

渤、黄、东海 7 000 年以来海岸线和海底沉积物厚度的演变

程 鹏

(厦门大学海洋与地球学院,福建 厦门 361102)

摘要: [目的] 自全新世最大海侵以来,渤、黄、东海西部岸线发生了显著变化,陆架区发育了多个沉积体系,但这一区域的古岸线和海底沉积物厚度的演变还没有全面认识.[方法] 综合前人研究的结果,整理恢复渤、黄、东海自 7 000 年来的 12 条古岸线,同时通过收集钻孔数据,估算古岸线同时期的海底沉积厚度.[结果] 渤海西部的成陆过程在宋代黄河改道后趋于稳定,自公元 1855 年黄河回归渤海后,现代黄河三角洲发育,形成现代海岸线.苏北中部的成陆过程在汉代基本达到稳定,黄河在苏北入海导致岸线快速向海推进,自黄河再次改道后,废黄河口岸线受侵蚀后退,形成现代岸线.长江三角洲以江心洲并入北岸的形式向东南方向发展,河口逐渐变窄,发育速度逐渐加快.长江和黄河的入海泥沙在黄河口、山东半岛沿岸、苏北、长江口及浙闽沿岸形成了主要的沉积区,以长江三角洲的沉积厚度最大.[结论] 本文构建了渤、黄、东海西部古岸线和沉积物厚度数据集,可为全新世海洋沉积过程和环境变迁等研究提供数据支撑.

关键词: 渤海;黄海;东海;海岸线演变;陆架沉积;全新世

中图分类号:P737.1

文献标志码:A

文章编号:0438-0479(2025)03-0446-15

Evolution of coastline and seafloor sediment thickness of the Bohai, Yellow and East China Seas over the past 7 000 years

CHENG Peng

(College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract: [Objective] Since the maximum Holocene transgression, the western coasts of the Bohai, Yellow, and East China Seas have undergone significant changes, leading to the development of various sedimentation systems on the continental shelves. Changes in coastline and water depth have altered the hydrodynamic processes in the Bohai, Yellow, and East China Seas, subsequently impacting sediment transport and aquatic ecosystems. However, a comprehensive understanding of the evolution of coastlines and seabed sediments in these regions over the past 7 000 years has not been reconstructed. This study aims to establish a dataset of ancient coastlines and sediment thickness in the Bohai, Yellow, and East China Seas over the past 7 000 years, thereby providing essential data support for the investigation of ancient marine environments and sedimentary processes. [Methods] Previous studies have reconstructed the Holocene coastlines of the Bohai Sea and the western coasts of the Yellow and East China Seas. However, these investigations have primarily focused on specific regions. In this study, we identified ancient coastlines from 12 distinct time periods in the northern Jiangsu and Yangtze River Delta regions, which encompass the longest coastline within the study area. Subsequently, we established the corresponding coastlines in adjacent regions, resulting in a comprehensive reconstruction of the coastlines for the Bohai Sea and the western shores of the Yellow and East China Seas across various time periods. Additionally, we collected a total of 164 long sediment cores and 296 shallow sediment cores. Utilizing the age-thickness data obtained from these sediment cores, we estimated the sediment thickness for each paleocoastline period and interpolated this sediment thickness across the Bohai Sea and the

收稿日期:2024-11-16 录用日期:2025-04-03

基金项目:国家自然科学基金(42076008)

Email:pcheng@xmu.edu.cn

引文格式:程鹏. 渤、黄、东海 7 000 年以来海岸线和海底沉积物厚度的演变[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2025, 64(3): 446-460.

Citation: CHENG P. Evolution of coastline and seafloor sediment thickness of the Bohai, Yellow and East China Seas over the past 7 000 years[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2025, 64(3): 446-460. (in Chinese)



western Yellow and East China Seas to delineate the distribution of bottom sediment thickness. [Results] Following the maximum Holocene transgression, the coastlines of Bohai Bay and Laizhou Bay progressively advanced seaward. This process stabilized after the diversion of the Yellow River during the Song Dynasty. The modern Yellow River Delta began to form after 1855, when the river changed its course and entered the Bohai Sea, resulting in the establishment of the present coastline. The epeirogenic process of coastal plain in central northern Jiangsu occurred before 5200 a. B. P., and the coastline tended to reach a stable state during 4500—800 a. B. P.. Following the Yellow River's entry into the sea in northern Jiangsu, the coastline in this region advanced rapidly since Song Dynasty, especially at the site of abandoned Yellow River Estuary. After the Yellow River's subsequent diversion in Qing Dynasty, the abandoned estuary experienced erosion and retreat, while the coastlines on both its northern and southern sides continued to advance seaward, resulting in the formation of the modern coastline. Approximately 7 000 years ago, the head of Yangtze River Estuary was located near Zhenjiang and the estuary exhibited a funnel shape. The Yangtze River Delta gradually formed through the emergence of river islands that expanded toward the southeast as it developed northward along the banks. The estuary narrowed over time, and the rate of development increased. The sediment from the Yangtze and Yellow Rivers has created significant deposition areas along the Yellow River Estuary, the Shandong Peninsula coast, northern Jiangsu, the Yangtze River Estuary, and the coasts of Zhejiang and Fujian. The Yangtze River Delta has the thickest sediment accumulation and its sediment center has been moving southeastward with the development of estuaries. The central Yellow Sea and the southwestern region of Cheju Island are characterized as low sedimentation areas. The land formation rates in the western Bohai Sea, northern Jiangsu, and the Yangtze River Delta were relatively large, whereas the Liaodong Bay and Hangzhou Bay experienced slower land formation rates. All five regions have exhibited a noticeable increase in the rate of land formation over the past 400 years. [Conclusions] This study compiled a database of paleocoastline and seabed sediment thickness in the western Bohai, Yellow and East China Seas and revealed the land formation processes since the past 7000 a. B. P.. The findings provide essential data support for research on sediment transport and paleoenvironment evolution in these regions.

Keywords: Bohai Sea; Yellow Sea; East China Sea; coastline evolution; continental shelf sedimentation; Holocene

自末次盛冰期以来,全球海平面逐步上升^[1],在距今 7 000 年左右,中国东部沿海的相对海平面接近或达到现今的海平面高度,其后海平面波动较小,相对稳定^[2-5]. 古岸线的重建显示渤海湾^[6]和苏北-杭州湾平原^[7]在这一时期出现了最大海侵. 由于中国东部入海河流携带了大量泥沙,渤海和黄、东海西侧的海岸线在最大海侵后发生了显著变化,同时,在渤、黄、东海的陆架上也形成了相当厚度的全新世沉积. 海岸线和水深的变化改变了渤、黄、东海的水动力过程,并进一步影响沉积物输运和水生生态系统,因此,重建渤、黄、东海 7 000 年以来的海岸线和海底沉积的演变过程,是反演和探究这些海区全新世以来环境变迁的基础.

已往的研究已重建了渤海和黄、东海西岸的全新世海岸线^[8]. 渤海西岸是渤海岸线变化最剧烈的区域,根据贝壳堤、牡蛎礁、三角洲叶瓣和海侵层的分布,薛春汀^[9]恢复了 7 000 年以来的 6 条海岸线. 北黄海为基岩海岸,岸线变化较小,南黄海岸线最主要的变化区域为江苏海岸,根据贝壳堤和古文化遗址的分布,朱诚等^[10]恢复了新石器时期的 4 条海岸线. 长江三角洲在全新世最大海侵以来,岸线以江心洲并入北岸的方式向东南方向发展,形成了 6 个完整的三角洲体^[11]. 浙江南部和福建沿海为基岩岸,海岸线变化较

小.《中国历史地图集》描述了历朝的海岸线^[12],李凤林等^[13]描述了渤海湾西岸历朝海陆分布,张忍顺^[14]则详细分析了江苏历史时期的海岸变迁.

河流入海泥沙除了充填成陆之外,在陆架上也发育了多种形式的沉积体系,包括水下三角洲、潮流沙脊和陆架泥质区等^[15]. 黄河入海泥沙在渤海西岸形成了巨大的三角洲,最大沉积厚度可达 20 m^[16-17]. 北黄海存在中部泥和辽东半岛沿岸泥,南黄海的主要沉积体包括中部泥、废黄河水下三角洲、黄海东南部泥以及苏北潮流沙脊. 长江三角洲是整个东海沉积厚度最大的区域,其沉积中心位于长江口东南方,厚度最大达 70 m 以上,浙闽沿岸的条状泥也是长江沉积物的汇,其泥质区绵延 800 km,最大厚度约 40 m^[18]. 济州岛西南部泥质区的分布范围大,但沉积厚度较小^[19]. 朝鲜半岛西南部泥质带的分布范围小,但沉积厚度大,最大超过 50 m,主要来源于韩国西海岸的河流^[20].

