doi: 10.12029/gc20210804001

郝秀东, 劳月英, 欧阳绪红, 姜兴钰, 王福, 田立柱, 施佩歆, 陈永胜, 王宏, 李建芬, 商志文. 2024. 山东莱州湾南岸晚上新世以来(6.8~0.004 Ma)古植被演替与海平面波动[J]. 中国地质, 51(2): 689−700.

Hao Xiudong, Lao Yueying, Ouyang Xuhong, Jiang Xingyu, Wang Fu, Tian Lizhu, Shi Peixin, Chen Yongsheng, Wang Hong, Li Jianfen, Shang Zhiwen. 2024. Late Pliocene(6.8−0.004 Ma)vegetation evolution and sea−level fluctuations on the southern coastal plain of Laizhou Bay, Bohai Sea, China[J]. Geology in China, 51(2): 689−700(in Chinese with English abstract).

山东莱州湾南岸晚上新世以来（6.8~0.004 Ma）古植被演替与海平面波动

郝秀东[1,2,3,4,5]，劳月英[1,2]，欧阳绪红[1,2]，姜兴钰[6]，王福[6]，田立柱[6]，施佩歆[6]，陈永胜[6]，王宏[6]，李建芬[6]，商志文[6]

（1. 南宁师范大学北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 广西 南宁 530001; 2. 南宁师范大学广西地表过程与智能模拟重点实验室, 广西 南宁 530001; 3. 广西红树林研究中心广西红树林保护与利用重点实验室, 广西 北海 536000; 4. 自然资源部/广西岩溶动力学重点实验室, 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004; 5. 中国科学院南京地质古生物研究所现代古生物学和地层学国家重点实验室, 江苏 南京 210008; 6. 中国地质调查局泥质海岸带地质环境重点实验室, 天津 300170）

提要:【研究目的】海岸带沉积物中的微体古生物化石保存着丰富的地质环境信息, 本文的目的是重建莱州湾南岸晚上新世以来的古植被演替与海平面波动关系。**【研究方法】**拟通过对 HLL01 钻孔的孢粉、淡水藻类、海相沟鞭藻、有孔虫内衬等微体古生物化石的分析, 恢复和重建莱州湾南岸及其附近地区晚上新世以来的古植被演替与海平面波动。**【研究结果】**(1)在晚上新世—早更新世阶段(约 6.8~1.6 Ma), 大量的陆生草本花粉(75.13%)指示研究区的植物群落主要以藜科、蒿属及禾本科为主的草原植被, 气候温暖偏干。(2)在早更新世—中更新世阶段(约 1.6~0.6 Ma), 研究区的植物群落开始由草原向森林草原类型过渡; 急剧增加的淡水藻类, 则指示研究区可能有大的河流注入, 或形成较大规模的湖泊; 降水量增加, 气候变得湿润。(3)在中更新世—晚全新世阶段(约 0.6~0.004 Ma), 研究区的植物群落已经变成森林草原植被。淡水藻类含量略有降低, 指示研究区的河流注入量开始减少, 湖泊面积也开始萎缩。同时, 海相沟鞭藻和有孔虫内衬等海相化石记录, 指示研究区在该阶段出现了较为明显的大规模海侵事件。**【结论】**莱州湾晚上新世以来发生了 3 次古植被演替与海平面波动事件。

关 键 词: 孢粉组合; 古植被; 古环境演变; 晚上新世; 海岸带地质调查工程; 莱州湾; 山东

创 新 点: (1)系统开展了莱州湾南岸的孢粉、淡水藻类、海相沟鞭藻、有孔虫内衬等微体古生物化石的研究工作; (2)依据微体古生物化石记录, 揭示了晚上新世以来 3 次主要的古植被演替与海平面波动事件。

中图分类号: Q948.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000−3657(2024)02−0689−12

Late Pliocene（6.8−0.004 Ma）vegetation evolution and sea−level fluctuations on the southern coastal plain of Laizhou Bay, Bohai Sea, China

收稿日期: 2021−08−04; **改回日期:** 2022−01−26

基金项目: 国家自然科学基金项目(42001076, U20A2048, 41861020)、广西自然科学基金项目(2023GXNSFBA026263)、中国科学院南京地质古生物研究所现代古生物学和地层学国家重点实验室开放基金(223109)、广西岩溶动力学重大科技创新基地开放基金项目(KDL & Guangxi202204)、广西红树林保护与利用重点实验室开放基金项目(GKLMC−201902)、北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室开放基金项目(NNNU−KLOP−X1919, NNNU−KLOP−X2101)联合资助。

作者简介: 郝秀东, 男, 1980 年生, 博士, 副研究员, 主要从事孢粉学研究; E−mail: xiudonghao@126.com。

通讯作者: 欧阳绪红, 女, 1984 年生, 博士, 副研究员, 主要从事过去全球变化研究; E−mail: oy_xh@163.com。

姜兴钰, 男, 1981 年生, 硕士, 高级工程师, 从事第四纪海岸带地质环境变化研究; E−mail: jxingyu@cgs.cn。

HAO Xiudong[1,2,3,4,5], LAO Yueying[1,2], OUYANG Xuhong[1,2], JIANG Xingyu[6], WANG Fu[6], TIAN Lizhu[6], SHI Peixin[6], CHEN Yongsheng[6], WANG Hong[6], LI Jianfen[6], SHANG Zhiwen[6]

(1. *Key Laboratory of Beibu Gulf Environment Change and Resources Utilization (Nanning Normal University), Ministry of Education, Nanning* 530001*, Guangxi, China;* 2. *Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation, Nanning Normal University, Nanning* 530001*, Guangxi, China;* 3. *Guangxi Academy of Sciences, Guangxi Mangrove Research Center, Guangxi Key Lab of Mangrove Conservation and Utilization, Beihai* 536000*, Guangxi, China;* 4. *Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin* 541004*, Guangxi, China;* 5. *State Key Laboratory of Modern Paleontology and Stratigraphy, Nanjing Institute of Geology and Paleontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210008*, Jiangsu, China;* 6. *CGS Key Laboratory of Muddy Coast Geo-environment, Tianjin* 300170*, China*)

Abstract: This paper is the result of coastal geological survey engineering.
[Objective] Microfossils, especially pollen, spores, and dinoflagellate cysts, as direct indicators or proxies, provide significant information on geological environment. Therefore, palynological analysis has an important role in restoration and reconstruction of vegetation history and sea−level fluctuations, which provides information from the sediment cores, especially in alluvial coastal plain regions. **[Methods]** In this study, we carry out analyses using detailed palynological records of pollen, spores, freshwater algae, marine dinoflagellate cysts, and foraminiferal organic linings from Borehole HLL01 on the southern coastal plain of Laizhou Bay, Bohai Sea, northern China. **[Results]** The results provide valuable information on vegetation history and sea−level fluctuations since the Late Pliocene. Large amounts of terrestrial herb pollen (75.13%; mainly composed of Chenopodiaceae, Artemisia and Poaceae) were identified at Borehole HLL01, suggesting that coastal steppes flourished in the study area and its adjacent areas, and a cold and dry climate than the present during the Late Pliocene to Early Pleistocene, ca. 6.8−1.6 Ma. After that, the steppe areas began to shrink, and the transition of coastal steppes to forest grasslands occurred in the Early−Middle Pleistocene, ca. 1.6−0.6 Ma, indicating a warm and humid climate. A sharp increase in freshwater algae indicates that large rivers' discharge had been injected into the study area, or large lakes were formed. Afterward, relatively cool and dry climatic conditions appeared, with little precipitation, and a relatively significant transgression event revealed by dinoflagellate cysts and foraminifera organic linings, and forest grassland vegetation was distributed in the study area and its adjacent areas, during the Middle Pleistocene to Holocene, ca. 0.6−0.004 Ma. **[Conclusions]** Three ancient plants have occurred and the sea level fluctuations occurred since the Late Pliocene (6.8−0.004 Ma) in the Laizhou Bay.

Key words: pollen assemblage; paleovegetation; palaeoenvironmental evolution; Late Pliocene; coastal geological survey engineering; Laizhou Bay; Shandong Province

Highlights: (1) Pollen, spores, freshwater algae, marine dinoflagellate cysts, and foraminiferal organic linings from the southern coastal plain of Laizhou Bay were investigated. (2) Three major phases shown by palynological results were corresponding to the vegetation evolution and sea-level fluctuations.

About the first author: HAO Xiudong, male, born in 1980, doctor, associate researcher, engaged in palynology; E−mail: xiudonghao@126.com.

About the corresponding author: OUYANG Xuhong, born in 1984, female, doctor, associate researcher, engaged in the past global changes; E−mail: oy_xh@163.com. JIANG Xingyu, male, born in 1981, senior engineer, engaged in geological environment change of Quatenary coastal zone; E−mail: jxingyu@cgs.cn.

