doi: 10.12029/gc20210328001

陈永胜, 胡亦潘, 姜兴钰, 李建芬, 商志文, 方晶, 王福. 2024. 渤海湾沿海低地第 II 海相层 MIS5a 阶段海侵与全球海平面变化的时间对比研究[J]. 中国地质, 51(6): 2056−2065.

Chen Yongsheng, Hu Yipan, Jiang Xingyu, Li Jianfen, Shang Zhiwen, Fang Jing, Wang Fu. 2024. Time correlation between MIS5a transgression and global sea level change of the second Marine layer in the coastal lowland of Bohai Bay[J]. Geology in China, 51(6): 2056−2065(in Chinese with English abstract).

渤海湾沿海低地第 II 海相层 MIS5a 阶段海侵与全球海平面变化的时间对比研究

陈永胜[1,2,3]，胡亦潘[4]，姜兴钰[1,2,3]，李建芬[1,2,3]，商志文[1,2,3]，方晶[5]，王福[1,2,3]

（1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 中国地质调查局海岸带地质环境重点实验室, 天津 300170; 3. 天津市海岸带地质过程与环境安全重点实验室, 天津 300170; 4. 中国地质大学（武汉）海洋地质资源湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430000; 5. 天津师范大学城市与环境科学学院, 天津 300378）

提要:【研究目的】渤海湾地区第 II 海相层的形成时代仍存争议, 制约着该地区海平面变化研究进展。本研究对该层进行光释光定年, 以期标定准确的地层年代及对应的海侵期次。【研究方法】以渤海湾西岸 CZ80、CZ85、CZ66 钻孔为研究对象, 在岩心沉积结构、构造及有孔虫丰度, 沉积微相研究基础上, 识别出了第 II 海相层, 并建立了第 II 海相层对比剖面。通过光释光测年方法对该地层的形成时代进行了准确测定, 进一步讨论第 II 海相层的发育时间与全球海平面变化关系。【研究结果】CZ80、CZ85 及 CZ66 孔在全新统(含第 I 海相层)以下均钻遇到了第 II 海相层, 海相层底板埋深在 35~33 m, 对应黄海高程−31.13~−28.39 m, 顶板埋深 32~20 m, 高程−25.58~−15.39 m。光释光测年结果表明第 II 海相层所对应的海侵事件发育时间约为 94~71 ka。【结论】光释光测年结果表明, 该区第 II 海相层始于 94 ka 或更早, 海水影响在距今约 71 ka 结束。对比全球海面曲线, 第 II 海相层时空特征与 MIS5a 阶段相符, 记录了 MIS5a 阶段海侵事件。

关　键　词: MIS5a 海侵; 全球海面变化; 光释光测年; 第 II 海相层; 渤海湾; 海岸带地质调查工程

创　新　点: (1)光释光测年样品的采集兼顾了第 II 海相层及其上下层位, 测量过程中粗颗粒采用小片法制片, 细颗粒采用小试管沉降烘干制片, 样品用量少; (2)文中引用 6 条全球海面变化曲线, 将本区第 II 海相层与全球海面变化带进行时空对比讨论, 识别出 MIS5a 阶段海侵事件。

中图分类号: P736.22　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000−3657(2024)06−2056−10

Time correlation between MIS5a transgression and global sea level change of the second Marine layer in the coastal lowland of Bohai Bay

CHEN Yongsheng[1,2,3], HU Yipan[4], JIANG Xingyu[1,2,3], LI Jianfen[1,2,3], SHANG Zhiwen[1,2,3], FANG Jing[5], WANG Fu[1,2,3]

(1. *Tianjin Centre, China Geological Survey, Tianjin* 300170, *China*; 2. *Key Laboratory of Coast Geo−environment, China Geological Survey, CGS, Tianjin,* 300170, *China*; 3. *Tianjin Key Laboratory of Coast Geological Processes and Environmental*

收稿日期: 2021−03−28; **改回日期:** 2021−06−27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372173、41806109)及中国地质调查局项目(DD20189506、DD20211301)联合资助。

作者简介: 陈永胜, 女, 1975 年生, 博士, 高级工程师, 从事第四纪海岸带地质环境变化研究; E−mail: cyongsheng@mail.cgs.gov.cn。

通讯作者: 王福, 男, 1979 年生, 博士, 研究员, 从事第四纪海岸带地质环境变化研究; E−mail: wfu@mail.cgs.gov.cn。

Safety, Tianjin 300170*, China*; 4. *Key Laboratory of Marine Resources of Hubei Province, China University of Geosciences, Wuhan* 430000*, Hubei, China*; 5. *College of Urban and Environmental Science, Tianjin Normal University, Tianjin* 300387*, China*)

Abstract: This paper is the result of coastal geological survey engineering.

[Objective] The second marine layer in the coastal lowland of Bohai Bay remains controversial, which restricts the progress of sea level change research in this area. This study performs optically stimulated luminescence dating on this layer, expecting to calibrate the precise stratigraphic age and the corresponding marine transgression episodes. **[Methods]** By taking the CZ80, CZ85, and CZ66 boreholes on the west coast of the Bohai Bay as the research targets, based on the examination of sedimentary structures, textures and foraminifera abundance in the cores and sedimentary microfacies, the second marine layer was identified, and a comparative profile of the second marine layer was constructed. The formation age of this layer was precisely determined through the optically stimulated luminescence dating method, and the relationship between the development duration of the second marine layer and global sea level changes was further explored. **[Results]** The CZ80, CZ85, and CZ66 boreholes all intersected the second marine layer beneath the Holocene stratum (including the first marine layer). The base of the marine layer was embedded at a depth ranging between 35 and 33 meters, corresponding to the elevation ranging from −31.13 to −28.39 meters in the Yellow Sea. The top of the marine layer was buried within a depth range of 32 to 20 meters, with an elevation varying from −25.58 to −15.39 meters. The optically stimulated luminescence dating outcomes reveal that the occurrence time of the marine transgression event corresponding to the second marine layer was approximately 94 to 71 ka. **[Conclusions]** The optically stimulated luminescence (OSL) dating outcomes reveal that the second marine layer in this region commenced at 94 ka or earlier, and the influence of seawater terminated approximately 71 ka ago. Through comparison with the global sea−level curve, the spatio−temporal attributes of the second marine layer are consistent with the MIS5a stage, chronicling the marine transgression event during the MIS5a stage.

Key words: MIS5a transgression; global sea level change; Optically Stimulated Luminescence (OSL) dating; the second marine layer; Bohai Bay; coastal geological survey engineering

Highlights: (1) The collection of OSL dating samples encompassed both the second marine layer and the adjacent strata above and below. In the course of the measurement, the small−piece approach was employed for sample preparation of coarse grains, while the small test tube sedimentation and drying technique was utilized for fine grains, with a limited quantity of samples. (2) Six global sea level change curves were cited in the paper. The second marine layer in this region was compared and deliberated with the global sea level change belts in terms of spatial and temporal aspects, and the transgression event during the MIS5a stage was identified.

About the first author: CHEN Yongsheng, female, born in 1975, Ph.D., senior engineer, engaged in Quaternary coastal geological environment changes research; E−mail: cyongsheng@mail.cgs.gov.cn.