已有的全新世古岸线研究都是针对某个特定的区域,不同区域的古岸线年代也并不完全相同. 本文通过综合整理这些古岸线,将它们合并补充,得到不同时期的完整的渤海和黄、东海西侧的古岸线. 季有俊等^[21]依据前人研究得到的全新世沉积层厚度,绘制了渤、黄、东海 7 000 年以来的沉积厚度分布. 在此基础上,本文通过收集钻孔资料推断沉积速率,从而估

算每条古岸线所在时期的海底沉积厚度,旨在建立渤、黄、东海 7 000 年以来古海岸线和沉积厚度的数据集,为研究古海洋和海洋沉积过程提供数据支撑。

1 资料与方法

1.1 古岸线的恢复

本文收集研究区域的古岸线文献资料,通过地理信息系统(GIS)软件将文献中不同区域不同时期的古岸线进行数字化处理,建立古岸线数据集,再将这些岸线合成完整的渤、黄、东海西部古岸线。恢复古岸线

主要参考文献如表 1 所示。渤海和黄、东海西侧的古海岸线在平原地区,如渤海湾、苏北和长江三角洲等地区有较大变化,而在基岩海岸如辽东半岛、山东半岛及福建沿岸等地则变化很小。本文仅考虑平原地区的古岸线演变,假设基岩海岸的古岸线与现代岸线一致。由于在研究区域中苏北-长江三角洲的海岸线最长,以这一区域已恢复的古岸线为基础,确定了 12 个时期(如表 1 所示,其中清代包括 4 个时期),再针对每个时期在其他区域找出相应的岸线。若其他区域在同一时期没有对应的岸线数据,则根据这一地区前后时期的古岸线进行线性插值得到。

表 1 古岸线重建的参考文献

Tab. 1 References for the paleocoastline reconstruction

时期	辽东湾	渤海西岸	江苏海岸	长江口	杭州湾
7000—6500 a B. P.	[22-23]	[9]	[10]	[10-11]	[10]
6000—5200 a B. P.	[12,23-24]	[9,25]	[10]	[10-11]	[10]
4500—4000 a B. P.	[12,23,26]	[9,25]	[10]	[10-11]	[10,12]
3800—3000 a B. P.	[12]	[9,13,25]	[10]	[10-11]	[12]
汉代(2152—1730 a B. P.)	[12]	[12-13]	[12,14]	[10-11]	[12,27]
唐代(1332—1043 a B. P.)	[12]	[12-13]	[12,14]	[12,14]	[12,27]
宋代(990—671 a B. P.)	[12]	[12-13]	[12,14]	[12,14]	[12]
明代(582—306 a B. P.)	[12]	[12-13]	[12,14]	[12,14]	[12]
清代(312—42 a B. P.)	[12]	[12-13]	[14]	[12]	[12,27]

1.2 海底沉积物厚度的估算

渤、黄、东海的部分区域已有全新世沉积厚度的分布图^[18,28-30],同时还有大量的钻孔数据。本文收集了 164 个钻孔^[4,16-17,20,31-98]和 296 个浅层沉积物柱状样数据^[3,17,20,54,99-140],分布如图 1 所示。对于长钻孔,根据其年龄-厚度曲线得到不同时期的沉积速率,再根据沉积速率估算古岸线所在时期的沉积厚度。浅层重力柱的沉积速率由²¹⁰Pb 测得,仅用于代表近 50 年的沉积速率。海底沉积厚度的具体估算步骤如下:首先将全新世沉积厚度分布图数字化,得到网格化的总沉积物厚度,并假设稳定的沉积速率,通过线性插值得到每个时期至今的沉积物厚度;其次对于每个钻孔,也可以得到其所在位置的不同时期至今的沉积厚度;再将两个沉积物厚度的数据集集成起来,即有钻孔的地点采用钻孔数据,没有钻孔的地点采用数字化,得到网格化沉积物厚度;最后通过地理信息软件 ArcGIS 运用克里金法对集成的沉积物厚度数据进行空间插值,得到整个海区更高分辨率的网格化数据。

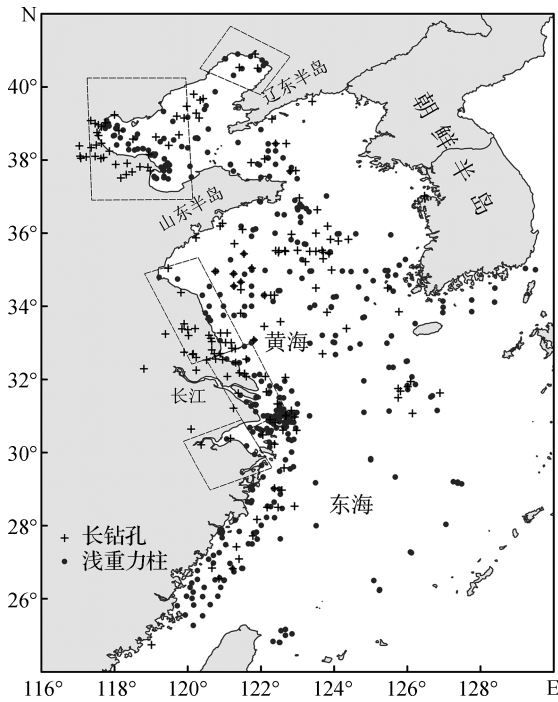
2 结果与讨论

2.1 海岸线演变

2.1.1 7000—3000 a B. P. 岸线

由于不同区域的全新世最大海侵时间有所差异,以 7000—6500 a B. P. 的岸线代表整个研究区域全新世最大海侵时期的岸线(图 2)。辽东半岛在距今 8 000~5 000 年间达到海侵最高峰,海水最远可侵入陆地约 60 km^[22]。渤海湾西岸的全新世海侵地层的埋藏深度为 5.0~16.8 m,此时的海岸线位置约位于黄河三角洲废弃叶瓣的西侧边缘^[141]。江苏岸线自连云港起,经灌南—建湖—兴化,绕过海安,经泰州—扬州,最终到达古长江口。古长江在镇江—扬州一带入海^[10],此时的江中沙洲为红桥亚三角洲^[142]。

渤海缺少 6000—5200 a B. P. 的岸线数据,以其 5000 a B. P. 岸线^[24]和 7000 a B. P. 岸线^[23]为基础推断得出。山东北部岸线大致位于黄骅市齐庄—海兴县



图中 5 个虚线框自北向南分别代表辽东湾、渤海西部、苏北、长江三角洲和杭州湾。底图审图号:GS(2023)2767 号。

图 1 渤、黄、东海的钻孔站点分布

Fig. 1 Distribution of gravity cores in the Bohai, Yellow and East China Seas

高湾—无棣县马山—东山后—博兴县黄金寨—平度市新河镇—莱州市土山镇一带^[25]。连云港附近的岸线变化较小,江苏中部阜宁—盐城已成为沿岸堤,江苏

南部至长江口的岸线约在中云台山—灌云—灌南—阜宁—盐城—海安—泰州—扬州—上海嘉定县—上海颛桥一带^[10]。长江中的红桥亚三角洲此时已并岸,而黄桥亚三角洲仅发育了一部分^[11]。

辽东湾 4500—4000 a B. P. 海岸线依据贝壳堤的位置^[26]和西周时期(约 3000 a B. P.)岸线^[12]推断得到,渤海西南部这一时期的岸线在黄骅—海兴—利津—郭井子一带^[25]。苏北岸线与前一时期相比变化较小^[10],而长江三角洲区域则向海有所推进,黄桥亚三角洲已经并岸而金沙亚三角洲开始发育^[11]。

谭其骧^[12]给出了西周时期的渤海海岸线,这一结果与依据古三角洲^[9]和贝壳堤^[25,143]所推测的 3000 a B. P. 古岸线相符。连云港附近岸线变化较小,江苏中部岸线向海推进至东冈一带,上海岸线则经过马桥附近^[10]。长江中的金沙亚三角洲此时处于发育中期^[11]。

2.1.2 汉、唐、宋、明代的岸线

根据历史记载及考古资料,谭其骧^[12]认为渤海湾西岸一带在西汉时曾发生过大海侵,当时海岸线推进到 4 m 等高线;李凤林等^[13]对渤海湾西岸的贝壳堤和牡蛎礁的测年结果支持这一观点,因此本文中汉代(2152—1730 a B. P.)渤海岸线采用谭其骧^[12]的西汉岸线(图 3)。渤海湾以及莱州湾岸线在西岸与 3500 a B. P. 岸线无太大差别,但在北岸则向陆后退,秦皇岛一带均沦为海洋;辽东湾岸线相比于上一时期则向海推进了一些。江苏至杭州湾的岸线综合了张忍顺^[14]的

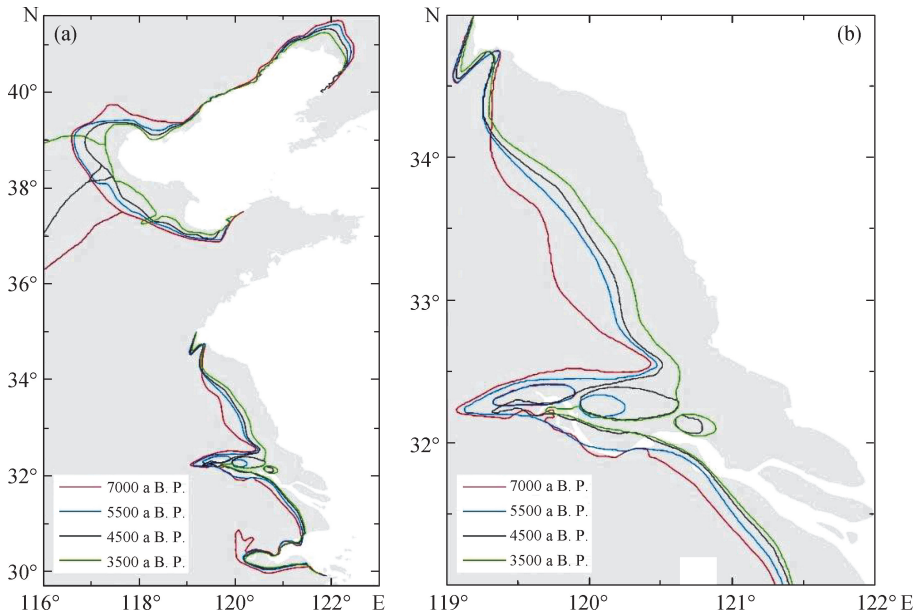


图 2 7000—3000 a B. P. 渤、黄、东海的海岸线变迁和黄河河道(a)及苏北—长江三角洲的海岸线变迁(b)

Fig. 2 Coastlines and the Yellow River courses in the Bohai, Yellow and East China Seas (a) and in the North of Jiangsu Province and the Yangtze River Delta (b) from 7000 to 3000 a B. P.