Fund support: Supported by National Natural Science Foundation of China (No.41861020, No.42001076, No.U20A2048), Guangxi Natural Science Foundation (No. 2023GXNSFBA026263), Open Funds from State Key Laboratory of Palaeobiology and Stratigraphy (Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, CAS) (No. 223109), Open Research Fund Program of Guangxi Key Science and Technology Innovation Base on Karst Dynamics (No. KDL & Guangxi202204), Open Research Fund Program of Guangxi Key Lab of Mangrove Conservation and Utilization (No.GKLMC−201902) and Open Fund of Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf, Ministry of Education (No.NNNU−KLOP−X1919, No.NNNU−KLOP−X2101).

1 引 言

全球超过 10% 的人口居住在海岸带、三角洲等低海拔地区，在全球变暖的大背景下，海平面上升直接影响到沿海地区的人类生存，已经成为重要的环境问题（Pickering et al., 2012; Giosan et al., 2014）。莱州湾是渤海的三大海湾之一，湾内河流

众多,海陆相互作用强烈,对植被演替、环境变化及海平面波动十分敏感,其陆海相互作用下的沉积过程及沉积环境演变一直是地质学界关注的焦点(李倩等, 2016; 杨吉龙等, 2016; 田立柱等, 2016; Gao et al., 2019)。多年来,众多学者运用不同的研究手段,如微体古生物学、地层学、元素地球化学等多种指标,对莱州湾,特别是南部和西部第四纪以来的海相地层、沉积古环境及其气候变迁进行了深入的研究,取得了丰硕的研究成果(庄振业等, 1987; 林防等, 2005; 郭飞等, 2016; Duan et al., 2018; Yin et al., 2018; Chen et al., 2019; Mei et al., 2019; Wang et al., 2019; Zhang et al., 2019; Zhao et al., 2019; Gao et al., 2020)。孢子、花粉(简称孢粉)是植物的组成部分,因其外壁富含耐高温、氧化和酸碱腐蚀的孢粉素($C_{96}H_{22}O_{24}$),可以经过漫长的地质年代,仍然被很好地保存下来(王开发和王宪曾, 1983; 郝秀东等, 2020);加之其具产量大、种类丰富,已成为恢复和重建古植被和古环境最直接、最可信的代用指标之一(宋长青和孙湘君, 1997; Nakagawa et al., 2003; Zhao et al., 2011; Zheng et al., 2014; Cong et al., 2021)。吕厚远(1989)、刘恩峰等(2004)在渤海南岸开展相关孢粉学研究,但时间跨度多集中在晚更新世阶段,上新世阶段等更久远时期的孢粉学研究,目前相关研究文献却较少(如黄猛等, 2019; 姜兴钰等, 2020)。大量的研究表明,上新世是地球地质历史上一个非常重要的时期。上新世以来地球系统的众多边界条件发生了显著变化(Zachos et al., 2001),伴随着温室气体浓度的逐步下降(Lunt et al., 2008),北极冰盖最终形成,北半球典型的第四纪冰期出现(DeMenocal, 2004),地球气候从中新世的温暖状态转变为更新世典型的冰期—间冰期旋回模式(Lisiecki and Raymo, 2005)。在上新世时期,地球大气中二氧化碳浓度约为 4×10^{-4},南极冰盖超过 1/3 融化,全球平均海平面比今天高约 20 m(Grant et al., 2019)。在全球变暖的大背景下,如果地球平均气温上升幅度超过 2℃,这将会越过南极冰盖的稳定临界点,或许会导致南极冰盖在几个世纪内完全融化,到那时,全球平均海平面将会大幅度上升,海岸线也将被重塑,势必会威胁到人类的生存安全(Grant et al., 2019)。

基于此,本研究拟通过对莱州湾南岸 HLL01 钻孔的孢粉学分析,结合古地磁结果建立年代框架,运用钻孔中出现的孢粉、海相沟鞭藻类、淡水藻类及有孔虫内衬等多种微体古生物化石记录,恢复和重建晚上新世以来莱州湾南岸及其附近地区的植被演变、古水文演化、气候变化及海平面波动,为进一步研究环渤海地区的古植被、古环境及古气候变迁提供参考资料。

2　研究区概况

2.1　地貌与地质背景

莱州湾南岸海岸带的地理区间为 118°32'E~119°37' E, 36°25'N~37°19' N, 西起淄脉沟口,东至胶莱河河口,北邻莱州湾;是典型的淤泥质堆积海岸,总面积为 5702.95 km^2(田立鑫等, 2021)。研究区现代地势平坦宽广,坡度很小,属海相沉积平原地貌,潮间带宽度 3~5 km,地势自南向北倾斜,沿海平原地势相对华北平原更陡,坡降可达 0.3‰。区内分布有弥河、小清河以及白浪河水系,其中,弥河和小清河径流量和输沙量较大,平均径流量分别为 428×10^9 m^3/a 和 85×10^9 m^3/a,平均输沙量分别为 8.4×10^5 t/a 和 3.7×10^5 t/a(田立柱等, 2016)。这些河流携带的大量沉积物(泥、沙等)汇入渤海,部分泥沙在莱州湾南岸沉积。但是,随着人类活动的加剧,港口建设、海水养殖、盐化工等土地利用变化剧烈(Yao et al., 2012; Liu et al., 2016)。本研究所选的 HLL 01 钻孔位于莱州湾南岸,其经纬度分别为:37°06'24"N, 119°07'07"E(图 1)。

莱州湾南岸是在华北克拉通基底上发育的中—新生代断陷、坳陷叠合形成的渤海湾盆地的组成部分(Allen et al., 1997; Qi and Yang, 2010),位于郯庐断裂中段沂沭断裂的东、西两支之间(Zhang et al., 2003)。在中新世中晚期,研究区整体处于稳定的沉降环境(Allen et al., 1997; Hu et al., 2001; He and Wang, 2003; 吴时国等, 2006; Yu et al., 2008)。晚第四纪以来,沉积环境类型主要为三角洲、河口、潮坪、冲积扇、洪积扇、海岸沙丘等(陈明等, 1991; 赵松龄, 1995; 孟庆海等, 1999; 于洪军等, 1999; 薛春汀和丁东, 2008),下伏地层以河湖相为主(Yi et al., 2015)。

2.2　气候与植被

莱州湾属暖温带季风气候,受季风影响较大,冬季寒冷干燥,夏季炎热潮湿。年平均气温 11.9~12.6℃,最低平均温度−3.8°C,最高平均温度 25.9°C,分别出现在 1 月和 7 月。年平均降水量为 612.5~660.1 mm,最大降水集中在 6—9 月;年均蒸发量 1776

