



## 近40年来海州湾砂质海岸冲淤变化分析

钱程, 夏非, 张永战

### Analysis of accretion and erosion changes in sandy coasts of Haizhou Bay in the past 40 years

QIAN Cheng, XIA Fei, and ZHANG Yongzhan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024072601>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 海岸冲淤动态的理论分析：物质收支、剖面形态、岸线进退

Theoretical framework for coastal accretion-erosion analysis: material budgeting, profile morphology, shoreline change  
海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(2): 1-17

#### 北部湾大风江河口沙嘴动态变化过程

Dynamic variation of sand spit in the Dafeng River estuary, Beibu Gulf  
海洋地质与第四纪地质. 2025, 45(2): 43-54

#### 福宁湾及附近海域悬沙粒度与影响因素

Suspended sediment grain size and influencing factors in Funing Bay and its nearby sea areas  
海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(1): 15-29

#### 闽江河口潮滩季节性冲淤变化格局及其控制机制

Patterns and controlling factors of seasonal erosion and accretion of estuarine tidal flat in the Minjiang River estuary  
海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(6): 1-13

#### 山东半岛东南部典型砂质岸滩季节性演化及控制因素探讨——以海阳万米海滩为例

Seasonal evolution of the typical sandy coast of southeastern Shandong Peninsula and controlling factors—Take the 10 000-meter beach in Haiyang as an example  
海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(1): 57-67

#### 三亚湾海岸地形时空变化与输沙过程研究

On temporal and spatial variations of coastal topography and sediment transport process in Sanya Bay  
海洋地质与第四纪地质. 2025, 45(1): 53-67



关注微信公众号，获得更多资讯信息

钱程, 夏非, 张永战. 近40年来海州湾砂质海岸冲淤变化分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2025, 45(3): 50-61.

QIAN Cheng, XIA Fei, ZHANG Yongzhan. Analysis of accretion and erosion changes in sandy coasts of Haizhou Bay in the past 40 years[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2025, 45(3): 50-61.

## 近40年来海州湾砂质海岸冲淤变化分析

钱程<sup>1</sup>, 夏非<sup>2</sup>, 张永战<sup>1</sup>

1. 南京大学地理与海洋科学学院, 海岸与海岛开发教育部重点实验室, 南京 210023

2. 江苏第二师范学院地理科学学院, 气候风险模拟与城乡智慧治理江苏省高校重点(建设)实验室, 南京 211200

**摘要:** 基于海州湾 1984—2022 年 47 幅遥感影像和 1980—2014 年 4 期海图, 计算分析了上述时段砂质海岸潮间带在 100/150/200 cm 三种潮位下的出露面积变化、水下岸坡等深线和冲淤的空间变化, 进而讨论了该砂质海岸冲淤变化的影响因素。结果表明: ① 1984—2022 年潮间带出露面积存在 5 次先增后减的起伏, 以赣榆港二期工程为界, 北部和南部面积均有明显减少, 其中 2011 年建港前存在 3 次起伏, 北部有所减少而南部基本稳定, 2011 年建港后存在 2 次起伏, 北部有明显减少而南部也有所减少。北部减少主要受围垦和建港占用影响, 南部则受人为占用影响较小。若不考虑人为占用, 2011 年建港前北部和南部面积均略有增加, 2011 年建港后北部面积略有增加而南部面积有明显减少。② 1980—2003 年, 水下岸坡所有等深线均呈现后退趋势, 北部以弱侵蚀为主, 自北向南, 近岸总体由弱侵蚀逐渐转变为弱淤积, 南部远岸表现弱侵蚀; 2003—2014 年, 等深线变化趋势发生转变, 2 m 和 10 m 等深线向海前进, 而 5 m 等深线仍向岸后退, 赣榆港区工程及其向南延伸区域表现不同程度的侵蚀, 北部近岸局部侵蚀, 而其他区域则基本表现淤积, 其中远岸淤积尤为明显。③ 赣榆港区防波堤建设引发的水动力条件减弱和泥沙自北向南运移受阻, 是造成建港后潮间带北部基本稳定、略有淤积和南部明显侵蚀的主要影响因素。对于水下岸坡, 建港前北部弱侵蚀、南部弱淤积的空间格局, 可能与沉积物自东北向西南的净输运趋势有关, 而建港后港区侵蚀向南延伸和其他区域总体淤积的空间格局, 可能与人工疏浚吹填工程的改造有关。

**关键词:** 遥感影像; 砂质海岸; 冲淤变化; 影响因素; 海州湾

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024072601

### Analysis of accretion and erosion changes in sandy coasts of Haizhou Bay in the past 40 years

QIAN Cheng<sup>1</sup>, XIA Fei<sup>2</sup>, ZHANG Yongzhan<sup>1</sup>

1. The Key Laboratory of Coast and Island Development of Ministry of Education, School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2. The Key Constructive Laboratory of Climate Risk Modeling and Urban-Rural Smart Governance of Jiangsu Higher Education Institutions, School of Geography, Jiangsu Second Normal University, Nanjing 211200, China

**Abstract:** Based on 47 remote sensing images from 1984 to 2022 and four sets of nautical charts from 1980 to 2014 in the Haizhou Bay, Jiangsu, East China, we calculated and analyzed the variations in the exposed intertidal area at three tidal levels (100, 150, and 200 cm), as well as the changes in underwater isobaths, and the spatial patterns of erosion and accretion. Furthermore, we discussed the influencing factors that drove these changes in the sandy coast. Results indicate that: ① From 1984 to 2022, the exposed intertidal area exhibited five fluctuations of increase-decrease. Using the second-phase construction of the Ganyu Port as the boundary, the intertidal area was decreased significantly in both the north and the south directions. Prior to the port construction in 2011, three fluctuations occurred, with a slight decrease in the north while remained stable in the south. After 2011, two fluctuations were observed, with a notable reduction in the north and a moderate decrease in the south. The decline in the north was mainly caused by reclamation and port construction, while in the south it was less affected by human activities. Aside from the impact of human occupation, both the north and south regions showed slight increases before 2011. After 2011, the

**资助项目:** 江苏省自然资源发展专项资金(海洋科技创新)项目“江苏海岸侵蚀地质灾害评价技术体系研究”(JSZRHYKJ202104); 国家自然科学基金青年科学基金项目“辐射沙脊群西洋潮流通道的浅部沉积层序及其形成演化”(41901107); 江苏省高等学校自然科学研究面上项目“辐射沙脊群东北翼浅层沉积结构南北分异研究”(18KJB170003)

