

doi: 10.12029/gc20210619001

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.

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).

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

王福^{1,2,3}, 王宏^{1,2,3}, 李建芬^{1,2,3}, 汪翡翠^{1,2,3}, 田立柱^{1,2,3}, 于谦⁴,
黄昭权⁵, 方晶⁶, 胡云壮^{1,2,3}, 肖国强^{1,2,3}, 李畅^{1,7}

(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. 华北地质科技创新中心, 天津 300170; 4. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210008; 5. 厦门大学海洋与地球学院, 福建 厦门 361005; 6. 天津师范大学地理与环境科学学院, 天津 300382; 7. 天津城建大学, 天津 300384)

摘要:【研究目的】为支撑海岸带生态保护修复, 提出科学修复方案, 需要掌握中国海岸自然演替总体规律和趋势。

【研究方法】本文在系统梳理总结中国海岸演化相关成果的基础上, 采用钻孔综合研究、遥感解译和 ArcGIS 空间分析等手段, 定量重建了末次盛冰期以来的海岸演化过程。【研究结果】结果显示, 近 200 多万年以来海水频繁进出中国海岸带地区, 其中最后一次大规模海退-海侵发生在近 20 ka 以来, 当时, 中国海岸整体经历了末次盛冰期—中全新世早期的海侵、中全新世早期—1850 年的海退、~1850 年以来的海侵 3 个阶段。【结论】基于现有器测资料分析显示, 中国乃至世界海岸未来将面临海面上升加快、海岸侵蚀加剧、风暴潮威胁增大的自然过程, 这些将是海岸带生态保护修复面临的核心问题。有鉴于此, 针对海岸带生态保护修复建议如下: 一是顺应砂质岸线整体侵蚀的自然规律, 将具有重要生态和/或经济价值的岸段作为修复重点, 避免大规模过度修复。二是针对海面上升和海岸侵蚀对红树林生态空间的挤压, 确定科学可行的修复目标。三是加强泥质沿海低地地区的生态化海堤建设。

关键词: 海岸演化; 海面; 侵蚀; 生态修复; 环境地质调查工程; 海岸带; 中国

创新点: (1) 定量重建中国海岸带 2 万年以来的演替过程; (2) 发现海岸侵蚀是中国海岸带生态修复面临的核心问题; (3) 针对砂质海岸、典型生态系统和人工海岸提出基于自然演替规律的修复建议。

中图分类号: X171.4; P748 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)01-0061-23

Evolution and trending prediction of the Chinese mainland coasts since 20 ka BP: Implication for ecological protection and restoration

WANG Fu^{1,2,3}, WANG Hong^{1,2,3}, LI Jianfen^{1,2,3}, WANG Feicui^{1,2,3}, TIAN Lizhu^{1,2,3}, YU Qian⁴,
HUANG Zhaoquan⁵, FANG Jing⁶, HU Yunzhuang^{1,2,3}, XIAO Guoqiang^{1,2,3}, LI Chang^{1,7}

收稿日期: 2021-06-19; 改回日期: 2022-02-17

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20189506、DD20211301)、国家自然科学基金重大项目(42293261)联合资助。

作者简介: 王福, 1979 年生, 博士, 研究员, 主要从事海岸带与第四纪地质环境演化研究; E-mail: tjwangfu@163.com。

<http://geochina.cgs.gov.cn> 中国地质, 2023, 50(1)

(1. Tianjin Centre, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 2. Key Laboratory of Coast Geo-environment, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 3. North China Center of Geoscience Innovation, Tianjin 300170, China; 4. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210008, Jiangsu, China; 5. College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China; 6. School of Geography and Environmental Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300382, China; 7. Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

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

[Objective] In order to support and provide a scientific plan for coastal ecological protection and restoration, it is necessary to figure out the laws and trend of natural coastal evolution processes. **[Methods]** Based on systematic collection and summarization of achievements on the evolution of the mainland coasts of China, combined with drilling cores comprehensive research, remote sensing interpreting and ArcGIS spatial analysis, the coastal history since the Last Glacial Maximum (LGM) was quantitatively reconstructed. **[Results]** The results showed that seawater frequently entered and exited the coastal areas since 2 million years ago. The last large-scale transgression-regression occurred in the past 20 ka, which can be divided into three phases: the coasts experienced the LGM-early mid-Holocene transgression, the Early mid-Holocene-1850 CE regression, and a new transgression again since ca. 1850 CE. **[Conclusions]** According to the analyzed results of the existing instrumental data, the coasts of the Chinese mainland and the world will face accelerating sea-level rise, increasing coastal erosion, and increasing storm surge threats in the future, which will be a key issue of ecological protection and restoration. In view of this, the following suggestions are put forward for the ecological protection and restoration of the coastal zone: First, for sandy coasts, while following the overall natural erosion background, the appropriate restoration strategies should be applied to the shore section with important ecological and economic values, and to avoid large-scale over-repair; The second is to determine scientifically feasible restoration targets in view of the squeezing of the mangrove ecological space caused by sea level rise and coastal erosion; The third is to strengthen the construction of ecological seawalls in the muddy coastal lowland areas.

Key words: coastal evolution; sea level rise; erosion; ecological restoration; environmental geological survey engineering; coastal zone; China

Highlights: (1) The coastal evolution history since the Last Glacial Maximum is quantitatively reconstructed; (2) We find that coastal erosion is the core problem faced by the ecological restoration; (3) We provide natural-based restoration suggestions for sandy coasts, typical ecosystems and artificial coasts.

Author the first author: WANG Fu, born in 1979, Ph.D., senior researcher, engaged in research on coast and Quaternary geo-environment evolution; E-mail: tjwangfu@163.com.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20189506, No.DD20211301) and major program of NSFC (No.42293261).

1 引 言

海面上升已经成为影响当今人类社会发展的重大挑战,尤其是全球人口、基础设施与社会财富大都集中于地势低平的海岸地区(骆永明,2016),京津冀协同发展、长三角一体化和粤港澳大湾区等国家区域发展战略均涉及海岸带地区。该类地区生态环境脆弱,地面标高通常 $<+5\text{ m}$,部分地区甚至低于 0 m 。与此同时,进入21世纪以来,大规模海岸带开发和围海造陆急剧扩张(施佩歆等,2016; Sengupta et al., 2018; 汪翡翠等,2019,2021; Wang et al., 2019; Li et al., 2020; Wang et al.,2021),造成中国

大陆自然岸线比例从1975年的88%大幅度下降到2017年的38%(王福和肖国强,2020^①;肖国强等,2022),岸线大幅度人为向海推进过程已经掩盖了自然侵蚀过程(Wang et al., 2019)。本世纪海面将继续上升,甚至加速上升(IPCC, 2014,2021),亟需从“地质历史时期—现代—未来”的角度深入研究海岸带地质演化,识别出真正的自然演化过程及趋势,对于海岸带地区国土空间规划、应对和适应气候变化,尤其是正在开展的海岸带生态保护和修复工程至关重要。

本文系统梳理、总结了我国海岸带地质演化研究成果,在此基础上,采用钻孔综合研究、遥感解译和ArcGIS空间分析等手段,将古岸线进行数字化,

定量重建了末次盛冰期以来的海岸演化过程,并与现代海岸演化过程进行了对比分析,以期为基于自然演化趋势的中国海岸带生态保护和修复提供科学依据。

2 中国海岸自然地质格架

中国海岸线总长度约3.2万km,其中大陆岸线约1.8万km(Chen et al., 2021),沿海地区从北向南依次由辽东隆起带、渤海湾盆地、燕山隆起带、鲁西鲁东隆起带、南黄海盆地和浙闽隆起带等构造单元组成。现代海岸类型受构造控制明显,隆起带主要发育基岩-砂质海岸,盆地主要发育广阔的泥质海岸。按照构造控制作用,可将中国海岸分为2种主要类型:隆升基岩-砂质海岸和盆地沉降泥质海岸(图1)。

构造升降作用,是控制海岸类型及演化的主要因素。同时,第四纪以来,中国海岸在海面变化和河流共同作用下,发生了多次海侵海退,在辽东湾、渤海湾、苏北平原、长三角和珠三角等地的地层中记录了多期海侵地层(黄镇国等,1982;辽宁省地质局水文地质大队,1983;中国科学院海洋研究所海洋地质研究室,1985;秦蕴珊等,1989)。海陆演替在万年尺度频繁发生,其中距离现在最近是始于20 ka BP的末次盛冰期以来的海侵海退事件。

3 末次盛冰期以来的海岸演化及其控制因素

3.1 末次盛冰期的古地理环境与海岸线位置

在约26~18 ka BP的末次冰期最盛期时,气候寒冷,冰川发育,海面下降到约-120至-135 m处(IPCC, 2014),海水退至东亚大陆架斜坡处,黄、渤海陆架全部出露(图2),内陆架也裸露成陆,成为亚洲大陆的一部分(图2)。蒙古高压增强给亚洲大陆带来冷的气流,吹蚀亚洲内陆,出露的陆架普遍沙漠化(赵松龄,1991)。南海北部陆架区末次盛冰期亦广阔成陆,冬季受到北方强大的冷高压和寒潮的侵袭带来的强劲东北风,吹扬起陆架上原有的河流相或滨海相的砂质沉积物,塑造了大规模的沙丘(吴正等,1993)。渤海地区1.1万年前的海岸线在其口门处,即庙岛群岛附近(图2)。

末次盛冰期时,渤海变为远离海岸的内陆湖

盆,山前冲积物覆盖了冀鲁平原和下辽河平原的大部分区域,河湖洼地几乎全部消亡,冀鲁平原与下辽河平原连在一起,成为统一的陆地。植被以柏科、阔叶树、苔藓、禾本科组合为主,指示偏冷(凉)气候(蒋辉等,1981;郝秀东等,2022);长江三角洲,海水退出,物源供应减少,形成古河谷和古河间地2个古地理单元。植被以松属、桦属、蒿属组合为主,除松属含量较多外,冷杉、云杉和桦属含量也占相当数量,同样指示寒冷气候(陈中原和杨文达,1991);珠江三角洲大部分暴露剥蚀,广泛地发育有风化作用形成的花斑黏土,一些相对低洼地带周围逐渐形成沙堤、湖泊,并逐渐演化成沼泽环境,地层中孢粉浓度极低,种类很少,松属、鳞盖蕨比重大,其余种类含量很低,指示冷干气候(黄镇国等,1982)。随着气温上升,约11 ka前时海面上升到约-55 m处(Lambeck et al., 2014),中国沿海地区开始了快速的海进过程,海岸线到达渤海入口处的庙岛群岛一带(图2)。随后,全新世海侵全面开始影响现代海岸带地区,海岸自然快速演替再次发生。

3.2 全新世早期海面快速上升与海岸演化

Lambeck et al. (2014)根据远区不同地点的968个海面标志点(包括作者所在小组的12个),在假设排除了局地构造、沉积自压实、再搬运对年龄数据的污染及均衡补偿影响等因素后,重建了与冰盖融化等体积的海面(the ice-volume equivalent sea level, ESL)上升历史,Miller et al. (2020)进一步肯定了这一成果。其结果表明,与冰盖融化等体积的海面高度从11.7 ka BP时的约-61.7 m快速上升至7 ka BP时的约-5.4 m,平均上升速率约12 mm/a。随后,从7 ka时的约-5.4 m、6 ka BP的约-2.9 m、5 ka BP的约-1.7 m逐渐上升到现代海平面高度,平均上升速率减为约0.77 mm/a(Lambeck et al., 2014)。

中国目前尚缺少充分的与冰盖融化等体积的海面变化研究,基本上仍停留在相对海面变化研究的水平。中国沿海地区10 ka以来的全新世相对海面变化(RSL)趋势,是全球、区域和局地因素共同影响下的RSL。全新世早中期相对海面快速上升,平均上升速率5.7~13.7 mm/a,在7.5~6.2 ka BP接近并达到现代海面的高度,之后海面缓慢上升。其中,渤海湾在9.8~8.3 ka cal BP期间,相对海面大致位于-23~-14 m,平均上升速率为6.3 mm/a。在8.3~