About the corresponding author: WANG Fu, male, born in 1979, Ph.D., researcher, engaged in geological environment changes of the Quaternary coastal zone research; E−mail: wfu@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the National Natural Foundation of China (No.41372173, No.41806109) and the projects of China Geological Survey (No.DD20189506, No. DD20211301).

1　引　言

渤海湾沿岸晚第四纪以来海陆相地层交互发育，记录了多期海水进退事件。按海侵时代由新到老的顺序，将海相地层分别命名第 I 海相层、第 II 海相层等(赵松龄等, 1978; 汪品先等, 1981; 王强和李凤林, 1983; 秦蕴珊等, 1985; 王强等, 1986)，其中第 I 海相层放射性^{14}C 测年数据较丰富，确定沉积于距今 9 ka 以来的全新世海侵时期(王强, 1999; 赵长荣等, 2003; 李建芬等, 2004, 2020; 李凤林等, 2004; 阎玉忠等, 2006a; Xu et al., 2015; 王福等, 2020, 2024; 王宏, 2022)。但是，第 II 海相层的形成时代争议突显。自 20 世纪 80 年代，研究者据^{14}C 年龄，对比气候期或磁性漂移事件推测第 II 海相层形成于 MIS 3 阶段或更晚(王淑芳和王云生, 1988; 庄振业等, 1999; 阎玉忠等, 2006b; 王强, 2008; 胥勤勉等, 2011)。最新的 AMS ^{14}C 测年结果显示第 II 海相层形成时代早于 43.5 ka(王福等, 2014; 商志文等, 2016)。近年来，随着光释光测年技术在渤海湾沿岸的应用，个别钻孔研究表明第 II 海相层形

成于 63~52 ka 或 80~65 ka，甚至更早的 126~104 ka(陈宇坤等, 2008; 陈永胜等, 2012, 2016; Liu et al., 2016; 岳保静等, 2020)。基于上述争议，本文以取自渤海湾西岸沿海低地的 3 个钻孔为研究对象，以沉积岩石学为基础，结合有孔虫丰度，对第 II 海相层进行了识别，并针对该层进行光释光测年，为区域晚更新世以来海面变化研究提供年代支撑。

2 方法和结果

钻孔 CZ80、CZ85 和 CZ66 位于沧州以北，垂直渤海湾西岸自西向东分布，距离现代岸线约 60~30 km(图 1)，详细信息参见表 1。

海相层的识别以沉积岩石学特征为基础，并通过有孔虫丰度控制海陆相转换界面。取有孔虫样品 355 个，取样间隔 0.2~0.4 m，称取干重样品 20 g，加 30% 的 H_2O_2 充分分散，过 240 目铜筛，筛上部分在显微镜下挑选有孔虫，并统计数量。

由于末次盛冰期全球海平面大幅下降导致陆架出露，渤海湾西岸全新统与下伏上更新统陆相地层之间普遍出现沉积间断(王强, 1999; 赵华等, 2002; 李凤林等, 2004; 王福等, 2023)。冰后期随着气候变暖和海面的快速上升，滨海平原地区植被发育，被继而到来的全新世海侵覆盖形成泥炭。本研究对渤海湾沿岸第 I 海相层下部的泥炭层进行 AMS^{14}C 测年，对下伏与之有陆相层间隔的第 II 海相层进行光释光测年，以确定的测年数据厘清第 II 海相层与第 I 海相层的年代。AMS^{14}C 测年样品由美国 Beta 实验室完成测试，测试结果根据 δ^{13}C

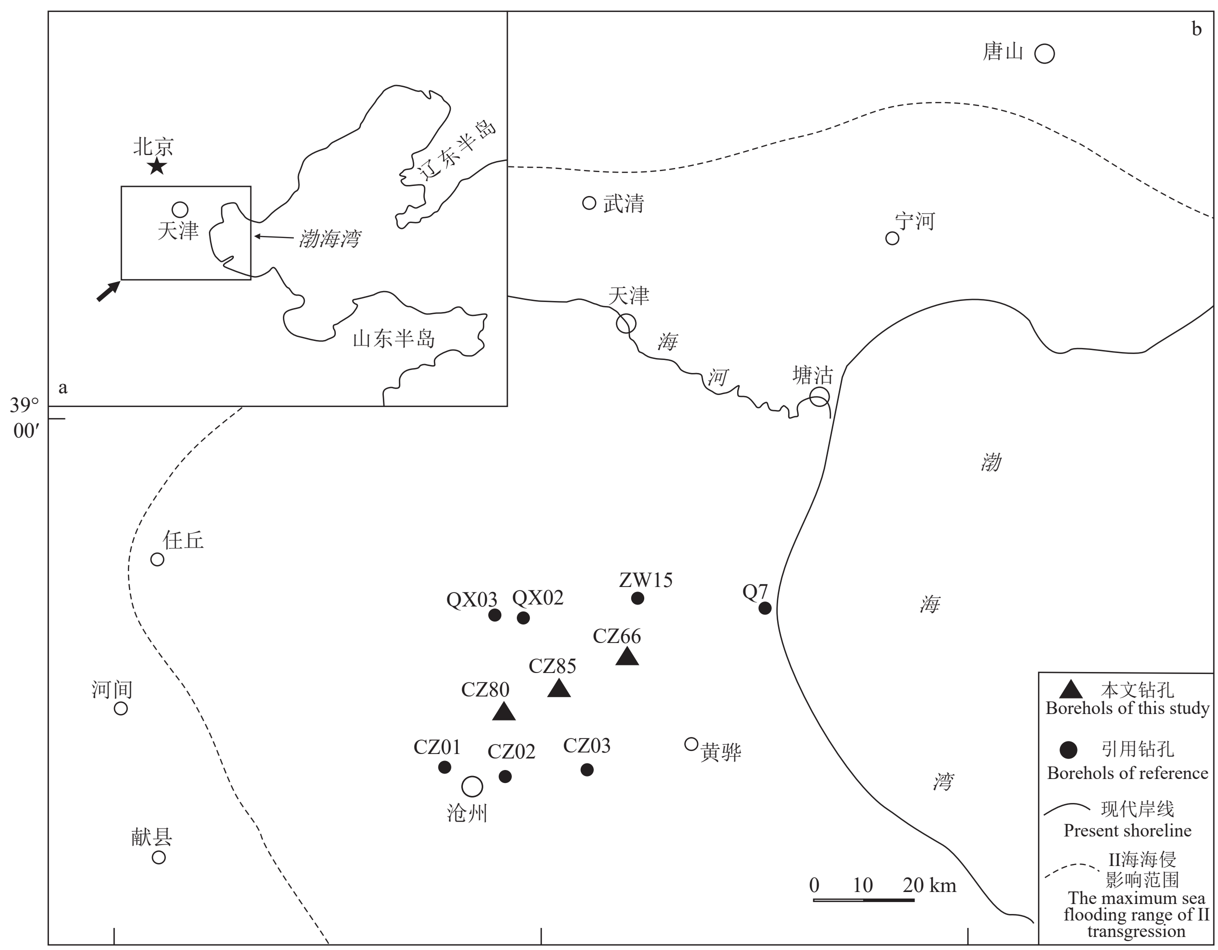

图 1 研究区及钻孔位置
(II 海影响范围据王强和李凤林, 1983 修改)
Fig.1 Map of the research area and drilling positions
(The distribution scope of the second marine layer modified from Wang Qiang and Li Fenglin, 1983)