**作者简介:** 钱程(1999—), 男, 硕士研究生, 海洋地球科学专业, E-mail: 694150647@qq.com

**通讯作者:** 夏非(1985—), 男, 博士, 副教授, 主要从事河海交互作用与沉积环境演化研究, E-mail: feixia@jssnu.edu.cn

张永战(1970—), 男, 博士, 副教授, 主要从事滨岸地貌与第四纪地质研究, E-mail: zhangyzh@nju.edu.cn

收稿日期: 2024-07-26; 改回日期: 2025-02-18. 张琰荣编辑

north region continued to increase slightly, while the south region experienced a significant reduction in area. ② From 1980 to 2003, all underwater isobaths showed a landward retreat. The north region is characterized by weak erosion mainly, transitioning from weak erosion nearshore to weak deposition southward, while the south offshore region showed weak erosion. Between 2003 and 2014, the trend of isobath changes reversed, in which the 2 m and 10 m isobaths advanced seaward, while the 5 m isobath continued to retreat landward. The Ganyu Port construction and its southern extension experienced varying degrees of erosion, while localized nearshore erosion was observed in the north region. Other areas exhibited mostly deposition, with the most pronounced accumulation occurring offshore. ③ The weakening of hydrodynamic conditions caused by the construction of Ganyu Port's breakwaters and the obstruction of sediment transport from north to south were the primary factors leading to the relative stability and slight deposition in the northern intertidal zone, while the southern intertidal zone experienced significant erosion after the port construction. Regarding the underwater coastal slope, the spatial pattern of weak erosion in the north and weak deposition in the south before the port construction may be associated with the net sediment transport trend from northeast to southwest. After port construction, the southward extension of erosion from the port area and the overall deposition in other regions were likely influenced by dredging and reclamation projects.

**Key words:** remote sensing images; sandy coast; erosion and accretion changes; influencing factors; Haizhou Bay

21 世纪以来, 由于气候变化的影响, 全球范围内海岸侵蚀均得到了不同程度的增强<sup>[1-3]</sup>。根据 Luijendijk 的研究, 全球范围内 31% 的海岸线是砂质的, 而其中有 24% 的沙滩正以超过 0.5 m/a 的速度侵蚀<sup>[4]</sup>。中国的砂质海岸占全部海岸类型约 13%<sup>[5-6]</sup>, 分布于各省山地、丘陵沿岸<sup>[7]</sup>, 且普遍处于侵蚀状态<sup>[8]</sup>。河流携沙减少、水动力条件变化与人类活动造成地面沉降也在相当程度上加剧了砂质海岸的侵蚀<sup>[9-10]</sup>。目前, 海岸侵蚀问题已成为国内沿海地区普遍产生的海洋灾害问题<sup>[11]</sup>。

江苏省的海岸类型以淤泥质海岸为主, 基岩、砂质海岸占岸线总长小于 10%, 仅集中分布在连云港以北的岸段<sup>[12]</sup>。海州湾的砂质海岸泥沙主要来自北部日照岚山头的沿岸输沙以及当地的河流供沙, 因此对环境因素变化敏感。另一方面, 受自然过程与人类活动的共同作用, 20 世纪 80 年代柘汪河口至兴庄河口岸段就出现严重的侵蚀现象, 当时认为侵蚀主要受水库修建、河口建闸减少入海泥沙、人为采砂等因素影响<sup>[13]</sup>。而 2005 年的“908”专项调查表明, 海州湾岸滩却又整体趋于稳定, 并在少数地区略有淤长<sup>[14]</sup>。近年来, 尤其是龙王河口岸段又重新出现了明显的侵蚀现象<sup>[15]</sup>。上述研究表明, 海州湾砂质海岸演化过程可能复杂多变。通常而言, 砂质海岸的演化过程与沉积物的收支相关, 而海州湾地区沉积物自然条件下主要有河流向和海向两方面输送<sup>[16-18]</sup>, 并受波浪和潮汐的共同作用。随着人类活动的进一步加剧<sup>[19]</sup>, 其对海岸演变造成的影响尚不明确。

已有研究为了解海州湾砂质海岸的演变过程提供了良好的数据支撑, 但也存在两方面空白, 其一为前文提到的, 随着赣榆港区的建成, 诸如此类的人类活动对海州湾岸滩演变的影响尚不明确。

另一方面, 由于海岸侵蚀大多都首先发生于潮下带<sup>[9]</sup>, 该地区也缺少同时结合水上和水下实测结果, 提取冲淤变化特征并进行影响因素分析。因此, 研究海州湾砂质海岸的冲淤变化及其影响因素十分必要, 本文将结合近 40 年来多期卫星遥感影像以及海图数据, 对砂质海岸水上和水下两部分的冲淤变化进行分析, 并初步探讨了主要影响因素, 可为后续海岸开发建设和海滩防护提供必要的依据。

## 1 研究区概况

海州湾是濒临南黄海的一个半封闭型海湾, 地处苏鲁沿海的过渡地段。本研究区北起绣针河口, 南至兴庄河口, 是江苏省唯一的砂质海岸, 岸线总长约 27 km, 潮间带宽约 1 km, 北部略宽于南部, 沉积物以小于 0.1 cm 的石英砂为主<sup>[20]</sup>。本文作者于 2024 年 1 月实地勘测的 LYG 海滩剖面显示, 滩面上陡下缓, 沉积物自海向陆逐渐变细, 距岸 50 m 坡度减缓处发生微弱的滩面下蚀(图 1)。该海岸的沉积物主要有陆海两方面来源, 陆向沉积物是由当地流速较快的小型河流将覆盖在苏北坳陷以及苏鲁隆起风化剥蚀的陆源沉积物搬运而来<sup>[12]</sup>; 海向沉积物则是沿岸泥沙在波浪为主的水动力作用下, 自北至南由岚山头向海州湾内转移而来<sup>[21]</sup>。

研究区属正规半日潮, 年平均最大潮差 4.6 m, 最小潮差 3.1 m。沿岸地区为涨潮流速略大于落潮流速的往复流, 其余海域为旋转流, 全年平均流速约 0.4 m/s。研究区波浪主要是以风浪为主的混合浪, 常浪向为偏东向, 强浪向受季风影响盛行偏北向浪, 年平均波高 0.4 m<sup>[20]</sup>。

