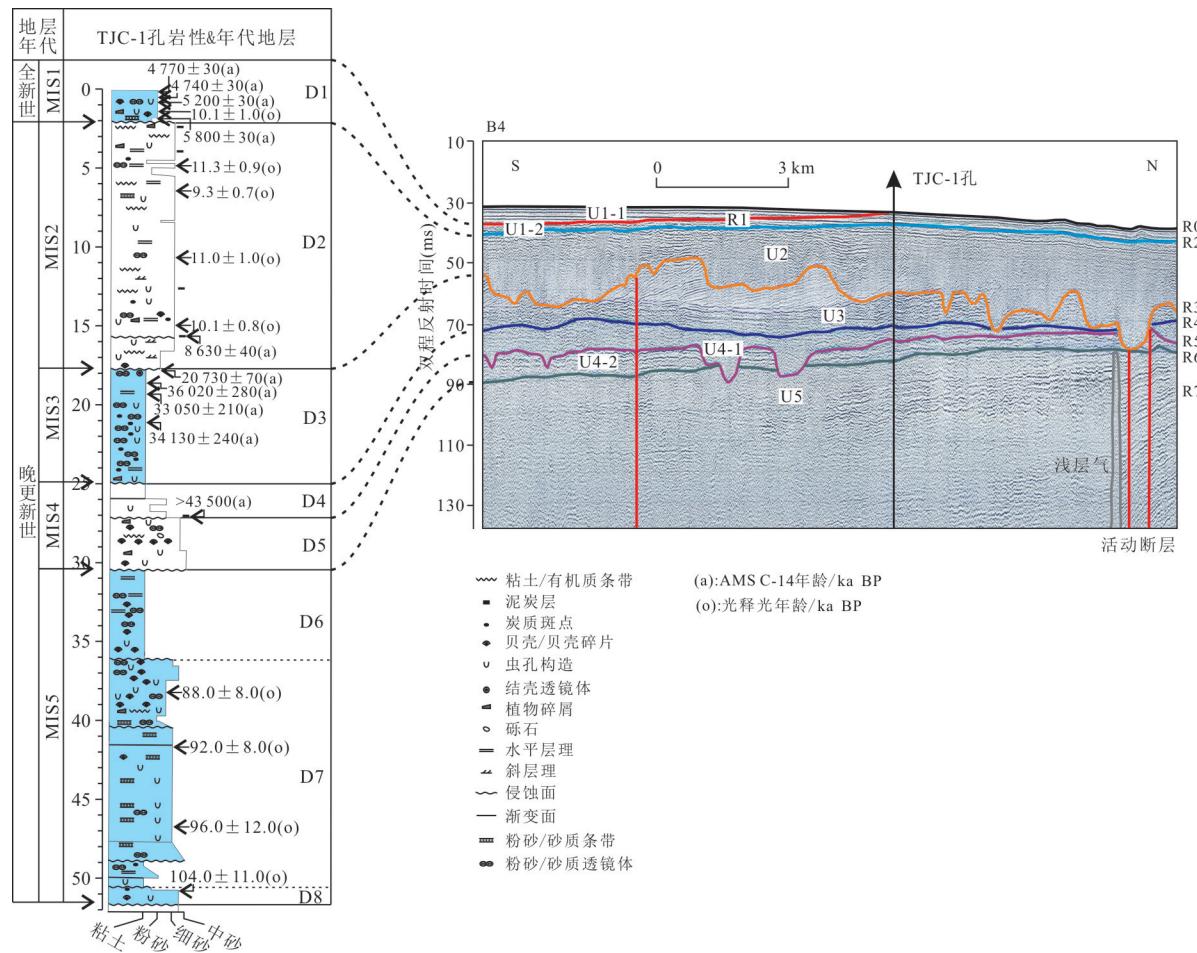


图 6 研究区 TJC-1 孔 0~51.50 m 段沉积地层与过孔浅地层剖面对比[剖面位置见图 1, 纵坐标为深度(m)]

Fig.6 Correlation between the depositional units of the core TJC-1(0~51.50 m) and the seismic units from the profile through the core in the study area