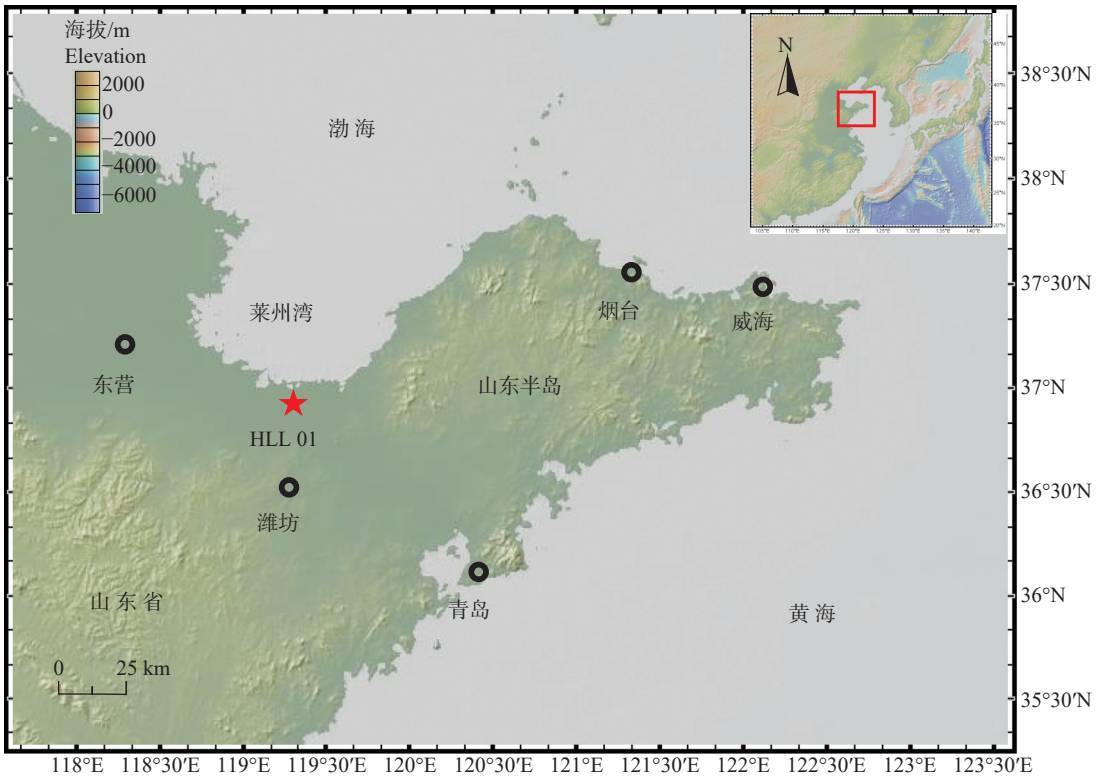

图 1 HLL 01 钻孔位置图
Fig.1 Location of the borehole HLL 01

mm, 高于降水量; 年均无霜期 187 天(Bi et al., 2014; 杨吉龙等, 2016)。

据中国科学院中国植被图编辑委员会(2007), 莱州湾南岸属黄河三角洲小麦、棉花、杂粮栽培植被, 碱蓬盐生草甸小区。现代植被类型包括滨海湿地、人工栽培区、草地、阔叶林和针阔混交林, 由 48 科 129 属 197 种植物构成, 主要科属包括松属、高山栎属、鹅耳栎属、木犀科、桑科、禾本科、藜科、蒿属、毛良属、蓼科、香蒲属、莎草科、卷柏属等(吴征镒, 1980; 张绪良等, 2008)。栽培作物主要为冬小麦。

3 研究方法及年代框架

3.1 岩性描述及样品采集

HLL01 钻孔海拔约 3 m, 由天津地质调查中心于 2012 年夏天实施钻井作业(姜兴钰等, 2016; 李倩等, 2016), 全孔进尺 452 m, 取心率为 94%。本次研究的孢粉样品按照 1~16 m 不等间距进行采集, 共采集了 HLL01 钻孔岩心 100 份孢粉样品。整孔沉积环境变化明显, 可划分为 50 层, 具体参见姜兴钰等(2016), 本文不复赘述。

3.2 实验室处理

采用传统的过筛法(Brown, 2008)进行孢粉实验室的提取, 即先加盐酸去除样品中的钙质, 再加氢氟酸去除硅质, 最后在超声波中运用 7 μm 网筛过筛。在提取孢粉及藻类的实验过程中用到大量的盐酸和氢氟酸, 有孔虫壳体(钙质或硅质)会被化学反应溶蚀掉, 但是, 有孔虫内部的有机质部分, 即有孔虫内衬, 却能很好的保存下来(Hao et al., 2020)。孢粉统计有效粒数在 100~586, 每个样品平均 126 粒。对于样品中出现的海相沟鞭藻、淡水藻类及有孔虫内衬等微体化石, 在鉴定和统计孢粉数目的同时也进行相应的鉴定和统计。孢粉图谱百分比含量按孢子与花粉总数计算, 淡水藻类百分含量以孢子、花粉及淡水藻类的总数计算。海相沟鞭藻和有孔虫内衬的含量极低, 则直接统计数值, 不计算百分比。

孢粉 (藻类) 浓度计算采用已知浓度的现代石松(*Lycopodium*)孢子(27637 粒/片)"外加标志法"(Maher, 1981), 再依据孢粉浓度计算公式进行浓度计算。

$$\text{孢粉浓度值（粒/克）}=\frac{\text{加入石松孢子数}\times\text{统计孢粉数}}{\text{鉴定的石松孢子数}\times\text{样品质量（克）}}$$

所有样品中出现的孢粉、淡水藻类、海相沟鞭藻类及有孔虫内衬等微体化石，均是在 Leica DM4000 B 光学显微镜 10×40 倍下进行鉴定和统计。孢粉、藻类百分比及浓度的图谱采用 Tilia (1.7.16) 软件绘制。

3.3 年代框架

姜兴钰等(2016)对 HLL 01 孔作了详细的古地磁地层学研究，建立了 HLL 01 钻孔地层年代框架(图 2)。钻孔底界年龄为 7.0 Ma, 140 m 以下为上新统，140 m 以上为更新统，其中 140~75 m 为下更新统，75~35 m 为中更新统，35~11 m 为上更新统，全新统埋深约 11 m(姜兴钰等, 2016)。

4 结　果

4.1 孢粉结果

整体来看，HLL01 钻孔的孢粉型化石(包括孢子、花粉、淡水藻类、海相沟鞭藻及有孔虫内衬等)保存状况良好，共鉴定出花粉和孢子 113 科属(图 3)，其中针叶乔木类 5 属，热带亚热带阔叶乔木和灌木类 22 科属，温带阔叶乔木和灌木类 28 科属，陆生草本类 48 科属，蕨类孢子 10 科属，以及淡水藻类

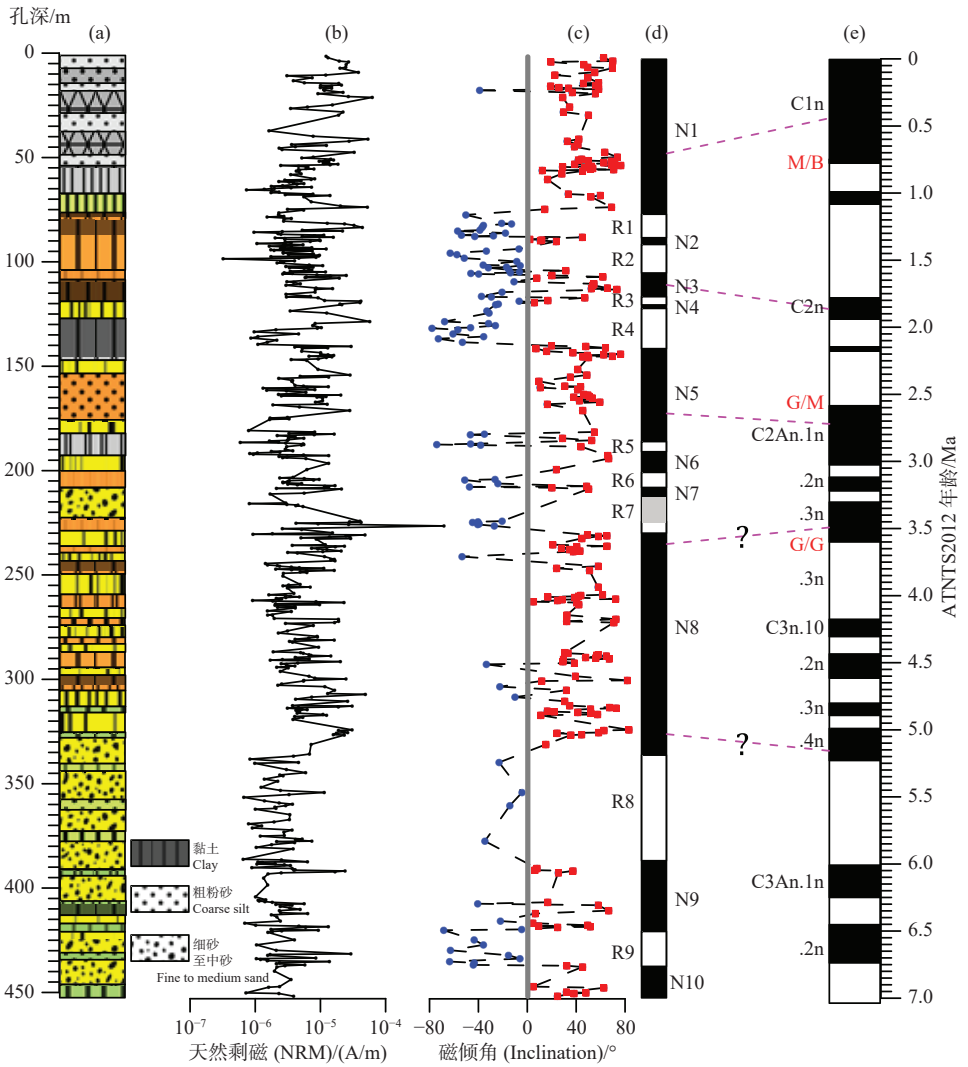

图 2　HLL01 孔的古地磁年代学框架(天然剩磁/NRM; 据姜兴钰等, 2016 修改)

Fig.2　Magnetostratigraphic chronology of borehole HLL01 (NRM: Natural Remanent Magnetization; modified from Jiang Xingyu et al., 2016)