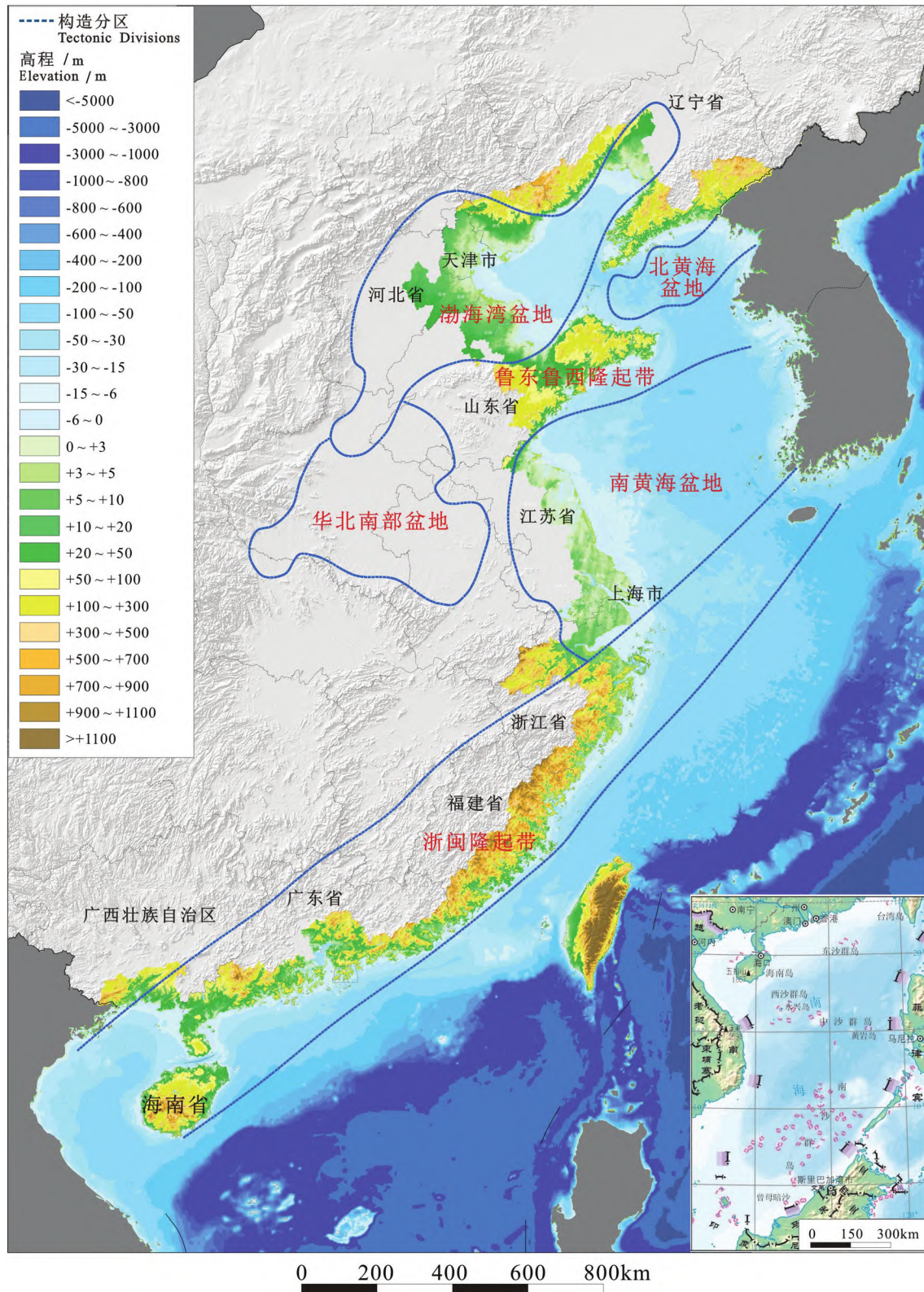


图1 中国沿海构造格架简图(构造分区据李国玉和吕明岗,2002)

Fig.1 Sketch map of the coastal structure framework along the Chinese mainland(after Li Guoyu and Lü Minggang, 2002)

<http://geochina.cgs.gov.cn> 中国地质, 2023, 50(1)

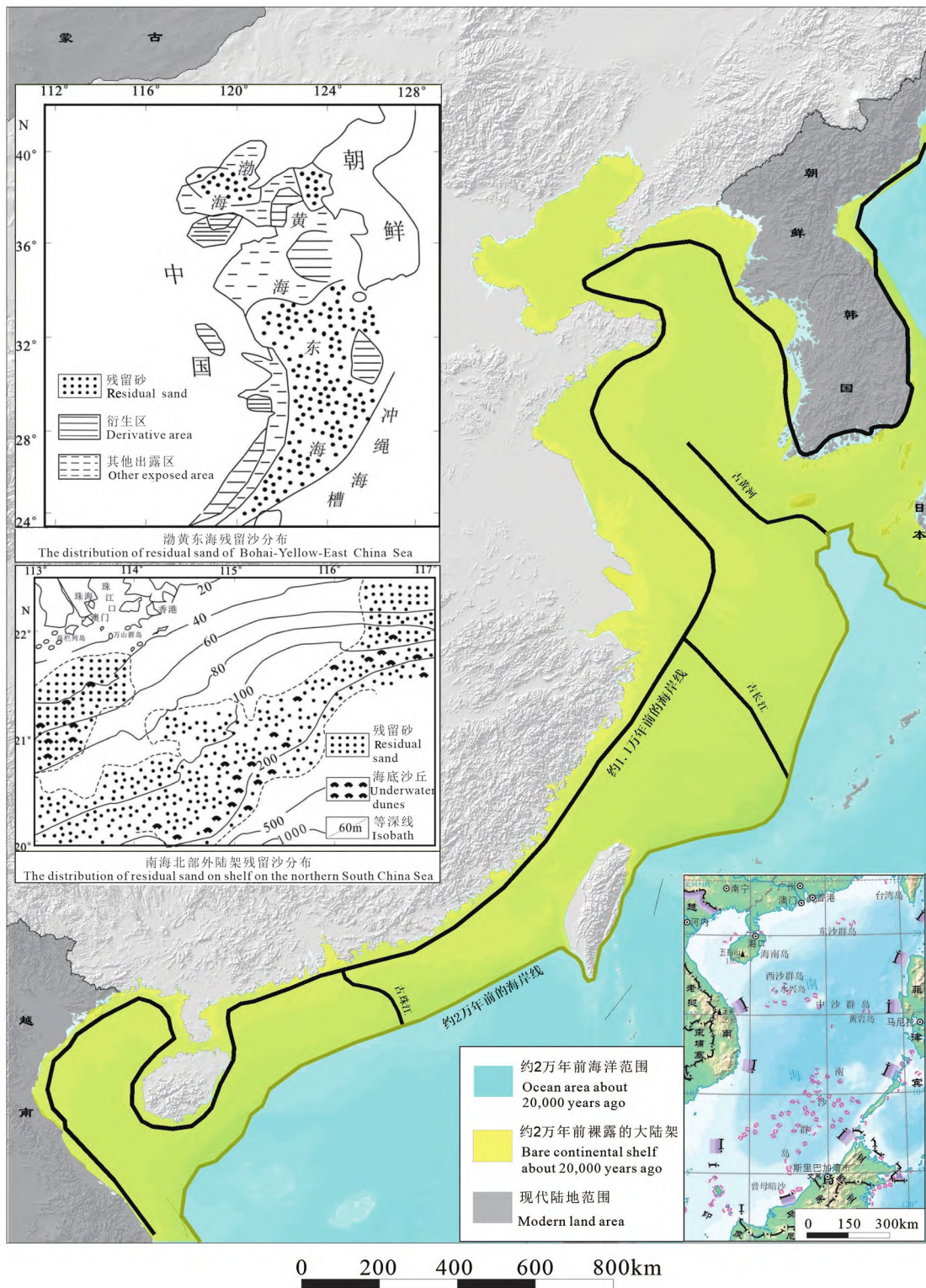


图2 末次盛冰期以来海岸线变化及古地理概图(中国地质调查局海岸带地质环境重点实验室,2018^⑥;据赵松龄,1991;吴正等,1993改绘)

Fig.2 Overview of coastline changes and paleogeography since the last glacial maximum (Key Laboratory of Coast Geo-environment, China Geological Survey, 2018^⑥; modified from Zhao Songling, 1991;Wu Zheng et al., 1993)

<http://geochina.cgs.gov.cn> 中国地质, 2023, 50(1)

7.9 ka cal BP 期间,海面快速上升,速率约为 12.6 mm/a,在 7.9 ka cal BP 达到 -8 m。在 7.9~6.2 ka cal BP 期间,海面上升速率减缓,约为 3.0 mm/a,在 6.2 ka cal BP 达到近似目前的海面高度,约为 -3.0 m。之后,海面以 0.5 mm/a 的速度缓慢上升(Li et al., 2021)(图3)。

长三角江苏沿海地区,在全新世早、中期海面平均上升速率为 12.6 mm/a,是一个上升速率逐渐减缓的过程:距今 11.2~8.2 ka cal BP,上升速率为 15.7 mm/a;在距今 8.2~7.1 ka cal BP,上升速率为 10.9 mm/a。在距今约 7.1 ka cal BP 之后,上升速率为 0.42 mm/a(李建芬等,2017^⑥;图3)。

珠三角地区,在全新世早、中期海面平均上升速率为 13.7 mm/a,不同阶段速率不同:距今 10.5 ka cal BP 时速率为 (16.4±6.1)mm/a,在距今 9.5 ka cal BP 时达到 (33.0±7.1)mm/a;在此阶段之后,海面上升速度迅速下降至距今 8.5 ka cal BP 时的 (8.8±1.9) mm/a,以及距今 7.5 ka cal BP 时的 (1.7±1.3)mm/a;在过去的约 7.0 ka 中,研究区的相对海面变化很小(Xiong et al., 2018;图3)。

在海面快速上升的作用下,中国东部沿海平原全新世海侵在 7~5 ka 前达到最大,在辽东湾最大海侵边界位于大石桥—牛庄—沙岭一带(夏东兴和王永吉,1981;辽宁省地质局水文地质大队,1983;符

文侠,1988;He et al., 2018)(图4),在渤海湾到达河北省盐山县—沧州市—霸州市—天津市武清区—宝坻区一线(薛春汀,2009;Wang et al., 2019)。在山东淹没了北镇—广饶—昌邑以北、以东的广大地区(图5),在苏北达到赣榆—兴化—太湖一带(图6),在珠三角达到黄埔—石楼—沙湾—大良—杏坛—南华一线(李平日等,1991;图7)。

3.3 全新世中—晚期的海岸演化

随后,海面总体上仍在缓慢上升,从距今约 7 ka 前的 -6~-5 m 上升到距今约 2 ka 前时的 0 m 左右,距今 2 ka 前至今,海面仅有分米级的小幅波动(Kopp et al., 2009; Lambeck et al., 2014; Bradley et al., 2016; Wang et al., 2020; 方晶等, 2022)。当海侵达到其最大边界之后,因入海河流携带的大量泥砂不断堆积,岸线整体表现为开始向海推进。在此过程中,海岸线有过数次较长时间的停顿,在渤海湾和苏北平原沿海地区留下了数道贝壳堤—岭地古岸线。图5显示的古岸线就是依据渤海湾海河南部平原的贝壳堤和海河北部平原的埋藏牡蛎礁间的岭地确定的。根据图2中的距今 11 ka 古岸线位置和图4至图7中全新世海侵最大线位置,以及以现代岸线位置大致作为 1850 年岸线位置,概略计算出中国东部沿海自全新世以来的海进和海退平均速率,早全新世海侵时,江苏沿海海进速率最快,约 69 m/a,辽东湾速率最

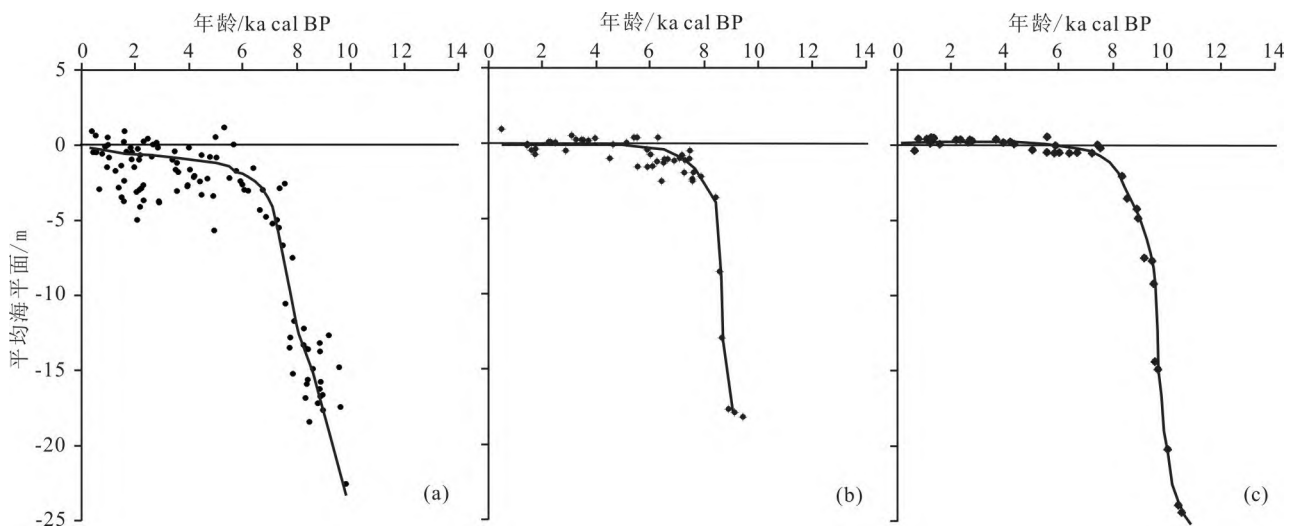


图3 渤海湾、长三角、珠三角全新世相对海面变化

a—渤海湾;b—长三角;c—珠三角(图a据Li et al., 2021; Wang et al., 2020绘制;图b引自李建芬等,2017^⑥;图c引自Xiong et al., 2018)

Fig.3 Holocene sea level changes of Bohai Bay, Yangtze River Delta and Pearl River Delta

a—Bohai Bay; b—Yangtze River Delta; c—Pearl River Delta (Fig.a modified from Li et al., 2021 and Wang et al., 2020; Fig.b modified from Li Jianfen et al., 2017^⑥; Fig.3c from Xiong et al., 2018)