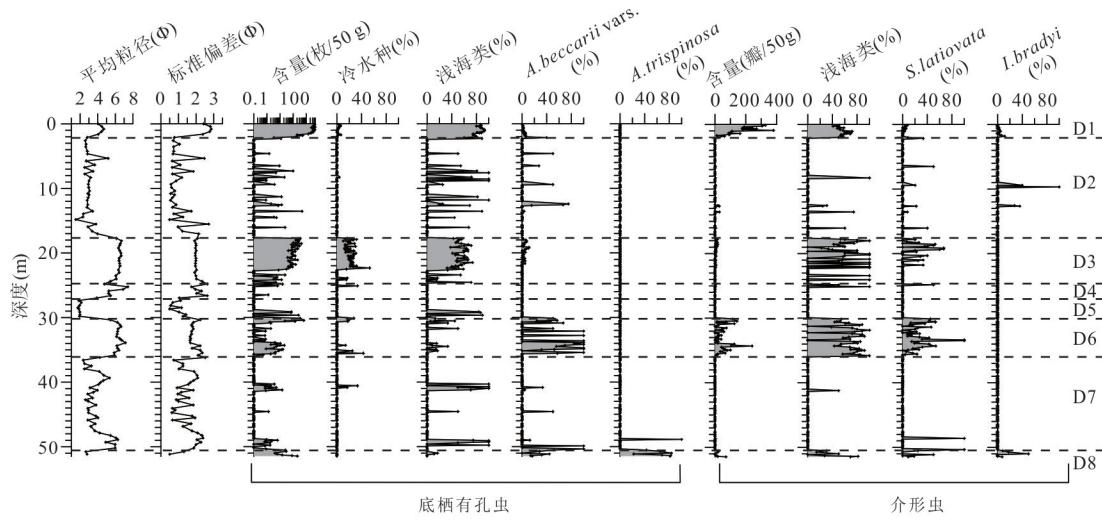


图 7 研究区 TJC-1 孔粒度参数、底栖有孔虫与介形虫组合垂向变化

Fig.7 Downcore variations in grain-size parameters, benthic foraminiferal and ostracod assemblages of core TJC-1 in the study area

D4(27.10~24.82 m)地层单元:对应声学地层单元U4-1,下部27.10~25.86 m段岩性主要为黄褐色粉一细砂,见虫孔构造,底部27.10~27.05 m段为一泥炭层,上部25.86~24.82 m段岩性主要为黄褐色黏土,两层段之间为渐变接触,与下伏地层为不整合接触(图6).该地层单元平均粒径介于4~7 Φ 之间,且自下而上逐渐变细.D4地层单元底栖有孔虫与介形虫极少,仅上部层位零星出现,不具有统计意义.基于岩性与微体古生物组合特征,结合下伏地层年代学结果,D4地层单元对应MIS4期中晚期低海平面期间的河流相及后期海平面上升过程中的河流充填相沉积.

D3(24.82~17.66 m)地层单元:对应U3声学地层单元,岩性主要为灰黑色黏土,夹粉砂透镜体与炭质斑点,发育平行层理与斜层理,见虫孔构造、植物碎屑与结壳体.该地层单元平均粒径介于5.4~6.7 Φ 之间,显示自下而上逐渐变细的趋势,分选好,与下伏地层为侵蚀接触(图6).该地层单元底栖有孔虫与海相介形虫含量相对较高,平均值分别为99.5枚/50 g与3.2瓣/50 g,且自下而上明显增加,底栖有孔虫优势种主要包括冷水种*Buccella frigida*、*Protelphidium turberculatum*与浅海类属种*Elphidium advenum*、*Elphidium magellanicum*;介形虫优势种也以浅海类属种*E. bradyformis*、*B. bisanensis*为主.21.09 m、19.37 m、18.55 m、17.89 m 4处底栖有孔虫的AMS¹⁴C年龄分别为34 130±240 BP、33 050±210 a BP、36 020±280 a BP、20 730±70 a BP.总体显示D3地层单元对应MIS3期早中期海平面上升过程中形成的滨海相沉积.

D2(17.66~2.03 m)地层单元:对应U2声学地层单元,岩性主要为黄褐色细砂、粉砂,夹黏土薄层,见虫孔构造,炭质斑点与植物碎屑,下部发育斜层理,见贝壳碎片.该单元沉积物粒度变化较大,平均粒径介于1.5~5.2 Φ ,分选较好,与下伏地层为明显的不整合接触(图6).该地层单元与D4地层单元类似,微体古生物化石含量较少,其中介形虫优势种以淡水属种*Ilyocypris bradyi*为主.该层段中4个OSL沉积物样品年龄介于(11.3±0.9)~(9.3±0.7) ka BP,15.59 m处植物碎屑的AMS¹⁴C年龄为8 630±40 a BP.沉积物岩性、微体古生物组合特征与测年结果总体显示D2地层单元对应末次冰盛期低海面时期的河流相与后期海平面上升期间的河流充填相沉积.

D1(2.03~0 m)地层单元:对应U1-2声学地层单元,岩性主要为黄褐色粉砂质黏土,夹粉砂质透镜体,见植物碎屑、贝壳碎片,虫孔构造发育.该地层单元沉积物平均粒径介于4.0~4.7 Φ 之间,且自下而上存在明显变细的趋势,分选较好,与下伏地层为不整合接触.该地层单元沉积物中微体古生物化石含量为全孔最高,且自下而上明显增加.底栖有孔虫与介形虫含量分别为2 823.8枚/50 g与165.9瓣/50 g,优势种均以浅海类属种为主,且底栖有孔虫冷水种*B. frigida*、*P. turberculatum*含量自下而上逐渐增加,而广温广盐浅水种*A. becarii* var.含量自下而上逐渐减少,介形虫半咸水指示种*S. lativata*含量也显示出自下而上逐渐减少的趋势.该地层单元中4个底栖有孔虫AMS¹⁴C年龄介于5 800±30~4 740±30 BP之间,1.50 m处的OSL年龄为10.1±1.0 ka BP.总体显示D1地层单元对应全新世早中期海平面上升过程中形成的滨海—浅海相沉积.