表 1 钻孔信息表

Table 1 List of boreholes CZ80, CZ85 and CZ66

钻孔编号	孔深/m	坐标		孔口黄海高程/m
CZ80	40	38°26′12″N	116°53′39″E	+6.42
CZ85	40	38°28′09″N	117°01′10″E	+4.61
CZ66	40	38°31′29″N	117°07′59″E	+3.87

值进行分馏效应校正得到惯用年龄，并采用 Intcal13 对陆相泥炭进行日历年校正，^{14}C 半衰期以 5568 a 计(Reimer et al., 2013)(表 2)。

在第 II 海相层及其上下层位获取光释光测年样品 12 个，由中国地质大学(武汉)海洋地质资源湖北省重点实验室测试。在实验室取岩心中央未受曝光影响的沉积物样品，先后加 H_2O_2 和 HCl 分别去除样品中的有机质和碳酸盐类。其中样品 CZ66-3、CZ80-6、CZ80-7 干筛提取 90~125 μm 粒级，并用 HF 刻蚀，其他样品用沉降法提取 4~11 μm 粒级，用 30% 的 H_2SiF_6 的去除长石等杂质。释光等效剂量使用 Risø-TL/OSL-DA-20 释光自动测年系统，采用单片再生剂量法测量(Murray and Wintle, 2000, 2003)。其中粗颗粒(90~125 μm)采用小片法(3 mm 铝片)制片，细颗粒采用小试管中沉降烘干制片，测片上的细颗粒为 1 mg 左右，平均厚度为 4 μm。给定测试的预热温度为 240℃，实验剂量的预热温度为 160℃。测片循环比在 0.9~1.1，生长曲线拟合有效，石英信号未饱和，等效剂量结果符合正态分布，等效剂量计算选用平均值模型(图 2)。剂量率计算所需要的 U、Th、K 的含量由中国原子能科学研究所测定。宇宙射线的贡献根据样品所在地点的经纬度、高程、样品埋藏深度和沉积物的密度计算。样品的含水率采用实际测量值，并给定 5% 的相对误差。光释光测年结果见表 3。

3 讨　论

3.1 岩性与沉积环境

根据沉积物岩性、沉积结构、有孔虫丰度及 AMS^{14}C、光释光年龄分析，3 个钻孔在全新世海侵前普遍经历了陆相–海相–陆相环境演变过程，全新世统以下均发育了第 II 海相层(图 3)。

(1)CZ80 孔沉积微相划分

40~36.85 m: 粉砂，夹黏土质粉砂纹层。暗黄棕色(门赛尔土壤比色卡 10YR 4/4)。未见有孔虫，陆相沉积。

36.85~34 m: 黏土质粉砂，夹砂质透镜体。黄棕色(10YR 5/4)。发育灰色垂直状潜育化条带，未见有孔虫，陆相沉积。

34~32 m: 黏土质粉砂。黄棕色(10YR 5/4)。灰色潜育化斑块，细小锈染斑点。生物扰动砂团发育，含毛蚶碎片，有孔虫 11~65 个/20 g，潮间带上部—盐沼沉积。

32~19.2 m: 细砂。亮黄棕色(10YR 6/4)。分选好，松散，未见有孔虫，陆相沉积。

19.2~18 m: 黏土质粉砂。亮黄棕色(10YR 6/4)向上过渡至灰棕色(10YR 5/2)。黏土含量向上增大，粒度变细。含细小钙核，磨圆较差。未见有孔虫。陆相沉积。

18~17 m: 粉砂。黄棕色(10YR 5/4)。较弱的潜育化现象，未见有孔虫，陆相沉积。

17~14.9 m: 黏土质粉砂。黄棕色(10YR 5/4)。较弱的潜育化现象，细小钙核均匀分布，未见有孔虫，陆相沉积。

14.9~13.84 m: 粉砂至细砂。灰色(10YR 5/1)。含丽蚌碎片，未见有孔虫，陆相沉积。

13.84 m 以上，进入全新世，主要为黑灰色(10YR 4/1)黏土质粉砂，海相沉积，底部泥炭年龄为 8175~8029 cal BP。

(2)CZ85 孔沉积微相划分

40~33 m: 黏土质粉砂，夹少量粉砂透镜体。棕色(10YR 5/3)。发育小钙核，较弱潜育化，局部锈染斑点。未见有孔虫，陆相沉积。

33~29.2 m: 黏土质粉砂，底部夹粉砂透镜体。黑灰色(10YR 4/1)。33~31 m 贝壳碎屑分布，有孔虫 0~189 个/20 g，海相潮滩—浅海沉积。

表 2 AMS ^{14}C 测年材料和结果

Table 2 Materials for AMS ^{14}C dating and results

野外编号	实验室编号	深度/m	高程/m	测年材料	$\delta^{13}C$/‰	惯用年龄/BP	校正年龄/(a cal BP)	
							2σ	概率
CZ80-14C-11	403411	13.84	−7.42	泥炭	−24.6	7300 ± 30	8175~8029	1
CZ85-14C-4	399722	12.65	−9.04	泥炭	−28	7270 ± 30	8165~8015	1
CZ66-14C-15	399718	13.63	−9.76	泥炭	−27.6	7670 ± 30	8523~8406	0.955