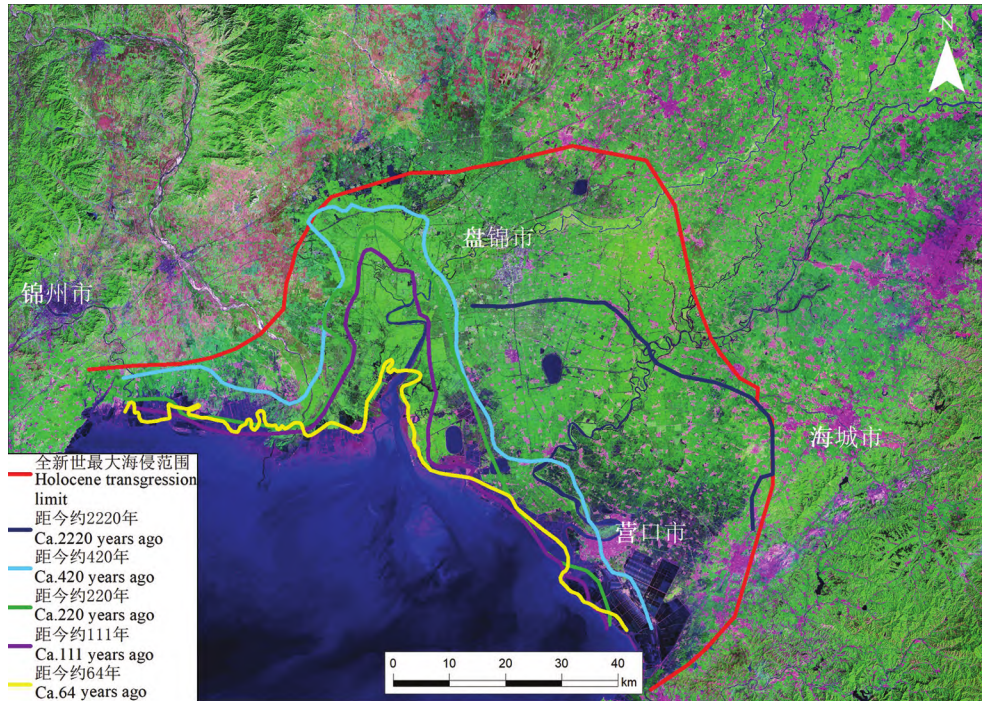


图4 辽东湾全新世海侵最大范围及古岸线位置(据辽宁省地质局水文地质大队, 1983; He et al., 2018)

Fig. 4 The Holocene transgression maximum and the location of the ancient shorelines in Liaodong Bay (after the Hydrogeological Brigade of the Geological Bureau of Liaoning Province, 1983; He et al., 2018)

慢,约10 m/a。中晚全新世成陆过程中,黄河三角洲和长江三角洲海退速率最快,为15~19 m/a,辽东湾速率最慢约6 m/a(表1,表2)。

3.4 全新世海岸演化中的古地理环境演替过程

冰后期至全新世中期,海面的快速上升使中国东部海岸由以滨海湿地环境为主转为浅海湿地环境。全新世中期以后,海平面上升速率减缓加之河流共同作用下,逐渐开始成陆,由浅海湿地环境复又转换为滨海湿地环境。在渤海湾地区形成了5道断续的贝壳堤—潟湖(王福等,2020;王宏,2022)、牡蛎礁—岭地(李建芬等,2020)古岸线(图5),在苏北平原发育了古砂堤群,并形成了南、北两大潟湖区(凌申,1990;图6)。后因黄河夺淮,大量泥沙被带至里下河及硕项—桑墟和艾塘潟湖区,古潟湖被淡化,最终淤积为平原。在长江三角洲地区,形成了冰后期至全新世中期的古河谷的充填以及河床、河漫滩—河口湾和部分河口湾—浅海环境和全新世晚期的局部河口湾—浅海及三角洲环境。距今7~3 ka间,长江中下游河道普遍发生淤积,但河流搬运到河口的泥沙相对较少,岸线推进缓慢,距今3~2 ka,长江口的泥沙显著增多,三角洲发生快速进积,

现代长江三角洲的绝大部分地区就是在这段时间形成的(严钦尚和洪雪晴,1987)。珠江三角洲地区,距今6 ka左右,除三角洲丘陵山地外,大部分平原地区均被海水淹没。此时,万顷沙地区为20 m水深的河口湾浅海环境。海侵高峰期后,三角洲沉积开始进入填积型海退序列,由河口湾浅海环境过渡到潮滩堆积为主的沉积环境。在距今2.5 ka以来海面上升速度较慢,沉积速率超过相对海面上升速率,三角洲开始快速进积,形成前三三角洲(河口湾浅海)—三角洲前缘水下浅滩、汉道、潮滩—三角洲平原沙洲、分汊河道及近岸湿地的演变模式(王建华等,2009;图7)。

总之,末次盛冰期现代海岸地区古地理环境主要以河谷、河间地、荒漠化地等环境为主;全新世早期快速海侵发生时,地下水同时迅速抬升,现代海岸地区主要以沼泽河谷湿地环境为主,滨海湿地广泛发育;全新世中期沿海平原均被海水淹没,成为浅海湿地环境;之后由于河流输入大量泥沙,原被海水淹没的区域被河流输泥沙填充,重新成陆,该过程持续到近代,此时,沿海地区以潟湖、三角洲平原等滨海湿地环境为主。虽在地质记录中存在西

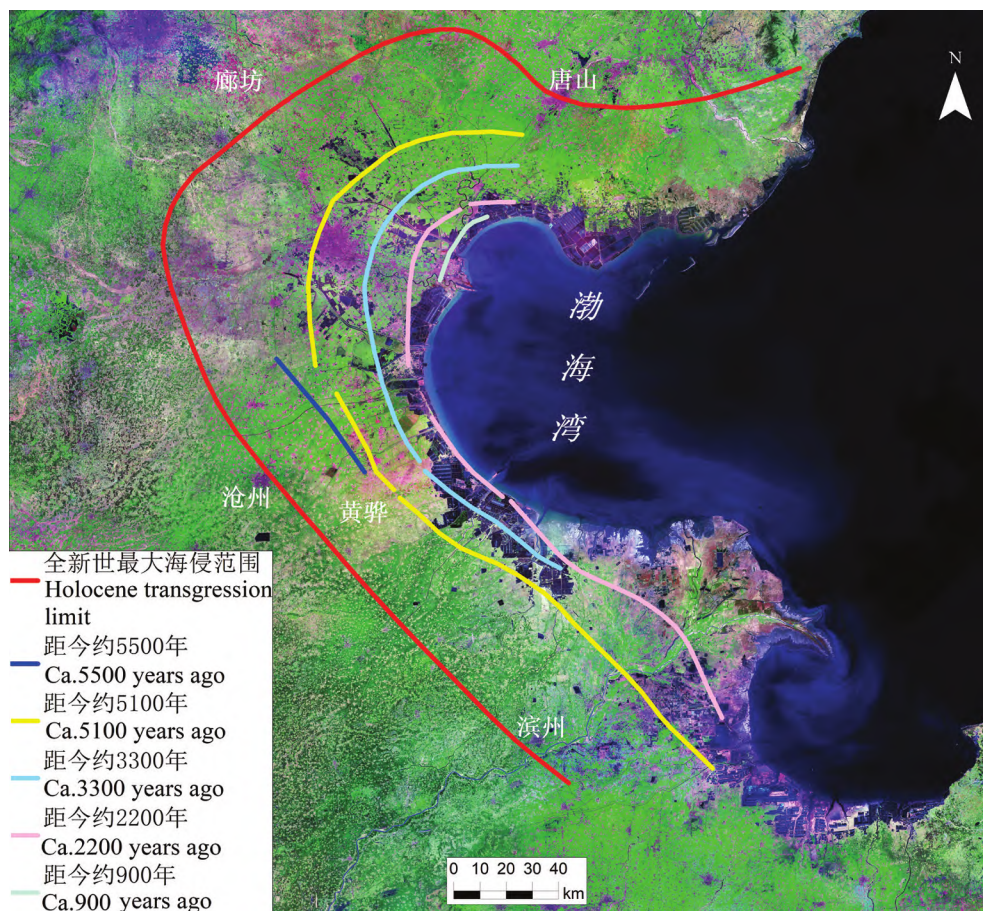


图5 渤海湾全新世海侵最大范围及古岸线位置(据薛春汀, 2009;王福等, 2020^①;李建芬等, 2020)

Fig. 5 The Holocene transgression maximum and the location of the ancient shorelines in Bohai Bay (after Xue Chunting et al., 2009; Wang Fu et al., 2020^①; Li Jianfen et al., 2020)

汉海侵等特殊海侵事件,但并没有在总体上改变沿海地区中晚全新世成陆的过程。至20世纪初期,渤海湾、长三角等沿海低地地区还存在大量的存水洼地,即滨海湿地广泛发育。基岩砂质海岸由于构造抬升作用基本未受海面上升明显影响,与现代格局基本一致。然而,近代有器测资料以来的数据显示,沿海平原地区的成陆过程发生了逆转。

4 1850年以来海岸演替规律及趋势分析

4.1 1850年以来的海岸演化过程

自1850年以来,全球气温上升了 0.85°C ($0.65\sim 1.06^{\circ}\text{C}$)、大致同期的全球海面上升了 0.19 m ($0.17\sim 0.21\text{ m}$),21世纪全球很可能将继续保持升温—海面上升的趋势(IPCC, 2014),这将对“小冰期”结束

以来升温—海面上升过程的延续。因此,查明“小冰期”(Matthes et al., 1939;王绍武, 1995)结束后的170年以来的海岸变化,是对今后做出科学预测的基本条件之一。

自1850年“小冰期”大致结束以来,海岸带的自然灾害,海面上升、地面沉降等均受到了人类活动的影响,可以称作“人类影响下的自然灾害”(“the human induced natural disasters”)。除黄河口、长江口、珠江口等大河河口附近海岸,中国泥砂质海岸大范围遭受侵蚀后退,基岩海岸基本保持稳定。

1900年代以来,辽东湾营口—锦州岸段,除辽河口附近由于河流输泥砂不断被填充外,河口两侧海岸总体表现为侵蚀(图4):1909—1956年辽河口岸线整体向海推进,但局部岸段发生较为严重的海岸侵蚀,自西向东分别为小凌河口西侧岸段、大凌

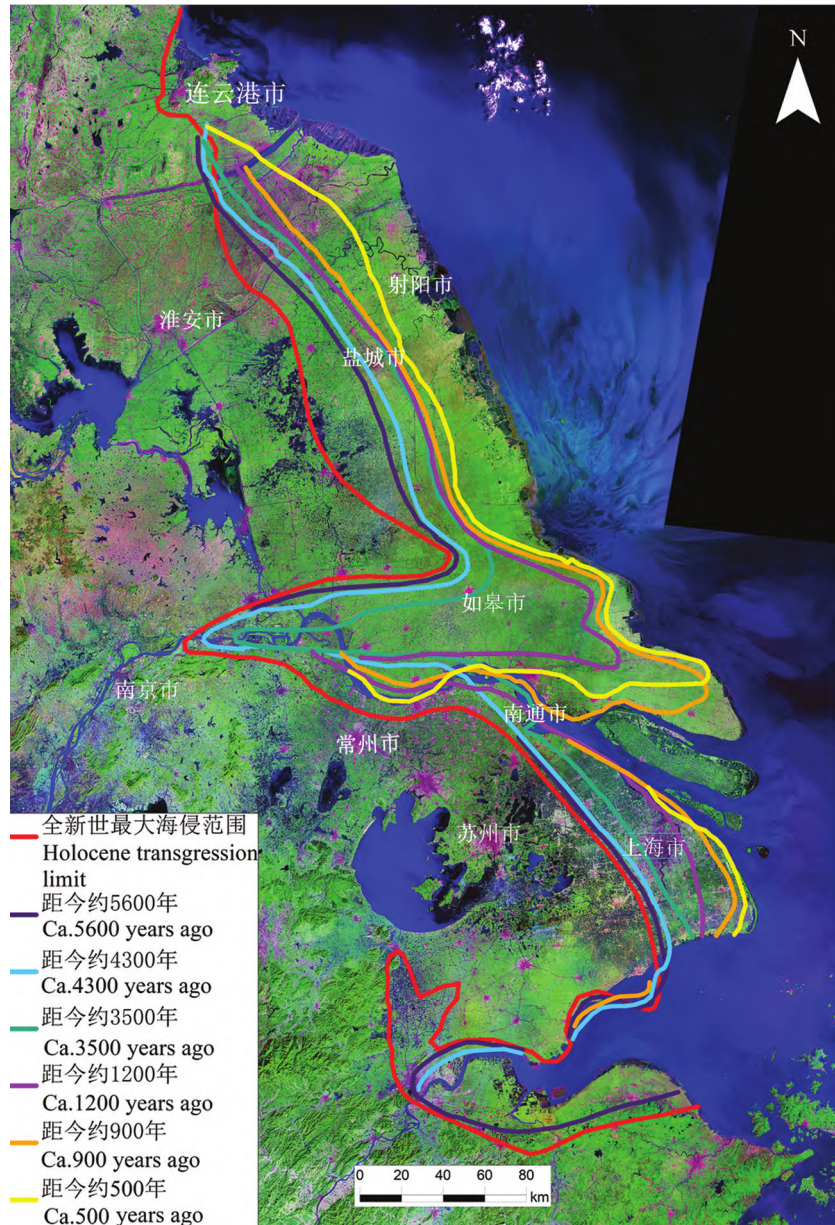


图6 苏北平原及长三角全新世海侵最大范围及古岸线位置(据朱诚等,1996)