此外, 赣榆港区为研究时段内进行的重大工程建设项目, 其建设及投用过程会对海岸带地貌与沉

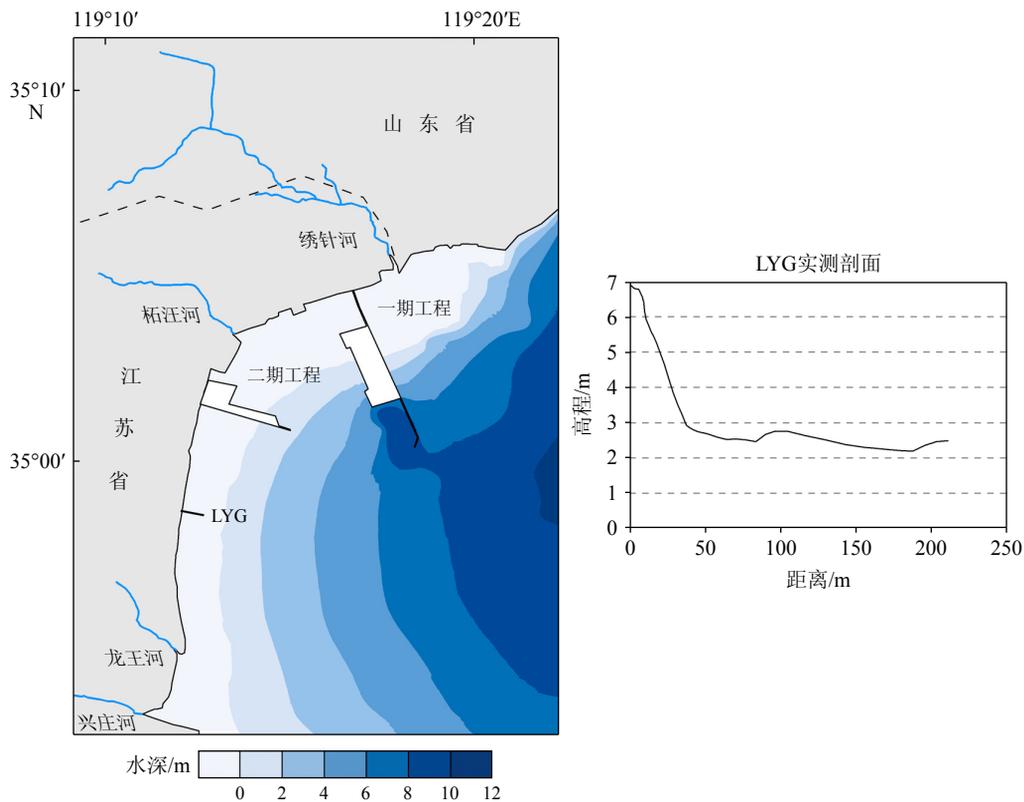


图1 研究区水下地形、海滩剖面和赣榆港区位置  
水深数据取自文献[23],为2014年实测。

Fig.1 Submarine topography, beach profile, and Ganyu Port location in the study area

The water depth data measured in 2014 were adopted from reference [23].

积的各项指标产生明显影响。北段一期工程位于绣针河口南岸,于2010年开建,2013年航道开通,防波堤向海延伸约6.3 km;南段二期工程位于柘汪河口南岸,于2014年开建,2016年初步完工,防波堤向海延伸约4 km;港区总体为两段环抱式港湾,且计划继续进行建设<sup>[22]</sup>。为便于后文的分析讨论,根据港口工程建设范围,以二期工程为界线将研究区的砂质海岸划分为南北两部分,北部从绣针河口至柘汪河口南侧,南部为柘汪河口南侧至兴庄河口。

## 2 数据与方法

### 2.1 遥感影像与水边线提取

本研究使用了由 Kilian 开发的工具包 CoastSat<sup>[24]</sup>对挑选的1984—2022年47幅影像进行砂质海岸的水边线提取(表1)。该工具包可在GitHub(<https://github.com/kvos/CoastSat>)上获取,允许用户在python环境下直接访问Google Earth Engine,调用其服务器内的Landsat 5、7和8及Sentinel-2的光学影像,并进行云掩膜、全色锐化等预处理。在水边线提取方

面,该工具提供了两种方式:①使用其默认训练完成的神经网络分类器进行图像分类,可分为“砂”、“海水”、“白浪”和“其他”;②使用归一化水体指数(MNDWI)进行水体增强处理,并使用大津法进行阈值分割。在实际操作过程中,发现该工具包训练的分类器并不适用于本研究区,因此主要使用方式②来进行水边线的提取。

海州湾砂质海岸剖面多呈现为上陡下缓的下蚀状态,为进一步获取滩面特征,选取的影像大多处于较低潮位,此时潮位对水边线位置的影响不可忽略。由于离研究区较近的海头镇潮位数据只能追溯到1990年,而连云港潮位站距研究区直线距离约30 km,处于同一潮汐系统控制下,故为了覆盖全研究时段,考虑使用时间范围更广的连云港潮位站数据近似表示研究区的实际潮位。将1990年后成像时刻的连云港潮位站与海头镇潮位站的数据进行对比,计算产生的平均绝对误差为14.3 cm,因而对研究结果影响较小,此代替选择可行。此外,1990—2022年潮位数据来源于大鱼潮汐表,由于1990年之前数据目前被设置为隐藏,因此,通过夏威夷大学的海平面中心(<https://uhslc.soest.hawaii>。

表 1 研究选用的 1984—2022 年遥感影像基本情况

Table 1 Basic information of the selected remote sensing images for this study between 1984 and 2022