汉代岸线和谭其骧^[12]的西汉岸线,此时连云港的云台山为岛屿,江苏北部岸线向海推进,江苏中部岸线略有后退,江苏南部岸线基本与上一时期一致.长江中金

沙亚三角洲此时已并岸,海门亚三角洲于 2500 a B. P. 开始发育,此时已形成了一部分;此外长江河道内还有东布州和瓜州等岛屿^[11,27].

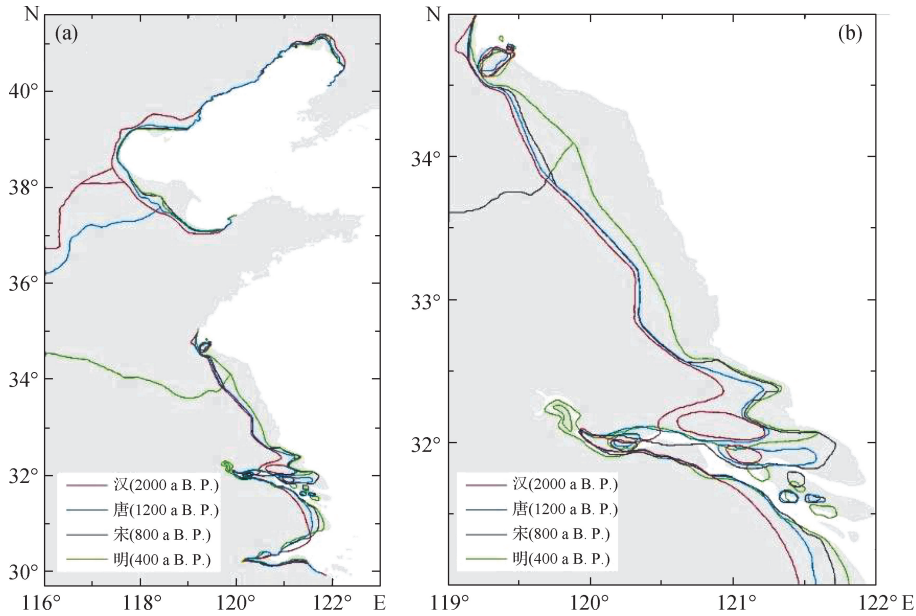


图 3 汉至明代渤、黄、东海的海岸线变迁和黄河河道(a)以及苏北—长江三角洲海岸线变迁(b)

Fig. 3 Coastlines and the Yellow River courses in the Bohai, Yellow and East China Seas (a) and in the North of Jiangsu Province and the Yangtze River Delta (b) from the Han to the Ming Dynasty

唐代(1332—1043 a B. P.)渤海岸线与汉代相比各区域均向海推进,尤其是滦河三角洲处的岸线变化最显著^[12-13].苏北的云台山已完全被海水包围,江苏中部岸线在阜宁—盐城—东台—海安—如皋—南通—吕泗一带,与唐代修筑的捍海堤相近,上海地区岸线在盛桥—航头沙堤一带^[12,14].长江的金沙亚三角洲在 2000 a B. P. 并岸,瓜州在 1300—1200 a B. P. 并岸,海门亚三角洲已基本完全发育^[11,27].

宋代(990—671 a B. P.)辽东湾岸线已接近于现代岸线,而辽河口岸线与现代岸线还有一定距离,渤海西岸的现代黄河三角洲尚未发育^[12-13].北宋时,黄河夺淮入海,苏北岸线开始增长.范仲淹修复了被海水冲毁的唐代捍海堤:范公堤北起阜宁,经盐城—东台—海安—如皋—南通,直至吕泗,苏北岸线在此后几百年内基本固定于这一位置^[12,14].长江口岸线发育较快,海门三角洲已完全并岸成为陆地^[11-12].

明代(582—306 a B. P.)渤海岸线与宋代相似,现代黄河三角洲仍为海洋^[12-13].江苏北部岸线向海推进迅速,此时淮安和泰州已基本成陆,江苏中部岸线抵达盐城的西部^[12,14].长江北岸的岸线在这一时期有显著后退.据《江苏通史》^[144],元顺帝时期(公元 1341—1367 年),长江主泓道北移,海门沿江陆地逐渐坍塌进

入江中,至元末,海门县只剩下东部的吕泗、西部的智正都、嘉会都地,其余均沦为海洋,长江三角洲北岸直至清代才修复稳定.

2.1.3 清代岸线

清代的岸线选择了顺治(312—289 a B. P.)、乾隆(214—154 a B. P.)、嘉庆(154—130 a B. P.)和光绪(79—42 a B. P.)4 个时期.渤海岸线在《中国历史地图集》^[12]中仅顺治时期有完整记录,其余时期的岸线根据顺治时期的岸线及现代(1950 年前)岸线推测得到(图 4).渤海岸线在清代变化不大,现代黄河三角洲在咸丰时期黄河改道后开始发展.江苏至杭州湾的岸线参考张忍顺^[14]的清代 4 个时期岸线和谭其骧^[12]的顺治时期岸线.苏北岸线与现代相比差异显著,废黄河口处在顺治和乾隆时期还未成陆,到嘉庆时期岸线已超过现代岸线.咸丰时期黄河改道回渤海后^[141],废黄河口逐渐侵蚀后退,其南北两岸仍然处于增长状态,直至达到现代岸线.长江三角洲岸线仅顺治和乾隆时期有记录:顺治时期长江三角洲北岸的启东角还未修复完成,崇明岛已发育了大部分,乾隆时期启东角则已基本修复.由于乾隆时期的岸线已基本接近现代岸线,假设嘉庆和光绪时期岸线与乾隆时期一致.

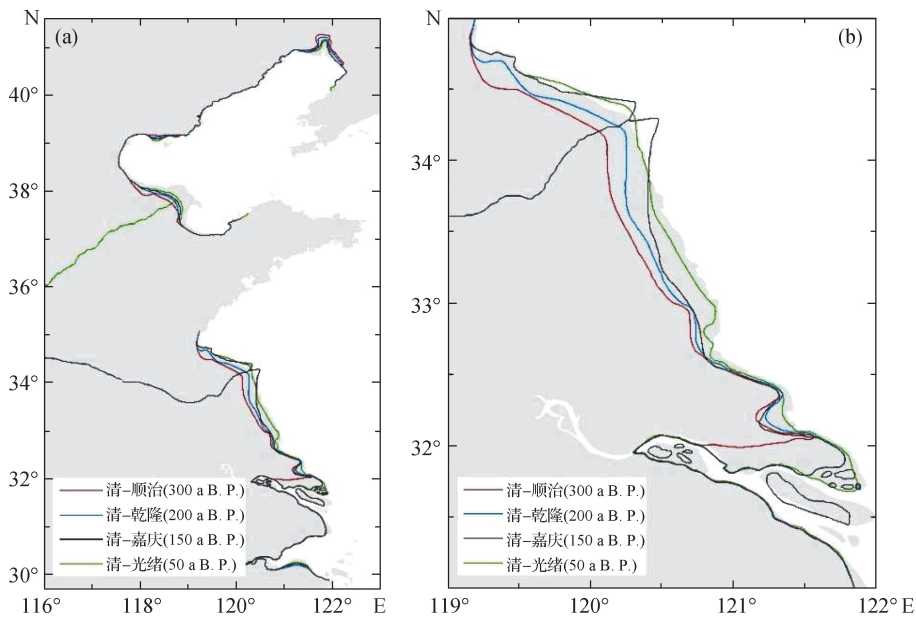


图4 清代渤、黄、东海的海岸线变迁和黄河河道(a)以及苏北—长江三角洲海岸线变迁(b)

Fig. 4 Coastlines and the Yellow River courses in the Bohai, Yellow and East China Seas (a) and in the North of Jiangsu Province and the Yangtze River Delta (b) during the Qing Dynasty

2.2 海底沉积物厚度演变

对应于古岸线演变,估算了12个时期的渤、黄、东海海底沉积物厚度(即这些时期至今的沉积厚度),如图5所示。7000 a B. P. 至今的沉积物厚度代表全新世最大海侵以来的总沉积厚度,在辽东湾这一沉积厚度最大可达10 m以上^[34],其西南部厚度则在5 m左右^[145-146]。黄河三角洲的总沉积厚度约20 m^[17,80,98],其北侧的渤海湾存在一条沿岸线分布的泥质带,沉积厚度为10~15 m^[16-17,75,147-148]。渤海中部沙席区的最大沉积厚度可达20 m^[149],坡度向四周逐渐减缓,其泥沙多来自老铁山水道^[150]。老铁山水道被侵蚀的厚度可达10 m以上^[151]。

北黄海北岸有一条带状的泥质区,厚度在5 m以内,与北黄海中部泥质区相连,连接处厚度为2~3 m^[3]。山东半岛楔形泥质区呈“Ω”形分布,最厚部分可达40 m^[30]。南黄海西部废黄河三角洲的最大沉积厚度达20 m以上^[74],其边缘处厚度多在10 m以上^[45,152-153]。南黄海中部的沉积厚度呈现出西北大、东南小的趋势,大部分区域的沉积厚度为数米^[53,68,86,154]。济州岛西南部的厚度多在5 m以内^[33,59,78]。朝鲜半岛西南部的泥质沉积区最大厚度可达50 m以上^[20]。