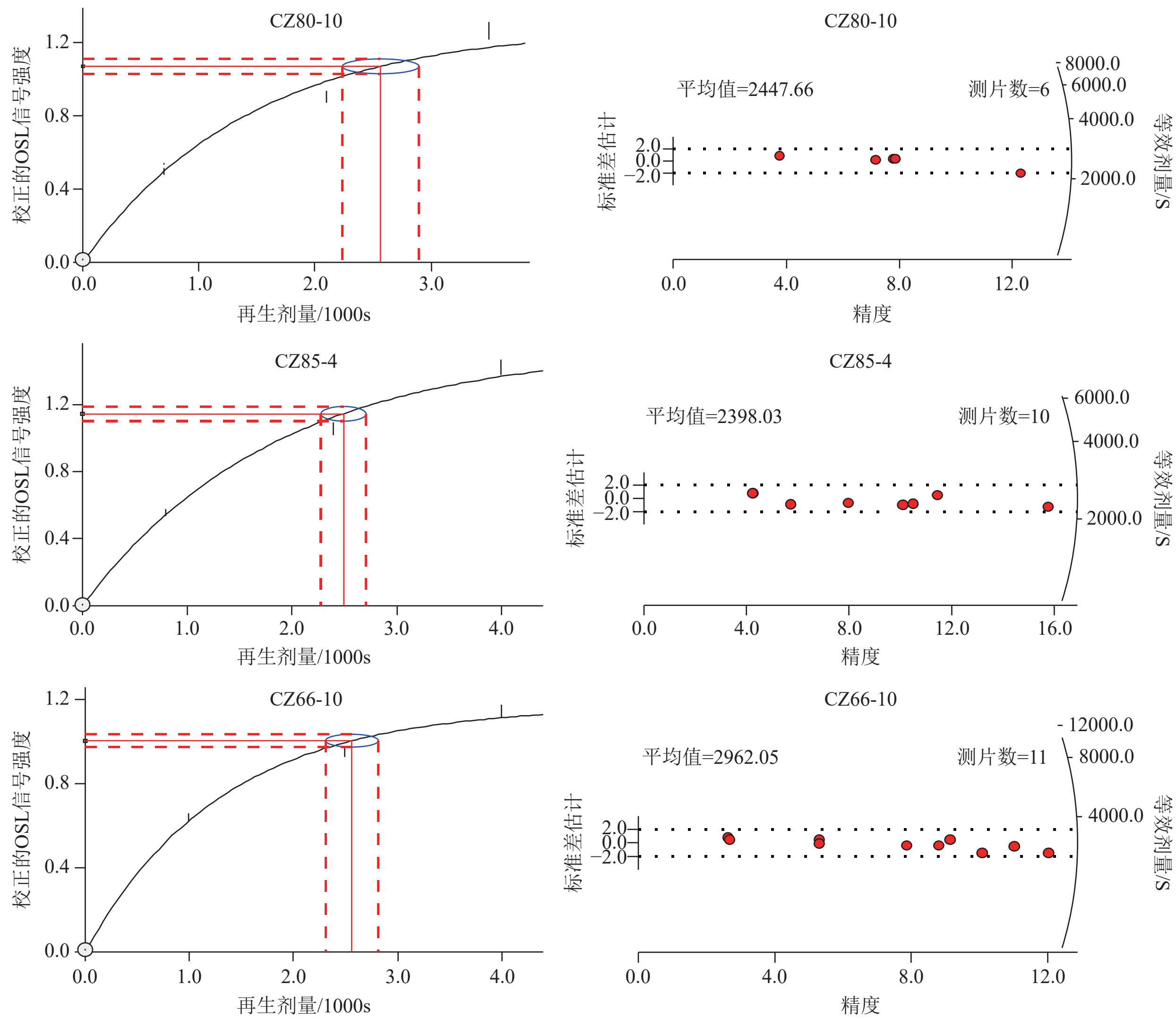

图 2　释光生长曲线和 De 离散分布图
Fig.2 Luminescence growth curve and De dispersion distribution

表 3　钻孔沉积物样品光释光测年结果
Table 3 OSL dating results of boreholes

样品编号	深度/m	测片	$U/10^{-6}$	$Th/10^{-6}$	K/%	含水/%	等效剂量/Gy	剂量率/(Gy/ka)	年龄/ka
CZ80-6	27.4	14/28	1.14±0.06	5.69±0.19	1.93±0.06	13	180.52±39.61	2.31 ±0.05	78.1 ±17.2
CZ80-7	32.58	12/28	1.70±0.08	8.20±0.25	1.97±0.06	16	205.40±23.97	2.56 ±0.05	80.3 ±9.5
CZ80-8	35.5	9/14	2.94±0.11	13.3±0.36	2.18±0.06	22	259.26±48.20	3.64 ±0.17	71.3 ±13.7
CZ80-10	40.35	6/14	1.91±0.08	9.01±0.26	1.84±0.06	18	224.89±26.87	2.85 ±0.12	79.0 ±10.0
CZ85-4	19.51	10/14	2.35±0.09	13.4±0.36	2.20±0.06	22	199.96±41.60	3.52 ±0.16	56.8 ±12.1
CZ85-7	25.45	18/28	2.28±0.09	11.0±0.31	1.93±0.06	17	196.55±42.82	3.22 ±0.15	61.0 ±13.6
CZ85-11	31.4	19/28	2.14±0.09	12.0±0.34	2.18±0.06	25	256.38±17.12	3.21 ±0.14	79.8 ±6.3
CZ85-15	35.4	16/28	2.82±0.11	16.6±0.45	2.25±0.07	26	320.80±49.15	3.76 ±0.18	85.2 ±13.7
CZ66-3	20.73	13/14	1.92±0.08	11.8±0.33	2.04±0.06	18	203.06±22.94	2.85 ±0.05	71.4 ±8.2
CZ66-6	27.4	11/28	2.33±0.09	12.2±0.34	2.03±0.06	25	271.19±41.19	3.17 ±0.14	85.4 ±13.5
CZ66-10	31.55	11/28	2.41±0.10	13.3±0.36	2.42±0.07	33	273.60±35.80	3.33±0.14	82.3 ±11.3
CZ66-15	37.27	11/42	2.02±0.08	9.53±0.28	1.73±0.06	19	347.29±37.59	2.81±0.13	123.6±14.5

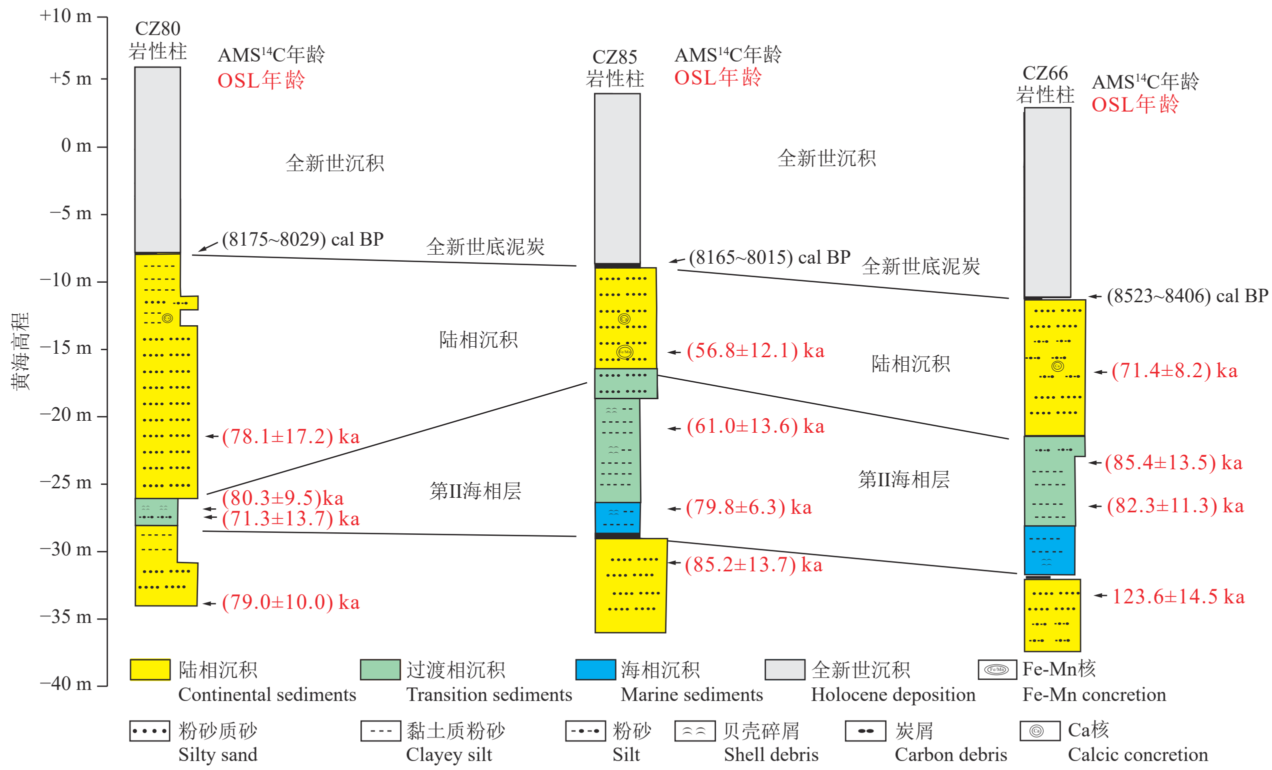

图 3 钻孔沉积微相与年龄对比剖面图
Fig.3 Comparison profile of sedimentary facies and ages of boreholes