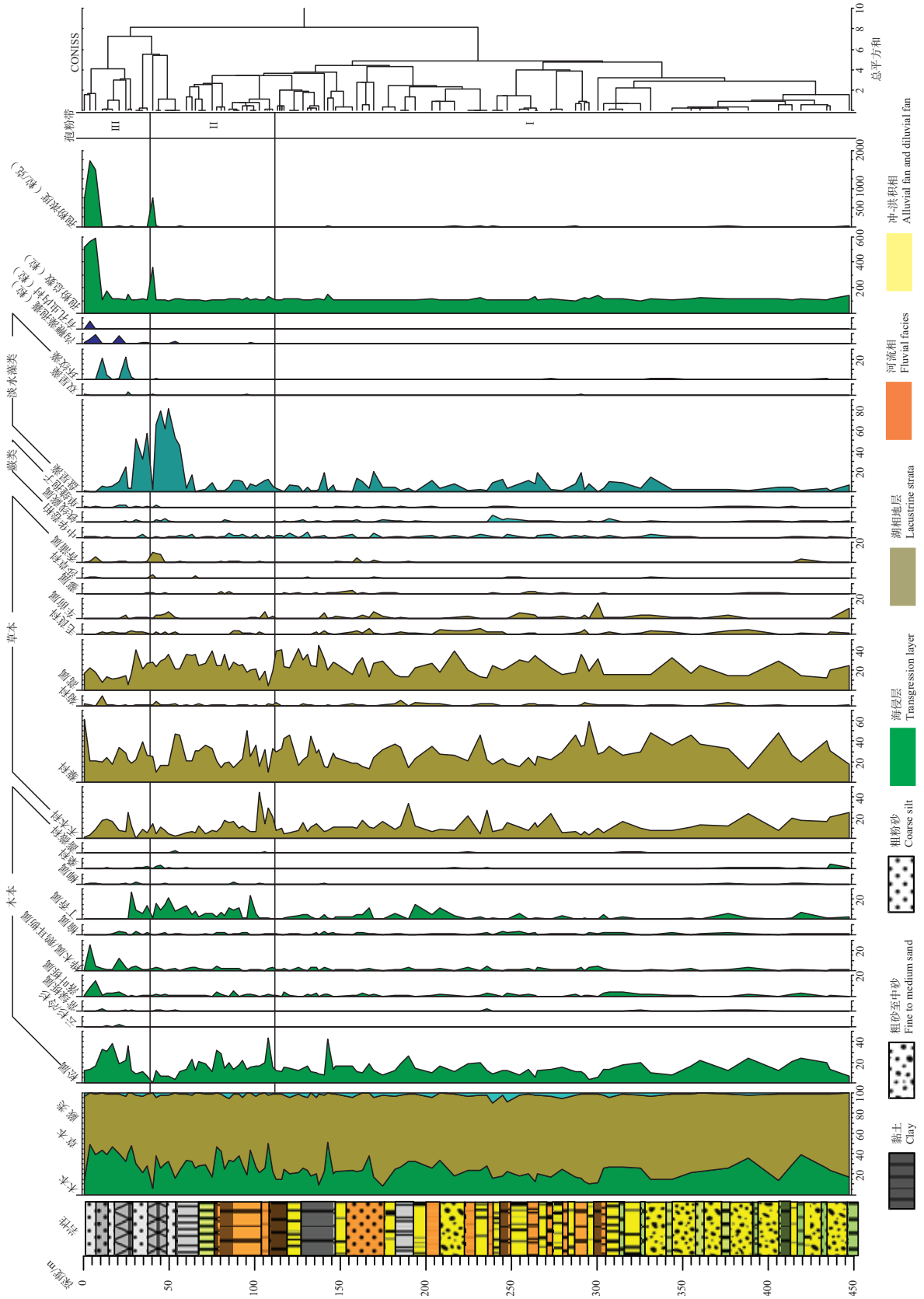

图 3 HLL01 钻孔主要孢粉型的百分比及浓度图

Fig.3 Percentage and concentration diagram of major palynomorphs in the borehole HLL01

3 属(表 1)。本研究中的海相沟鞭藻、有孔虫内衬没有进行属种鉴定, 只统计了其具体数值。具体孢粉类型及生态学划分(吴征镒, 1980)详见表 1。

4.2 孢粉组合特征

HLL01 钻孔孢粉组合整体上以禾本科(Poaceae)、藜科(Chenopodiaceae)和蒿属(*Artemisia*)等陆生草本花粉为主。松属(*Pinus*)、丁香属(*Syringa*)和落叶栎属(*Quercus*-D)等木本花粉次之。中华卷柏(*Selaginella sinensis*)和铁线蕨属(*Adiantum*)等蕨类孢子含量最低(图 3)。此外, 本钻孔还保存着大量的盘星藻属(*Pediastrum*)、双星藻(*Zygnema*)及环纹藻(*Concentricystis*)等淡水藻类、海相沟鞭藻和有孔虫内衬(其成分与孢粉壁类似, 可以在地层中很好的保存下来)。

根据 HLL01 钻孔主要孢粉类型百分比和藻类浓度变化特征, 对其进行聚类分析, 得出 3 个孢粉组合带, 自下而上为带Ⅰ, 带Ⅱ和带Ⅲ(图 3)。

4.2.1 带Ⅰ: 晚上新世早更新世 (6.8~1.6 Ma; 447~110 m)

本带的孢粉浓度为 4.93 粒/g, 为整个钻孔最低值。

孢粉组合以草本为主, 主要为藜科(28.76%)、蒿属(23.53%)和禾本科(11.73%), 含量高达 75.13%(平均值, 下同), 为整个钻孔的最高值。木本主要为针叶类松属(13.67%), 阔叶类丁香属(2.65%)、桦木属(1.26%)及落叶栎属(1.11%), 含量为 22.41%。蕨类主要为中华卷柏(1.03%)和铁线蕨属(0.75%), 含量最低, 为 2.46%。

淡水藻类主要为盘星藻(5.11%), 并伴有极少量的环纹藻(0.06%)和双星藻(0.01%), 含量在整个钻孔中最低, 为 5.18%。海相沟鞭藻和有孔虫内衬在本带缺失。

4.2.2 带Ⅱ: 早更新世—中更新世 (1.6~0.6 Ma; 110~40 m)

本带的孢粉浓度略有增加, 从 4.93 粒/g 升至

表 1 HLL01 钻孔鉴定的孢粉类型及生态学划分

Table 1 Pollen type identified in the borehole HLL01 and ecological division

高山针叶林	云杉（*Picea*）；铁杉（*Tsuga*）；冷杉（*Abies*）
热带亚热带针叶林	松属（*Pinus*）；柏科（Cupressaceae）
热带、亚热带阔叶林	常绿栎属（*Quercus*-evergreen）；豆科（Leguminosae）；桑科（Moraceae）；木犀科（Oleaceae）；枫香属（*Liquidambar*）；大戟科（Euphorbiaceae）；楝科（Meliaceae）；无患子科（Sapindaceae）；水青冈属(*Fagus*)；柿树科（Ebenaceae）；黄连木属（*Pistacia*）；木兰科（Magnoliaceae）；槭树科（Aceraceae）；臭椿属（*Ailanthus*）；冬青属（*Ilex*）；山矾科（Symplocaceae）；连翘属（*Forsythia*）；大风子科（Flacourtiaceae）；接骨木属（*Sambucus*）；鼠李科（Rhamnaceae）；马鞭草科（Verbenaceae）
温带阔叶林	桤木属（*Alnus*）；桦木属（*Betula*）；鹅耳枥属（*Carpinus*）；榛属（*Corylus*）；朴属（*Celtis*）；落叶栎属（*Quercus*-deciduous）；胡桃属（*Juglans*）；胡颓子属（*Elaeagnus*）；骆驼蓬属（*Peganum*）；枫杨属（*Pterocarya*）；榆属（*Ulmus*）；柳属（*Salix*）；蔷薇科（Rosaceae）；椴树属（*Tilia*）；忍冬科（Caprifoliaceae）；麻黄属（*Ephedra*）；丁香属（*Syringa*）；柽柳属（*Tamarix*）；白刺属（*Nitraria*）；香椿属（*Toona*）；绣线菊属（*Spiraea*）；白蜡树属（*Fraxinus*）；沙棘属（*Hippophae*）；杜鹃花科（Ericaceae）；盐肤木属（*Rhus*）；霸王属（*Zygophyiium*）；骆驼刺属（*Alhagi*）；葡萄科（Vitaceae）
草本	禾本科（Poaceae）；蒿属（*Artemisia*）；藜科（Chenopodiaceae）；天南星科（Araceae）；莎草科（Cyperaceae）；菊科（Compositae）；香蒲属（*Typha*）；蓼科（Polygonaceae）；百合科（Liliaceae）；唇形科（Lamiaceae）；酸模属（*Rumex*）；莎草科（Cyperaceae）；茄科（Solanaceae）；鸢尾科（Iridaceae）；柳叶菜科（Onagraceae）；毛茛科（Ranunculaceae）；爵床科（Acanthaceae）；石竹科（Caryophyllaceae）；荨麻科（Urticaceae）；茄科（Solanaceae）；堇菜属（*Violo*）；赪桐属（*Clerodendrum*）；虎耳草属（*Saxifraga*）；龙胆属（*Gentiana*）；葎草属（*Humulus*）；报春花属（*Primula*）；茜草属（*Rubia*）；玄参科（Scrophulariaceae）；婆婆纳属（*Veronica*）；耧斗菜属（*Aquilegia*）；旋花属（*Convolvulus*）；萎陵菜属（*Fragaria*）；地榆属（*Sanguisorba*）；金莲花属（*Trollius*）；唐松草属（*Thalictrum*）；菟丝子属（*Cuscuta*）；车前属（*Plantago*）；夏至草属（*Lagopsis*）；伞形科（Umbelliferae）；老鹳草属（*Geranium*）；千屈菜科（Lythraceae）；白花菜科（Capparidaceae）；狐尾藻属（Myriophyllum）；眼子菜属（*Potamogeton*）；苦苣苔科（Gesneriaceae）；黑三棱属（*Sparganium*）；假婆婆纳属（*Stimpsonia*）
蕨类	水蕨属（*Ceratopteris*）；水龙骨科（Polypodiaceae）；凤尾蕨属（*Pteris*）；石松属（*Lycopodium*）；鳞盖蕨属（*Microlepria*）；卷柏属（*Selaginella*）；中华卷柏（*Selaginella sinensis*）；膜蕨科（Hymenophyllaceae）；蹄盖蕨科（Athyriaceae）；铁线蕨 (Adiantum)；单缝孢子(Monolete spores)
淡水藻类	盘星藻（*Pediastrum*）；双星藻（*Zygnema*）；环纹藻（*Concentricystis*）