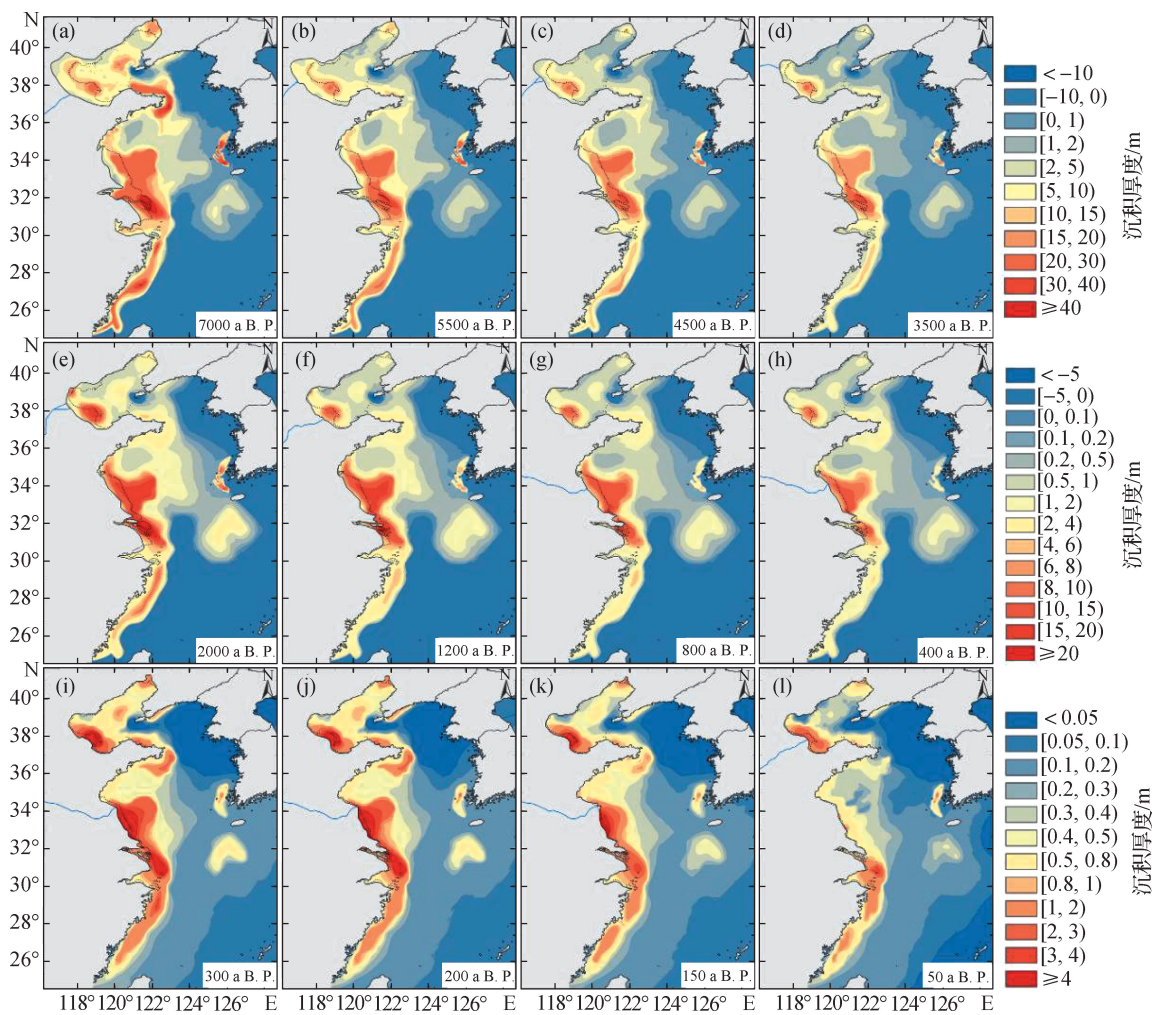
古长江口外大部分区域的沉积厚度均在20 m以上^[82,90,155],启东角东北部的沉积厚度可达40 m^[60,156]。浙闽沿岸泥质区有两个沉积中心,浙江北部沿岸的沉积中心厚度达30 m,浙江南部沿岸的沉积中心厚度达

40 m^[18],两个沉积中心的连接处厚度多为15~20 m^[76,157]。

5500 a B. P. 至今的海底沉积厚度与7000 a B. P. 至今的沉积物厚度相比,分布趋势相似但厚度减小。山东半岛外的楔形泥质区是黄海中争议最大的地区,关于其形成时间,不同学者持有不同观点,但多数认为楔形主体至少在4000年前已形成,此后该区域的沉积速率较低^[28,54,71,158]。

4500—1200 a B. P. 期间,山东半岛、黄海中部、济州岛西南部等低速沉积区的沉积厚度变化不明显,而河流三角洲的变化较明显。黄河三角洲的沉积中心逐渐朝东北方向移动,长江三角洲的沉积中心随长江三角洲的发育朝东南方向移动,废黄河三角洲的厚度在潮流沙脊处有所减小。

800 a B. P. 以来,除河口三角洲和浙闽沿岸外,海底沉积厚度变化不明显。现代黄河三角洲的沉积速率急剧增加,黄河三角洲快速发育。长江三角洲的沉积中心继续朝东南方向移动,南部地区陆地发展迅速。废黄河水下三角洲沉积厚度发生剧烈变化。公元1128年(822 a B. P.),黄河携带大量泥沙改道流入黄海,苏北陆地开始快速发育。公元1855年(95 a B. P.),黄河改道回到渤海,苏北失去了最大的泥沙来源,此时的沉积物主要来源于废黄河水下三角洲和辐射沙洲被侵蚀的沉积物^[159]。浙闽沿岸沉积中心基本稳定在浙江台州海域附近,向南逐渐降低。



黑色虚线为现代岸线, 蓝线为古黄河河道; 每行图片的图例相同, 在右侧展示.

图 5 渤、黄、东海 7000 a B. P. 以来海底沉积厚度的演变

Fig. 5 Distribution of seabed sediment thickness since 7000 a B. P. in the Bohai, Yellow and East China Seas

50 a B. P. 至今的沉积厚度以表层沉积速率乘以 50 年来估算, 因此这一厚度也可反映现代沉积速率. 渤海最大沉积速率位于黄河三角洲, 辽河口次之, 其他区域为低速沉积区. 成山角外海的沉积速率最小, 沿山东半岛向北、向南均有所增大. 南黄海中部沉积速率最小, 向西逐渐增加. 苏北沿岸因古黄河的迁移, 处于侵蚀状态, 泥沙在废黄河口的两侧堆积. 长江三角洲外的沉积速率很大, 向周围逐渐减小, 50 m 等深线以深的沉积速率急剧减小. 浙闽泥质区沉积速率在靠近长江口位置较大, 远离长江口位置相对较小, 在瓯江口以南也存在一个高值区. 朝鲜半岛西南部泥质沉积区的沉积速率较大.

2.3 成陆面积和体积的演变

根据古岸线和海底沉积物厚度可以计算出两条古岸线之间(即不同时期, 如 7000—5500 a B. P.) 形成

的陆地面积和体积. 为了分析不同区域的成陆特征, 将研究区域分为 5 个部分, 从北向南分别为辽东湾、渤海西部、苏北、长江三角洲以及杭州湾(图 1). 由于古岸线之间的时间间隔不同, 采用成陆面积和体积的速率(即将成陆面积和体积除以时间间隔)来反映不同时期成陆的变化.

除 800—300 a B. P. 期间的海侵外, 辽东湾的陆地一直处于增长状态, 特别在近 300 年, 成陆面积速率显著增大(图 6). 渤海西部在西汉出现大海侵, 在 800—400 a B. P. 期间由于黄河改道在苏北入海而成陆缓慢, 而在近代(即 50 a B. P. 以来)成陆面积速率则急剧增大, 达到近 70 km²/a. 除连云港附近岸线在 3500—2000 a B. P. 期间出现后退外, 苏北总体处于成陆过程中, 自北宋黄河在苏北入海以来, 成陆面积速率逐渐增大, 在清代黄河回归渤海后成陆面积速率减

小并趋于稳定. 长江三角洲的稳定发育过程中出现过两次岸线后退: 海门县的岸线在元代发生后退, 启东角在清初发生坍塌. 近400年以来, 长江三角洲的成陆面积速率增大, 特别在近代达到最大, 约 $30 \text{ km}^2/\text{a}$.

杭州湾的岸线一直处于扩张过程, 在近代达到最大速率. 总的来说, 渤海西部、苏北及长江三角洲的成陆面积速率较大, 而辽东湾和杭州湾的较小, 这5个区域在近400年的成陆面积速率明显增大.