3 讨论

3.1 渤海西部晚第四纪(MIS5期)以来的层序地层模型

R5与R3是研究区广泛分布、起伏较大的两个地层不整合面,由于缺乏直接的证据,它们形成的精准年龄很难识别,本文根据钻孔上下地层进行了推测.渤海西部TJC-1孔与周边典型钻孔[如Bc-1孔(秦蕴珊等,1985)与BH08孔(李小艳等,2015)]多项指标表明(图8),R5层序界面经历了MIS4期中期的低海面时期,与这一地质时期的陆架裸露及河流下切作用密切相关,发育明显的沉积间断,并在随后的海平面上升过程中遭受不同程度的改造.R3层序界面与R5层序界面相似,对应末次冰盛期低海面时期,形成时代晚于20 730±70 a BP,发育沉积间断,同样在后期海平面上升过程中受到改造.

研究区晚第四纪(MIS5期)以来的地层自下而上被R5、R3两个层序界面划分为3组地层单元:U5~U4-2、U4-1~U3、U2~U1-2~U1-1,分别对应MIS5期至MIS4期早期、MIS4期晚期-MIS3期早中期、末次冰盛期至全新世3个地质时期的沉积,其内部地层相对连续,而3组地层之间存在明显的侵蚀间断.据此可将研究区晚第四纪(MIS5期)以来的地层层序划分自下而上划分为3个层序SQ3、SQ2、SQ1.

SQ3位于层序界面R5之下,是研究区晚第四

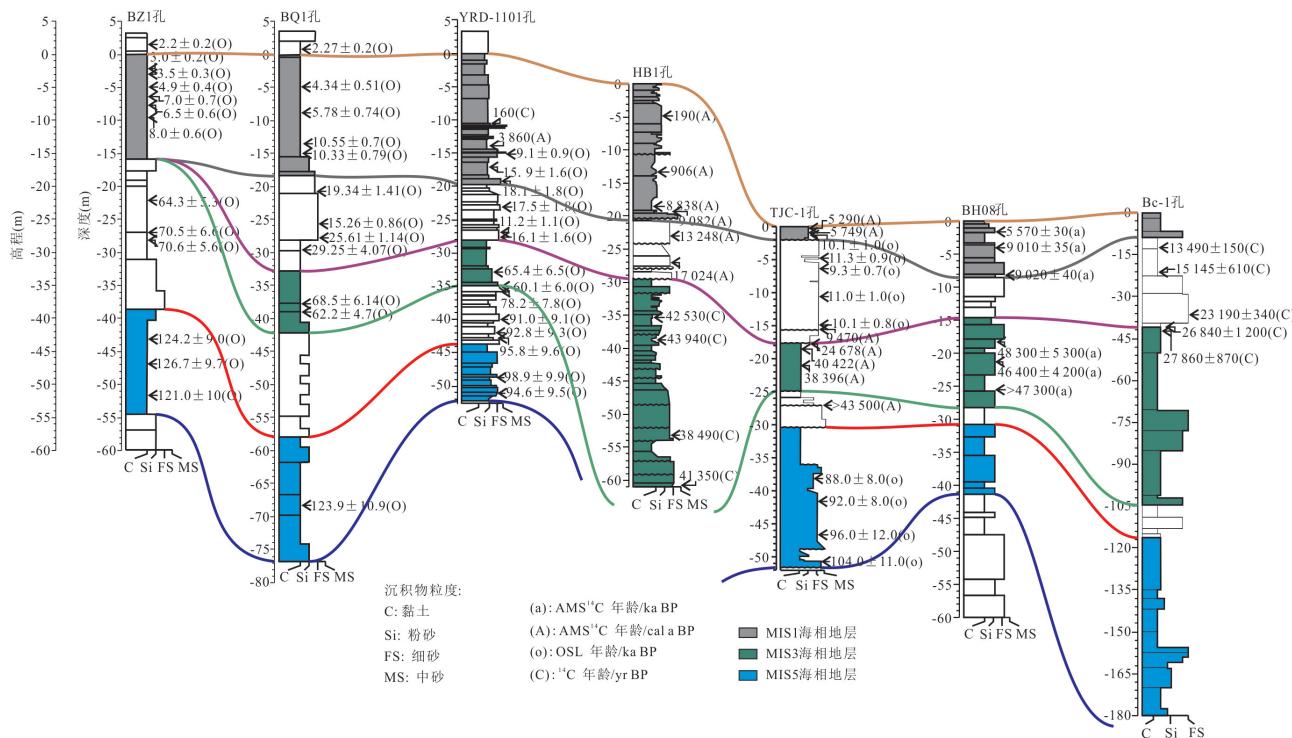


图 8 研究区 TJC-1 孔与周边钻孔地层对比

Fig.8 Stratigraphic comparison of core TJC-1 with neighbor cores in the study area

BZ1 孔据肖国桥等(2008); BQ1 孔据阎玉忠等(2006); YRD-1101 孔据 Liu *et al.*(2016); HB1 孔据 Liu *et al.*(2009); BH08 孔据李小艳等(2015); Bc-1 孔据秦蕴珊等(1985); 钻孔位置见图 1