序号	成像日期	传感器	潮位/m	序号	成像日期	传感器	潮位/m	序号	成像日期	传感器	潮位/m
1	1984-11-22	L5	1.10	17	2000-02-21	L7	2.04	33	2016-07-02	L8	2.04
2	1987-02-09	L5	1.40	18	2001-07-01	L7	1.98	34	2017-12-18	S2	1.00
3	1987-12-27	L5	1.10	19	2001-10-29	L5	1.56	35	2018-02-01	S2	0.97
4	1988-11-10	L5	1.46	20	2001-11-14	L5	1.01	36	2018-07-11	S2	1.99
5	1989-05-05	L5	1.99	21	2002-02-26	L7	1.03	37	2019-09-29	S2	1.40
6	1990-10-15	L5	1.90	22	2002-07-20	L7	2.02	38	2019-12-09	L8	0.97
7	1992-11-21	L5	1.04	23	2003-01-04	L5	2.06	39	2020-03-23	L8	1.60
8	1992-12-23	L5	1.54	24	2003-02-13	L7	1.03	40	2020-09-28	S2	1.91
9	1993-11-24	L5	1.60	25	2004-12-24	L5	1.03	41	2020-12-27	S2	0.91
10	1994-01-27	L5	1.56	26	2006-02-13	L5	1.46	42	2021-02-22	L8	2.05
11	1995-01-14	L5	1.10	27	2008-02-19	L5	1.03	43	2021-03-12	S2	0.96
12	1997-03-24	L5	1.54	28	2011-03-31	L5	1.03	44	2021-12-30	L8	1.54
13	1998-09-19	L5	2.04	29	2013-04-07	L8	1.04	45	2022-05-16	S2	1.53
14	1999-04-15	L5	1.43	30	2014-05-26	L8	1.55	46	2022-06-25	S2	1.92
15	1999-11-09	L5	1.96	31	2014-11-18	L8	2.05	47	2022-11-07	S2	0.90
16	2000-01-20	L7	0.94	32	2016-01-24	L8	0.91				

注: L5、L7和L8分别表示Landsat 5、Landsat 7和Landsat 8, S2表示Sentinel-2。

edu/network) 获取 1990 年之前的数据, 该数据集<sup>[25]</sup>描述为 Research Quality, 故可直接用于本研究。

水边线提取中, 在对研究时段内滩面出露较多时刻的水边线提取的同时, 还对研究区的人工岸线逐年进行手动提取, 北部为养殖塘的外缘, 南部为公路的外侧, 人工岸线与水边线所围成的区域即为成像时刻的潮间带出露面积。为了确保能进行相同潮位下的对比, 根据与潮位匹配的实际情况, 综合考虑将潮间带的出露面积划分为 100、150、200 cm 三种潮位进行对比, 并设置误差区间为  $\pm 10$  cm, 由此产生的水边线变动小于单个像元的分辨率, 此影响可忽略。对于目前使用较广的潮位校正方法<sup>[26-27]</sup>, 在实际操作过程中发现少量图像存在潮位较高时刻的水边线反而更靠近海的异常现象, 这可能是某些特定的环境因素导致实时水位与潮位存在差异。此类误差会影响部分年份的潮位校正结果, 因而选择直接剔除这些异常值, 而非使用传统潮位校正模型去做校正。

## 2.2 海图数字化与水下冲淤分析

本研究使用了中国人民解放军海军司令部航

海保证部分别于 1985、2008 和 2014 年出版发行的“日照港-灌河口”1:120000 海图, 以及 2022 年出版发行的“岚山港-滨海港”1:150000 海图, 测量时间分别为 1980、2003、2011 和 2014 年(表 2)。其中, 2011 年和 2014 年实测的海图由于电子图像分辨率较低而无法识别水深点数据, 只能进行等深线的提取和对比。因此, 分别提取了 1980、2003、2011 和 2014 年的 2、5 和 10 m 等深线进行分析。为充分利用 1980 年和 2003 年海图水深点数据进行冲淤变化分析, 本研究还使用了江苏省有色金属华东地质勘查局于 2014 年 5 月实测的该海区 1:100000 水下地形数据<sup>[23]</sup>。

表 2 研究选用的 1980—2014 年海图基本情况

Table 2 Basic information of the selected nautical charts for this study between 1980 and 2014

图号	出版时间	测量时间	比例尺	坐标系	投影
12570	1985	1980	1:120000	BJ54	墨卡托
	2008	2003			
37001	2014	2011	1:150000	CGCS2000	
41001	2022	2014			

首先将所有水深点数据统一到同一理论深度基准面,并在 ArcGIS 中将水深点数据统一配准至 WGS-84 UTM-50N 投影系,根据水深点创建点要素数据并赋予其水深值,根据等深线创建线要素,在线要素上每隔 100 m 选取一个采样点赋予其水深值。而后根据研究区底图进行普通克里金插值,参数的设定依据验证误差最小的标准,像元大小为 100 m,移除趋势为二阶,由此产生的误差最小,此时产生的均方根误差分别为 0.234、0.301 和 0.175 m。最后导出结果为该年份数字高程模型,进而将三期插值结果裁剪、重采样,进行叠置分析即可得到研究区不同年际间的水下冲淤变化结果。

### 3 结果

#### 3.1 潮间带出露面积变化

1984—2022 年间,研究区人工岸线总共发生了 11 次变动,且多集中于北部。总体而言,北部和南部潮间带面积变化在 1984—2022 年均表现为减少,且北部减少幅度明显大于南部(图 2)。此外,由于不同潮位下的潮间带出露面积保持了近似一致的

变化特征,而 100 cm 潮位下的潮间带出露面积数据最为详尽,因而下文有关面积变化的阐述均以 100 cm 潮位下的潮间带出露面积为代表。

建港前的 1984—2011 年,北部面积减少了 5.3%,而南部减少了 0.5%,变化过程中存在 3 次先增后减的起伏。第一次起伏发生在 1984—1995 年间,表现为北部和南部面积均有所减少。首先北部和南部均发生减少,随后逐渐增加,并于 1992 年附近达到极大值,此时北部面积相较于 1984 年减少了 5.7%,南部面积增加了 6.9%,随后至 1995 年期间再次发生减少,北部面积相较于 1992 年减少了 0.8%,南部面积减少了 9.8%。第二次起伏发生在 1995—2004 年,表现为北部近乎稳定而南部有所增加。同样北部和南部先逐渐增加至 2000 年,北部面积相较于 1995 年增加了 11.6%,南部面积增加了 20.3%,而从 2000 年至 2004 年面积迅速减少,此时北部相较于 2000 年减少了 10.3%,南部面积减少了 14.7%。第三次起伏发生在 2004—2011 年,表现为北部和南部面积均略有增加。首先北部和南部面积先逐渐增加至 2008 年,北部面积相较于 2004 年增加了 5.1%,南部面积增加了 15.0%,并自此面积开始逐渐减小,2011 年北部面积相较于 2008 年减小了 3.6%,