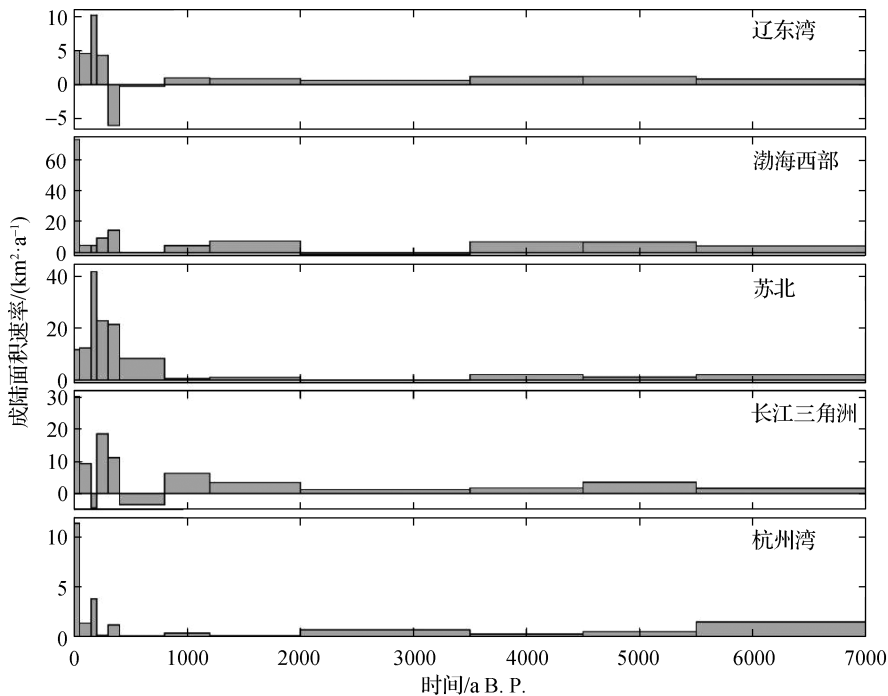


图6 渤、黄、东海5个区域7000 a B.P. 以来成陆面积速率的演变

Fig. 6 Formation rate of land area since 7000 a B.P. of five regions in the Bohai, Yellow and East China Seas

成陆体积的变化趋势与成陆面积相似, 但在速率上有所不同(图7). 对于大型河流的河口三角洲, 在海平面上升后, 三角洲的向海扩展首先经历古河道的填充, 随后发育水下三角洲, 因而充填期间成陆的体积较大, 速率较大. 对于滨海平原, 其沉积物来源于中小型河流的直接输入以及邻近大型河流入海沉积物在水动力作用下的沿岸输运, 加上沿岸水深变化较为平缓, 其向海扩张过程中的成陆体积速率相对稳定. 辽东湾和杭州湾的成陆体积速率自7000 a B.P. 以来逐渐减小, 并在近200年来有增大趋势. 辽河的古河道充填约在3500 a B.P. 前趋于完成, 随后进入滨海平原的稳定推进过程, 但在近300年成陆体积有增大趋势. 钱塘江的古河道充填约在4500 a B.P. 前趋于完成, 随后进入滨海平原的稳定推进过程. 渤海西部平原向海较稳定地扩张, 约在400 a B.P. 趋于稳定, 随后由于黄河三角洲的增长, 成陆体积速率有所增大. 长江口自7000 a B.P. 以来, 从一个喇叭形河口逐渐演化为鸟嘴状三角洲, 从成陆体积速率来看, 长江河口充填约在800 a B.P. 趋于稳定, 三角洲的主体形成, 随后进入较稳定的增长过程. 苏北滨海平原在800 a B.P.

之前的成陆过程较平稳, 在黄河改道进入黄海期间, 成陆体积速率明显增大, 在黄河回归渤海后成陆体积又急剧减小.

2.4 研究的局限

本文是基于前人研究结果的集成和再分析, 由于未基于第一手数据, 研究方法和结果中存在一些不足之处. 古岸线重建通常根据海岸线的特征指示物(如贝壳堤、海侵层、考古遗址等)或历史文献来推断, 仅能得到一个大概位置, 由于不知古岸线的确切位置, 这些古岸线的重建误差并不清楚. 本文运用 ArcGIS 软件数字化文献中的地图时, 也会引入一些误差, 但由于古岸线本身只是推断结果, 数字化引入的误差是可以接受的.

本文通过收集已发表的钻孔数据来估算沉积速率, 仅将钻孔分为两类来考虑: 长钻孔指岩芯长, 有年龄-厚度曲线, 可以用来估算长时间的沉积速率; 浅层重力柱一般用 ^{210}Pb 测年, 只能估算现代沉积速率. 文献中不同钻孔的年龄-厚度曲线并不一致, 本文恢复了12条古岸线, 因此仅运用钻孔的年龄-厚度曲线估算了这12个时期的沉积速率. 受篇幅限制, 不能将每个

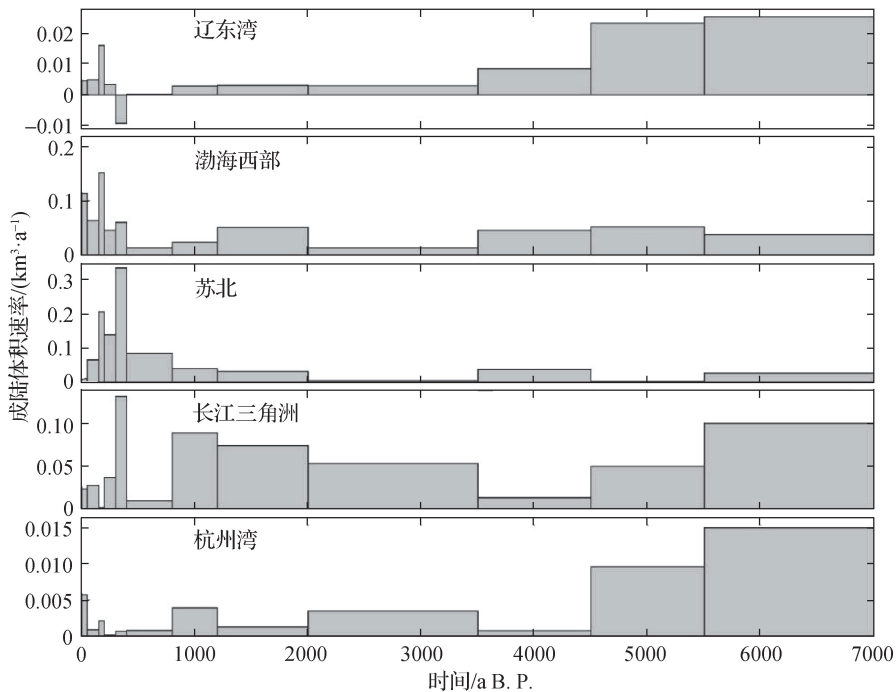


图 7 渤、黄、东海 5 个区域 7000 a B. P. 以来成陆体积速率的演变

Fig. 7 Formation rate of land volume since 7000 a B. P. of five regions in the Bohai, Yellow and East China Seas

钻孔的数据展示出来, 仅提供了不同时期的沉积物厚度分布图, 但沉积速率的大小可由沉积物的厚度间接反映. 需要注意的是, 本文利用钻孔资料估算沉积速率时没有考虑沉积物压实作用的影响(因为没有钻孔的第一手资料), 这会带来一定的误差.

由于钻孔数量有限, 仅用钻孔数据进行空间插值得到的沉积物厚度分布误差较大, 本文将用总沉积物厚度线性插值得到的不同时期至今的厚度和钻孔数据集集成起来进行插值. 以前者为基础, 用后者对前者进行局部校正, 这样得到的空间插值结果较合理; 但大部分区域的沉积速率其实是基于线性插值的, 这也会产生一定的误差.

总的来说, 本文所得数据仅提供较粗略的分析结果, 获得更精确的古岸线和古水深数据还有待更多的数值积累和进一步研究.

3 结 论

综合前人研究结果, 本文整理恢复了渤、黄、东海 7 000 年以来 12 个时期的海岸线, 以及每个时期至今的海底沉积物厚度. 海侵后渤海湾和莱州湾的岸线逐渐向海推进, 在宋代黄河改道后达到稳定, 自公元 1855 年后黄河改道在渤海入海后, 现代黄河三角洲发育, 形成现代海岸线. 苏北中部的成陆过程在 5200 a

B. P. 前较快, 在 4500—800 a B. P. 期间相对稳定; 自宋代黄河在苏北入海后, 苏北岸线快速推进, 形成了现代苏北平原的主体; 在黄河再次改道后, 废黄河口岸线受侵蚀后退, 其南北两侧岸线则继续向海推进, 形成现代岸线. 长江口在 7 000 年前位于镇江附近, 呈喇叭形, 长江三角洲以江心洲逐步形成并向北并岸的形式向东南方向发展, 河口逐渐变窄, 发育速度逐渐加快. 长江和黄河入海泥沙在黄河口、山东半岛沿岸、苏北、长江口及浙闽沿岸形成主要的沉积区, 以长江三角洲的沉积厚度最大. 黄海中部和济州岛西南泥质区的沉积速率较小. 渤海西部、苏北及长江三角洲成陆较快, 而辽东湾和杭州湾较慢, 这些区域在近 400 年的成陆面积速率明显增加. 成陆体积速率的演化表明长江、钱塘江和辽河的古河道充填过程已完成, 进入较稳定的增长过程. 黄河改道影响了渤海西部和苏北滨海平原稳定增长过程, 在黄海入海期间成陆体积显著增大. 本文构建了渤、黄、东海西部古岸线和沉积物厚度数据集, 可为这一区域古海洋和沉积物运输研究提供数据支撑.