5.66 粒/g。

本带仍以草本为主，其含量从 75.13% 下降至 65.55%，木本含量则从 22.41% 增加至 32.27%，蕨类孢子含量略有下降，从 2.46% 降至 2.18%。主要科属的含量分别为：藜科（24.92%）、蒿属（24.79%）、禾本科（10.81%）、松属（19.88%）、丁香属（7.79%）、桦木属（1.62%）、落叶栎属（1.35%）和中华卷柏（1.09%）。

淡水藻类含量在本带急剧增加，为整个钻孔中最高，达 20.10%，主要为盘星藻（20.03%），并伴有极少量的环纹藻（0.03%）和双星藻（0.03%）。此外，海相沟鞭藻零星出现在两个样品中，有孔虫内衬在本带持续缺失。

4.2.3 带Ⅲ：中更新世—晚全新世 (0.6~0.004 Ma; 40~0.5 m)

本带的孢粉浓度急剧增加，从 5.66 粒/g 升至 341.23 粒/g，为整个钻孔最高值。

本带的草本含量持续降低，为 64.17%，主要科属为藜科（26.99%）、蒿属（17.82%）、禾本科（10.18%）。木本含量持续增加，为 34.31%，主要为松属（18.47%）、丁香属（4.36%）、桦木属（4.26%）及落叶栎属（2.72%）。蕨类含量持续降低，为 1.52%，主要为中华卷柏（0.46%）。

淡水藻类含量在本带略有降低，为 19.03%，但环纹藻和双星藻的含量却有增加，分别为 4.53% 和 0.35%，盘星藻的含量（14.15%）较带Ⅱ有所降低。此外，海相沟鞭藻开始出现在多个样品中，有孔虫内衬出现在一个样品中。

5 讨 论

5.1 莱州湾南岸的古植被演替

综合 HLL01 钻孔的孢粉记录，其含量整体上以草本为主，木本次之，蕨类含量最低，指示晚上新世以来莱州湾南岸的古植被类型变化不大，主要为草原–森林草原交替波动。

5.1.1 晚上新世—早更新世草原植被

在晚上新世—早更新世（7.5~1.1 Ma）阶段，草本花粉含量达到整个钻孔的最高值（75.13%），主要以藜科（28.76%）、蒿属（23.53%）和禾本科（11.73%）等为主的陆生草本植物。木本主要以松属（13.67%）为主，并伴生一些丁香属（2.65%）、桦木属（1.26%）及落叶栎属（1.11%）等阔叶乔木类。考虑到松属花粉的超代表性（伍婧等，2013），如果剔除松属花粉，木本花粉的含量则很低（8.74%）。蕨类含量最低（2.46%），主要为中华卷柏（1.03%）和铁线蕨属（0.75%）。孢粉记录指示从晚上新世进入早更新世之后，莱州湾南岸及其附近地区的植物群落主要以藜科、蒿属及禾本科为主的草原。

5.1.2 早更新世—中更新世草原–森林草原过渡植被

在早更新世—中更新世（1.1~0.2 Ma）阶段，草本和蕨类孢子含量略有下降，分别为 65.55% 和 2.18%。木本含量则略有增加，为 32.27%；剔除具有超代表性的松属花粉，含量为 12.39%。孢粉记录指示莱州湾南岸及其附近地区的植被类型开始由以藜科（24.92%）、蒿属（24.79%）及禾本科（10.81%）为主的草原，向其间分布着一些以松属为代表的针叶木本和以丁香属、桦木属及落叶栎属等为代表的阔叶木本植物的森林草原过渡。

5.1.3 中更新世—晚全新世森林草原植被

在中更新世—晚全新世（0.2~0.004 Ma）阶段，草本和蕨类孢子含量持续降低，分别为 64.17% 和 1.52%，木本含量持续增加（34.31%），主要为松属（18.47%）、丁香属（4.36%）、桦木属（4.26%）及落叶栎属（2.72%）。剔除松属花粉，木本花粉含量为 15.84%。孢粉记录指示莱州湾南岸及其附近地区在中更新世—晚全新世阶段，植被类型已经由草原–森林草原过渡阶段，演替为森林草原植被。

5.2 莱州湾南岸的古水文演化

HLL01 钻孔的保存着大量的淡水藻类，主要为盘星藻属、环纹藻属和双星藻属。盘星藻是一类广域性分布的水生藻类植物，生活在淡水或微咸水湖泊、池塘、洼地或流速不大的小河等各种静止水体中，硬水中更为常见（唐领余等，2013）。现生盘星藻几乎都生于淡水，迄今为止海产种类没有发现（张玉兰和张敏斌，2002）。环纹藻化石在中国第四纪地层中有广泛的分布，是一种具指相意义、对气候有较强适应性的藻类，往往与莎草科、香蒲、眼子菜、泽泻、浮萍等水生植物共同出现，且经常与淡水生盘星藻、双星藻、鼓藻共生，反映温热湿润的淡水湖沼或河漫滩积水沼泽的沉积环境（王开发和韩信斌，1983；柯曼红，1995；张玉兰和张敏斌，2002）。现代双星藻一般生长于含有机质丰富的浅的、静止的淡

水中, 尤其是小水坑、沼泽等水体最适宜它们生长繁殖。个别种类能在半咸水中生活, 少数种类生长在潮湿土壤上(胡鸿均等, 1980; 王开发等, 1982; 张玉兰和张敏斌, 2002)。综合 HLL01 钻孔的淡水藻类化石记录, 在晚上新世—早更新世阶段, 含量为整个钻孔的最低值(5.18%), 主要为盘星藻(5.11%), 并伴有极少量的环纹藻(0.06%)和双星藻(0.01%), 并结合周边钻孔资料(黄猛等, 2019; 姜兴钰等, 2020), 指示莱州湾南岸及其附近地区并没有大的河流注入, 或形成面积较大的湖泊, 降水量较少, 气候偏干。在早更新世—中更新世阶段, 淡水藻类含量急剧增加, 为整个钻孔中最高(达 20.10%), 主要为盘星藻(20.03%), 指示莱州湾南岸及其附近地区可能有大的河流注入, 或有大的湖泊形成, 降水量增加, 气候变得湿润。在中更新世—晚全新世阶段, 淡水藻类含量在本带略有降低(19.03%), 指示莱州湾南岸及其附近地区河流注入量开始减少, 湖泊面积也开始萎缩, 气候变得寒冷偏干。

5.3 莱州湾南岸的海平面波动

除了极少数淡水种以外, 沟鞭藻类绝大多数生长在海洋里, 几乎出现在所有的海洋沉积物中, 加之其个体小, 数量丰富, 对环境反应灵敏, 常常用来反映河口、湖泊及微咸内陆海等水环境, 识别古海洋环境、重建古海水温度、追踪洋流演化历史、恢复和重建古海岸线、揭示海侵和海退事件等, 特别是在缺乏钙质和硅质微体化石的情况下(Zonneveld et al., 1997, 2001, 2007; Morzadec-Kerfourn, 2005; van Soelen et al., 2010), 已成为古生物学、古海洋学研究的一个重要手段(Hao et al., 2020)。