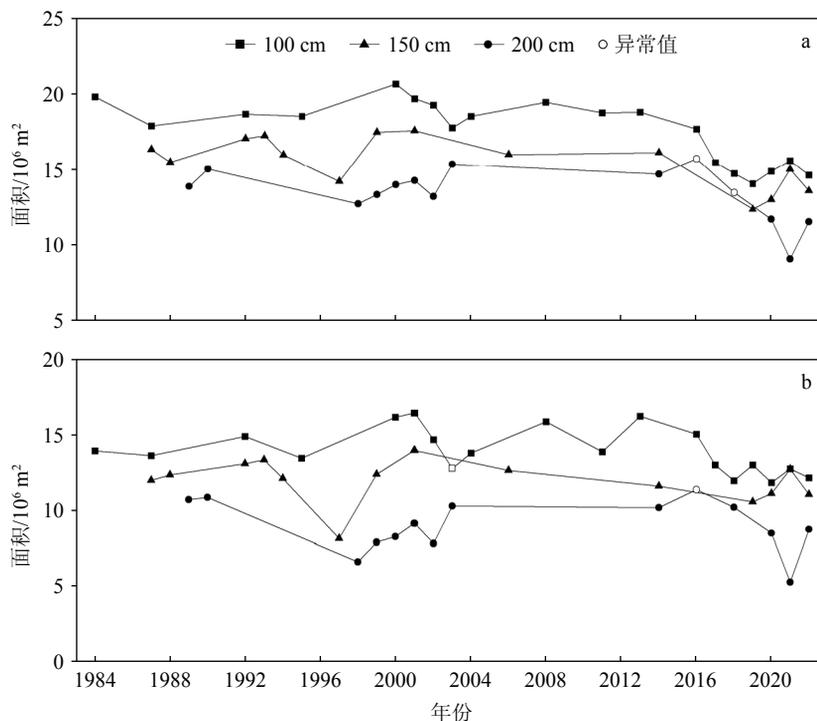


图 2 1984—2022 年海州湾三种潮位下的潮间带出露面积变化  
潮位误差区间为 $\pm 10$  cm。a 为北部潮间带出露面积, b 为南部潮间带出露面积。

Fig.2 Variations in the exposed area of the intertidal zone of the Haizhou Bay under three tidal levels between 1984 and 2022

The error band of tidal level is  $\pm 10$  cm. a: the exposed area of the northern intertidal zone, b: the exposed area of the southern intertidal zone.

南部面积减小了 12.6%。

建港后的 2011—2022 年, 北部面积减少了 22.0%, 而南部面积减少了 12.3%, 变化过程中存在 2 次先增后减的起伏。值得说明的是, 这一时段内起伏频率的增加是由于可用数据的增加, 因而可以更加详细地反映变化过程, 不能归因为人类活动造成的海岸不稳定性增加。第一次起伏发生在 2011—2018 年, 表现为北部面积有明显减少, 而南部面积有所减少。从 2011 年至 2013 年, 北部面积增加了 0.2%, 南部面积增加了 17.0%, 而从 2013 年至 2018 年, 北部面积减少了 21.6%, 南部面积减少了 26.3%。第二次起伏发生在 2018—2022 年, 表现为北部面积略有减少, 而南部面积略有增加。从 2018 年至 2021 年, 北部面积增加了 5.7%, 南部面积增加了 6.5%, 而到 2022 年, 北部面积减少了 6.1%, 南部面积减少了 4.6%。

综上所述, 1984—2022 年潮间带出露面积指示的冲淤状态随时间转变迅速, 且绝大部分时段内北部和南部都表现为相同的冲淤状态。1995 年后潮间带出露面积由此前的减少转为稳定, 而 2011 年后

潮间带出露面积再次由稳定转为减少, 2018 年后潮间带出露面积再次趋于稳定。

### 3.2 水下岸坡等深线和冲淤变化

根据海图数字化获得的 4 期等深线位置, 分别计算了不同年份之间各等深线的年均变化速率, 结果如图 3 所示。总体而言, 研究区等深线变化较为迅速, 并且不同地理位置、不同水深的水下变化均存在明显差异性。

1980—2003 年间, 所有等深线都呈现后退状态。从地理位置来看, 2 m 等深线在北部的后退速率大于南部, 北部的平均后退速率为 3.7 m/a, 而南部仅为 0.7 m/a。5 m 等深线也表现出相同的特征, 平均后退速率自北向南由 7.9 m/a 减小至 0.6 m/a。而 10 m 等深线则是北部后退速率小于南部, 自北向南平均后退速率由 12.9 m/a 增加至 31.4 m/a。从水深变化来看, 等深线的变化速率均随水深的增加而增大, 2 m 等深线的平均后退速率为 2.2 m/a, 5 m 等深线的平均后退速率为 4.2 m/a, 10 m 等深线的平均后退速率为 22.2 m/a。