参考文献:

[1] LAMBECK K, ROUBY H, PURCELL A, et al. Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene[J]. Proceedings of the National Academy of

- Sciences of the United States of America, 2014, 111(43): 15296-15303.
- [2] 赵希涛,唐领余,沈才明,等. 江苏建湖庆丰剖面全新世气候变迁和海面变化[J]. 海洋学报, 1994, 16(1): 78-88.
- [3] LIU J P, MILLIMAN J D, GAO S, et al. Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea[J]. Marine Geology, 2004, 209(1/2/3/4): 45-67.
- [4] SONG B, LI Z, SAITO Y, et al. Initiation of the Changjiang (Yangtze) Delta and its response to the mid-Holocene sea level change[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2013, 388: 81-97.
- [5] ZONG Y Q. Mid-Holocene sea-level highstand along the southeast coast of China[J]. Quaternary International, 2004, 117(1): 55-67.
- [6] LI J F, SHANG Z W, WANG F, et al. Holocene sea level trend on the west coast of Bohai Bay, China: reanalysis and standardization[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2021, 40(7): 198-248.
- [7] 郑洪波,周友胜,杨青,等. 中国东部滨海平原新石器遗址的时空分布格局:海平面变化控制下的地貌演化与人地关系[J]. 中国科学:地球科学, 2018, 48(2): 127-137.
- [8] 王福,王宏,李建芬,等. 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, 2023, 50(1): 61-83.
- [9] 薛春江. 7000年来渤海西岸、南岸海岸线变迁[J]. 地理科学, 2009, 29(2): 217-222.
- [10] 朱诚,程鹏,卢春成,等. 长江三角洲及苏北沿海地区7000年以来海岸线演变规律分析[J]. 地理科学, 1996, 16(3): 207-214.
- [11] 王靖泰,郭蕃民,许世远,等. 全新世长江三角洲的发育[J]. 地质学报, 1981, 55(1): 67-81.
- [12] 谭其骧. 中国历史地图集[M]. 北京:中国地图出版社, 1982.
- [13] 李凤林,阎玉忠,商志文,等. 渤海西岸全新世气候演化与海陆变迁[J]. 地质学刊, 2014, 38(2): 173-186.
- [14] 张忍顺. 苏北黄河三角洲及滨海平原的成陆过程[J]. 地理学报, 1984, 39(2): 173-184.
- [15] GAO S, COLLINS M B. Holocene sedimentary systems on continental shelves[J]. Marine Geology, 2014, 352: 268-294.
- [16] HE L, XUE C T, YE S Y, et al. New evidence on the spatial-temporal distribution of superlobes in the Yellow River Delta complex[J]. Quaternary Science Reviews, 2019, 214: 117-138.
- [17] LIU J P, SAITO Y, WANG H, et al. Stratigraphic development during the late Pleistocene and Holocene offshore of the Yellow River Delta, Bohai Sea[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 36(4/5): 318-331.
- [18] LIU J P, XU K H, LI A C, et al. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea[J]. Geomorphology, 2007, 85(3/4): 208-224.
- [19] HU B Q, YANG Z S, QIAO S Q, et al. Holocene shifts in riverine fine-grained sediment supply to the East China Sea distal mud in response to climate change[J]. The Holocene, 2014, 24(10): 1253-1268.
- [20] PARK S C, LEE H H, HAN H S, et al. Evolution of late Quaternary mud deposits and recent sediment budget in the southeastern Yellow Sea[J]. Marine Geology, 2000, 170(3/4): 271-288.
- [21] 季有俊,杨作升,王厚杰,等. 最大海侵时期古渤海潮流沉积动力环境特征及其与现今对比[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(3): 31-39.
- [22] 符文侠. 下辽河平原和辽东半岛海岸带晚更新世以来的海侵[J]. 地理研究, 1988, 7(2): 73-80.
- [23] 夏东兴,王永吉. 晚更新世以来黄渤海沿海海岸变迁[J]. 海洋科技资料, 1981(4): 36-44.
- [24] XUE C T, QIN Y C, YE S Y, et al. Evolution of Holocene ebb-tidal clinof orm off the Shandong Peninsula on East China Sea shelf[J]. Earth-Science Reviews, 2018, 177: 478-496.
- [25] 王青,朱继平,史本恒. 山东北部全新世的人地关系演变:以海岸变迁和海盐生产为例[J]. 第四纪研究, 2006, 26(4): 589-596.
- [26] 钟以章,高常波. 辽东半岛全新世海平面变化及近5000年来的地壳运动[J]. 海洋科学, 1988, 12(1): 4-8.
- [27] 陈吉余,罗祖德,陈德昌,等. 钱塘江河口沙坎的形成及其历史演变[J]. 地理学报, 1964, 19(2): 109-123.
- [28] LIU J P, MILLIMAN J D, GAO S. The Shandong mud wedge and post-glacial sediment accumulation in the Yellow Sea[J]. Geo-Marine Letters, 2001, 21(4): 212-218.
- [29] MILLIMAN J D, QIN Y S, REN M E, et al. Man's influence on the erosion and transport of sediment by Asian Rivers: the Yellow River (Huanghe) example[J]. The Journal of Geology, 1987, 95(6): 751-762.
- [30] YANG Z S, LIU J P. A unique Yellow River-derived distal subaqueous delta in the Yellow Sea[J]. Marine Geology, 2007, 240(1/2/3/4): 169-176.
- [31] 陈俊兵,刘龙龙,吴振,等. 杭州湾舟山群岛海域晚第四纪声学地层[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(12): 49-57.
- [32] 陈永胜,王福,田立柱,等. 渤海湾西岸全新世沉积速率对河流供给的响应[J]. 地质通报, 2014, 33(10): 1582-1590.
- [33] 李广雪,孙晓燕,刘勇,等. 中国东海北部晚全新世表层海水温度变化[J]. 科学通报, 2009, 54(21): 3374-3379.

- [34] 李萍,徐元芹,李培英. 辽东湾北部 LH01 孔晚更新世 24 ka 以来古环境演变[J]. 海洋科学进展, 2014, 32(1): 59-67.
- [35] 刘升发,庄振业,龙海燕. 渤海东部晚第四纪环境演变及潮流沙席沉积[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008(1): 25-31.
- [36] 吕晓霞,逢磷,宋金明,等. 南黄海西部陆架 D7 岩芯的沉积年代研究[J]. 海洋环境科学, 2014, 33(4): 550-555, 561.
- [37] 皮仲,李铁刚,南青云. 中全新世以来南黄海岩心记录的沉积环境演变对东亚季风的响应[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(7): 1-10.
- [38] 王建华,周洋,郑卓,等. 杭州湾晚第四纪沉积与古环境演变[J]. 古地理学报, 2006, 8(4): 551-558.
- [39] 王利波,杨作升,赵晓辉,等. 南黄海中部泥质区 YE-2 孔 8.4 ka B. P. 来的沉积特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(5): 1-11.
- [40] 温春,刘健,张军强,等. 南黄海江苏岸外潮流沙脊远端沉积与演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(3): 1-9.
- [41] 夏非,张永战. 苏北平原龙冈 LG 孔晚第四纪地层与环境演化记录[J]. 地理研究, 2018, 37(2): 433-446.
- [42] 夏非,张永战,刘德政. 南黄海辐射沙脊群西洋潮流通道的浅部沉积层序及其形成演化再认识[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, 41(4): 13-26.
- [43] 肖尚斌,李安春. 东海内陆架泥区沉积物的环境敏感粒度组分[J]. 沉积学报, 2005, 23(1): 122-129.
- [44] 肖尚斌,李安春,陈木宏,等. 近 8 ka 东亚冬季风变化的东海内陆架泥质沉积记录[J]. 地球科学, 2005, 30(5): 573-581.
- [45] 薛春汀,周永青,朱雄华. 晚更新世末至公元前 7 世纪的黄河流向和黄河三角洲[J]. 海洋学报, 2004, 26(1): 48-61.
- [46] 阎玉忠,王宏,李凤林,等. 渤海湾西岸 BQ1 孔揭示的沉积环境与海面波动[J]. 地质通报, 2006, 25(3): 357-382.
- [47] 杨子庚. 晚松山时南海海的古长江三角洲[J]. 第四纪研究, 1994, 14(1): 13-23.
- [48] 张杰,李琦. 东海南部内陆架泥质区 S05-2 孔沉积物 4870 a B. P. 以来的沉积学记录及其对物源与季风演化指示[J]. 热带海洋学报, 2020, 39(5): 84-97.
- [49] 张振克,谢丽,张云峰,等. 苏北平原 MIS 3 阶段海侵事件的沉积记录[J]. 第四纪研究, 2010, 30(5): 883-891.
- [50] 赵希涛,李波,鲁刚毅,等. 江苏阜宁西园全新世风暴沉积与海岸沙丘的发现及其意义[J]. 中国科学(B辑:化学 生命科学 地学), 1992, 22(9): 994-1001, 1009.
- [51] 庄丽华,常凤鸣,李铁刚,等. 南黄海 EY02-2 孔底栖有孔虫群落特征与全新世沉积速率[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(4): 7-14.
- [52] AI L N, HAN Z Z, WU X, et al. How did the climate and human activities modulate the sedimentary evolution of the Central Yellow Sea Mud, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2022, 235: 105299.
- [53] AI L N, HAN Z Z, WU X, et al. Geochemical and grain-sized implications for provenance variations of the Central Yellow Sea muddy area since the middle Holocene[J]. Journal of Ocean University of China, 2020, 19(3): 577-588.
- [54] ALEXANDER C R, DEMASTER D J, NITTROUER C A. Sediment accumulation in a modern epicontinental-shelf setting: the Yellow Sea[J]. Marine Geology, 1991, 98(1): 51-72.
- [55] CHEN J, MA J Q, XU K H, et al. Provenance discrimination of the clay sediment in the western Taiwan Strait and its implication for coastal current variability during the late- Holocene[J]. The Holocene, 2017, 27(1): 110-121.
- [56] CHEN T, RYVES D B, WANG Z H, et al. Mid- to late Holocene geomorphological and hydrological changes in the South Taihu area of the Yangtze Delta Plain, China [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2018, 498: 127-142.
- [57] CONG J Y, HU G, JONELL T N, et al. Source-to-sink and evolutionary processes of the East China Sea inner-shelf mud belt and its response to environmental changes since the Holocene: new evidence from the distal mud belt[J]. The Holocene, 2021, 31(7): 1071-1088.
- [58] DONG J, LI A C, LIU X T, et al. Sea-level oscillations in the East China Sea and their implications for global seawater redistribution during 14.0–10.0 ka B. P. [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2018, 511: 298-308.
- [59] DOU Y G, YANG S Y, LIM D I, et al. Provenance discrimination of last deglacial and Holocene sediments in the southwest of Cheju Island, East China Sea[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2015, 422: 25-35.
- [60] GAO L, LONG H, SHEN J, et al. High-resolution OSL dating of a coastal sediment sequence from the South Yellow Sea[J]. Geochronometria, 2016, 43(1): 143-154.
- [61] GAO L, LONG H, TAMURA T, et al. A ~ 130 ka terrestrial-marine interaction sedimentary history of the northern Jiangsu coastal plain in China [J]. Marine Geology, 2021, 435: 106455.
- [62] GUO T H, ZHU C, LI K F, et al. Early-middle Holocene marine-terrestrial changes in the southeastern Lixiahe Plain, East China: land-forming mechanisms, regional