29.2~20 m: 黏土质粉砂夹粉砂层, 向上过渡至粉砂。黄棕色(10YR 5/4)。26.4 m 见完整毛蚶单壳, 有孔虫丰富, 丰度高达 1168 个/20 g, 浅海—三角洲沉积。

20~16 m: 黏土质粉砂与粉砂互层。亮黄棕色(10YR 6/4)。含小型钙核, 未见有孔虫, 陆相沉积。

16~12.7 m: 粉砂。灰棕色(10YR 5/2)。分选好, 松散, 未见有孔虫, 陆相沉积。

12.7 m 以上, 进入全新世, 主要为黑灰色(10YR 4/1)黏土质粉砂, 海相沉积, 底部泥炭年龄为 8165~8015 cal BP。

(3)CZ66 孔沉积微相划分

40~36.5 m: 黏土质粉砂, 夹粉砂透镜体。黄棕色(10YR 5/6)。弱潜育化, 发育铁锰质斑点, 少量钙核, 未见有孔虫, 陆相沉积。

36.5~35 m: 黏土质粉砂。灰色(10YR 5/1)。炭质斑点, 未见有孔虫, 陆相沉积。

35~30.6 m: 黏土质粉砂, 夹少量粉砂透镜体。黑灰色(10YR 4/2)。34.4~34 m 粉砂贝屑层, 底部弱侵蚀接触。向上粒度变细, 见虫孔, 有孔虫含量 3~106 个, 海相潮滩—浅海沉积。

30.6~24 m: 黏土质粉砂, 夹粉砂透镜体。黄棕色(10YR 5/4)。斑状至片状锈染, 含贝壳碎片, 有孔虫含量 0~42 个, 浅海—三角洲沉积。

24~19.9 m: 粉砂。亮黄棕色(10YR 6/4)。分选好, 松散, 未见有孔虫, 陆相沉积。

19.9~13.8 m: 粉砂。暗黄棕色(10YR 4/4)。含少量淡水腹足类贝壳, 未见有孔虫, 陆相天然堤沉积。

13.8 m 以上, 主要为黑灰色(10YR 4/1)黏土质粉砂, 海相沉积, 底部泥炭年龄为 8523~8406 cal BP。

3.2 第 II 海相层的发育时间

CZ80 孔保存下来的第 II 海相层厚度仅为 2 m, 该海相层上部为厚层状河道砂体, 侵蚀作用较强, 推测为河道下切作用导致了海相层厚度的损失。根据光释光年龄数据, 可推测第 II 海相层为 80~71 ka。

CZ85 孔第 II 海相层厚度 13 m, 海相层中部的光释光年龄为 (79.8±6.3) ka、(61.0±13.6) ka, 因此该

海相层发育于 80~85 ka。

CZ66 孔第 II 海相层厚度 11 m，海相层中部的光释光年龄为分别为 (82.3ka±11.3) ka、(85.4±13.5) ka，该层年龄虽倒置，取误差范围的交集，该海相层发育于 94~72 ka 前后。

研究区北侧的 QX03~Q7 剖面，第 II 海相层厚度 7~10 m，底、顶对应黄海高程−37.3~−11.1 m；南侧的 CZ01~CZ03 剖面，第 II 海相层厚度 10~13 m，底、顶板对应黄海高程−28.3~−14.7 m，根据 AMS ^{14}C 年龄，上述剖面第 II 海相层年龄均早于 43 ka（王福等，2014；商志文等，2016）。本研究的 CZ80~CZ66 剖面海相层底板埋深 35~33 m，对应黄海高程−31.13~−28.39 m，顶板埋深 32~20 m，对应黄海高程−25.58~−15.39 m。第 II 海相层在区域上可对比，光释光测年结果将该海相层的形成时代前推至 94~71 ka。

3.3 第 II 海相层与全球海平面变化关系

末次间冰期的全球海面分别在 MIS5e、MIS5c 和 MIS5a 阶段形成 3 个峰值，最高海面在−20~+6 m 波动，之后进入末次冰期，海面在波动中下降（Waelbroeck et al., 2002; Rohling et al., 2010; Yokoyama and Esat, 2011; Elderfield et al., 2012; Pico et al., 2016; Dutton and Barlow, 2019）。CZ80、CZ85、CZ66 钻孔第 II 海相层年龄集中分布在 94~71 ka，与全球海面曲线对比，其时空位置总体与 MIS 5a 阶段基本一致（图 4）。

CZ80~CZ66 剖面第 II 海相层底板埋深 35~33 m，向海方向倾斜，根据海相层光释光年龄推测海水到达该地区为距今 94 ka 或更早。底部以潮滩沉积为主，表明位处平均潮水位附近，对应的黄海高程−31.13~−28.39 m，近似记录了相对海面的高位。以渤海湾盆地新生代以来的构造沉降活动校正（漆家福等，1995；赵利和李理，2016），当时的全球海面高度应略高于此。海相层顶板与上层多突变接触，因钻孔孔径较小，未见明显的侵蚀界面，但上层沉积物粒度偏粗，说明动力增强，后期河流侵蚀作用明显，导致第 II 海相层厚度差异较大，根据光释光年龄推测海水影响在距今约 70.8 ka 结束，对