Fig.6 The Holocene transgression maximum and the location of the ancient shorelines in Yangtze River and North Jiangsu plain (after Zhu Cheng et al., 1996)

河口西侧岸段以及双台子河东侧岸段。经初步测算,小凌河口西侧岸段平均侵蚀速率约为 55 m/a,大凌河口西侧岸段平均侵蚀速率约为 80 m/a,双台子河东侧岸段平均侵蚀速率约为 56 m/a。侵蚀速率远大于早中全新世海侵时的海岸侵蚀速率。

1900年代以来,渤海湾自然海岸受海岸侵蚀作用明显,滦河三角洲地区,由于近代滦河三角洲从曹妃甸向北东方向逐渐迁移,废弃三角洲前端的天然

岸段因海洋影响发生强烈侵蚀(中国地质调查局海岸带地质环境重点实验室,2018^⑥; Wang et al., 2019)。渤海湾南部大口河—滨州港天然贝壳堤岸段亦发生明显侵蚀,贝壳堤海岸亟需加强保护和修复(文明征等,2021^⑥)。

苏北废弃黄河三角洲岸线,1855年黄河改道渤海入海之后,因巨量泥沙供应断绝而形成了以六合庄为中心的侵蚀岸段(图8)。河口及两侧的三角洲

<http://geochina.cgs.gov.cn> 中国地质, 2023, 50(1)

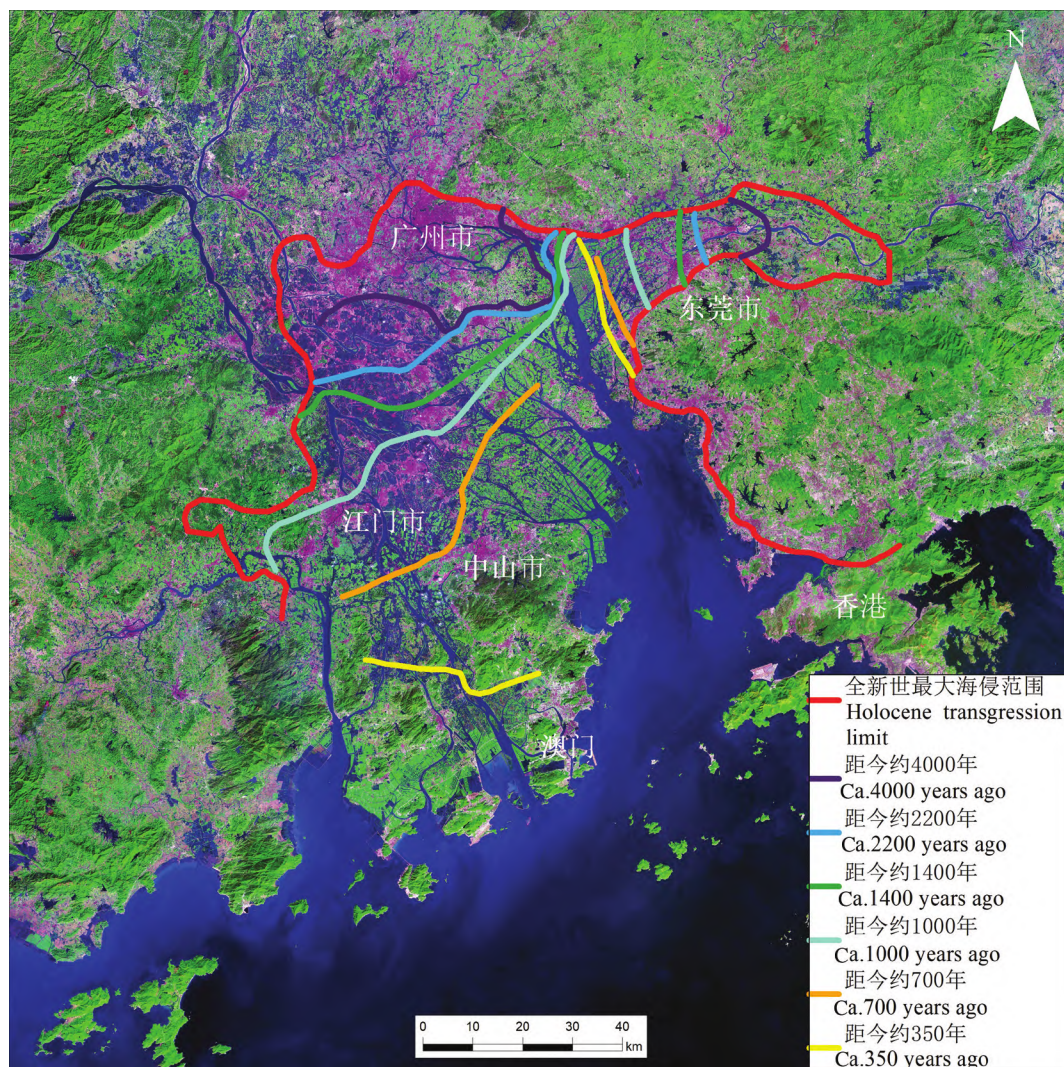


图7 珠江口全新世海侵最大范围及古岸线位置(据李平日等,1991)

Fig.7 The Holocene transgression maximum and the location of the ancient shorelines in Pearl River (after Li Pingri et al., 1991)

前缘岸线后退。最初几年内(1855—1862年), 蚀退速度可达1000 m/a以上, 之后, 随着河口的后退及在江苏海岸的突显度的减低, 岸线侵蚀速度渐渐降低, 但直到20世纪中期, 岸线后退速度仍可达100 m/a。1923—1956年六合庄岸线后退速度106 m/a, 南侧振东闸附近为83 m/a, 北侧废黄河尖为70 m/a。在

1949—1952年修建了主海堤, 20世纪70年代以后采用了护岸工程, 岸线蚀退有明显缓和。以上三处岸线后退速度分别下降为60 m/a, 50 m/a以及26 m/a(张忍顺等, 2002)。根据2013年和2017年中国海洋环境质量公报, 连云港至射阳段岸滩平均侵蚀速率自2013年高达26.4 m/a, 逐步降低至2017年的

表1 中国东部沿海海侵海退速率(m/a)

Table 1 Transgression and regression rates of Chinese mainland (m/a)

地质历史时期	辽东湾	渤海湾	黄河三角洲	苏北沿海	江苏南部	珠江口
早全新世距今11~6 ka海岸侵蚀速率	~10	~25	~26	~42	~69	~18
中晚全新世距今约6 ka~公元1850 a以来海岸淤进速率	~6	~14	~15	~8	~19	~11

<http://geochina.cgs.gov.cn> 中国地质, 2023, 50(1)

表2 中晚全新世海岸带平均淤进速率

Table 2 The average coast siltation rate since the mid-late Holocene

辽东湾		渤海湾		苏北沿海		珠江口	
地质历史时期/ka	平均淤进速率/(m/a)	地质历史时期/ka	平均淤进速率/(m/a)	地质历史时期/ka	平均淤进速率/(m/a)	地质历史时期/ka	平均淤进速率/(m/a)
6~2.2	2.95	6~5.5	57.68	6~5.2	9.53	6~4.0	4.39
2.2~0.4	11.15	5.5~5.1	20.39	5.2~4.3	4.20	4.0~2.2	3.10
0.4~0.2	20.47	5.1~3.3	8.39	4.3~3.6	12.40	2.2~1.4	5.92
0.2~0.11	24.34	3.3~2.2	10.59	3.6~1.2	5.06	1.4~1.0	16.15
0.11~0.06	119.3	2.2~0.9	6.28	1.2~1.0	34.94	1.0~0.7	42.44
				1.0~0.5	15.46	0.7~0.4	43.45



图8 1855年后苏北废黄河三角洲海岸的形成与演变过程(1895、1940、1949、1957年岸线据张忍顺,1984)

Fig.8 The formation and evolution of the abandoned Yellow River Delta coast in northern Jiangsu after 1855 (shoreline of 1895, 1940, 1949, 1957 after Zhang Renshun, 1984)

<http://geochina.cgs.gov.cn> 中国地质, 2023, 50(1)

10.5 m/a。但另一种重要的侵蚀过程显著加剧,即滩面的下蚀。以六合庄海堤脚滩面高程(废黄河基面)为例,1968年以来下蚀超过2.7 m。20世纪90年代上半叶,河口附近岸外15 m等深线以浅的海底下蚀速度同样非常惊人,达0.25 m/a以上,水深5~12 m的海底下蚀最快,可达0.56 m/a(张忍顺等,2002)。

长江三角洲岸线变化主要集中于3个地段:河口(包括长江南岸、北岸)、上海陆地地区和杭州湾北岸地带。受长江水流趋向和杭州湾上海大陆沙嘴发育状况的影响,在河口和杭州湾地区长江三角洲岸线变迁呈现出较为复杂的演变过程,表现为陆地和海岸的淤涨或坍塌,各个时期因水陆关系格局的不同而发生相应变化(杨伟兵,2011)。明清时期(1368—1911年),受滩地外涨和江海、陆海环境变化影响,真正的海岸线分布在今浦东东部地区的两条沙带(东、西沙带)旧址一线上(张修桂,1997)。长江口北岸18世纪中叶后先后涨出了惠安沙、永丰沙、永昌沙、永泰沙、永隆沙、永兴沙、南连升沙、北连升沙、日盈沙、联珠沙、杨家沙、永旺沙和西庆沙等10多个沙洲。从1911年《江苏省地图》分析,当年外沙还未完全涨接,至1915和1917年,人工围垦促进外沙涨连成陆,随之北岸沙嘴又从吕四廖角嘴跃移到寅阳角,海岸淤涨且不断东伸至启东(张军宏和孟翊,2009)。长江口南岸大部分地区在明代中叶以前持续向外伸展,少数地区则向内拥进,公元1500年以来岸线演变的趋势总的来说是北段(黄家湾以北至福山)削,南段(黄家湾以南至泥城)涨。当长江南岸北段的岸线达到历史上最远处之后不久就出现了全线内坍的现象,除少数地区外,江岸节节后退,一直延续到清末。自1911年后的半个多世纪以来,特别是新中国成立以来,由于海塘工程的不断加固,长江口南岸北段的岸线基本稳定,比较1920年以前的较大比例尺地图与当今的地形图,岸线基本相同(陈家麟,1980)。

珠江三角洲,近百年来,发生显著变化的现象是万顷沙和灯笼沙的向海推移。公元1800年以前,万顷沙地区还是汪洋一片。1830年,在三涌与四涌之间的福安围,开始有沙坦出露,1835年,番禺县水上居民开始在那里筑围,1883、1936及1950年海图对比结果显示,平原向海推进速率约为60 m/a。灯笼沙,在1883年时磨刀门是一个深入的漏斗湾,灯

笼沙尚未出现,金斗湾的岸线在蚶洲以西。之后开始围垦使岸线向海推进的速率平均达到120 m/a。尽管万顷沙和灯笼沙是人工围垦的结果,不能代表自然的淤积速率,但在大体相同的阶段及人工围垦条件下,灯笼沙的延伸速率比万顷沙大一倍,也大致反映了二者的自然淤积速率的比值(黄镇国等,1982)。

总之,自“小冰期”于1870年前后结束至1950年代的80年里,天然海岸线处于蚀退状态。自1950年代至今的70年间,人类活动在很大程度上逐渐掩盖了天然岸线蚀退的自然进程,导致人工岸线向海推进,近十余年来围海造陆区块的人工岸线更是推进至浅海区。但是,在残留的天然岸线和人为护坡不够坚固的岸段,海岸线蚀退、或人工护岸被破坏的现象仍随处可见。由此获得的基本结论是,近150年来,海岸蚀退从未停止,海岸蚀退与全球气温上升—海面上升、人类活动导致的河流输沙减少之间,存在同步现象。换言之,近百年以来海岸侵蚀一直在发生,如果没有人类活动的影响,海侵已经不可避免的在泥沙质海岸带地区大范围发生了。从自然演替的角度来讲,现在面临的海面上升、河流作用减弱的背景条件和全新世早—中期发生大范围海侵时的背景条件极为相似,因此,近百年以来的海岸侵蚀就是现代“自然—人为”共同作用下的演替结果。

4.2 海岸侵蚀的原因及演化趋势分析

4.2.1 黄河、长江河流作用对海岸演化的影响

自7 ka以来黄河、长江等大河携带大量的泥沙质沉积物入海,渤海湾沿海低地、苏北平原等由此成陆。然而,自1950年代以来,中国大部分河流由于上游用水和建闸,河流入海径流量和输泥沙量迅速降低。以1970—1979年及2008—2018年监测数据显示(表3):

与1970年代相比,辽河径流量从81亿 m^3 下降到23.5亿 m^3 、减少了71%,输沙量从1283万t减少到139万t、减少了89%。滦河现在几乎断流。海河径流量从10.1亿 m^3 下降到6.8亿 m^3 、减少了33%,较1950年代以前减少了93%,随着径流量的降低,海河自1970年代以来几乎无泥沙入海。黄河径流量从311亿 m^3 下降到182亿 m^3 、下降约41%,输沙量从91600万t下降到6976万t、减少了92%(表3)。长江