纪以来可识别出的最下部的层序,主要包括 U5 与 U4-2 两个地层单元,其下部的单元由于钻孔或浅地层剖面穿透深度的限制未能识别。U5 地层单元对应 MIS5 期海平面波动过程中的滨海—浅海交替沉积,代表海侵体系域与高水位体系域,然而,区分这两个体系域之间的最大海泛面在研究区的浅地层剖面与钻孔地层中均未识别出,原因有二:其一,受限于浅地层剖面分辨率与缺乏精确定年数据;其二, MIS5 期海平面波动过程中的再造与混合作用导致难以识别。U4-2 地层单元对应 MIS4 期早期海平面下降过程中的滨海相沉积,代表海退体系域,这一体系域在黄河口与滦河口厚度较大,普遍超过 10 m(图 5),显示了这一时期黄河与滦河对研究区物源供应的响应,也表明黄河在 MIS4 期早期已经开始对渤海西部产生明显的影响(蓝先洪等,2018)。

SQ2 介于层序界面 R5 与 R3 之间,由 U4-1 与 U3 两个地层单元组成(图 9)。U4-1 地层单元上覆于层序界面 R5 之上,对应 MIS4 期海平面较低时期的与河流湖泊相关的陆相沉积,在 TJC-1 孔位置表现为河道充填沉积,代表低水位体系域。这一体系域在研究区主要沉积中心分布在黄河口与滦河口附

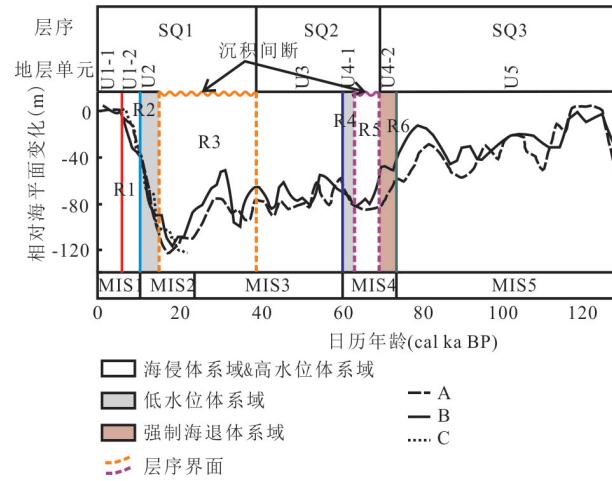


图 9 研究区晚第四纪层序地层与海平面变化的对比

Fig.9 Stratigraphic sequence in the Liaodong Bay and its correlation with sea-level changes during the late Quaternary

A 据 Lea *et al.*(2002); B 据 Chappell *et al.*(1996); C 据 Liu *et al.*(2004)

近,表明了这一时期研究区广泛发育与黄河、滦河水系相关的河流,相关地球化学的成果也印证了这一推论(蓝先洪等,2018)。U3 地层单元上覆于海进侵蚀面 R4 之上,对应 MIS3 期早中期滨海相沉积,

代表海侵体系域,这一海侵体系域在渤海西部主要分布在滦河口海域,大部分厚度介于12~20 m,而黄河口附近海域厚度较小(图5),显示了MIS3期早中期滦河对研究区的主控作用,受黄河的影响相对较小,这与前人钻孔中的结论相一致(Liu *et al.*, 2009). SQ2无高水位体系域,主要原因在于后期末次冰盛期低海面时期,渤海陆架裸露,河流下切侵蚀作用导致缺失.

SQ1上覆于层序界面R3之上,是研究区晚第四纪以来最上部的层序,自下而上包括U2、U1-2、U1-1这3个地层单元.U2地层单元与U4-1单元相类似,对应末次冰盛期低海面时期与河流湖泊相关的陆相沉积,TJC-1孔位置表现为河道充填相沉积,代表低水位体系域,这一低水位体系域在海河口及滦河口外厚度较大(图5),而黄河口附近海域并不发育,表明末次冰盛期至全新世期间黄河并未对研究区产生明显的影响,前人研究也表明这一时期黄河并未贯穿渤海(Liu *et al.*, 2009). U1-2地层单元位于海进侵蚀面R2之上,对应全新世早中期滨海相沉积,代表海侵体系域,这一海侵体系域在研究区厚度变化不大,主要受平缓地形的影响,大部分厚度介于5~9 m,在黄河口与海河口外厚度较大.U1-1地层单元上覆于最大海泛面R1之上,对应全新世高海面以来的浅海相沉积,代表高水位体系域,这一体系域在黄河口、滦河口及研究区东北部厚度较大,主要黄河、滦河沉积物在现代环流体系的影响下,形成的现代水下三角洲及渤海中部泥质沉积(刘建国等,2007; Liu *et al.*, 2009).

3.2 渤海西部晚第四纪(MIS5期)以来的地层演化

已有研究表明,海平面变化、沉积物供应、渤海海峡地形是黄渤海陆架区地层发育与沉积环境演化的主要控制因素(Liu *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2018).此外,浅地层剖面显示,晚更新世甚至全新世期间,研究区活动断裂发育(图2~4)(李西双等,2010;王洪聚等,2011),虽然对地层格架未起到决定性作用,但对地层的赋存状态产生了明显的影响.因此,本文在论述渤海西部晚第四纪以来的沉积演化过程中也考虑了这一因素的影响.