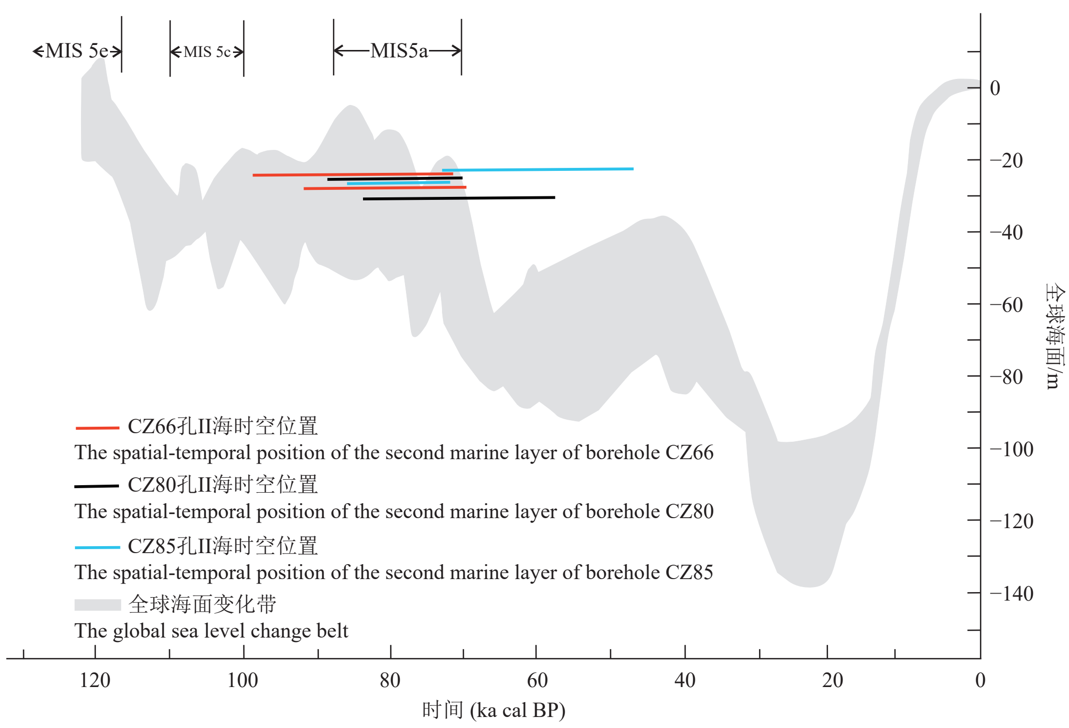

图 4 CZ80、CZ85 和 CZ66 孔第 II 海相层与全球海面时空对比图（全球海面变化曲线据 Waelbroeck et al., 2002; Rohling et al., 2010; Yokoyama and East, 2011; Elderfield et al., 2012; Pico et al., 2016; Dutton and Barlow, 2019）

Fig.4 Spatio−temporal comparison map between the global sea level and the second marine layer of boreholes CZ80, CZ85 and CZ66 (Global sea level change curve after Waelbroeck et al., 2002; Rohling et al., 2010; Yokoyama and East, 2011; Elderfield et al., 2012; Pico et al., 2016; Dutton and Barlow, 2019)

应黄海高程−25.58~−15.39 m。据此认为 CZ80~CZ66 剖面第 II 海相层记录了 MIS5a 阶段的海侵事件。

CZ80~CZ66 剖面第 II 海相层集中分布在 94~71 ka，但 CZ80-8 和 CZ85-7 的光释光年龄明显年轻，以误差范围计算，大约可至 50 ka（61.0±13.6 ka）。位于本研究剖面北部的渤海湾西岸 BQ1 和 BZ1 孔及南部的莱州湾 BH1 和 BH2 孔第 II 海相层上部较年轻，光释光年龄 20~60 ka（阎玉忠等, 2006b; 陈宇坤等, 2008; Yi et al., 2013）。易亮等（2016）根据渤海盆地演化规律及年代学研究，认为第 II 海相层的发育始于 MIS5，但在 MIS3 尚有残余沉积保留的可能。但 MIS3 全球海平面相对较低，渤海湾地区海侵能否发生及其影响程度有待进一步研究。

4 结　论

渤海湾沿海低地的 CZ80、CZ85 及 CZ66 孔均钻遇了第 II 海相层，该海相层底板埋深 35~33 m，对应黄海高程−31.13~−28.39 m；顶板埋深 32~20 m，对应黄海高程−25.58~−15.39 m。光释光测年结果表明，该第 II 海相层始于 94 ka 或更早，海水影响在距今约 71 ka 结束。对比全球海面曲线，第 II 海相层时空特征与 MIS5a 阶段相符，记录了 MIS5a 阶段海侵事件。

References

Chen Yukun, Li Zhenhai, Shao Yongxin, Wang Zhisheng, Gao Wuping, Yang Xulian. 2008. Study on the Quaternary chronostratigraphic section in Tianjin area[J]. Seismology and Geology, 30(2): 483−493 (in Chinese with English abstract).

Chen Yongsheng, Wang Fu, Jiang Xingyu, Li Weiqi, Li Jianfen, Shang Zhiwen. 2016. Identification and OSL ages of the second marine bed in Borehole QX02 along the western coast of Bohai Bay[J]. Geological Bulletin of China, 35(10): 1600−1606 (in Chinese with English abstract).

Chen Yongsheng, Wang Hong, Pei Yandong, Tian Lizhu, Li Jianfen, Shang Zhiwen. 2012. Devision and its geological significance of the late Quaternary marine sedimentary beds in the west coast of Boahi Bay, China[J]. Journal of Jinlin University (Earth Science Edition), 42(3): 747−759 (in Chinese with English abstract).

Dutton A, Barlow N L M. 2019. What do we know about last interglacial sea level?[J]. Past Global Changes, 27(1): 6–7.

Elderfield H, Ferretti P, Greaves M, Crowhurst S, McCave I N, Hodell D, Piotrowski A M. 2012. Evolution of ocean temperature and ice volume through the Mid−pleistocene climate transition[J]. Science, 337: 704–709.

Li Fenglin, Wang Hong, Yan Yuzhong, Wang Yunsheng, Zhang Jinqin, Zhao Changrong, Zhang Yufa, Li Jianfen, Lin Fang. 2004. The significance of the depositonal hiatuses on the coastal plain of west Bohai Bay since the Late Quaternary Period[J]. Geological Survey and Research, 9(3): 177−183 (in Chinese with English abstract).

Li Jianfen, Wang Hong, Li Fenglin, Zhang Jinqi, Zhang Yufa, Wang Yunsheng. 2004. Holocene geo–environmental changes at the Xingtuo section in the central part of the oyster reef plain, Baohai Bay[J]. Geological Bulletin of China, 23(2): 170−176 (in Chinese with English abstract).

Li Jianfen, Shang Zhiwen, Chen Yongsheng, Tian Lizhu, Jiang Xingyu, Wang Fu, Hu Yunzhuang, Li Yong, Yang Peng, Wen Mingzheng, Yuan Haifan, Shi Peixin, Wang Hong. 2020. Research status and protection suggestions on oyster reef in Bohai Bay[J]. Geological Survey and Research, 43(4): 317–333 (in Chinese with English abstract).

Liu J, Wang H, Wang F F, Qiu J D, Saito Y, Lu J F, Zhou L Y, Xu G, Du X L, Chen Q. 2016. Sedimentary evolution during the last ~1.9 Ma near the western margin of the modern Bohai Sea[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 451: 84−96.

Murray A S, Wintle A G. 2000. Luminescence dating of quartz using an improved single–aliquot regenerative–dose protocol[J]. Radiation Measurements, 32: 57−73.

Murray A S, Wintle A G. 2003. The single aliquot regenerative dose protocol: Potential for improvements in reliability[J]. Radiation Measurements, 37: 377−381.

Pico T, Mitrovica J X, Ferrier K L, Braun J. 2016. Global ice volume during MIS 3 inferred from a sea–level analysis of sedimentary core records in the Yellow River Delta[J]. Quaternary Science Reviews, 152: 72−79.

Qi Jiafu, Zhang Yiwei, Lu Kezheng, Yang Qiao. 1995. Cenozoic tectonic evolution in Bohai Bay basin province[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 19(S1): 1−6 (in Chinese with English abstract).

Qin Yunshan, Zhao Yiyang, Zhao Songling. 1985. Geology of Bohai Sea[M]. Beijing: Science Press, 212–223(in Chinese with English abstract).