表3 入海河流年均径流量、年均输沙量对比

河流名称	1950年之前		1970—1979年		2000—2010年		2011—2018	
	径流量 /(10 ⁸ m ³ /a)	输沙量 /(10 ⁴ t/a)	径流量 /(10 ⁸ m ³ /a)	输沙量 /(10 ⁴ t/a)	径流量 /(10 ⁸ m ³ /a)	输沙量 /(10 ⁴ t/a)	径流量 /(10 ⁸ m ³ /a)	输沙量 /(10 ⁴ t/a)
辽河	87.0	1849.0	81.1	1283.0	27.0	186.2	23.5	138.7
滦河	49.0	2267.0	—	—	—	0.0	0.0	0.0
海河	97.0	—	10.1	—	2.8	0.0	6.8	5.7
黄河	431.0	111490.0	311.1	91600.0	145.7	13730.9	182.1	6976.3
长江	9323.0	46144.0	8934.9	47000.0	8592.1	19161.8	8810.4	11561.3
珠江	3550.0	8053.0	3552.4	8421.0	2605.2	2837.1	2824.4	2195.9

注:据程天文和赵楚年,1984,1985;中华人民共和国水利部2000—2019年中国河流泥沙公报统计;"—"表示无数据。

径流量略有降低,但是沙量从47000万t下降到11561万t,减少了75%。珠江径流量从3552亿m³下降到2824亿m³,减少了20%,输沙量从8421万t减少到2196万t,减少了74%(表3)。

入海河流径流量和输沙量的减少,已经对海岸带地区、尤其是三角洲地区造成一定影响,主要表现为土地损失、海岸侵蚀等。辽河口两侧海岸、现代滦河口、渤海湾、现代黄河三角洲、苏北废弃黄河三角洲、长江口等均发生快速海岸侵蚀。

渤海湾主要入海河流包括海河、独流减河和永定新河,1960年代以来,由于入海径流量和输沙量的锐减,虽然岸线已经人工固化,但是调查发现,岐口潮间带平均沉积速率较1960年代之前降低超过50%,近年的滩面监测甚至出现了侵蚀。同时,调查还发现浅海区已经大范围出现侵蚀,侵蚀速率个别区域超过10 cm/a。

表4 不同时代黄河三角洲累计径流量、累计输沙量和净造陆面积一览

年代	净造陆面积 / km ²	径流量 /10 ⁸ m ³	输沙量 /10 ⁴ t	年均造陆 面积/ km ²
1855—1954	1510	43100	11149000	151
1954—1976	548.3	10219.65	2564000	25
1977—1981	145	1530.28	433300	29
1981—1987	23	1716	468300	3.2
1987—1998	143.6	2280	582800	11.9
1998—2000	12.6	426	118200	4.2

注:据程天文和赵楚年,1984,1985;庞家珍和姜明星,2003;常军等,2004;中华人民共和国水利部2000—2019年中国河流泥沙公报统计。

黄河三角洲,自1855年黄河改道现代黄河三角洲入海以来,净造陆面积和径流量及输沙量存在密切的正相关性(表4,图9),也就是说径流量和输泥沙量控制了现代三角洲海岸演化过程。1950年代以前,河口累积造陆面积随着累积年径流量和输沙量显著增加,年均造陆面积超过150 km²;1950年代至1970年代,入海径流量和泥沙量下降到之前的四分之一,年均造陆面积降低到25 km²;1980年代以来,除1987—1998年大洪水,黄河入海水沙继续急剧减少,年均造陆面积不足5 km²。而且发生多次断流现象,造成现行北汉流路及清水沟废弃流路持续侵蚀(王一鸣等,2018; Yin et al., 2018; Gao et al., 2020; 李贺等,2020)。此外,黄河口沙嘴变化与黄河来水来沙条件关系密切,根据目前河口水沙条件推测,未来河口岸线变化将减缓,维持黄河口造陆与侵蚀平衡的临界来沙量为2.74~4.21亿t/a(郑珊珊等,2018)。

长江口,相较于长江年径流量的变化,长江年输沙量却明显呈现出下降的趋势。1974—1985年间,长江口陆域面积净减少16.10 km²,平均每年净减少陆域面积为1.74 km²。由于上游宝珠寺等大型水库的修建,自1985年入海沙量开始减小,1985—2000年水下三角洲经历了淤涨和冲刷交替变化,其中1997—2000年的淤涨为流域入海水量增加所致,2000—2009年期间呈现持续冲刷趋势。

水下三角洲在某一时间段内的冲刷和淤涨面积相等,也就是淤涨的速率为零,此时的人海水量和沙量为三角洲冲淤平衡的临界水力要素。杨云平等(2014)利用1985—2009年长江河口三角洲-10 m和-20 m等深线变化数据和水量、沙量和含沙

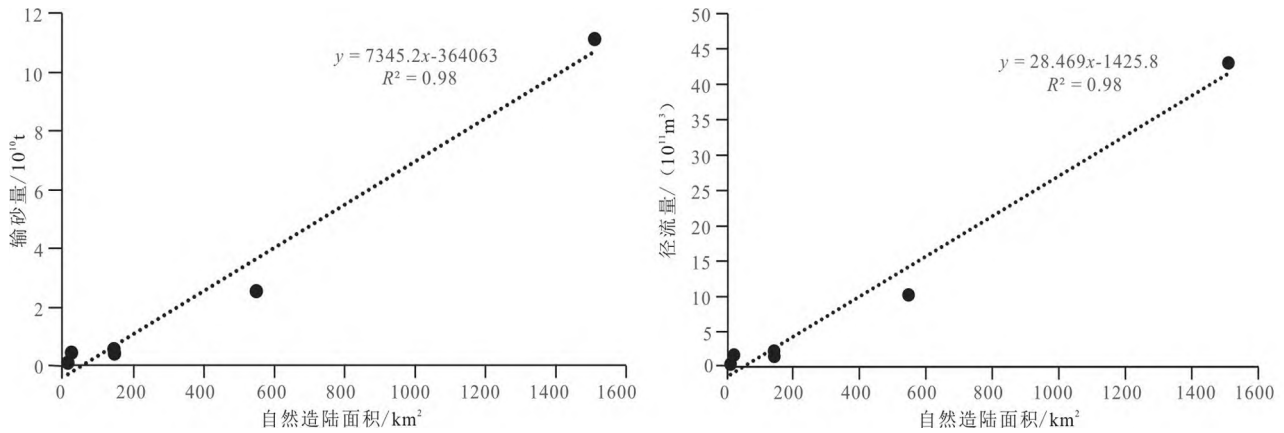


图9 黄河入海径流量、泥砂通量和造陆面积关系图
 Fig.9 Correlation between the Yellow River's runoff, sediment flux and land production area

量数据,讨论了冲淤与水量、沙量和含沙量之间的关系,结果显示,长江水下三角洲-10 m和-20 m区域达到上述冲淤平衡时的临界入海水量分别为 $8.51 \times 10^{11} \text{ m}^3/\text{a}$ 和 $8.81 \times 10^{11} \text{ m}^3/\text{a}$, 临界入海沙量为 $2.97 \times 10^8 \text{ t/a}$ 和 $2.57 \times 10^8 \text{ t/a}$, 临界含沙量为 0.339 kg/m^3 和 0.286 kg/m^3 (图10)。

河流输泥沙减少是引起海岸侵蚀的主要因素,而且由于人类对于水资源需求的不断增长,这一影响将会持续 (Walling and Fang, 2003; Ericson et al., 2006; Wang et al., 2018)。

4.2.2 海平面上升对海岸影响评估

(1) 相对海面上升已达 10 ka 以来最大值,并有继续加速上升趋势

中国沿海地面沉降监测结果显示,渤海湾、长三角地区是中国海岸带地区地面沉降较严重的地区。京津冀海岸带是中国沿海地面沉降最严重区,沉降速率平均在 20~30 mm/a, 局部地区甚至大于 50 mm/a (郭海鹏等, 2017)。

中国沿海近 30 年的海平面监测结果显示, 2000—2007 年上升速率为 2.5 mm/a, 2008—2010 年

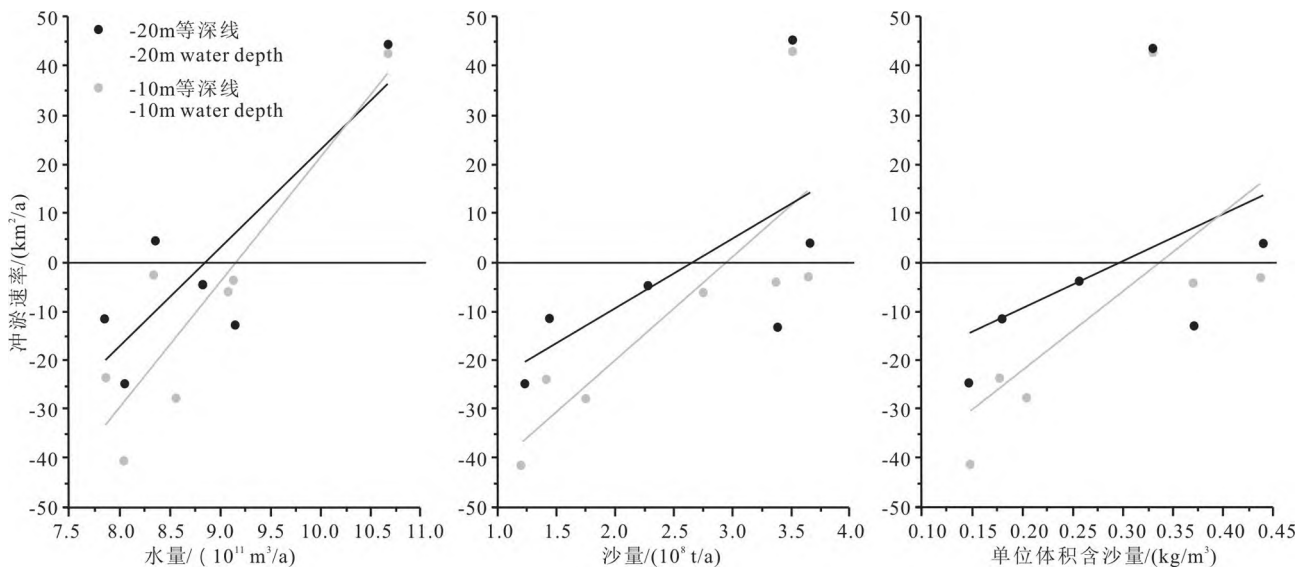


图10 长江三角洲冲淤速率和流域水力要素关系(据杨云平等, 2014)
 Fig. 10 The relationship between the erosion-deposition rate and the hydraulic elements of the Yangtze River Delta (after Yang Yunping et al., 2014)

<http://geochina.cgs.gov.cn> 中国地质, 2023, 50(1)

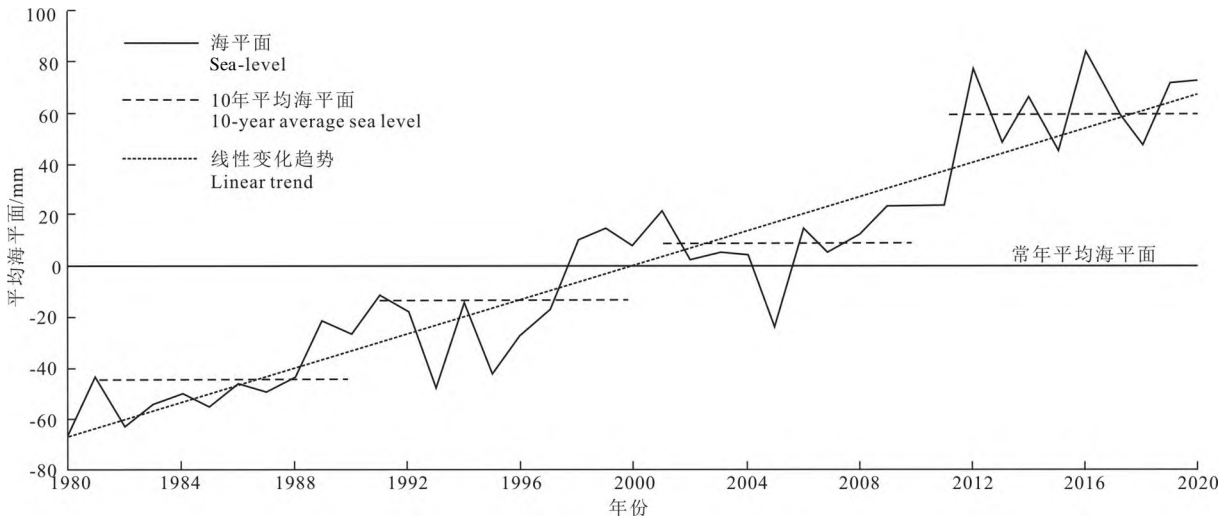


图11 中国沿海近30年海平面变化趋势(据自然资源部,2021)

Fig.11 The trend of sea level change along the coast of Chinese mainland during the past 30 years (after MNR, 2021)

为2.6 mm/a, 2011年为2.7 mm/a, 2012—2013年为2.9 mm/a, 2014—2015年为3.0 mm/a, 2016年为3.1 mm/a, 2017—2018年为3.3 mm/a, 2019—2021年为3.4 mm/a(图11)(自然资源部, 2001—2022), 呈现逐年加速上升的趋势, 尤其是2010年以来。叠加地面沉降后的相对海面上升速率迅速增高。