- significance, and implications for Neolithic cultural origins[J]. *Marine Geology*, 2021, 438: 1065-18.
- [63] HORI K, SAITO Y, ZHAO Q H, et al. Sedimentary facies of the tide-dominated paleo-Changjiang (Yangtze) Estuary during the last transgression[J]. *Marine Geology*, 2001, 177(3/4): 331-351.
- [64] HU B Q, LI J, ZHAO J T, et al. Sr-Nd isotopic geochemistry of Holocene sediments from the South Yellow Sea; implications for provenance and monsoon variability[J]. *Chemical Geology*, 2018, 479: 102-112.
- [65] KIM J M, KENNETT J P. Paleoenvironmental changes associated with the Holocene marine transgression, Yellow Sea (Hwanghae) [J]. *Marine Micropaleontology*, 1998, 34(1/2): 71-89.
- [66] KOO H J, CHO H G. Changes in detrital sediment supply to the Central Yellow Sea since the last deglaciation [J]. *Ocean Science*, 2020, 16(5): 1247-1259.
- [67] LI J, HU B Q, WEI H L, et al. Provenance variations in the Holocene deposits from the southern Yellow Sea; clay mineralogy evidence[J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 90: 41-51.
- [68] LIM D, XU Z K, CHOI J, et al. Holocene changes in detrital sediment supply to the eastern part of the Central Yellow Sea and their forcing mechanisms[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 105: 18-31.
- [69] LIU J, SAITO Y, KONG X H, et al. Sedimentary record of environmental evolution off the Yangtze River Estuary, East China Sea, during the last ~ 13 000 years, with special reference to the influence of the Yellow River on the Yangtze River Delta during the last 600 years[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29 (17/18): 2424-2438.
- [70] LIU J, SAITO Y, KONG X H, et al. Geochemical characteristics of sediment as indicators of post-glacial environmental changes off the Shandong Peninsula in the Yellow Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2009, 29(7): 846-855.
- [71] LIU J, SAITO Y, WANG H, et al. Sedimentary evolution of the Holocene subaqueous clinoform off the Shandong Peninsula in the Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 2007, 236(3/4): 165-187.
- [72] LIU J, ZHANG X H, MEI X, et al. The sedimentary succession of the last ~ 3. 50 Ma in the western South Yellow Sea; paleoenvironmental and tectonic implications [J]. *Marine Geology*, 2018, 399: 47-65.
- [73] LIU J A, SAITO Y, KONG X H, et al. Delta development and channel incision during marine isotope stages 3 and 2 in the western South Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 2010, 278(1/2/3/4): 54-76.
- [74] LIU J G, LI A C, CHEN M H. Environmental evolution and impact of the Yellow River sediments on deposition in the Bohai Sea during the last deglaciation[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 38(1/2): 26-33.
- [75] LIU J G, LI A C, CHEN M H, et al. Sedimentary changes during the Holocene in the Bohai Sea and its paleoenvironmental implication [J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(10/11): 1333-1339.
- [76] LIU S F, SHI X F, FANG X S, et al. Spatial and temporal distributions of clay minerals in mud deposits on the inner shelf of the East China Sea; implications for paleoenvironmental changes in the Holocene [J]. *Quaternary International*, 2014, 349: 270-279.
- [77] LIU S F, SHI X F, LIU Y G, et al. Holocene paleoclimatic reconstruction based on mud deposits on the inner shelf of the East China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 69: 113-120.
- [78] QIAO S Q, YANG Z S, LIU J P, et al. Records of late-Holocene East Asian winter monsoon in the East China Sea; key grain-size component of quartz versus bulk sediments[J]. *Quaternary International*, 2011, 230 (1/2): 106-114.
- [79] QIU J D, YIN P, LIU J Q, et al. Historical records of trace metals in core sediments from Jiangsu coastal area, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 149: 110625.
- [80] SAITO Y, WEI H L, ZHOU Y Q, et al. Delta progradation and chenier formation in the Huanghe (Yellow River) Delta, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18(4): 489-497.
- [81] SHU Q, ZHAO Y F, FRECHEN M, et al. Chronology of a sedimentary sequence from the land-ocean interaction zone in the North Jiangsu Basin [J]. *Quaternary International*, 2021, 580: 78-86.
- [82] SUN Z Y, LI G, YIN Y. The Yangtze River deposition in southern Yellow Sea during Marine Oxygen Isotope Stage 3 and its implications for sea-level changes[J]. *Quaternary Research*, 2015, 83(1): 204-215.
- [83] WANG K, ZHENG H B, TADA R, et al. Millennial-scale East Asian summer monsoon variability recorded in grain size and provenance of mud belt sediments on the inner shelf of the East China Sea during mid-to-late Holocene [J]. *Quaternary International*, 2014, 349: 79-89.
- [84] WANG X, SHI X F, WANG G Q, et al. Late Quaternary sedimentary environmental evolution offshore of the Hangzhou Bay, East China; implications for sea level change and formation of Changjiang alongshore current

- [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2015, 33(3): 748-763.
- [85] WANG Y, ZHANG Y Z, ZOU X Q, et al. The sand ridge field of the South Yellow Sea: origin by river-sea interaction[J]. Marine Geology, 2012, 291: 132-146.
- [86] WANG Y H, LI G X, ZHANG W G, et al. Sedimentary environment and formation mechanism of the mud deposit in the central South Yellow Sea during the past 40 ka[J]. Marine Geology, 2014, 347: 123-135.
- [87] WANG Z H, XU H, ZHAN Q, et al. Lithological and palynological evidence of late Quaternary depositional environments in the subaqueous Yangtze Delta, China [J]. Quaternary Research, 2010, 73(3): 550-562.
- [88] XU F J, LI A C, LI T G, et al. Rare earth element geochemistry in the inner shelf of the East China Sea and its implication to sediment provenances [J]. Journal of Rare Earths, 2011, 29(7): 702-709.
- [89] XU Q M, YANG J L, YUAN G B, et al. Stratigraphic sequence and episodes of the ancient Huanghe Delta along the southwestern Bohai Bay since the LGM[J]. Marine Geology, 2015, 367: 69-82.
- [90] XU T Y, WANG G Q, SHI X F, et al. Sequence stratigraphy of the subaqueous Changjiang (Yangtze River) Delta since the Last Glacial Maximum[J]. Sedimentary Geology, 2016, 331: 132-147.
- [91] YANG S Y, LI C X, JUNG H S, et al. Discrimination of geochemical compositions between the Changjiang and the Huanghe sediments and its application for the identification of sediment source in the Jiangsu Coastal Plain, China[J]. Marine Geology, 2002, 186(3/4): 229-241.
- [92] YANG W Q, ZHOU X, XIANG R, et al. Reconstruction of winter monsoon strength by elemental ratio of sediments in the East China Sea [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 114: 467-475.
- [93] YANG Y, JIA J J, ZHOU L, et al. Quantitative reconstruction of Holocene sediment sources contributing to the central Jiangsu coast, China; new insights into source-to-sink processes [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2020, 45(11): 2463-2477.
- [94] ZHANG X, DALRYMPLE R W, YANG S Y, et al. Provenance of Holocene sediments in the outer part of the Paleo-Qiantang River Estuary, China [J]. Marine Geology, 2015, 366: 1-15.
- [95] ZHAO B C, WANG Z H, CHEN J, et al. Marine sediment records and relative sea level change during late Pleistocene in the Changjiang Delta area and adjacent continental shelf[J]. Quaternary International, 2008, 186(1): 164-172.
- [96] ZHAO Y F, ZOU X Q, LIU Q, et al. Clay mineralogy indicates the muddy sediment provenance in the estuarine-inner shelf of the East China Sea[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2018, 152: 69-79.
- [97] ZHENG Y, ZHENG H B, KISSEL C, et al. Sedimentation rate control on diagenesis, East China Sea sediments[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2011, 187(3/4): 301-309.
- [98] ZHOU L Y, LIU J, SAITO Y, et al. Fluvial system development and subsequent marine transgression in Yellow River (Huanghe) Delta and its adjacent sea regions during Last Glacial Maximum to early Holocene [J]. Continental Shelf Research, 2014, 90: 117-132.
- [99] 董爱国, 翟世奎, MATTHIAS Z, 等. 长江口外海域岩心沉积物地球化学特征及其对人类活动的响应[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(4): 107-114.
- [100] 董太禄, 扬光复, 徐善民. 渤海南部现代沉积特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1995, 15(4): 131-134.
- [101] 杜瑞芝, 刘国贤, 杨松林, 等. 渤海湾现代沉积速率和沉积过程[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1990, 10(3): 15-22.
- [102] 段凌云, 王张华, 李茂田, 等. 长江口沉积物²¹⁰Pb 分布及沉积环境解释[J]. 沉积学报, 2005, 23(3): 514-522.
- [103] 冯旭文, 金翔龙, 章伟艳, 等. 长江口外缺氧区柱样沉积物元素的分布及其百年沉积环境效应[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(2): 25-32.
- [104] 何宝林, 刘国贤. 辽东湾北部浅海区现代沉积特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1991, 11(2): 7-15.
- [105] 胡邦琦, 李国刚, 李军, 等. 黄海、渤海铅-210 沉积速率的分布特征及其影响因素[J]. 海洋学报, 2011, 33(6): 125-133.
- [106] 李凤业, 高抒, 贾建军, 等. 黄、渤海泥质沉积区现代沉积速率[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(4): 364-369.
- [107] 李凤业, 史玉兰. 渤海南部现代沉积物堆积速率和沉积环境[J]. 黄渤海海洋, 1995(2): 33-37.
- [108] 李凤业, 史玉兰, 申顺喜, 等. 同位素记录南黄海现代沉积环境[J]. 海洋与湖沼, 1996, 27(6): 584-589.
- [109] 李凤业, 杨永亮, 何丽娟, 等. 南黄海东部泥区沉积速率和物源探讨[J]. 海洋科学, 1999, 23(5): 37-40.
- [110] 刘明, 范德江. 近 60 年来长江水下三角洲沉积地球化学记录及其对人类活动的响应[J]. 科学通报, 2010, 55(36): 3506-3515.
- [111] 刘升发, 石学法, 刘焱光, 等. 东海内陆架泥质区沉积速率[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(6): 1-7.
- [112] 刘胜璟, 高建华, 徐笑梅, 等. 浙闽沿岸泥质区沉积物粒度组分对长江入海输沙量减少的响应[J]. 海洋学报, 2021, 43(3): 105-115.
- [113] 齐君, 李凤业, 宋金明, 等. 北黄海沉积速率及其沉积通