Reimer P J, Baillie M G L, Bard E, Bayliss A, Beck J W, Blackwell P G, Bronk Ramsey C, Buck C E, Burr G S, Edwards R L. 2013. IntCal13 and MARINE13 radiocarbon age calibration curves 0–50000 years cal BP[J]. Radiocarbon, 55(4): 1869−1887.

Rohling E J, Braun K, Grant K, Kucera M, Roberts A, Siddall M, Trommer G. 2010. Comparison between Holocene and marine isotope stage–11 sea–level histories[J]. Earth and Planetary Science Letters, 29: 97−105.

Shang Zhiwen, Wang Fu, Li Jianfen, Jiang Xingyu, Chen Yongsheng, Wang Hong. 2016. The age of the second marine layer in coastal lowland of Bohai Bay revealed by AMS^{14}C dating method (II)[J]. Geological Bulletin of China, 35(10): 1607−1613 (in Chinese with English abstract).

Waelbroeck C, Labeyrie L, Michel E, Duplessy J C, McManus J F, Lambeck K, Balbon E, Labracherie M. 2002. Sea–level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records[J]. Quaternary Science Reviews, 21: 295–305.

Wang Fu, Chen Yongsheng, Li Jianfen, Wang Hong, Fang Jin, Shang Zhiwen, Tian Lizhu, Jiang Xingyu, Shi Peixin. 2014. The age of the second marine layer in coastal lowland of Bohai Bay revealed by AMS^{14}C dating method[J]. Geological Bulletin of China, 33(10): 1591−1595 (in Chinese with English abstract).

Wang Fu, Shang Zhiwen, Li Jianfen, Jiang Xingyu, Wen Mingzheng, Shi Peixin, Tian Lizhu, Chen Yongsheng, Yang Peng, Hu Yunzhuang, Li Yong, Yuan Haifan, Wang Hong. 2020. Research status and protection suggestions of chenier on Bohai Bay[J]. Geological Survey and Research, 43(4): 293−316 (in Chinese with English abstract).

Wang Fu, Wang Hong, Li Jianfen, Wang Feicui, Tian Lizhu, Yu Qian, Huang Zhaoquan, Fang Jing, Hu Yunzhuang, Xiao Guoqiang, Li Chang. 2023. Evolution and trending prediction of the Chinese mainland coasts since 20 ka BP: Implication for ecological protection and restoration[J]. Geology in China, 50(1): 61−83 (in Chinese with English abstract).

Wang Fu, Hu Yunzhuang, Tian Lizhu, Shi Peixin, Li Jianfen, Chen Yongsheng, Li Yong, Sahng Zhiwen, Jiang Xingyu, Yuan Haifan, Yang Peng, Wen Mingzheng, Zhao Yanlin, Yang Yi, Wang Hong. 2024. Sea level change in Bohai Bay[J]. North China Geology, 47(1): 1−20 (in Chinese with English abstract).

Wang Hong. 2022. Barrier–island–and lagoon characterized land formation in the Bohai Bay and its enlightenment to sustainability of coastal development[J]. North China Geology, 45(1): 1−17 (in Chinese with English abstract).

Wang Pinxian, Min Qiubao, Bian Yunhua, Cheng Xinrong. 1981. Strata of Quaternary transgressions in east China: A preliminary Study[J]. Acta Geologica Sinica, (1): 1−13 (in Chinese with English abstract).

Wang Qiang, Li Fenglin. 1983. The changes of marine–continental conditions in the west coast of the Bohai Gulf during Quaternary[J]. Marine Geology & Quaternary Gology, 3(4): 83−89 (in Chinese with English abstract).

Wang Qiang, Zhang Yufa, Yuan Guibang, Zhang Qenqin. 2008. Since MIS3 stage the correlation between transgression and climatic changes in the north Huanghua area, Hebei[J]. Quaternary Sciences, 28(1): 79−83 (in Chinese with English abstract).

Wintle A G. 1997. Luminescence dating: Laboratory procedures and protocols[J]. Radiation Measurements, 27: 769−817.

Xu Q M, Yang J L, Yuan G B, Chu Z X, Zhang Z K. 2015. Stragraphic sequence and episodes of the ancient Huanghe Delta along the southwesthern Bohai Bay since the LGM[J]. Marine Geology, 367: 69−82.

Xu Qinmian, Yuan Guibang, Zhang Jinqi, Qin Yafei. 2011. Statigraphic sequence and episodes of the late Quaternary strata along the coast of Bohai Bay and its geology significance[J]. Acta Geologica Sinaca, 85(8): 1352−1367 (in Chinese with English abstract).

Yan Yuzhong, Wang Hong, Li Fenglin, Li Jianfen, Zhao Changrong, Lin Fang. 2006a. Sedimentary environment and sea–level fluctuations revealed by Borhole BQ1 on the west coast of the Bohai Bay[J]. Geological Bulletin of China, 25(3): 357−382 (in Chinese with English abstract).

Yan Yuzhong, Wang Hong, Li Fenglin, Tian Lizhu. 2006b. Different depositional processes of boreholes BQ1 and BQ2 in the Late Pleistocene on the west coast of Bohai Bay[J]. Quaternary Sciences, 26(3): 321−326 (in Chinese with English abstract).

Yi L, Lai Z P, Yu H J, Xu X Y, Su Q, Yao J, Wang X L, Shi X F. 2013. Chronologies of sedimentary changes in the south Bohai Sea, China: Constraints from luminescence and radiocarbon dating[J]. Boreas, 42(2): 267−284.

Yi Liang, Jiang Xingyu, Tian Lizhu, Yu Hongjun, Xu Xingyong, Shi Xuefa, Qin Fuafeng, Deng Chenlong. 2016. Geochronological study on Plio–Pleistocene evolution of Bohai Basin[J]. Quaternary Sciences, 36(5): 1075−1087 (in Chinese with English abstract).

Yokoyama Y, Esat T M. 2011. Global climate and sea level–enduring variability and rapid fluctuations over the past 150, 000 years[J]. Oceanography, 24(2): 54−69.

Yue Baojing, Liu Jinqing, Liu Jian, Liao Jing, Zhang Junqing. 2020. Grain size distribution of sediment of YRD–1101 in the western margin of the modern Bohai Sea since latest Pleistocene and its environmental change[J]. Geology in China, 47(3): 853−867 (in Chinese with English abstract).

Zhao Changrong, Hus J, Yan Yuzhong, Wang Hong, Zhang Jinqi. 2003. Late Pleistocene–Holocene chronostragraphic sequence and the geomagnetic polar excursion on the west coast of Bohai Bay[J]. Geological Survey and Research, 26(3): 183−192 (in Chinese with English abstract).

Zhao Hua, Lu Yanchou, Zhang Jinqi, WangHong. 2002. IRSL dating of Late Quaternary sediments and chronology of environmental changes at Dazhigu area, Tianjin[J]. Chinese Journal of Geology, 37(2): 174−183 (in Chinese with English abstract).

Zhao Li, Li Li. 2016. The extensional pattern and dynamics of Bohai Bay basin in Late Mesozoic–Cenozoic[J]. Geology in China, 43(2): 470–485 (in Chinese with English abstract).