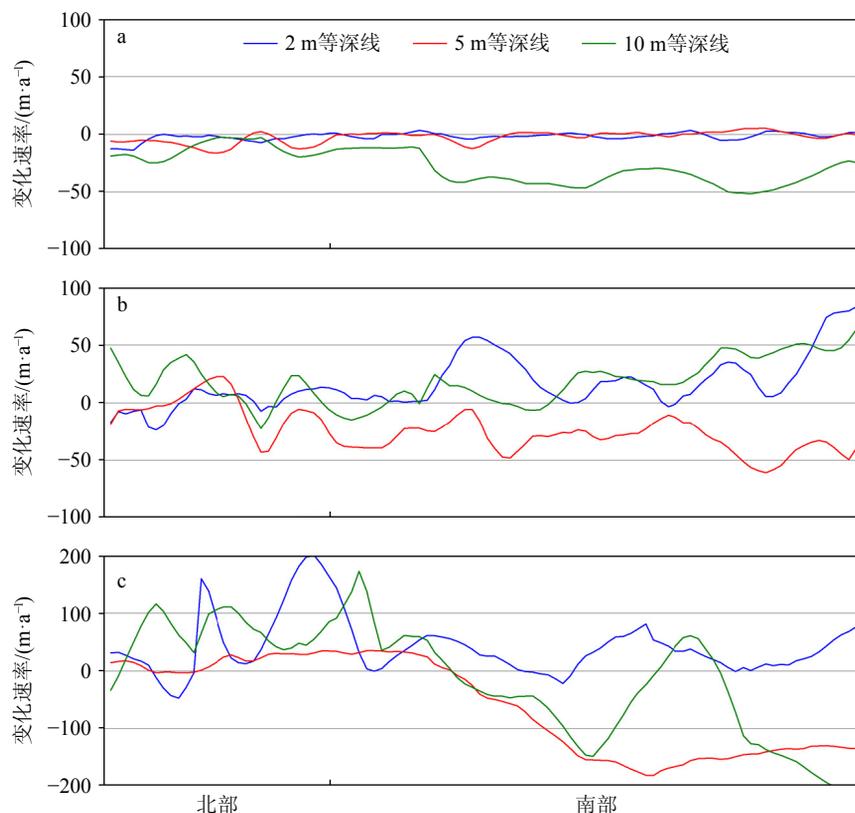


图 3 1980—2014 年海州湾等深线变化速率

正值表示向海前进, 负值表示向岸后退。a: 1980—2003 年, b: 2003—2011 年, c: 2011—2014 年。

Fig.3 Variation rates of isobaths in the Haizhou Bay between 1980 and 2014

Positive values indicate seaward movement, negative values indicate landward movement. a: 1980—2003 CE, b: 2003—2011 CE, c: 2011—2014 CE.

2003—2011年, 2 m和10 m等深线均向海前进, 而5 m等深线则向岸后退。从地理位置来看, 2 m等深线北部的前进速率小于南部, 北部的平均前进速率为1.3 m/a, 而南部则高达27.0 m/a。5 m等深线北部的后退速率小于南部, 自北向南由5.1 m/a增加至31.8 m/a。10 m等深线北部和南部的前进速率相近, 自北向南平均前进速率由19.2 m/a略增至19.9 m/a。从水深变化来看, 等深线的变化速率亦随水深的增加而增大, 2 m等深线的平均前进速率为14.2 m/a, 5 m等深线的平均后退速率为18.5 m/a, 10 m等深线的平均前进速率为19.6 m/a。

2011—2014年, 仍延续了上一阶段2 m和10 m等深线向海前进, 5 m等深线向岸后退的状态。从地理位置来看, 2 m等深线北部和南部的前进速率相近, 北部的平均前进速率为43.8 m/a, 南部为42.3 m/a。5 m等深线表现为北部前进、南部后退, 北部的平均前进速率为11.1 m/a, 南部的平均后退速率为79.6 m/a。10 m等深线亦表现为北部前进、南部后退, 北部的平均前进速率为69.1 m/a, 南部的平均后退速率为38.4 m/a。从水深变化来看, 等深线的变化速率随水深的增加而减小, 2 m等深线的平均前进速率为43.1 m/a, 5 m等深线的平均后退速率为34.2 m/a, 10 m等深线的平均前进速率为15.3 m/a。

等深线与水深点的融合与对比更能全面反映冲淤变化, 故计算获得1980—2014年海州湾水下岸坡冲淤变化(图4)。结果显示, 1980—2003年研究区北部以弱侵蚀为主, 最大侵蚀厚度为1.8 m, 年平均侵蚀速率为8.1 cm/a; 自北向南经过柘汪河口, 侵蚀减缓, 该处侵蚀厚度为0.2 m, 年平均侵蚀速率为0.8 cm/a; 南部近岸以弱淤积为主, 最大淤积厚度为0.2 m, 年平均淤积速率为0.8 cm/a, 远岸表现为弱侵蚀, 最大侵蚀厚度为0.5 m, 年平均侵蚀速率为2.2 cm/a。2003—2014年除港区工程及其向南延伸区域外, 其他区域基本表现淤积, 其中远岸淤积尤为明显; 北部近岸局部侵蚀, 最大侵蚀厚度为1.4 m, 年平均侵蚀速率为12.7 cm/a; 南部近岸整体弱淤积, 淤积厚度相差不大, 最大淤积厚度为0.7 m, 年平均淤积速率为6.4 cm/a; 港区工程建设区域水深最大增加4.5 m, 工程周围水深也有不同程度的增加。上述两个时段的冲淤变化结果对比显示, 港区工程周围的侵蚀显著增强, 其向南延伸区域也由弱淤积转变为弱侵蚀; 在港区工程及其向南延伸区域以外, 北部近岸残留局部侵蚀且侵蚀速率有所增加, 但远岸已普遍明显淤积, 南部近岸曾经的局部弱侵蚀转变为整体弱淤积, 且原先淤积区域的淤积速率有所增加。

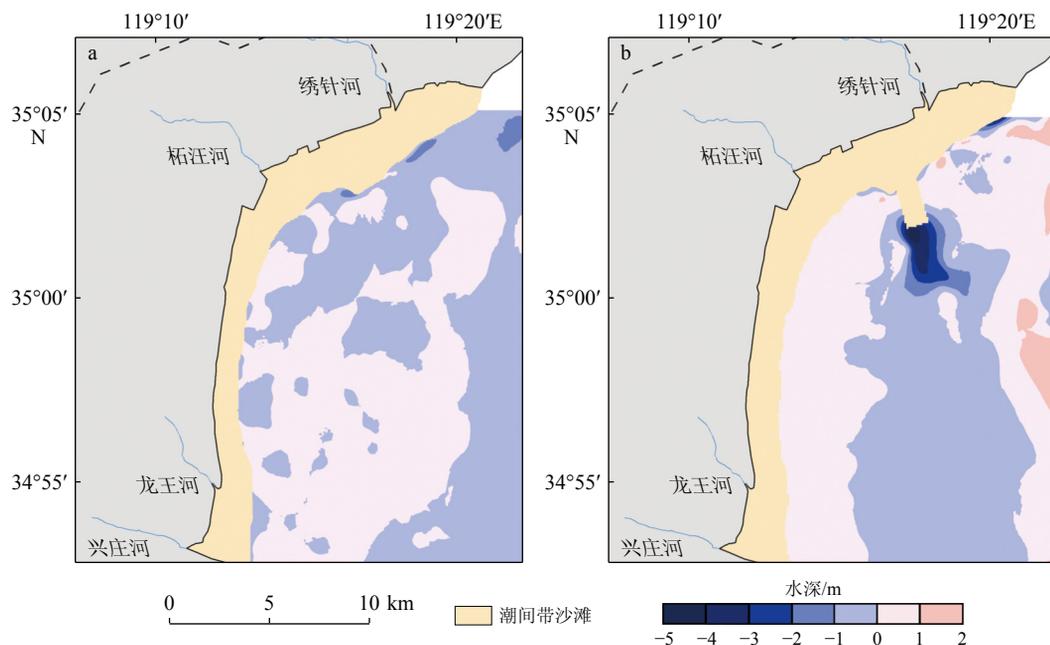


图4 1980—2014年海州湾水下岸坡冲淤变化

正值表示淤积, 负值表示侵蚀。a: 1980—2003年, b: 2003—2014年。

Fig.4 Variations in erosion and accretion of the submarine coastal slope in the Haizhou Bay between 1980 and 2014

Positive values indicate accretion, negative values indicate erosion. a: 1980—2003 CE, b: 2003—2014 CE.