综合 HLL01 钻孔的海相化石记录, 在晚上新世—早更新世阶段, 海相沟鞭藻和有孔虫内衬均缺失; 在早更新世—中更新世阶段, 有孔虫内衬持续缺失, 只在两个样品中零星出现海相沟鞭藻; 但在中更新世—晚全新世阶段, 海相沟鞭藻开始出现在多个样品中, 有孔虫内衬也出现在一个样品中。海相沟鞭藻和有孔虫内衬记录显示在晚上新世—中更新世阶段, 化石缺失或零星出现在两个样品中, 指示莱州湾南岸及其附近地区, 在该阶段并没有出现大规模海侵事件; 但是, 到了中更新世—晚全新世阶段, 海相沟鞭藻出现在多个样品中, 同时, 有孔虫内衬也出现在一个样品中, 指示研究区在该阶段出现了较为明显的大规模海侵事件。

6 结　论

综合 HLL01 钻孔的孢粉、淡水藻类、海相沟鞭藻及有孔虫内衬等微体化石记录, 恢复和重建了晚上新世以来莱州湾南岸及其附近地区的植被环境及海平面变迁, 具体如下:

(1)晚上新世—早更新世(6.8~1.6 Ma)温暖偏干期, 莱州湾南岸及其附近地区的植物群落主要以藜科、蒿属及禾本科为主的草原, 极低的淡水藻类含量也指示研究区并没有大的河流注入, 或大的湖泊形成, 降水量较少。

(2)早更新世—中更新世阶段(1.6~0.6 Ma)温暖湿润期, 莱州湾南岸及其附近地区的植物群落开始由草原向森林草原过渡, 急剧增加的淡水藻类, 指示莱州湾南岸及其附近地区可能有大的河流注入, 或形成较大规模的湖泊, 降水量增加。

(3)中更新世—晚全新世阶段(0.6~0.004 Ma)寒冷偏干期, 莱州湾南岸及其附近地区的植被类型已经成为森林草原植被。淡水藻类含量略有降低, 指示研究区的河流注入量开始减少, 湖泊面积也开始萎缩。同时, 海相沟鞭藻和有孔虫内衬等海相化石出现在多个样品中, 指示研究区在该阶段出现了较为明显的大规模海侵事件。

但是, 由于本钻孔研究的孢粉样品数量较少, 只参考古地磁地层学结果建立了年代框架, 缺乏一些精准测年的数据, 使得一些重大的气候事件在本研究中没有被揭示出来。今后要加大对钻孔进行高分辨率的孢粉分析, 增加测年(特别是 AMS ^{14}C 测年)数据, 结合周边古环境重建记录, 揭示莱州湾南岸及其附近地区的古植被演替、古环境变迁及古海平面波动。

致谢: 感谢南宁师范大学省部级重点实验室创新基地大学生创新实践训练计划项目(S202310603131, S202310603061)对本研究的支持! 审稿专家和编辑对本文的修改完善提出了很多宝贵的意见和建议, 在此表示衷心感谢!

References

Allen M B, MacDonald D I M, Zhao X, Vincent S J, Brouet-Menzies C. 1997. Early Cenozoic two phase extension and Late Cenozoic thermal subsidence and inversion of the Bohai Basin, northern

China[J]. Marine and Petroleum Geology, 14(7): 951−972.

Bi X, Wen X, Yi H, Wu X, Gao M. 2014. Succession in soil and vegetation caused by coastal embankment in southern Laizhou Bay, China−Flourish or degradation[J]. Ocean & Coastal Management, 88: 1−7.

Brown C A. 2008. Palynological Techniques[M]. College Station, Texas, American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation.

Chen Ming, Chen Jianguo, Wang Jianfen. 1991. The evolutional trend of swamping, salting and desertization along the coast of Bohai Sea and its relationship to global change[J]. Quatternary Sciences, 11(2): 113−122 (in Chinese with English abstract).

Chen X Y, Liu D H, Yin P, Liu J Q, Cao K, Gao F. 2019. Temporal and spatial evolution of surface sediments characteristics in the Dagu River estuary and their dynamic response mechanism[J]. China Geology, 2(3): 325−332.

Cong J Y, Long H Y, Zhang Y, Wang N. 2021. Ecological environment response of benthic foraminifera to heavy metals and human engineering: A case study from Jiaozhou Bay, China[J]. China Geology, 5(1): 12−25.

DeMenocal P B. 2004. African climate change and faunal evolution during the Pliocene−Pleistocene[J]. Earth and Planetary Science Letters, 220(1/2): 3−24.

Duan X Y, Li Y X, Li X G, Yin P. 2018. Historical records and the sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in the East China Sea[J]. China Geology, 1(4): 505−511.

Editorial Committee of Vegetation Map of China, Chinese Academy of Sciences. 2007. Vegetation Map of the People's Republic of China (1: 1000000) [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).

Gao M S, Guo F, Huang X Y, Hou G H. 2019. Sediment distribution and provenance since Late Pleistocene in Laizhou Bay, Bohai Sea, China[J]. China Geology, 2: 16−25.

Gao M S, Hou G H, Dang X Z, Huang X Y. 2020. Sediment distribution characteristics and environment evolution within 100 years in western Laizhou Bay, Bohai Sea, China[J]. China Geology, 3: 445−454.

Giosan L, Syvitski J, Constantinescu S, Day J. 2014. Climate change: Protect the world's deltas[J]. Nature, 516: 31−33.

Grant G R, Naish T R, Dunbar G B, Stocchi P, Kominz M A, Kamp P J J, Tapia C A, McKay R M, Levy R H, Patterson M O. 2019. The amplitude and origin of sea−level variability during the Pliocene epoch[J]. Nature, 574: 237−241.

Guo Fei, Gao Maosheng, Hou Guohua, Kong Xianghuai, Zhao Jinmin, Zheng Yimin, Zhao Guangmin. 2016. Geochemical characteristics of sediment in core 07 since the Late Pleistocene in Laizhou Bay[J]. Acta Oceanology Sinica, 21(3): 144−155 (in Chinese with English abstract).

Hao Xiudong, Ouyang Xuhong, Xie Shiyou, Wei Xingping. 2020. Modern palynomorph assemblages and their relationships with vegetation in karst areas of Chongqing, Southwestern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 45(15): 5266−5276 (in Chinese with English abstract).

Hao X D, Ouyang X H, Zheng L B, Zhuo B, Liu Y L. 2020. Palynological evidence for Early to Mid−Holocene sea−level fluctuations over the present−day Ningshao Coastal Plain in eastern China[J]. Marine Geology, 426: 106213.

He L J, Wang J Y. 2003. Cenozoic thermal history of the Bohai Bay Basin: Constraints from heat flow and coupled basin−mountain modeling[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 28: 421−429.

Hu S B, O'Sullivan P B, Raza A, Barry P K. 2001. Thermal history and tectonic subsidence of the Bohai Basin, northern China: A Cenozonic rifted and local pull−apart basin[J]. Physics of the Earth and Planetary Interios, 126: 221−235.

Hu Hongjun, Li Yaoying, Wei Yinxin, Zhu Huizhong, Chen Jiayou. 1980. Chinese Freshwater Algae[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers (in Chinese).

Huang Meng, Li Mingchen, Fan Hangyu, Zhang Xiaofei, Li Jijun, Xu Qinmian. 2019. Late Cenozoic climate and sedimentary environment evolution of the north western evolution of the north western coast of the Bohai Bay revealed by borehole QHJ01[J]. Acta Geologica Sinica, 93(4): 899−914 (in Chinese with English abstract).

Jiang Xingyu, Yi Liang, Tian Lizhu, Shi Peixin, Chen Yongsheng, Wang Hong, Wang Fu, Li Jianfen, Shang Zhiwen. 2016. Magnetostratigraphic chronology of borehole HLL01, south coast of Laizhou Bay[J]. Geological Bulletin of China, 35(10): 1669−1678 (in Chinese with English abstract).

Jiang Xingyu, Wang Lin, Hao Xiudong, Wang Fu, Tian Lizhu, Shi Peixin, Chen Yongsheng, Wang Hong, Li Jianfen, Shang Zhiwen. 2020. Late Pliocene palynological record and paleoenvironmental change from the borehole HLL02 in the south coast of Laizhou Bay, Bohai Sea, China[J]. Geological Survey and Research, 43(4): 341−347 (in Chinese with English abstract).

Ke Manhong. 2007. Discovery and significance of the Concentricystes fossils on Loess Plateau[J]. Journal of Xi'an Engineering University, (2): 90−93 (in Chinese with English abstract).