- 量[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(2): 9-14.
- [114] 宋云香, 战秀文, 王玉广. 辽东湾北部河口区现代沉积特征[J]. 海洋学报, 1997, 19(5): 145-149.
- [115] 夏小明, 谢钦春, 李炎, 等. 东海沿岸海底沉积物中的 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 分布及其沉积环境解释[J]. 东海海洋, 1999, 17(1): 21-28.
- [116] 夏小明, 杨辉, 李炎, 等. 长江口-杭州湾毗连海区的现代沉积速率[J]. 沉积学报, 2004, 22(1): 130-135.
- [117] 谢钦春, 李伯根, 夏小明, 等. 浙江瓯江口南岸潮滩相带的时空变化[J]. 地理学报, 1994, 49(6): 509-516.
- [118] 杨松林, 刘国贤, 杜瑞芝, 等. 莱州湾及渤海中央盆地南部海域沉积速率的研究[J]. 海洋学报, 1991, 13(6): 804-812.
- [119] 杨作升, 陈晓辉. 百年来长江口泥质区高分辨率沉积粒度变化及影响因素探讨[J]. 第四纪研究, 2007, 27(5): 690-699.
- [120] 张荣敏, 张桂林, 黄博, 等. 山东半岛近岸海区现代沉积速率分析[J]. 海洋地质动态, 2009, 25(9): 15-18.
- [121] 张瑞, 潘少明, 汪亚平, 等. 长江河口水下三角洲 ^{210}Pb 分布特征及其沉积速率[J]. 沉积学报, 2009, 27(4): 704-713.
- [122] 张瑞, 汪亚平, 高建华, 等. 长江口泥质区垂向沉积结构及其环境指示意义[J]. 海洋学报, 2008, 30(2): 80-91.
- [123] 张志忠, 李双林, 董岩翔, 等. 浙江近岸海域沉积物沉积速率及地球化学[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(3): 15-24.
- [124] 赵广明, 叶思源, 李广雪, 等. 渤海湾沉积地球化学记录及其对环境变迁的指示[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(5): 51-57.
- [125] 赵一阳, 李凤业, DEMASTER D J, 等. 南黄海沉积速率和沉积通量的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 1991, 22(1): 38-43.
- [126] 邹汉阳, 苏贤泽, 余兴光, 等. ^{210}Pb 法测定东海大陆架现代沉积速率[J]. 台湾海峡, 1982, 1(2): 30-40.
- [127] CHEN Z Y, SAITO Y, KANAI Y, et al. Low concentration of heavy metals in the Yangtze estuarine sediments, China: a diluting setting [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004, 60(1): 91-100.
- [128] DEMASTER D J, MCKEE B A, NITTROUER C A, et al. Rates of sediment accumulation and particle reworking based on radiochemical measurements from continental-shelf deposits in the East China Sea [J]. Continental Shelf Research, 1985, 4(1/2): 143-158.
- [129] DUAN L Q, SONG J M, XU Y Y, et al. The concentrations, fluxes, enrichments and chronologies of potential harmful elements in sediment cores from Bohai Bay, North China [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 64(8): 2259-2269.
- [130] GAO J H, SHI Y, SHENG H, et al. Rapid response of the Changjiang (Yangtze) River and East China Sea source-to-sink conveying system to human induced catchment perturbations [J]. Marine Geology, 2019, 414: 1-17.
- [131] GUO Z G, LIN T, ZHANG G, et al. The sedimentary fluxes of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Yangtze River Estuary coastal sea for the past century [J]. Science of the Total Environment, 2007, 386(1/2/3): 33-41.
- [132] HUH C A, SU C C. Sedimentation dynamics in the East China Sea elucidated from ^{210}Pb , ^{137}Cs and $^{239,240}\text{Pu}$ [J]. Marine Geology, 1999, 160(1/2): 183-196.
- [133] LEE S Y, HUH C A, SU C C, et al. Sedimentation in the southern Okinawa trough: enhanced particle scavenging and teleconnection between the equatorial Pacific and western Pacific margins [J]. Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2004, 51(11): 1769-1780.
- [134] LI F Y. Modern sedimentation rates and sedimentation feature in the Huanghe River Estuary based on ^{210}Pb technique [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1993, 11(4): 333-342.
- [135] LI F Y, LI X G, SONG J M, et al. Sediment flux and source in northern Yellow Sea by ^{210}Pb technique [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2006, 24(3): 255-263.
- [136] LIM D I, CHOI J Y, JUNG H S, et al. Recent sediment accumulation and origin of shelf mud deposits in the Yellow and East China Seas [J]. Progress in Oceanography, 2007, 73(2): 145-159.
- [137] LIU J P, LI A C, XU K H, et al. Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf cliniform deposit in the East China Sea [J]. Continental Shelf Research, 2006, 26(17/18): 2141-2156.
- [138] WEI T Y, CHEN Z Y, DUAN L Y, et al. Sedimentation rates in relation to sedimentary processes of the Yangtze Estuary, China [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007, 71(1/2): 37-46.
- [139] YANG S Y, YOUN J S. Geochemical compositions and provenance discrimination of the central South Yellow Sea sediments [J]. Marine Geology, 2007, 243(1/2/3/4): 229-241.
- [140] YOUN J, KIM T J. Geochemical composition and provenance of muddy shelf deposits in the East China Sea [J]. Quaternary International, 2011, 230(1/2): 3-12.
- [141] XUE C T. Historical changes in the Yellow River

- Delta, China [J]. *Marine Geology*, 1993, 113 (3/4): 321-330.
- [142] 李从先,郭蓄民,许世远,等.全新世长江三角洲地区砂体的特征和分布[J].*海洋学报*,1979,1(2):252-268.
- [143] 赵松龄,杨光复,苍树溪,等.关于渤海湾西岸海相地层与海岸线问题[J].*海洋与湖沼*,1978,9(1):15-25.
- [144] 宋林飞. *江苏通史*[M]. 南京:凤凰出版社,2012.
- [145] 陈晓辉,孟祥君,李日辉.辽东湾晚第四纪层序地层[J].*海洋地质与第四纪地质*,2020,40(2):37-47.
- [146] 孙洪光.辽东湾北部晚更新世中期以来的沉积特征及环境演化[D].青岛:中国海洋大学,2005:71.
- [147] 陈永胜,王福,田立柱,等.渤海湾西岸全新世沉积速率对河流供给的响应[J].*地质通报*,2014,33(10):1582-1590.
- [148] 刘建国.全新世渤海泥质区的沉积物物质组成特征及其环境意义[D].青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所),2007:159.
- [149] 陈珊珊,王中波,李日辉,等.渤海东部潮流沉积特征及 MIS4 以来的沉积环境演化[J].*高校地质学报*,2018,24(2):297-306.
- [150] 蒋东辉,高抒,李凤业.渤海海峡区域现代沉积速率分布的数值计算[J].*海洋科学*,2003,27(3):32-35.
- [151] MAO X Y, SHI J, ZHAO L, et al. Paleotemperature in the Yellow Sea during the mid-Holocene estimated using a numerical model[J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 143:118-129.
- [152] 安郁辉.苏北近岸中全新世以来楔形沉积体成因研究[D].青岛:山东科技大学,2020:74.
- [153] 张欣.中国东部海岸带-陆架区近 20 万年来沉积物年代学与沉积环境演化[D].武汉:中国地质大学,2021:136.
- [154] 胡邦琦.中国东部陆架海泥质沉积区的物源识别及其环境记录[D].青岛:中国海洋大学,2010:172.
- [155] HORI K, SAITO Y, ZHAO Q H, et al. Sedimentary facies and Holocene progradation rates of the Changjiang (Yangtze) Delta, China[J]. *Geomorphology*, 2001, 41 (2/3):233-248.
- [156] ZHAO B C, YAN X X, WANG Z H, et al. Sedimentary evolution of the Yangtze River mouth (East China Sea) over the past 19 000 years, with emphasis on the Holocene variations in coastal currents[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 490: 431-449.
- [157] WANG L M, LI G X, GAO F, et al. Sediment records of environmental changes in the south end of the Zhejiang-Fujian coastal mud area during the past 100 years[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2014, 32 (4):899-908.
- [158] 杨子赓. Olduvai 亚时以来南黄海沉积层序及古地理变迁[J].*地质学报*,1993,67(4):357-366,392.
- [159] 王颖,朱大奎.中国的潮滩[J].*第四纪研究*,1990,10 (4):291-300.

(责任编辑:徐婷婷)