MIS5期(128~70 ka BP),全球气候变暖,海平面达到现今海平面高度(在MIS5e时甚至超过现今海平面)(Chappell *et al.*, 1996; Lea *et al.*, 2002),海水掠过渤海海峡侵入渤海,并逐渐向渤海湾西岸推进,发生海侵,形成了广泛的浅海沉积,或随着海平

面的波动发育浅海—滨海相交替沉积,对应TJC-1孔51.50~30.30 m段,这一时期的沉积在渤海西部及周边平原地区钻孔中广泛发育,如在BH08孔41.50~31.00 m段(李小艳等,2015)与YRD-1101孔55.62~48.31 m段(Liu *et al.*, 2016)地层沉积中均有显示(图8).

MIS5期晚期至MIS4期早期,海平面逐渐下降,这一时期渤海西部大部分地区仍被海水覆盖,发育滨海相沉积,TJC-1孔对应层位埋深30.30~27.10 m(图8).至MIS4期中期,海平面下降至现今海平面以下80 m(Chappell *et al.*, 1996; Lea *et al.*, 2002),由于渤海海峡的阻隔作用,研究区海域大部分裸露成陆,广泛发育与黄河、滦河相关的古河流体系,下切侵蚀前期形成的MIS4期早期滨海相沉积,对应层序界面R5,导致MIS4期这一地质时期存在明显的沉积间断.MIS4期晚期随着海平面的逐渐上升,形成河湖相沉积,对应TJC-1孔27.10~24.82 m段地层(图8).

至MIS3早期,海平面持续上升,在南黄海西部可达现今海平面以下30 m(Liu *et al.*, 2010),这一时期,庙岛群岛周边的沟谷最大深度超过50 m(Liu *et al.*, 2016),海水淹没渤海海峡,大规模侵入渤海乃至西部平原,研究区由陆相环境转变为海相沉积环境,对应TJC-1孔24.82~17.66 m段(高程介于50.82~43.66 m),研究区浅地层剖面中这一时期的活动断层广泛发育,对地层发育也会产生明显的影响(图2~4),前人研究也显示渤海MIS3期最大沉降速率可达0.5 m/a(Liu *et al.*, 2016),由此推断研究区地层沉降可达17 m左右,因此,研究区这一时期地层的发育除受海平面变化控制外,也明显受到活动构造的作用.这一时期的沉积在BH08孔28.20~17.80 m段(李小艳等,2015)、YRD-1101孔38.29~31.43 m段(Liu *et al.*, 2016)、渤海西部平原BQ1孔42.18~31.44 m段(阎玉忠等,2006)地层中均有显示(图8),而某些地区钻孔中未见这一时期的地层,如渤海西部平原BZ1孔(肖国桥等,2008),主要受地形因素的作用.至MIS3期中晚期,海平面持续波动,总体呈下降趋势,在研究区某些地区形成三角洲沉积体(图6),相似的三角洲沉积序列在南黄海西部(Liu *et al.*, 2010)及东海陆架地区(Berné *et al.*, 2002)也有显示.

MIS3期晚期至末次冰盛期,海平面快速下降至现今海平面120 m以下(Chappell *et al.*, 1996;

Lea *et al.*, 2002), 黄渤海陆架裸露成陆, 研究区广泛发育与海河、滦河相关的河流体系, 将先期形成的 MIS3 期晚期的地层侵蚀殆尽, 而黄河在这一地质时期在南黄海陆架盛行 (Liu *et al.*, 2010). 之后随着海平面的逐渐上升, 与 MIS4 期晚期相似, 在研究区发育河河湖相沉积, 对应 TJC-1 孔 17.66~2.03 m 段 (图 8). 这一地质时期河流相与河流充填相沉积在中国东部陆架海区 (Saito *et al.*, 1998; Berné *et al.*, 2002; Yoo *et al.*, 2016; Chen *et al.*, 2018) 及全球其他陆架区 (如 Nordfjord *et al.*, 2006; Green, 2009) 广泛分布.

新仙女木事件期间, 海平面上升至现今海平面以下 58 m 并徘徊了近千年 (Fairbanks, 1989; Chappell *et al.*, 1996), 由于渤海海峡的阻隔作用, 海水并未侵入渤海, 在北黄海西部发育大量这一时期的标志性泥炭层或硬质黏土层沉积 (李铁刚等, 2010; 陈晓辉等, 2014). 之后的融水脉冲事件 MWP-1B (11.6~11.3 cal ka BP) 使海平面快速上升至现今海平面以下 45 m (Fairbanks, 1989; Liu *et al.*, 2004), 海水在淹没渤海海峡侵入渤海, 这一时间与 TJC-1 孔海相地层单元 D1 最早的形成时间 10.1 ± 1.0 ka BP 大致相当, 与现代黄河三角洲平原钻孔海侵开始的时间也大致吻合 (Saito *et al.*, 2000). 至全新世中期, 海平面呈阶梯式上升至现今海平面 (Chappell *et al.*, 1996; Liu *et al.*, 2004), 随着潮流作用减弱, 渤海现代环流体系初步形成. 之后海平面持续至今, 黄河、滦河入海物质在沿岸流为主的环流体系影响下 (韩宗珠等, 2011; 蓝先洪等, 2018), 形成黄河水下三角洲、渤海湾北部细粒沉积区、渤海中部泥质沉积区. 全新世期间的海相沉积对应 TJC-1 孔 2.03~0 m 段, 在渤海及周边平原钻孔沉积地层中均有显示 (图 8).