Li Qian, Yi Liang, Liu Suzhen, Yu Hongjun, Chen Yanping, Xu Xiangyong, Li Ping, Deng Chenlong. 2016. Rock magnetic properties of the Lz908 borehole sediments from the southern Bohai Sea, eastern China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 59(5): 1717−1728 (in Chinese with English abstract).

Lin Fang, Wang Jianzhong, Li Jianfen, Pei Yandong, Kang Hui. 2005. Characteristics of microfossil assemblages and evolution of the sedimentary environment since the Late Quaternary in the Laizhou Bay, Bohai Sea[J]. Geological Bulletin of China, 24(9): 879−884 (in Chinese with English abstract).

Lisiecki L E, Raymo M E. 2005. A Pliocene−pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}O$ records[J]. Paleoceanography, 20(1): 1−17.

Liu Enfeng, Zhang Zulu, Shen Ji. 2004. Spore−pollen records of environmental change on south coast plain of Laizhou Bay since the Late Pleistocene[J]. Journal of Palaeogeography, 6(1): 78−84 (in Chinese with English abstract).

Liu Y, Huang H, Qi Y, Liu X, Yang X. 2016. Holocene coastal morphologies and shoreline reconstruction for the southwestern coast of the Bohai Sea, China[J]. Quaternary Research, 86(2): 144−161.

Lunt D J, Foster G L, Haywood A M, Stone E J. 2008. Late Pliocene Greenland glaciation controlled by a decline in atmospheric CO_2 levels[J]. Nature, 454: 1102−1105.

Lü Houyuan. 1989. Spore−pollen records and paleoenvironment analysis since Late Pleistocene on the south Bohai Sea[J]. Journal of Oceanography of Huanghai and Bohai Sea, 7(2): 11−25 (in Chinese with English abstract).

Maher L J. 1981. Statistics for microfossil concentration measurements

employing samples spiked with marker grains[J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 32: 153−158.

Mei S, Chu H X, Dong L Y, Fang Z H, Li P F, Zhang F F, Shan R, Zhao T H. 2019. Influencing factors and evaluation application of regional crustal stability in the Bohai Strait[J]. China Geology, 2(3): 354−363.

Meng Qinghai, Han Mei, Zhao Minghua, Jiang Aixia. 1999. A preliminary study of the Mihe River alluvial diluvial fan and the palaeochannels[J]. Journal of Shandong Normal University(Natural Science), 14(1): 46−50 (in Chinese with English abstract).

Morzadec−Kerfourn M T. 2005. Interaction between sea−level changes and the development of littoral herbaceous vegetation and autotrophic dinoflagellates [J]. Quaternary International, 133–134: 137−140.

Nakagawa T, Kitagawa H, Yasuda Y, Tarasov P E, Nishida K, Gotanda K, Sawai Y, Yangtze River Civilization Program Members. 2003. Asynchronous climate changes in the North Atlantic and Japan during the last termination[J]. Science, 299: 688−691.

Pickering M, Horsburgh K, Wells N, Green M. 2012. The impact of future sea−level rise on the European Shelf tides[J]. Continental Shelf Research, 35: 1−15.

Qi J, Yang Q. 2010. Cenozoic structural deformation and dynamic processes of the Bohai Bay basin province, China[J]. Marine & Petroleum Geology, 27(4): 757−771.

Song Changqing, Sun Xiangjun. 1997. Establishment of transfer functions of the pollen−climatic factors in Northern China and the quantitative climatic reconstruction at DJ core[J]. Acta Botanica Sinica, 39(6): 554−560 (in Chinese with English abstract).

Tang Lingyu, Mao Limi, Lü Xinmiao, Ma Qingfeng, Zhou Zhongze, Yang Chunlei, Kong Zhaochen, Batten D J. 2013. Palaeoecological and palaeoenvironmental significance of someimportant spores and micro−algae in Quaternary deposits[J]. Chinese Science Bulletin, 58: 3125−3139 (in Chinese with English abstract).

Tian Lixin, Han Mei, Wang Min, Wei Fan, Kong Fanbiao, Kong Xianglun. 2021. Spatiotemporal evolution and stability of land use type in the coastal zone of the south coast in Laizhou Bay[J]. Rearch of Soil and Water Conservation, 28(4): 259−274 (in Chinese with English abstract).

Tian Lizhu, Tao Youbing, Jiang Xingyu, Chen Yongsheng, Shi Peixin, Shang Zhiwen, Li Jianfen, Wang Fu, Wang Hong. 2016. Reconstruction of the Holocene relative sea level change for the south coast of Laizhou Bay[J]. Geological Bulletin of China, 35(10): 1679−1691 (in Chinese).

van Soelen E E, Lammertsma E I, Cremer H, Donders T H, Sangiorgi F, Brooks G R, Larson R A, Sinninghe Damsté J S, Wagner−Cremer F, Reichart G J. 2010. Late Holocene sea−level rise in Tampa Bay: Integrated reconstruction using biomarkers, pollen, organic−walled dinoflagellate cysts, and diatoms [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 86(2): 216−224.

Wang F, Li J F, Shi P X, Shang Z W, Li Y, Wang H. 2019. The impact of sea−level rise on the coast of Tianjin−Hebei, China[J]. China Geology, 2(1): 26−39.

Wang Kaifa, Han Xinbin. 1983. Study on the Cenozoic fossil Concentricystes of East China[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 22: 468−473 (in Chinese with English abstract).

Wang Kaifa, Wang Xianzeng. 1983. Theory of Pollen Analysis[M]. Beijing: Peking University Press (in Chinese).

Wang Kaifa, Zhang Yulan, Jiang Hui. 1982. Discovery of *Zygnemataceae* fossils in the sediments of the East Sea and Yellow Sea and its palaeogeographic significance[J]. Chinese Science Bulletin, 22: 1387−1389 (in Chinese).

Wu Jing, Ma Yuzhen, Sang Yanli, Meng Hongwei, Hu Caili. 2013. Representation of major pollen taxa from surface samples of Daluoshan Mountain, Ningxia[J]. Acta Plaeotologica Sinica, 52(1): 57−67 (in Chinese with English abstract).

Wu Shiguo, Yu Zhaohua, Zou Dongbo, Zhang Haiying. 2006. Structural features and Cenozoic evolution of the Lu Fault Zone in the Laizhou Bay, Bohai Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 6: 101−110 (in Chinese with English abstract).

Wu Zhengyi. 1980. Vegetation of China[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).

Xue Chunting, Ding Dong. 2008. Weihe River−Mihe River Delta in south coast of Bohai Sea, China: Sedimentary sequence and architecture[J]. Scientia Geographica Sinica, 28(5): 672−676 (in Chinese with English abstract).

Yang Jilong, Xu Qinmian, Hu Yunzhuang, Yuan Haifan, Xiao Guoqiao, Zhou Xinying. 2016. Palaeovegetation evolution and its response to the climate change since Middle Pleistocene in the North China Plain[J]. Geological Bulletin of China, 35(10): 1745−1751 (in Chinese).

Yao Z, Guo Z, Xiao G, Wang Q, Shi X, Wang X. 2012. Sedimentary history of the western Bohai coastal plain since the Late Pliocene: implications on tectonic, climatic and sea−level changes[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 54: 192−202.

Yi L, Deng C L, Xu X Y, Yu H J, Qiang X K, Jiang X Y, Chen Y P, Su Q, Chen G Q, Li P, Ge J Y, Li Y. 2015. Paleo−megalake termination in the Quaternary: Paleomagnetic and water−level evidence from south Bohai Sea, China[J]. Sedimentary Geology, 319: 1−12.

Yin P, Duan X Y, Gao F, Li M N, Li S H, Qiu J D, Zhou L Y. 2018. Coastal erosion in Shandong of China: status and protection challenges[J]. China Geology, 1(4): 512−-521.

Yu Hongjun, Han Deliang, Liu Xuan, Shan Qiumei. 1999. Study on the disintegration of marine stratum in the northern shelf region of nearshore of China[J]. Acta Oceanology Sinica, 21(3): 83−90 (in Chinese with English abstract).

Yu Z H, Wu G, Zou D B, Feng D Y, Zhao H Q. 2008. Seismic profiles across the middle Tan−Lu fault zone in Laizhou Bay, Bohai Sea, eastern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 33: 383−394.

Zachos J, Pagani M, Sloan L, Thomas E, Billups K. 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present[J]. Science, 292: 686−693.

Zhang Xuliang, Gu Dongqi, Chen Dongjing, Sui Yuzhu. 2008. Flora characteristics of vascular plants of coastal wetlands of southern Laizhou Bay and its protection[J]. Ecology and Environment, 17(1): 86−92 (in Chinese).

Zhang Yulan, Zhang Minbin. 2002. Discovery of freshwater algae in marine sediments and paleoenvironmental significance[J]. Marine Science Bulletin, 21(2): 36−40 (in Chinese with English abstract).