渤海湾和苏北平原及长三角泥质海岸带地区, 在叠加地面沉降之后, 现代相对海面上升速率均超过10 mm/a, 渤海湾地区处于近10 ka 以来的历史最高值, 苏北平原及长三角也达到了7.5 ka 以来的最高值。

(2)海面上升对海岸线影响程度评估

中国是风暴潮和台风威胁严重的国家之一, 辽东湾、渤海湾、莱州湾等北方沿海低地地势低洼, 风暴潮灾害频发。因此, 海面上升对中国沿海低地地区将产生深远和重大的影响。

基于中国海岸地质演化、岸线类型、海面上升、地表高程、地面沉降等, 对海面上升的影响进行了综合评估。结果显示, 基岩岸段不易受海面上升影响, 总长度3529 km; 辽东湾、渤海湾、黄河三角洲、莱州湾、苏北沿海、长三角和珠江口的泥质岸段和少量生物岸段为受海面上升影响强烈岸段, 总长度4195 km; 其余砂质岸段为易受海面上升影响岸段。

不易受影响的岸段主要分布在辽东半岛大连, 山东半岛烟台、威海、青岛, 浙江宁波、台州, 福建宁德、福州、莆田, 广东汕头、汕尾、阳江以及香港等地。易

受影响岸段主要为砂质岸段, 主要分布在辽宁绥中, 河北秦皇岛, 大口河, 山东潍坊、烟台、威海、青岛、日照, 江苏连云港、南通, 浙江舟山, 福建宁德、莆田、泉州、厦门, 广东汕头、深圳、珠海、茂名、湛江, 澳门, 广西北海、防城港, 海南海口、三亚等地。海面上升影响强烈岸段主要为泥质岸段, 主要分布在辽宁丹东、盘锦、营口, 河北唐山、黄骅, 天津滨海新区, 山东东营、潍坊, 江苏盐城、南通, 上海, 浙江嘉兴、宁波、台州, 广东中山, 海南岛西北部儋州等地。

中国沿海泥质海岸带向陆一侧的沿海低地地表高程资源匮乏, 尤其是渤海湾和苏北平原及长三角地区。该类地区为海面上升影响强烈的区域。中国沿海百年一遇寒潮型和台风型风暴潮增水位在+2~+4 m不等, 渤海湾地区百年一遇的风暴潮潮位为+3.262 m(吴少华等, 2002; 王宏等, 2010), 山东龙口地区+3.12 m(李梦梦和罗新正, 2018), 江苏蛎山站位达到+4.38 m(周天逸等, 2018)、福建沙埕港站位为+2.43 m(董剑希等, 2008)。如果以+3 m水位作为中国海岸百年一遇风暴潮的平均值, 那么地表高程低于+3 m的区域均为易受到百年一遇风暴潮淹浸的区域, 结合地表高程数据, 中国沿海地区约6.7万 km²的区域为百年一遇风暴潮潜在影响范围。全新世自然演替结果显示, 沿海现代5 m等高线与调查查明的全新世海侵影响最大边界临近, 该区域为易受海面上升影响的潜在区域, 面积达到11.5万 km²(图12)。

以渤海湾为例,海堤-滩面监测结果显示,海堤与现有滩面交汇处的高程普遍低于平均高潮位,海堤已经成为保护沿海低地的唯一屏障(图13),目前该岸段海堤整体可抵御百年一遇风暴潮。然而,在海面上升和地面沉降双重影响下,海堤抵御风暴潮的能力将被削弱,按照目前海面上升速率5.0 mm/a(依据渤海湾塘沽验潮站近20年海面观测数据拟合计算获得)、海堤沉降速率11~37 mm/a计算(天津市控制地面沉降工作办公室,2014^⑨),该区现有海堤到2050年后将无法抵御百年一遇风暴潮。因此,应考虑到地面沉降和海面上升的影响,科学规划海堤设防标准,按照现有的监测结果,海堤相对高程须考虑到年均损失16~42 mm的影响。

无论是地质历史时期还是近现代的海岸演化,均受到海面变化、河流作用和构造作用的控制。1850年以来,在海面上升、河流输泥砂减少的大背景下,除黄河等河口外,沿海平原海岸和基岩海岸中的砂质岸滩整体上已经开始表现为持续侵蚀,与自然演替规律对比后,本文认为,目前中国海岸已经进入地质历史时期的海侵阶段,换言之,海面上升和河流作用减弱引起的海侵作用将是海岸带生态保护修复面临的长期挑战。

5 对海岸带生态保护和修复的启示

生态系统(ecosystem)是由生物群落及其生存环境共同组成的动态平衡系统(中国大百科全书,2002)。本文所讨论的海岸带地质演化过程是属于生态系统中的非生物物质的演化过程,该过程决定了栖息在其上的动植物及其能量传递过程等,也是目前海岸带生态保护修复需要加强重视的重要一环。

“坚持尊重自然、顺应自然、保护自然”是生态保护修复的核心理念,因此,掌握自然演化过程和规律是科学开展生态保护修复的前提。如上文所述,第四纪以来,中国海岸带发生了6~7次海侵-海退旋回。其中,距今18~6 ka前,由于海面快速上升,海岸线由大陆架向陆推进到距离现代岸线80 km附近,现代岸线和滨海湿地均被海水淹没。6 ka BP~AD 1850年,随着海面上升速率减缓、河流作用逐渐加强,海岸线开始向海推进至现代岸线附近,辽东湾、渤海湾、黄河三角洲、苏北沿海和长江三角洲、珠江三角洲等滨海湿地逐渐形成。1850年以

来,随着全球气候变暖、海面加速上升、入海水沙减少,海岸线由整体向海推进转为向陆侵蚀。最为典型的表现就是中国70%砂质岸线正在不同程度的遭受侵蚀,南方的红树林岸线由于侵蚀不断退化。自1950年代至现今的70年间,围填海和围海养殖等人类活动在很大程度上掩盖了天然岸线蚀退的自然进程,但海岸蚀退从未停止(表5)。基于以上海岸带自然演替规律,笔者判断,中国海岸带已处于海岸侵蚀阶段,海面上升将是长期面临的形势,揭示的海岸带自然演替规律和内在机理,可为海岸带生态保护和修复提供基本科学规律遵循。

在海面上升和海岸侵蚀的背景下,针对中国海岸带生态保护修复提出以下建议:

一是砂质岸滩不宜开展大规模修复,因为这是不符合自然规律的行为,建议选择具有高生态价值和旅游等经济价值的沙滩为主要修复对象开展修复,如河北秦皇岛、山东青岛、海南三亚等地的沙滩,能够为当地带来巨大的经济价值,可采取人工措施开展系统修复。

二是盐沼湿地、红树林岸线修复亦应首先考虑到侵蚀和海面上升对其生态空间压缩的影响,应以营造生态空间修复为主,如辽宁盘锦盐沼湿地、江苏盐城盐沼湿地、福建漳江口红树林、广东湛江红树林、广西防城港红树林、海南东寨港红树林等地,可开展以海岸带侵蚀治理为主的盐沼湿地和红树林生态修复。

三是泥质岸线及其后侧的沿海低地在地质历史时期海水多次进出,应以预防风暴潮等洪水灾害为主,城市和重大工程前端的海堤和围填海区应以生态化建设为主,如渤海湾-天津、长三角-上海和珠三角-广州等地,应以保护沿海经济社会发展为主要目标,可开展以预防海平面上升引起的洪水灾害增加为主的生态海堤建设。

四是基岩岸线比较稳定,基本不受海面上升和侵蚀的影响,应以降低人类活动影响为主,如中国的辽东半岛、山东半岛、粤闽浙基岩海岸,可采取以保护为主的自然恢复措施开展生态系统修复。

6 结 论

(1)已有地质记录显示近200多万年以来中国海岸共发生约7次海侵海退事件,地质历史时期海



图12 中国大陆沿海海面上升影响程度评估图(据王福等,2020^①)

Fig.12 Assessment of the sea level rise impact on the coast of Chinese mainland(after Wang Fu et al., 2020^①)

<http://geochina.cgs.gov.cn> 中国地质, 2023, 50(1)

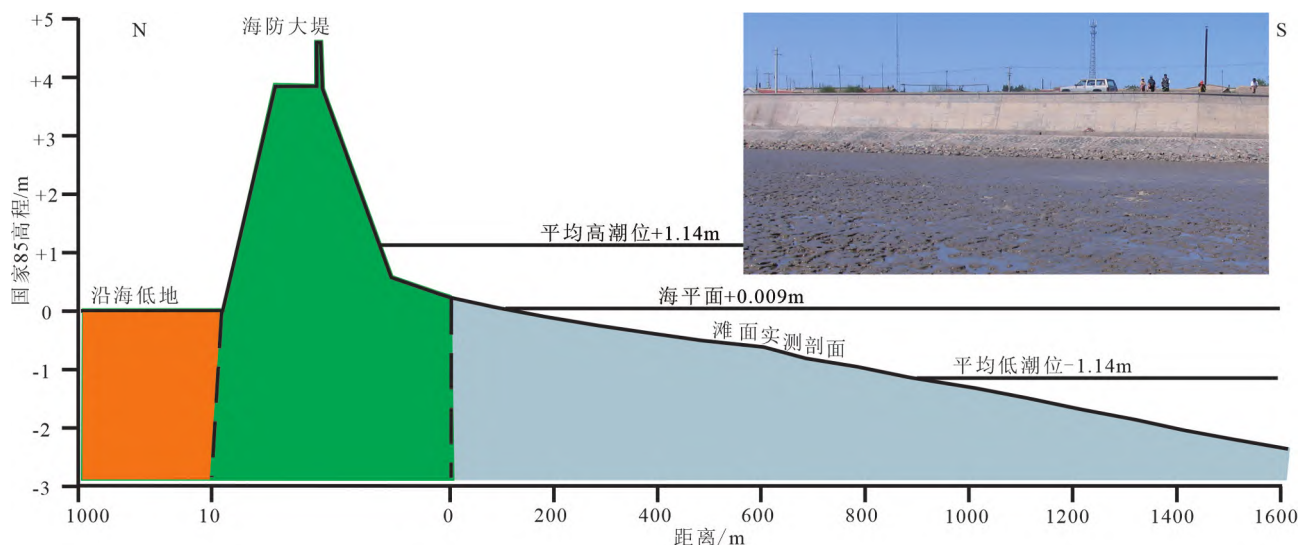


图13 天津海河北侧海堤-滩面实测剖面(据王福等,2010)

Fig.13 The measured seawall profile on the north side of the Haihe River in Tianjin (after Wang Fu et al., 2010)

水频繁进出沿海地区。其中最后一次发生在 20 ka 以来,海面从距今约 18 ka 的 -130 m 上升到距今约 10 ka 的 -50 m 左右,而后,继续快速上升,距今 7~5 ka 左右海水侵入到陆地最大范围 80 km 左右,中国东部的辽东湾、渤海湾、苏北平原、长三角、珠三角等区被海水淹没。此后,海面基本稳定或有小幅度上升,随着河流输泥沙作用的增强,发生海退,中国的辽东湾、渤海湾、长三角等地重新成陆。

(2)至 1850 年“小冰期”结束以来,气候变暖,海面上升,中国海岸除大河口三角洲进积之外,大部分海岸又开始发生侵蚀。从中国海岸线 2 万年以来的地质演化过程来看,1850 年以来海岸线整体由淤

积转为侵蚀,海岸带进入海侵初期阶段。中国乃至全球海岸带地区将长期面临海面上升加快、海岸侵蚀加剧、风暴潮威胁增大的自然地质背景。

(3)考虑到近 200 万年以来,海水频繁进出中国东部的辽东湾、渤海湾、长三角和珠三角等沿海平原地区,目前,中国乃至全球海岸地区正处在类似地质历史时期曾经经历过的海侵阶段,因此,海岸侵蚀将是海岸带生态修复面临的核心地质问题。

致谢:中国地质调查局天津地质调查中心陈永胜高级工程师、姜兴钰高级工程师、商志文正高级工程师、施佩歆正高级工程师、李勇研究员、袁海帆工程师、文明征高级工程师、杨朋高级工程师参与

表 5 中国沿海地区第四纪以来海陆演替过程

Table 5 The land-sea changing evolution processes in the Chinese coastal region during Quaternary period

时代	海陆演化	古地理及地表环境	环境背景
第四纪	7次海进海退	海陆相地层交互	构造升降、气候与海面变化
距今 2.0~1.1 万年	仍处于低海面时期,海面最低时较现在低近 130 m,基本退出陆架地区	渤海成为湖盆和沙地环境、长三角成为河谷和河间地、珠三角以沙堤和湖泊环境为主	气候开始转暖,海面下降到最低点后开始上升
距今 1.1~0.5 万年	发生大规模海侵,距今 0.7~0.5 万年海侵达到最大	河谷被充填,现代沿海平原被海水淹没,海水进入内陆	海平面快速上升、河流侵蚀基准面上升、调适空间增加
距今 0.5 万年~公元 1850 年	发生较大规模海退,渤海湾、长江三角洲等在这一时期逐渐成陆	留下多道沿岸堤或障壁岛类古海岸线,沼泽—盐沼、贝壳堤—潟湖、障壁岛—潟湖环境	海面在距今约 0.3~0.2 万年时接近现在的高度,海洋作用减弱,河流输运泥砂形成新的陆地
1850 年以来	砂泥质海岸开始持续侵蚀,沿海工农业兴起	沿海低地淡水沼泽—盐沼、贝壳堤—潟湖,逐渐被大规模沿海城市化和围海造陆侵占	海平面上升、河流输运泥砂能力因人为因素而减弱,海岸面临不断增加的侵蚀

数据搜集与整理,在此一并致谢。

注释

①王福,肖国强. 2020. 海岸线现状与变迁专题研究[R]. 中国地质调查成果快讯, 6 (16/17): 8-10.