## 4 讨论

前人对引发江苏海岸侵蚀的主要因素多总结为人类活动、风暴潮、海平面上升<sup>[28]</sup>等。其中,人类活动较为复杂,既可产生短期直接影响,也能通过改变供沙条件而产生长期间接影响;风暴潮作用短暂且影响显著,而海平面上升却比较缓慢,年均上升速率为毫米级<sup>[29]</sup>,其与人类活动密切相关,会产生长期影响。因从本研究所用数据中明显无法提取海平面上升引起的海岸侵蚀,故以下主要探讨人类活动、风暴潮与研究区海岸冲淤变化的可能关系。

### 4.1 围填海和建港对海岸冲淤变化的影响

围填海和建港等人类活动很大程度上影响着海岸带地貌与沉积的变化<sup>[30-32]</sup>,研究区早期人类活动造成的潮间带面积变化主要表现在柘汪乡养殖场修建以及台风摧毁养殖塘后的土地复垦,而后期则主要是建港直接占用潮间带(表3)及建港后产生的一系列影响。

潮间带出露面积变化和水下岸坡冲淤变化结果显示(图2、4),以赣榆港一期工程开始的2011年为时间节点,研究区潮间带和水下岸坡的冲淤变化存在显著差异。建港前,潮间带面积虽经历多次波动,但整体上较为稳定,仅北部因围垦略有减少;若排除围垦直接占用的影响,建港前的1984—2011年,北部面积增加2%,南部面积增加0.7%,因而潮间带整体稳定;水下岸坡则呈现北冲南淤的空间格局,北部弱侵蚀,南部弱淤积,这可能与当时研究区沉积物自东北向西南的净输运趋势有关<sup>[17]</sup>。建港后,北部和南部的潮间带面积均出现大幅减少;其中,北部因受建港和围垦的共同占用影响而减少,南部则受明显侵蚀;若排除共同占用的影响,建港后的2011—2022年,北部面积增加1.2%,南部面积减少12.2%;水下岸坡受疏浚吹填工程的改造影响,自然状态已难以直接反映,主要表现为港区侵蚀向南延伸和其他区域总体淤积。

上述潮间带面积变化的阶段性差异主要可归因于赣榆港区防波堤建设带来的明显影响。2011年港口一期工程防波堤使得传播至当地的NNE向波浪发生偏转,原来斜向作用的波浪转为偏正向作用<sup>[34]</sup>,当地水动力环境发生改变,进而明显影响潮流和波浪的协同输沙。Feng等的海州湾围填海水动力评估模型计算结果显示,港口工程会使湾内进潮量下降9.8%,湾内平均流速降低6 cm/s,以及与湾外水体交换速率下降3.9%<sup>[35]</sup>。所以,一期工程防波堤以南的局部区域受水动力减弱的影响,河流携带的细颗粒物在入海口处得以沉积,从而使得该岸段出现沙滩泥化现象,并逐渐自港内向海外淤积。2016年二期工程防波堤建成后,柘汪河及其北部泥沙向西南方向输运受阻,这在一定程度上引发了南部潮间带的明显侵蚀。因此,赣榆港建设造成的输沙条件变化,显著控制着潮间带的北部略有淤积和南部明显侵蚀。

### 4.2 风暴潮对海岸冲淤变化的影响

风暴潮是海岸地貌短期剧烈变化的重要影响因素,其通过引发一系列复杂沉积动力过程来显著改变海岸地形<sup>[36]</sup>。1990、1995和1998年本研究区分别有过风暴潮摧毁潮上带养殖塘的记录,共计恢复光滩 $2.2 \times 10^6 \text{ m}^2$ <sup>[33]</sup>。为探索风暴潮对海滩动态变化的影响,本研究统计了1989—2022年《中国海洋灾害公报》<sup>[37]</sup>中江苏省所受各类风暴潮影响的记录,并挑选距风暴潮发生前后适当间隔的遥感影像进行对比(对于一年中前后靠近发生的两次风暴潮,仅挑选第一次发生前和第二次发生后的两期遥感影像进行对比),影像数据均进行了面积补偿以排除因人为占用而导致的面积变化干扰,结果如图5所示。需要指出的是,用于对比的风暴潮发生前后图像的潮位差值多小于10 cm,根据实测剖面坡度计算相应的水边线位置显示,其在滩面上的变化一般为10 m左右,尽管潮位变化一定程度上会掩盖风暴潮的影响,但考虑到研究区的地形特征及潮位波动较小,本研究结果仍具有一定参考价值。

表3 研究时段内海州湾主要海岸工程建设事件及其影响

Table 3 Main events and their impacts from the coastal engineering construction in the Haizhou Bay during the study period

事件名称	时间	影响	来源
柘汪乡养殖场修建	1987、1988年	占用潮间带光滩 $3.4 \times 10^6 \text{ m}^2$	文献[33]
海岸土地复垦	2002、2008、2013、2016年	占用潮间带光滩 $1.7 \times 10^6 \text{ m}^2$	本文遥感解译
赣榆港修建	2017、2019年	占用潮间带光滩 $3.1 \times 10^6 \text{ m}^2$	本文遥感解译