Zhang Y Q, Dong S W, Shi W. 2003. Cretaceous deformation history of the middle Tan−Lu fault zone in Shandong Province, eastern China[J]. Tectonophysics, 363: 243−258.

Zhang Y, Chen B, Ning Z, Yang Y F, Hu G, Zhang X B, Wang H J. 2019. Investigation and numerical simulation of summer sedimentation in Jiaozhou Bay, China[J]. China Geology, 2(4): 522−529.

Zhao Songling. 1995. Problem of warrant renewal consideration in the study of sedimentary environment of Yellow Sea and East China Sea[J]. Marine Science, 4: 55−57 (in Chinese with English abstract).

Zhao Y, Yu Z C, Zhao W W. 2011. Holocene vegetation and climate histories in the eastern Tibetan Plateau: Controls by insolation−driven temperature or monsoon−derived precipitation changes[J]. Quaternary Science Reviews, 30: 1173−1184.

Zhao G M, Ye S Y, Yuan H M, Yang S X, He L, Edward A L. 2019. A new−type sampler using to collect undisturbed samples of shallow drilling sediment core in the coastal wetland geological surveys[J]. China Geology, 2(3): 398−399.

Zheng Z, Wei J H, Huang K Y, Xu Q H, Lu H Y, Tarasov P, Luo C X, Beaudouin C, Deng Y, Pan A D, Zheng Y W, Luo Y L, Nakagawa T, Li C H, Yang S X, Peng H H, Cheddadi R. 2014. East Asian pollen database: Modern pollen distribution and its quantitative relationship with vegetation and climate[J]. Journal of Biogeography, 41: 1819−1832.

Zhuang Zhengye, Li Jianhua, Qiu Shihua, Xian Ziqiang, Bo Guancheng, Wang Yongji. 1987. Holocene transgraession and its layers in the East Coast of Laizhou Gulf, Bohai[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2: 31−39 (in Chinese with English abstract).

Zonneveld K A F, Versteegh G J M, de Lange G J. 1997. Preservation of organic−walled dinoflagellate cysts in different oxygen regimes: A 10, 000 years natural experiment[J]. Marine Micropaleontology, 29: 393−405.

Zonneveld K A F, Verrsteegh G J M, de Lange G J. 2001. Palaeoproductivity and post depositional aerobic organic matter decay reflected by dinoflagellate cyst assemblages of the Eastern Mediterranean S1 sapropel[J]. Marine Geology, 172: 181−195.

Zonneveld K A F, Bockelmann F, Holzwarth U. 2007. Selective preservation of organic−walled dinoflagellate cysts as a tool to quantify past net primary production and bottom water oxygen concentrations[J]. Marine Geology, 237: 109−126.

附中文参考文献

陈明, 陈建国, 王建芬. 1991. 环渤海沿岸沼泽化、盐渍化和沙漠化的演化及其与全球变化的关系[J]. 第四纪研究, 11(2): 113−122.

郭飞, 高茂生, 侯国华, 孔祥淮, 赵金明, 郑懿珉, 赵广明. 2016. 莱州湾 07 钻孔沉积物晚更新世以来的元素地球化学特征[J]. 海洋学报, 21(3): 145−155.

胡鸿均, 李尧英, 魏印心, 朱蕙忠 陈嘉佑. 1980. 中国淡水藻类 [M]. 上海: 上海科学技术出版社.

郝秀东, 欧阳绪红, 谢世友, 魏兴萍. 2020. 重庆喀斯特地区现代花粉组合与植被的关系[J]. 生态学报, 40(15): 5266−5276.

黄猛, 李明辰, 樊航宇, 张晓飞, 李继军, 胥勤勉. 2019. 渤海湾西北岸 QHJ01 孔记录的晚新生代气候与沉积环境演化[J]. 地质学报, 93(4): 899−914.

姜兴钰, 王琳, 郝秀东, 王福, 田立柱, 施佩歆, 陈永胜, 王宏, 李建芬, 商志文. 2020. 晚上新世以来莱州湾南岸 HLL02 钻孔的孢粉记录及其古环境演变[J]. 地质调查与研究, 43(4): 341−347.

姜兴钰, 易亮, 田立柱, 施佩歆, 陈永胜, 王宏, 王福, 李建芬, 商志文. 2016. 莱州湾南岸 HLL01 孔磁性地层定年[J]. 地质通报, 35(10): 1669−1678.

柯曼红. 1995. 黄土高原区环纹藻化石的发现及其意义[J]. 西安地质学院学报, (2): 90−93.

李倩, 易亮, 刘素贞, 于洪军, 陈燕萍, 徐兴永, 李萍, 邓成龙. 2016. 渤海南部莱州湾 Lz908 孔沉积物的岩石磁学性质[J]. 地球物理学报, 59(5): 1717−1728.

林防, 王建中, 李建芬, 裴艳东, 康慧. 2005. 渤海莱州湾第四纪晚期以来微体化石组合特征和沉积环境演化[J]. 地质通报, 24(9): 879−884.

刘恩峰, 张祖陆, 沈吉. 2004. 莱州湾南岸滨海平原晚更新世以来古环境演变的孢粉记录[J]. 古地理学报, 6(1): 78−84.

吕厚远. 1989. 渤海南部晚更新世以来的孢粉组合及古环境分析[J]. 黄渤海海洋, 7(2): 11−25.

孟庆海, 韩美, 赵明华, 姜爱霞. 1999. 弥河冲洪积扇和古河道初步研究[J]. 山东师大学报 (自然科学版), 14(1): 46−50.

宋长青, 孙湘君. 1997. 花粉−气候因子转换函数建立及其对古气候因子定量重建[J]. 植物学报, 39(6): 554−560.

唐领余, 毛礼米, 吕新苗, 马庆峰, 周忠泽, 杨春蕾, 孔昭宸, Batten D J. 2013. 第四纪沉积物中重要蕨类孢子和微体藻类的古生态环境指示意义[J]. 科学通报, 58: 3125−3139.

田立鑫, 韩美, 王敏, 魏帆, 孔凡彪, 孔祥伦. 2021. 莱州湾南岸海岸带土地利用时空演变及稳定性研究[J]. 水土保持研究, 28(4): 259−274.

田立柱, 陶有兵, 姜兴钰, 陈永胜, 施佩歆, 商志文, 李建芬, 王福, 王宏. 2016. 莱州湾南岸全新世相对海平面变化重建[J]. 地质通报, 35(10): 1679−1691.

王开发, 王宪曾. 1983. 孢粉学概论[M]. 北京: 北京大学出版社, 1−4.

王开发, 韩信斌. 1983. 我国东部新生界环纹藻化石研究[J]. 古生物学报, 22: 468−473.

王开发, 张玉兰, 蒋辉. 1982. 双星藻科化石在东、黄海沉积中的发现及其古地理意义[J]. 科学通报, 22: 1387−1389.

伍婧, 马玉贞, 桑艳礼, 蒙红卫, 胡彩莉. 2013. 宁夏大罗山表土样品中主要花粉类型的代表性[J]. 古生物学报, 52(1): 57−67.

吴时国, 余朝华, 邹东波, 张海英. 2006. 莱州湾地区郯庐断裂带的构造特征及其新生代演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 6: 101−110.

吴征镒. 1980. 中国植被 [M]. 北京: 科学出版社.

薛春汀, 丁东. 2008. 渤海莱州湾南岸潍河−弥河三角洲: 沉积序列和沉积格架[J]. 地理科学, 28(5): 672−676.

杨吉龙, 胥勤勉, 胡云壮, 袁海帆, 肖国桥, 周新郢. 2016. 中更新世以来华北平原植被演化及其气候响应[J]. 地质通报, 35(10): 1745−1751.

于洪军, 韩德亮, 刘选, 单秋美. 1999. 中国近海北部陆架海相地层解体问题的研究[J]. 海洋学报, 21(3): 83−90.

张绪良, 谷东起, 陈东景, 隋玉柱. 2008. 莱州湾南岸滨海湿地维管束植物的区系特征及保护[J]. 生态环境, 17(1): 86−92.

张玉兰, 张敏斌. 2002. 海洋沉积物中淡水藻类的发现及其古环境意义[J]. 海洋通报, 21(2): 36−40.

赵松龄. 1995. 黄东海陆架沉积环境研究中值得重新思考的问题[J]. 海洋科学, 4: 55−57.

中国科学院中国植被图编辑委员会. 2007. 中华人民共和国植被图 (1: 1000000) [M]. 北京: 地质出版社.

庄振业, 李建华, 仇士华, 冼自强, 薄官成, 王永吉. 1987. 莱州湾东岸的全新世海侵和地层[J]. 海洋湖沼通报, 2: 31−39.