②中国地质调查局海岸带地质环境重点实验室. 2018. 21世纪海面上升与我国研究案例:渤海湾地区(案例1)[R]. 海岸带地质环境研究动态(中国地质调查局天津地质调查中心), 6: 15-31

③李建芬,王宏,商志文,王福. 2017. 科技部973计划和重大科学研究计划项目“扬子大三角洲演化与陆海交互作用过程及效应研究”第一课题“扬子大三角洲沉积体系结构与演化”之“晚更新世以来扬子大三角洲海平面变化”专题报告[R]. 中国地质调查局天津地质调查中心, 1-7.

④王福,王宏,李建芬,李勇,施佩歆,田立柱,胡云壮,姜兴钰,商志文,杨吉龙,陈永胜,肖国强,李磊,匡海洋,袁海帆,杨朋,文明征. 2020. 海面上升对我国海岸带的影响评估及对策研究专题报告[R]. 中国地质调查局天津地质调查中心, 1-49.

⑤文明征,姜兴钰,李勇,田立柱,王宏. 2021. 汪子岛岸段2020年地质地貌调查报告[R]. 中国地质调查局天津地质调查中心, 1-12.

⑥天津市控制地面沉降工作办公室. 2014. 天津市地面沉降年报2013年报[R]. 天津市水利局, 1-20.

References

- Bradley S L, Milne G A, Horton B P, Zong Y Q. 2016. Modelling sea level data from China and Malay-Thailand to estimate Holocene ice-volume equivalent sea level change[J]. *Quaternary Science Reviews*, 137: 54-68.
- Chang Jun, Liu Gaohua, Liu Qingsheng. 2004. Analysis on spatio-temporal feature of coastline change in the Yellow River Estuary and its relation with runoff and sand-transportation[J]. *Geographical Research*, 23(5): 339-346 (in Chinese with English abstract).
- Chen Jialin. 1980. The South Bank changes of the Yangtze Estuary[J]. *Journal of Fudan University (Social Science Edition)*, S1: 61-73 (in Chinese).
- Chen Xijie, Jia Liqiong, Jia Ting. 2021. Overview and characteristics of China's islands: based on "statistical communique on China's survey in 2017"[J]. *China Geology*, 4: 756-758.
- Chen Zhongyuan, Yang Dawen. 1991. Quaternary paleogeography and paleoenvironment of Changjiang River estuarine region[J]. *Acta Geographica Sinica*, 46(4): 436-448 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Tianwen, Zhao Chunian. 1984. The estimation of discharge and loads from the rivers flowing into littoral seas of China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 39(4): 418-427 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Tianwen, Zhao Chunian. 1985. Runoff and sediment transport

of major rivers in China mainland and their impacts on the coast[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 7(4): 460-471 (in Chinese).

China Encyclopedia General Committee, Environmental Science Committee. 2002. *China Encyclopedia: Environmental Science*[M]. Beijing: China Encyclopedia Press (in Chinese).

Department of Marine Geology, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences. 1985. *Bohai Sea Geology*[M]. Beijing: Science Press, 1-232 (in Chinese).

Dong Jianxi, Zhang Tianyu, Fu Xiang, Wu Wei, Zhao Lianda, Wu Shaohua, Yu Fujiang. 2008. Calculation of the storm surges in the Shancheng Bay in Fujian Province in 100 years return periods[J]. *Marine Science Bulletin*, 27(1): 9-16 (in Chinese with English abstract).

Ericson J P, Vorosmarty C J, Dingman S L, Ward L G, Meybeck M. 2006. Effective sea-level rise and deltas: Causes of change and human dimension implications[J]. *Glob Planet Change*, 50: 63-82.

Fang Jing, Wang Fu, Shang Zhiwen, Wang Tianjiao, Yanxia, Kang Qinwei, Qu Yinghui, Liu Yufei. 2022. 7.8~7.4 ka environment of diatom-rich layer and relative sea level change in the south plain of the Haihe River, Tianjin[J]. *Geology in China*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20220411.1118.004.html> (in Chinese with English abstract).

Fu Wenxia. 1988. A study of the transgression process since late Pleistocene on the coast zone of lower Liaohe River plain and the Liaodong Peninsula[J]. *Geographical Research*, 7(2): 73-80 (in Chinese with English abstract).

Gao Maosheng, Hou Guohua, Dang Xianzhang, Huang Xueyong. 2020. Sediment distribution characteristics and environment evolution within 100 years in western Laizhou Bay, Bohai Sea, China[J]. *China Geology*, 3: 445-454.

Guo Haipeng, Bai Jinbin, Zhang Youquan, Wang Liya, Shi Jusong, Li Wenpeng, Zhang Zuochen, Wang Yunlong, Zhu Juyan, Wang Haigang. 2017. The evolution characteristics and mechanism of the land subsidence in typical areas of the North China Plain[J]. *Geology in China*, 44(6): 1115-1127 (in Chinese with English abstract).

Hao Xiudong, Lao Yueying, Ouyang Chuhong, Liao Nanyan, Jiang Xingyu, Wang Fu, Tian Lizhu, Shi Peixin, Chen Yongsheng, Wang Hong, Li Jianfen, Shang Zhiwen. 2022. 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*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20220228.2057.002.html> (in Chinese with English abstract).

He Lei, Xue Chunting, Ye Siyuan, Laws Edward Allen, Yuan Hongming, Yang Shixiong, Du Xiaolei. 2018. Holocene evolution of the Liaohe Delta, a tide-dominated delta formed by multiple rivers in Northeast China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 152: 52-68.

Huang Zhenguo, Li Pingri, Zhang Zhongying, Li Konghong, Qiao

- Pengnian. 1982. The Formation and Evolution of the Pearl River Delta[M]. Guangzhou: Science Popularization Publishing House Guangzhou Branch, 1–274(in Chinese).
- Hydrogeology Team, Geological Bureau of Liaoning Provincial. 1983. Quaternary of Liaoning[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–133 (in Chinese).
- IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report Summary for Policymakers[R].1–31.
- IPCC. 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis[R].1–41.
- Jiang Hui, Wang Kaifa, Wang Lanhua. 1981. Spore– pollen assemblages from the western part of Bohai Bay Since the Late Pleistocene and their paleoclimate and paleogeography[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 4: 34–42 (in Chinese with English abstract).
- Kopp R E, Simons F J, Mitrovica J X, Maloof A C, Oppenheimer M. 2009. Probabilistic assessment of sea level during the last interglacial stage[J]. Nature, 462: 863–868.
- Lambeck K, Rouby H, Purcell A, Sun Y, Sambridge M. 2014. Sea level and global ice volume from the Last Glacial Maximum to the Holocene[J]. PNAS, 111: 15296–15303.
- Li Feixue, Ding Dongdong, Chen Zhenjie, Chen Honghua, Shen Ting, Wu Qianlian, Zhang Chengye. 2020. Change of sea reclamation and the sea– use management policy system in China[J]. Marine Policy, 115(12): 103861.
- Li Guoyu, Lu Minggang. 2002. Maps of Oil and Gas Basins in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1–492 (in Chinese).
- Li He, Huang Chong, Zhang Chenchen, Liu Qingsheng, Liu Gaohuan. 2020. Coastal erosion and sediment dynamics of the Yellow River Delta and their responses to the runoff– sediment flux since 1976[J]. Resources Science, 42(3): 486–498 (in Chinese with English abstract).
- Li J F, Shang Z W, Wang F, Chen Y S, Tian L Z, Jiang X Y, Yu Q, Wang H. 2021. Holocene sea level trend on the west coast of Bohai Bay, China: An overview[J]. Acta Oceanologica Sinica, 40(7): 198–248.
- 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).
- Li Mengmeng, Luo Xinzhen. 2018. Evaluation of the economic vulnerability of Shandong coastal areas under the influence of hundred– year tide level[J]. Marine Science Bulletin, 37(6): 667–675 (in Chinese with English abstract).
- Li Pingri, Qiao Pengnian, Zheng Honghan, Fang Guoxiang, Huang Guangqing. 1991. Environment Evolution of Zhujiang Delta in the Past 10000 Years[M]. Beijing: China Ocean Press, 1–154 (in Chinese).
- Ling Shen. 1990. Changes of the paleogeographic environment in North Jiangsu Plains since the Holocene[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 8(4): 20–28 (in Chinese with English abstract).
- Luo Yongming. 2016. Sustainability associated coastal eco– environmental problems and coastal science development in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 31(10): 1133–1142 (in Chinese with English abstract).
- Matthes F E. 1939. Report of committee on glaciers[J]. Transactions, American Geophysical Union, 20(4): 518–523.
- Miller K G, Browning J, Schelz W J, Kopp R E, Mountain G S, Wright J D. 2020. Cenozoic sea– level and cryospheric evolution from deep– sea geochemical and continental margin records[J]. Science Advances, 6(20): eaaz1346.
- MLR. 2001–2021. Sea Level Bulletins 2010–2020[R]. Ministry of Land Resources, People’s Republic of China. <http://www.nmdis.org.cn/hygb/zghpmgb/> (in Chinese).
- MWR. 2000–2019. China River Sediment Bulletin: 2000–2019[R]. Ministry of Water Resources, People's Republic of China (in Chinese).
- Pang Jiazhen, Jiang Mingxing. 2003. On the evolution of the Yellow River Estuary (Part II) [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 4: 1–13 (in Chinese with English abstract).
- Qin Yunshan, Zhao Yiyang, Chen Lirong, Zhao Songling. 1989. Geology of Huanghai Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 1–289 (in Chinese).
- Sengupta D, Chen R S, Meadows M E. 2018. Building beyond land: An overview of coastal land reclamation in 16 global megacities[J]. Applied Geography, 90: 229–238.
- Shi Peixin, Wang Fu, Shang Zhiwen, Kang Hui, Xiao Guoqiang, Yang Jilong, Li Jianfen, Jiang Xingyu, Chen Yongsheng, Tian Lizhu, Li Yong. 2016. The present situation and changing characteristics of the shorelines along Tianjin–Hebei coastal areas and proposal for protection[J]. Geological Bulletin of China, 35 (10): 1630–1637(in Chinese with English abstract).
- SOA. 2013. Bulletin of China's Marine Environment 2013[R]. State Oceanic Administration website (<http://www.nmdis.org.cn>) (in Chinese).
- SOA. 2017. Bulletin of China's Marine Eco– environment 2017[R]. State Oceanic Administration, People's Republic of China, website: <http://www.nmdis.org.cn> (in Chinese).
- Walling D E, Fang D. 2003. Recent trends in the suspended sediment loads of the world[J]. Global Planet Change, 39: 111–126.
- Wang Feicui, Shi Peixin, Shang Zhiwen, Xiao Guoqiang, Wang Fu. 2019. Research on coastline of Tianjin[J]. Geological Survey and Research, 42(4): 278–281 (in Chinese with English abstract).
- Wang Feicui, Yang Peng, Shi Peixin, Shang Zhiwen, Xiao Guoqiang, Wang Fu. 2021. Research on the status of Hebei Province’s