4 结论

渤海西部晚第四纪 (MIS5 期) 以来的声学地层自下而上被 7 个地层界面 (R6、R5、R4、R3、R2、R1、R0) 划分为 7 个声学地层单元 (U5、U4-2、U4-1、U3、U2、U1-2、U1-1), 这些声学地层单元与 TJC-1 孔的沉积地层单元具有良好的对应关系. 这些地层的发育受控于海平面变化、沉积物供应、渤海海峡地形的共同作用, 同时受到活动断裂的影响.

渤海西部晚第四纪 (MIS5 期) 以来的地层单元为 R5 与 R3 两个层序界面自下而上划分为 3 个层序

(SQ3、SQ2、SQ1), 这两个层序界面分别与 MIS4 期、MIS2 期低海面时期的沉积间断密切相关.

SQ3 包括下部的海侵体系域与高水位体系域、上部的海退体系域, 涉及 U5 与 U4-2 两个地层单元, 分别对应 MIS5 期海平面相对较高时期的滨—浅海相交替沉积、MIS4 期早期滨海相沉积; SQ2 自下而上由低水位体系域、海侵体系域组成, 分别对应 MIS4 期中晚期的与黄河、滦河相关的河湖相沉积 (U4-1)、MIS3 期早中期滨海相沉积 (U3), 该层序中的高水位体系域为后期末次冰盛期低海面时期河流下切侵蚀殆尽; SQ1 自下而上包括低水位体系域、海侵体系域、高水位体系域, 分别对应末次冰盛期与滦河相关的河湖相沉积 (U2)、全新世早中期滨海相沉积 (U1-2)、全新世高海面以来的浅海相沉积 (U1-1).

研究区 MIS4 期中期与末次冰盛期低海面时期形成的低水位体系域的厚度与横向分布变化较大; MIS4 期早期的海退体系域与 MIS3 期海侵体系域由于受到后期低海面河流下切侵蚀作用, 厚度变化同样较大, 而全新世早中期的海侵体系域厚度较薄且变化较小, 分布广泛; 全新世高海面以来的高水位体系域厚度变化相对较小, 主要分布在河口近岸海域.

References

- Berné, S., Vanger, P., Guichard, F., et al., 2002. Pleistocene Forced Regressions and Tidal Sand Ridges in the East China Sea. *Marine Geology*, 188: 293—315. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(02\)00446-2](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(02)00446-2)
- Chappell, J., Omura, A., Esat, T., et al., 1996. Reconciliation of Late Quaternary Sea Levels Derived from Coral Terraces at Huon Peninsula with Deep Sea Oxygen Isotope Records. *Earth and Planetary Science Letters*, 141 (1/2/3/4): 227—236. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(96\)00062-3](https://doi.org/10.1016/0012-821X(96)00062-3)
- Chen, X. H., Li, R. H., Lan, X. H., et al., 2014. Formation and Paleo-Environmental Implications of Hard Clay in the Central North Yellow Sea during the Late Period of Pleistocene. *Quaternary Sciences*, 34(3): 570—578 (in Chinese with English abstract).
- Chen, X. H., Li, R. H., Lan, X. H., et al., 2018. Stratigraphy of Late Quaternary Deposits in the Mid-Western North Yellow Sea. *Journal of Oceanology and Limnology*, 36(6): 2130—2153.
- Fairbanks, R. G., 1989. A 17 000-Year Glacio-Eustatic Sea