Zhao Songling, Yang Guanfu, Cang Shuxi, Zhang Hongcai, Huang Qingfu, Xia Dongxing, Wang Yongjie, Liu Fushou, Liu Chengfu. 1978. On the marine stratigraphy and coastlines of the western of the gulf of Bohai[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 9(1): 15–25 (in Chinese with English abstract).

Zhuang Zhenye, Xu Weidong, Liu Dongsheng, Zhuang Lihua, Liu Baozhu, Cao Youyi, Wang Qiang. 1999. Division and environmental evolution of Late Quaternary marine beds of S3 hole in the Bohai Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 19(2): 27−35 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈宇坤, 李振海, 邵永新, 王志胜, 高武平, 杨绪连. 2008. 天津地区第四纪年代地层剖面研究[J]. 地震地质, 30(2): 483−493.

陈永胜, 王福, 姜兴钰, 黎伟麒, 李建芬, 商志文, 王福. 2016. 渤海湾西岸 QX02 孔 II 海的识别及光释光年龄[J]. 地质通报, 35(10): 1600−1606.

陈永胜, 王宏, 裴艳东, 田立柱, 李建芬, 商志文. 2012. 渤海湾西岸晚第四纪海相地层划分及地质意义[J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 42(3): 747−759.

李凤林, 王宏, 阎玉忠, 王云生, 张金起, 赵长荣, 张玉发, 李建芬, 林防. 2004. 渤海湾西岸滨海平原晚第四纪以来的沉积间断[J]. 地质调查与研究, 9(3): 177−183.

李建芬, 王宏, 李凤林, 张金起, 张玉发, 王云生. 2004. 渤海湾牡蛎平原中部兴坨剖面全新世地质环境变迁[J]. 地质通报, 23(2): 170−176.

李建芬, 商志文, 陈永胜, 田立柱, 姜兴钰, 王福, 胡云壮, 李勇, 杨朋, 文明征, 袁海帆, 施佩歆, 王宏. 2020. 渤海湾牡蛎礁的研究现状与保护建议[J]. 地质调查与研究, 43(4): 317−333.

漆家福, 张一伟, 陆克政, 杨桥. 1995. 渤海湾盆地新生代构造演化[J]. 石油大学学报 (自然科学版), 19(S1): 1−6.

秦蕴珊, 赵一阳, 赵松龄. 1985. 渤海地质[M]. 北京: 科学出版社, 212–223.

商志文, 王福, 李建芬, 姜兴钰, 陈永胜, 王宏. 2016. AMS ^{14}C 测年揭示的渤海湾沿海低地第 II 海相层年龄 (II)[J]. 地质通报, 35(10): 1607−1613.

王福, 陈永胜, 李建芬, 王宏, 方晶, 商志文, 田立柱, 姜兴钰, 施佩歆. 2014. AMS ^{14}C 测年揭示的渤海湾沿海低地第 II 海相层年龄[J]. 地质通报, 33(10): 1591−1595.

王福, 商志文, 李建芬, 姜兴钰, 文明征, 施佩歆, 田立柱, 陈永胜, 杨朋, 胡云壮, 李勇, 袁海帆, 王宏. 2020. 渤海湾贝壳堤现状及保护建议[J]. 地质调查与研究, 43(4): 293−316.

王福, 王宏, 李建芬, 汪翡翠, 田立柱, 于谦, 黄昭权, 方晶, 胡云壮, 肖国强, 李畅. 2023. 中国海岸 20 ka 以来的演替过程及趋势分析: 对现代海岸生态保护修复的启示[J]. 中国地质, 50(1): 61−83.

王福, 胡云壮, 田立柱, 施佩歆, 李建芬, 陈永胜, 李勇, 商志文, 姜兴钰, 袁海帆, 杨朋, 文明征, 赵琰琳, 杨怡, 王宏. 2024. 渤海湾海面变化[J]. 华北地质, 47(1): 1−20

王宏. 2022. 渤海湾障壁岛–潟湖型成陆过程及对今后海岸带可持续发展的启示[J]. 华北地质, 45(1): 1−17.

汪品先, 闵秋宝, 卞云华, 成鑫荣. 1981. 我国东部第四纪海侵地层的初步研究[J]. 地质学报, (1): 1−13.

王强. 1999. 渤海西岸全新世早期基底泥炭堆积时间域初步研究[J]. 第四纪研究, 19(1): 91

王强, 李凤林. 1983. 渤海湾西岸第四纪海陆变迁[J]. 海洋地质与第四纪地质, 3(4): 83−89.

王强, 李凤林, 李玉德, 高秀林. 1986. 对渤海西、南岸平原第四纪海侵命名的讨论[J]. 海洋学报, 8(1): 72−82.

王强, 张玉发, 袁桂邦, 张文卿. 2008. MIS3 阶段以来河北黄骅北部地区海侵与气候期对比[J]. 第四纪研究, 28(1): 79−83.

王淑芳, 王云生. 1988. 天津迎宾馆钻孔磁性地层的划分与对比[J]. 水文地质工程地质, (1): 41−45.

胥勤勉, 袁桂邦, 张金起, 秦亚飞. 2011. 渤海湾沿岸晚第四纪地层划分及地质意义[J]. 地质学报, 85(8): 1352−1367.

阎玉忠, 王宏, 李凤林, 李建芬, 赵长荣, 林防. 2006a. 渤海湾西岸 BQ1 孔揭示的沉积环境与海面波动[J]. 地质通报, 25(3): 358−382.

阎玉忠, 王宏, 李凤林, 田立柱. 2006b. 渤海湾西岸晚更新世沉积的差异性特征[J]. 第四纪研究, 26(3): 321−326.

易亮, 姜兴钰, 田立柱, 于洪军, 徐兴永, 石学法, 秦华锋, 邓成龙. 2016. 渤海盆地演化的年代学研究[J]. 第四纪研究, 36(5): 1075−1087.

岳保静, 刘金庆, 刘健, 廖晶, 张军强. 2020. 渤海西缘 YRD–1101 孔晚更新世以来沉积粒度特征及其环境变迁[J]. 中国地质, 47(3): 853−867.

赵长荣, J. Hus, 阎玉忠, 王宏, 张金起. 2003. 渤海湾西岸湾顶晚更新世—全新世年代地层序列与地磁极漂移[J]. 地质调查与研究, 26(3): 183−192.

赵华, 卢演俦, 张金起, 王宏. 2002. 天津大直沽晚第四纪沉积物红外释光测年及环境变迁年代学[J]. 地质科学, 37(2): 174−183.

赵利, 李理. 2016. 渤海湾盆地晚中生代以来伸展模式及动力学机制[J]. 中国地质, 43(2): 470−485.

赵松龄, 杨光复, 苍树溪, 张宏才, 黄庆福, 夏东兴, 王永吉, 刘福寿, 刘成福. 1978. 关于渤海湾西岸海相地层与海岸线问题[J]. 海洋与湖沼, 9(1): 15−25.

庄振业, 许卫东, 刘东生, 庄丽华, 刘宝柱, 曹有益, 王强. 1999. 渤海南部 S3 孔晚第四纪海相地层的划分及环境演变[J]. 海洋地质与第四纪地质, 19(2): 27−35.