- coastline in 2019 based on Landsat OLI images[J]. *North China Geology*, 44(4): 35–40 (in Chinese with English abstract).
- Wang F, Li J F, Shi P X, Shang Zhiwen, Li Yong, Wang Hong. 2019. The impact of sea-level rise on the coast of Tianjin-Hebei, China[J]. *China Geology*, 2(1): 26–39.
- Wang Fu, Pei Yandong, Li Jianfen, Shang Zhiwen, Fan Changfu, Tian Lizhu, Song Meiyu, Geng Yan, Wang Hong. 2010. Current elevation of Tianjin tidal zone and the urban safety of Binhai New Area, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(5): 682–687 (in Chinese with English abstract).
- Wang F, Tian L Z, Jiang X Y, Marshall W, Wang H. 2018. Human-induced changes in recent sedimentation rates in Bohai Bay, China: Implications for coastal development[J]. *Science China: Earth Sciences*, 61(10): 1510–1522.
- 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 F, Zong Y Q, Mauz B, Li J F, Fang J, Tian L Z, Chen Y S, Shang Z W, Jiang X Y, Spada G, Melini D. 2020. Holocene sea-level change on the central coast of Bohai Bay, China[J]. *Earth Surface Dynamics*, (8): 679–693.
- Wang Hong, Shang Zhiwen, Wang Fu, Li Jianfen, Pei Yandong, Tian Lizhu, Fan Changfu, Sheng Jingjin, Chen Yongsheng, Liu Huimin. 2010. Storm surges in the west coast of Bohai Bay, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(5): 641–649 (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 Jianhua, Cao Linglong, Wang Xiaojing, Yang Xiaoqiang, Yang Jie, Su Zhihua. 2009. Evolution of sedimentary facies and paleoenvironment during the Late Quaternary in Wanqingsha Area of the Pearl River Delta[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 29(6): 35–41 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shaowu. 1995. Studies on climate of the Little Ice Age[J]. *Quaternary Sciences*, 15(3): 202–212 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yao, Guo Chihui, Chen Xijie, Jia Liqiong, Guo Xiaona, Chen Ruishan, Zhang Maosheng, Chen Zeyu, Wang Haodong. 2021. Carbon peak and carbon neutrality in China: Goals, implementation path and prospects[J]. *China Geology*, 4: 720–746. doi: 10.31035/cg2021083.
- Wang Yiming, Gao Peng, Mu Xingmin, Zhao Guangju. 1973. Relationship between the shape of the Yellow River delta and the runoff-sediment flux Since 1973[J]. *Journal of Sediment Research*, 43(5): 39–45 (in Chinese with English abstract).
- Wu Shaohua, Wang Xinian, Dai Mingrui, Song Shan, Ma Yuqian. 2002. The general status of storm surges and the simulation of extratropical storm surges in the Bohai Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 24(3): 28–34 (in Chinese with English abstract).
- Wu Zheng, Feng Wenke, Liao Zhiliang, Jin Zhimin. 1993. Paleogeographic study in the continental shelf of the Northern South China Sea during the last stage of the late Pleistocene [J]. *Acta Geographica Sinica*, 48(6): 492–496 (in Chinese with English abstract).
- Xia Dongxing, Wang Yongji. 1981. Coastal changes of the Yellow Sea and Bohai Sea since the Late Pleistocene[J]. *Marine Science Bulletin*, 4: 38–46 (in Chinese).
- Xiao Guoqiang, Wang Fu, Yin Ping, Hu Yunzhuang. 2022. Review and prospect of the coastal geological survey of Chinese mainland[J]. *North China Geology*, 45(1): 92–100 (in Chinese with English abstract).
- Xiong H X, Zong Y Q, Qian P, Huang G Q, Fu S Q. 2018. Holocene sea-level history of the northern coast of South China Sea[J]. *Quaternary Science Reviews*, 194: 12–26.
- Xue Chungting. 2009. Historical changes of coastlines on West and South coast of Bohai Sea since 7000 a.B.P.[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 29(2): 217–222 (in Chinese with English abstract).
- Yan Shangqing, Hong Xueqing. 1987. Holocene transgression in the South Plain Yangtze River Delta[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 9(6): 744–752 (in Chinese with English abstract).
- Yang Weibing. 2011. Study of shoreline evolution of Yangtze River Delta[J]. *Journal of Poyang Lake*, 2: 105–116 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yunping, Li Yitian, Xue Guoqiang. 2014. Quantitative relationship between Yangtze delta evolution and land-sea hydrologic features[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 33(1): 88–94 (in Chinese with English abstract).
- Yin P, Duan X Y, Gao F, Li M N, Lü S H, Qiu J D, Zhou L Y. 2018. Coastal erosion in Shandong of China: status and protection challenges[J]. *China Geology*, 1: 512–521.
- Zhang Junhong, Meng Xiang. 2009. The Formation and Changes of the North Branch of the Yangtze River Estuary[J]. *Yangtze River*, 40(7): 14–17 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Renshun, Lu Liyun, Wang Yanhong. 2002. The mechanism and trend of coastal erosion of Jiangsu Province in China[J]. *Geographical Research*, 21(4): 469–478 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Renshun. 1984. Land-forming history of the Huanghe River Delta and coastal plain of North Jiangsu[J]. *Acta geographica Sinica*, 39(2): 173–184 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiugui. 1997. Overview of the land formation process in Shanghai Area[J]. *Fudan Journal (Social Science Edition)*, 1: 79–

- 85 (in Chinese).
- Zhao Songling. 1991. China shelf sea desertization and its derived deposits during the last stage of late Pleistocene[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 22(3): 285–293 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Shan, Wang Kairong, Wu Baosheng, Lü Yiwei, Han Qi. 2018. Review on the evolution and management of the Yellow River Delta[J]. *Yellow River*, 40(10): 6–16 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Tianyi, Tan Ya, Xie Danghan. 2018. Study on sea-level distribution of storm surges caused by cold wave in coastal areas of Jiangsu[J]. *Acta Agraculturae Jiangxi*, 30(4): 99–103 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Cheng, Chen Peng, Lu Chuncheng, Wang Wen. 1996. Analysis of coastline evolution in the Yangtze River Delta and the coastal areas of northern Jiangsu since 7000 a BP[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 16(3): 207–213 (in Chinese with English abstract).
- ### 中文参考文献
- 常军, 刘高焕, 刘庆生. 2004. 黄河口海岸线演变时空特征及其与黄河来水来沙关系[J]. *地理研究*, 3(5): 339–346.
- 陈家麟. 1980. 长江口南岸岸线变迁[J]. *复旦学报(社会科学版)*, S1: 61–73.
- 陈中原, 杨文达. 1991. 长江河口地区第四纪古地理古环境变迁[J]. *地理学报*, 46(4): 436–448.
- 程天文, 赵楚年. 1984. 中国沿海入海河川径流量与输沙量的估算[J]. *地理学报*, 39(4): 418–427.
- 程天文, 赵楚年. 1985. 我国主要河流入海径流量、输沙量及沿岸的影响[J]. *海洋学报*, 7(4): 460–471.
- 董剑希 仇天宇 付翔, 吴玮, 赵联大, 吴少华, 于福江. 2008. 福建省沙堤港百年一遇台风风暴潮计算[J]. *海洋通报*, 27(1): 9–16.
- 方晶, 王福, 商志文, 王天娇, 严霞, 康钦威, 曲英晖, 刘宇飞. 2022. 7.8~7.4 ka 天津海河南岸平原富硅藻层形成与相对海平面[J]. *中国地质*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20220411.1118.004.html>.
- 符文侠. 1988. 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*, 7(2): 73–80.
- 郭海朋, 白晋斌, 张有全, 王丽亚, 石菊松, 李文鹏, 张作辰, 王云龙, 朱菊艳, 王海刚. 2017. 华北平原典型地段地面沉降演化特征与机理研究[J]. *中国地质*, 44(6): 1115–1127.
- 国家海洋局. 2013. 中国海洋环境状况公报 2013 年[R]. 中国海洋信息网(<http://www.nmdis.org.cn/hygb/zghpmgb/>).
- 国家海洋局. 2017. 中国海洋生态环境状况公报 2017 年[R]. 中国海洋信息网(<http://www.nmdis.org.cn/hygb/zghpmgb/>).
- 郝秀东, 劳月英, 欧阳绪红, 廖南燕, 姜兴钰, 王福, 田立柱, 施佩歆, 陈永胜, 王宏, 李建芬, 商志文. 2022. 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*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20220228.2057.002.html>
- 黄镇国, 李平日, 张仲英, 李孔宏, 乔彭年. 1982. 珠江三角洲形成发育演变[M]. 广州, 科学普及出版社广州分社: 1–274.
- 蒋辉, 王开发, 张玉兰. 1981. 渤海西部晚更新世以来的孢粉组合及其古气候、古地理[J]. *海洋湖沼通报*, 4: 34–42.
- 李国玉, 吕鸣岗. 2002. 中国含油气盆地图集(第二版)[M]. 北京, 石油工业出版社: 1–492.
- 李贺, 黄翀, 张晨晨, 刘庆生, 刘高焕. 2020. 1976 年以来黄河三角洲海岸冲淤演变与入海水沙过程的关系[J]. *资源科学*, (42)3: 486–498.
- 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.
- 李梦梦, 罗新正. 2018. 百年一遇潮位淹没影响下山东沿海地区经济脆弱性评价[J]. *海洋学报*, 37(6): 667–675.
- 李平日, 乔彭年, 郑洪汉, 方国祥, 黄光庆. 1991. 珠江三角洲一万年来的环境演变[M]. 北京, 海洋出版社: 1–154.
- 辽宁省地质局水文地质大队. 1983. 辽宁第四纪[M]. 北京: 地质出版社, 1–133.
- 凌申. 1990. 全新世以来苏北平原古地理环境演变[J]. *黄渤海海洋*, 8(4): 20–28.
- 骆永明. 2016. 中国海岸带可持续发展中的生态环境问题与海岸科学发展[J]. *中国科学院院刊*, 31(10): 1133–1142.
- 庞家珍, 姜明星. 2003. 黄河河口演变(II)–(二)1855 年以来黄河三角洲流路变迁及海岸线变化及其他[J]. *海洋湖沼通报*, 4: 1–13.
- 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽容, 赵松龄. 1989. 黄海地质[M]. 北京: 海洋出版社, 1–289.
- 施佩歆, 王福, 商志文, 康慧, 肖国强, 杨吉龙, 李建芬, 姜兴钰, 陈永胜, 田立柱, 李勇. 2016. 津冀沿海岸线现状、变化特征及保护建议[J]. *地质通报*, 35(10): 1630–1637.
- 汪翡翠, 施佩歆, 商志文, 肖国强, 王福. 2019. 天津市海岸线现状[J]. *地质调查与研究*, 42(4): 278–281.
- 汪翡翠, 杨朋, 施佩歆, 商志文, 肖国强, 王福. 2021. 基于 Landsat OLI 影像的河北省 2019 年海岸线现状[J]. *华北地质*, 44(4): 35–40.
- 王福, 裴艳东, 李建芬, 商志文, 范昌福, 田立柱, 宋美钰, 耿岩, 王宏. 2010. 天津潮间带高程现状与滨海新区城市安全[J]. *地质通报*, 29(5): 682–687.
- 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. 渤海湾贝壳堤现状与保护建议[J]. *地质调查与研究*, 43(4): 293–316.
- 王宏, 商志文, 王福, 李建芬, 裴艳东, 田立柱, 范昌福, 盛晶瑾, 陈永胜, 刘慧敏. 2010. 渤海湾西岸风暴潮: 叠加地质因素的新探讨[J]. *地质通报*, 29(5): 641–649.
- 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
- 王建华, 曹玲珑, 王晓静, 杨小强, 阳杰, 苏志华. 2009. 珠江三洲万顷沙地区晚第四纪沉积相与古环境演变[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 29(6): 35–41.
- 王绍武. 1995. 小冰期气候的研究[J]. *第四纪研究*, 15(3): 202–212
- 王一鸣, 高鹏, 穆兴民, 赵广举. 2018. 1973 年以来黄河三角洲形态与入海水沙通量关系研究[J]. *泥沙研究*, 43(5): 39–45.
- 吴少华, 王喜年, 戴明瑞, 宋珊, 马毓倩. 2002. 渤海风暴潮概况及温

- 带风暴潮数值模拟[J]. 海洋学报, 24(3): 28-34.
- 吴正, 冯文科, 廖秉良, 金志敏. 1993. 晚更新世末期南海海北部陆架的古地理探讨[J]. 地理学报, 48(6): 492-496.
- 夏东兴, 王永吉. 1981. 晚更新世以来黄渤海沿海海岸变迁[J]. 海洋科通报, 4: 38-46.
- 肖国强, 王福, 印萍, 胡云壮. 2022. 我国海岸带地质调查工作回顾与展望[J]. 华北地质, 45(1): 92-100.
- 薛春汀. 2009. 7000年来渤海西岸、南岸海岸线变迁[J]. 地理科学, 29(2): 217-222.
- 严钦尚, 洪雪晴. 1987. 长江三角洲南岸平原全新世海侵问题[J]. 海洋学报, 9(6): 744-752.
- 杨伟兵. 2011. 长江三角洲岸线演变研究[J]. 鄱阳湖学刊, 2: 105-116.
- 杨云平, 李义天, Xue Guoqiang. 2014. 长江口三角洲演变与陆海水力要素量化关系[J]. 水力发电学报, 33(1): 88-94.
- 张军宏, 孟翊. 2009. 长江口北支的形成和变迁[J]. 人民长江, 40(7): 14-17.
- 张忍顺, 陆丽云, 王艳红. 2002. 江苏海岸侵蚀过程及其趋势[J]. 地理研究, 21(4): 469-478.
- 张忍顺. 1984. 苏北废黄河三角洲及滨海平原的成陆过程[J]. 地理学报, 39(2): 173-184.
- 张修桂. 1997. 上海地区成陆过程概述[J]. 复旦学报(社会科学版), 1: 79-85.
- 赵松龄. 1991. 晚更新世末期中国陆架沙漠化及期衍生沉积的研究[J]. 海洋与湖沼, 22(3): 285-293.
- 郑珊, 王开荣, 吴保生, 吕宜卫, 韩琦. 2018. 黄河口冲淤演变及治理研究综述[J]. 人民黄河, 40(10): 6-16.
- 中国科学院海洋研究所海洋地质研究室. 1985. 渤海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1-232.
- 中华人民共和国水利部. 2001—2020. 2000—2019年中国河流泥沙公报[R]. 水利部网址: http://www.irtces.org/nszx/cbw/hlnsgb/A550406index_1.htm
- 周天逸, 谭亚, 谢当汉. 2018. 寒潮引起的江苏沿海风暴潮潮位分布规律研究[J]. 江西农业学报, 30(4): 99-103.
- 朱诚, 程鹏, 卢春成, 王文. 1996. 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, 16(3): 207-213.
- 中国大百科全书总委员会《环境科学》委员会. 2002. 中国大百科全书, 环境科学[M]. 中国大百科全书出版社.
- 自然资源部. 2001—2022. 2000~2020中国海平面公报[R]. 中国海洋信息网: <http://www.nmdis.org.cn/hygb/zghpmgb/>.