- Level Record: Influence of Glacial Melting Rates on the Younger Dryas Event and Deep Ocean Circulation. *Nature*, 342: 637—642. <https://doi.org/10.1038/342637a0>
- Folk, R. L., Ward, W. C., 1957. Brazos River Bar: A Study in the Significance of Grain Size Parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 31: 514—519.
- Green, A. N., 2009. Palaeo-Drainage, Incised Valley Fills and Transgressive Systems Tract Sedimentation of the Northern KwaZulu-Natal Continental Shelf, South Africa, SW Indian Ocean. *Marine Geology*, 263: 46—63. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2009.03.017>
- Han, Z. Z., Zhang, J. Q., Zou, H., et al., 2011. Characteristics and Provenance of Clay Mineral Assemblage of Sediments from the Northern Part of the Bohai Bay. *Periodical of Ocean University of China(Natural Sciences)*, 41(11): 95—102(in Chinese with English abstract).
- Lan, X. H., Li, R. H., Mi, B. B., et al., 2016. Distribution Characteristics of Rare Earth Elements in Surface Sediment and Their Provenance Discrimination in the Eastern Bohai and Northern Yellow Seas. *Earth Science*, 41(3): 464—474(in Chinese with English abstract).
- Lan, X. H., Li, R. H., Chen, X. H., et al., 2018. Study of Sedimentary Geochemistry in the Western Bohai Sea since Late Pleistocene. *Advances in Marine Scicence*, 36(1): 67—78(in Chinese with English abstract).
- Lea, D. W., Martin, P. A., Pak, D. K., et al., 2002. Reconstructing a 350 ky History of Sea Level Using Planktonic Mg/Ca and Oxygen Isotope Records from a Cocos Ridge Core. *Quaternary Sciences Reviews*, 21: 283—293. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(01\)00081-6](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(01)00081-6)
- Li, S. L., 1994. A Preliminary Study of Foraminifera and Ostracoda Assemblages in the Liaodong Bay. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 30(2): 181—193(in Chinese with English abstract).
- Li, T. G., Chang, F. M., Yu, X. K., 2010. Younger Dryas event and Formation of Peat Layers in the Northern Yellow Sea. *Earth Science Frontiers*, 17 (1): 322—329 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. S., Liu, B. H., Zhao, Y. X., et al., 2010. Late Pleistocene-Holocene Submarine Active Structures in the Bohai Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 32(5): 52—59(in Chinese with English abstract).
- Li, X. Y., Zhao, Q. H., Yao, Z. Q., et al., 2015. Transgressive Records of Last Million Years in the Bohai Sea, China: Evidence from Foraminifera and Ostracoda of Core BH08. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 35(6): 93—108 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. G., Li, A. C., Chen, M. H., et al., 2007. Geochemical Characteristics of Sediments in the Bohai Sea Mud Area during Holocene. *Geochimica*, 36(6): 559—568(in Chinese with English abstract).
- Liu, J. P., Milliman, J. D., Gao, S., et al., 2004. Holocene Development of the Yellow River's Subaqueous Delta, North Yellow Sea. *Marine Geology*, 209: 45—67.
- Liu, J., Saito, Y., Kong, X. H., et al., 2010. Delta Development and Channel Incision during Marine Isotope Stages 3 and 2 in the Western South Yellow Sea. *Marine Geology*, 278: 54—76. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2010.09.003>
- Liu, J., Saito, Y., Wang, H., et al., 2009. Stratigraphic Development during the Late Pleistocene and Holocene Offshore of the Yellow River Delta, Bohai Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 36: 318—331. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2009.06.007>
- Liu, J., Wang, H., Wang, F. F., et al., 2016. Sedimentary Evolution during the Last ~1.9 Ma near the Western Margin of the Modern Bohai Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 451: 84—96.
- Marsset, T., Xia, D., Berné, S., et al., 1996. Stratigraphy and Sedimentary Environments during the Late Quaternary, in the Eastern Bohai Sea (North China Platform). *Marine Geology*, 135: 97—114. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(96\)00038-2](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(96)00038-2)
- Nordfjord, S., Goff, J. A., Austin Jr, J. A., et al., 2006. Seismic Facies of Incised Valley Fills, New Jersey Continental Shelf: Implications for Erosion and Preservation Processes Acting during Latest Pleistocene - Holocene Transgression. *Journal of Sedimentary Researches*, 76: 1284—1303. <https://doi.org/10.2110/jsr.2006.108>
- Qin, Y. S., Zhao, Y. Y., Zhao, S. L., et al., 1985. Geology of the Bohai Sea. Science Press, Beijing, 161—211(in Chinese).
- Saito, Y., Katayama, K., Ikehara, K., et al., 1998. Transgressive and Highstand Systems Tract and Post-Glacial Transgression, the East China Sea. *Sedimentary Geology*, 122: 217—232. [https://doi.org/10.1016/s0037-0738\(98\)00107-9](https://doi.org/10.1016/s0037-0738(98)00107-9)
- Satio, Y., Wei, H., Zhou, Y., et al., 2000. Delta Progradation and Chenier Formation in Huanghe(Yellow River) Delta, China. *Journal of Asian Science*, 18: 489—497. [https://doi.org/10.1016/s1367-9120\(99\)00080-2](https://doi.org/10.1016/s1367-9120(99)00080-2)
- Wang, H. J., Liu, B. H., Li, X. S., 2011. Activity of the Faults in the Southern Part of Bohai Sea since the Late Pleistocene. *Advances in Earth Science*, 26(5): 556—564(in Chinese with English abstract).
- Wang, P. X., Min, Q. B., Bian Y. H., 1980. A Preliminary

- Study of Foraminiferal and Ostracoda Assemblages of the Yellow Sea, *Papers on Marine Micropaleontology*. China Ocean Press, Beijing, 84—100 (in Chinese).
- Wang, P. X., Min, Q. B., Bian Y. H., 1981. Strata of Quaternary Transgression in East China: A Preliminary Study. *Acta Geologica Sinica*, 55(1): 1—13 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P. X., Zhang, J. J., Zhao, Q. H., et al., 1988. Foraminifera and Ostracoda in Surface Sediments of the East China Sea. China Ocean Press, Beijing, 1—307 (in Chinese).
- Wang, Q., Tian, G. Q., 1999. The Neotectonic Setting of Late Quaternary Transgressions on the Eastern Coastal Plain of China. *Journal of Geomechanics*, 5(4): 41—48 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, G. Q., Guo, Z. T., Chen, Y. K., et al., 2008. Magnetostratigraphy of BZ1 Borehole in West Coast of Bohai Bay, Northern China. *Quaternary Sciences*, 28(5): 909—916 (in Chinese with English abstract).
- Yan, Y. Z., Wang, H., Li, F. L., et al., 2006. Sedimentary Environment and Sea-Level Fluctuations Revealed by Borehole BQ1 on the West Coast of the Bohai Bay, China. *Geological Bulletin of China*, 25(3): 357—382.
- Yang, Z. G., Lin, H. M., Wang, S. J., et al., 1998. A Study of the Ancient Cold Water Mass Sediments in South Yellow Sea during Last Interglacial. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1: 47—58 (in Chinese with English abstract).
- Yao, Z. Q., Guo, Z. T., Chen, Y. K., et al., 2006. Magnetostratigraphy of Marine Terrigenous Facies Deposits in Bohai Bay. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1: 9—15.
- Yi, L., Yu, H. J., Ortiz, J. D., et al., 2012. Late Quaternary Linkage of Sedimentary Records to Three Astronomical Rhythms and the Asian Monsoon, Inferred from a Coastal Borehole in the South Bohai Sea, China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 329: 101—117.
- Yoo, D. G., Chang, T. S., Lee, G. S., et al., 2016. Late Quaternary Seismic Stratigraphy in Response to Postglacial Sea-Level Rise at the Mid-Eastern Yellow Sea. *Quaternary International*, 392: 125—136. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.07.045>
- Zhao, Q. H., Wang, P. X., 1988. Modern Ostracoda in Sediments of Shelf Seas Off China: Quantitative and Qualitative Distributions. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 19(6): 553—561 (in Chinese with English abstract).
- 硬质粘土层的形成及其古环境意义. *第四纪研究*, 34(3): 570—578.
- 韩宗珠, 张军强, 邹昊, 等, 2011. 渤海湾北部底质沉积物中黏土矿物组成与物源研究. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 41(11): 95—102.
- 蓝先洪, 李日辉, 密蓓蓓, 等, 2016. 渤海东部和黄海北部表层沉积物稀土元素的分布特征与物源判别. *地球科学*, 41(3): 464—474.
- 蓝先洪, 李日辉, 陈晓辉, 等, 2018. 渤海西部晚更新世以来沉积地球化学研究. *海洋科学进展*, 36(1): 67—78.
- 李淑莺, 1994. 辽东湾表层沉积中有孔虫介形虫研究. *北京大学学报·自然科学版*, 30(2): 181—193.
- 李铁刚, 常凤鸣, 于心科, 2010. Younger Dryas 事件与北黄海泥炭层的形成. *地学前缘*, 17(1): 322—329.
- 李西双, 刘保华, 赵月霞, 等, 2010. 渤海海域晚更新世—全新世的活动构造. *海洋学报*, 32(5): 52—59.
- 李小艳, 赵泉鸿, 姚政权, 等, 2015. 渤海百万年以来的海侵记录: BH08 孔有孔虫与介形类证据. *海洋地质与第四纪地质*, 35(6): 93—108.
- 刘建国, 李安春, 陈木宏, 等, 2007. 全新世渤海泥质沉积物地球化学特征. *地球化学*, 36(6): 559—568.
- 秦蕴珊, 赵一阳, 赵松龄, 等, 1985. 渤海地质. 北京: 科学出版社, 161—211.
- 汪品先, 闵秋宝, 卞云华, 等, 1981. 我国东部第四纪海侵地层的初步研究. *地质学报*, 55(1): 1—13.
- 汪品先, 闵秋宝, 卞云华, 1980. 黄海有孔虫、介形虫组合的初步研究. *海洋微体古生物论文集*. 北京: 海洋出版社, 84—100.
- 汪品先, 章纪军, 赵泉鸿, 等, 1988. 东海底质中的有孔虫和介形虫. 北京: 海洋出版社, 1—307.
- 王洪聚, 刘保华, 李西双, 2011. 晚更新世以来渤海南部海域断裂活动性. *地球科学进展*, 26(5): 556—564.
- 王强, 田国强, 1999. 中国东部晚第四纪海侵的新构造背景. *地质力学学报*, 5(4): 41—48.
- 肖国桥, 郭正堂, 陈宇坤, 等, 2008. 渤海湾西岸 BZ1 钻孔的磁性地层学研究. *第四纪研究*, 28(5): 909—916.
- 阎玉忠, 王宏, 李凤林, 等, 2006. 渤海湾西岸 BQ1 孔揭示的沉积环境与海面波动. *地质通报*, 25(3): 357—382.
- 杨子赓, 林和茂, 王圣洁, 等, 1998. 对末次间冰期南黄海古冷水团沉积的探讨. *海洋地质与第四纪地质*, 1: 47—58.
- 姚政权, 郭正堂, 陈宇坤, 等, 2006. 渤海湾海陆交互沉积的磁性地层学. *海洋地质与第四纪地质*, 1: 9—15.
- 赵泉鸿, 汪品先, 1988. 中国浅海现代介形虫的数量与属种分布. *海洋与湖沼*, 19(6): 553—561.

附中文参考文献

陈晓辉, 李日辉, 蓝先洪, 等, 2014. 晚更新世末北黄海中部