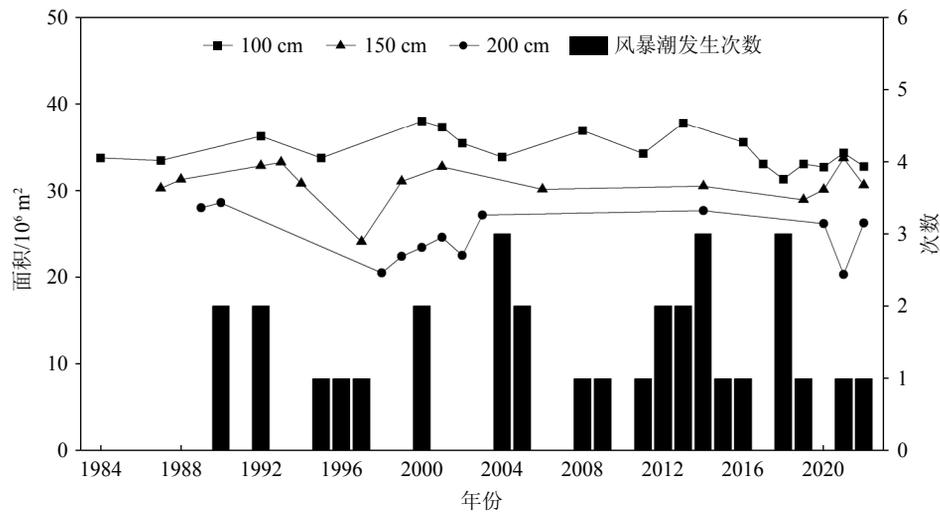


图5 1984—2022年海州湾风暴潮事件与潮间带出露面积变化对比

Fig.5 Comparison of storm surge events and variations in exposed area of the intertidal zones in the Haizhou Bay between 1984 and 2022

发生前后均有遥感影像揭示完整潮间带出露面积的风暴潮分别对应着5个年份的7期次台风,分别是1990年5号(6月24日)和15号(8月30日)台风、2000年12号(8月31日)和14号(9月13日)台风、2016年14号(9月13日)台风、2019年9号(8月8日)台风和2021年6号(7月22日)台风。对比结果显示,1990年和2019年这2个年份风暴潮发生前后的潮间带出露面积有所增加,而2016年风暴潮发生前后却有所减少。2000年和2021年存在不同潮位下的潮间带出露面积数据,对比结果显示,经过2000年的连续两次风暴潮,100 cm潮位下的潮间带出露面积有所减小,150 cm潮位下无数据,而200 cm潮位下的却有所增大;经过2021年的一次风暴潮,100 cm潮位下的潮间带出露面积有所减小,而150 cm和200 cm潮位下的却有所增大。风暴潮主要通过影响泥沙运移来改变海岸形态<sup>[38]</sup>,对于砂质海岸,风暴潮造成的水位激增会更多地影响潮间带上部和潮上带,并将滩面上部的泥沙搬运至中下部堆积<sup>[39-41]</sup>,造成“高滩侵蚀、离岸输运、低滩淤积”的现象<sup>[42]</sup>。2007年台风“韦帕”对海州湾海岸影响的数值模拟结果显示,潮汐泵送效应和重力环流主导了风暴潮时期的泥沙输运,可能导致泥沙朝着与风暴潮时期主导风向相反的方向输运<sup>[43]</sup>。本文的对比结果显示风暴潮发生前后的潮间带下部多侵蚀而上部多淤积,这与以往认识差异明显,可能表明研究所用的遥感影像提取的潮间带面积不仅受风暴潮的直接影响,还受风暴潮发生后岸滩调整的后续影响。然而,受限于目前可获得的遥感影像连续性不足,风暴潮作用下的潮间带响应尚无法完整提取,未来可通过采用更短重返周期的影像

来研究某次风暴潮前后的地貌响应,以改进现有研究成果。

#### 4.3 其他人类活动对海岸冲淤变化的影响

海州湾砂质海岸的泥沙供给主要有陆海两向,对于陆向泥沙供给,由于20世纪50至80年代兴建的海堤和挡潮闸<sup>[44]</sup>,分别阻隔了位于高潮线附近现代海岸沙坝的沙源供给和减少了入海河流的泥沙<sup>[12]</sup>;对于海向泥沙供给,由于1977年建成的岚山头突堤,隔断了北部的沿岸输沙进入海州湾。上述陆海两向的泥沙供给减少均可促进海岸侵蚀的发展。还有,各种人工采砂也可加剧海岸侵蚀,柘汪镇、海头镇、石梁河水库以及龙王河口沙嘴附近等多地都存在过非法采砂活动<sup>[45-47]</sup>,水库附近等流域采砂会减少入海河流的泥沙供给进而间接引发海岸侵蚀,而河口附近采砂可直接引发海岸侵蚀。此外,研究区的砂质岸线生态修复于2021年开始实施,并预计2025年完成,主要实施区域为研究区南部的海州湾旅游度假区,使用赣榆港区疏浚的当地沙源并以滩肩补沙方式完成,累计补沙量为 $2.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ <sup>[48]</sup>。海滩喂养会在短期内有效缓解龙王河口的海岸侵蚀,但长期效果仍需进一步观测和评估。上述人类活动对研究区的冲淤变化会产生不同程度的影响,但所产生影响的时空格局和过程机制目前尚难具体掌握,有待今后开展深入研究。

## 5 结论

本研究基于Landsat系列卫星和Sentinel-2卫星的47幅影像,计算分析了1984—2022年海州湾砂

质海岸在100、150、200 cm三种潮位下的潮间带出露面积变化,并基于4期海图水深数据,计算分析了1980—2014年海州湾水下岸坡等深线与冲淤变化,进而讨论了影响上述变化的主要因素,主要得到以下结论:

(1)1984—2022年潮间带出露面积的变化过程可划分为两个阶段:建港前的1984—2011年,潮间带出露面积存在3次先增后减的起伏,北部面积减少了5.3%,南部面积减少了0.5%;建港后的2011—2022年,潮间带出露面积存在2次先增后减的起伏,北部面积减少了22.0%,南部面积减少了12.3%。北部面积的明显减少与海岸围垦、建港的人为占用相关,扣除人为直接占用面积后,建港前的1984—2011年,北部面积增加了2%,南部面积增加了0.7%;建港后的2011—2022年,北部面积增加了1.2%,南部面积减少了12.2%。潮间带由2011年建港前的总体基本稳定、略有淤积,转变为建港后的北部基本稳定、略有淤积和南部明显侵蚀。

(2)1980—2014年水下岸坡等深线和冲淤的变化过程可划分为两阶段:1980—2003年,所有等深线均呈现后退趋势,北部以弱侵蚀为主,自北向南,近岸总体由弱侵蚀逐渐转变为弱淤积,南部远岸表现弱侵蚀;2003—2014年,等深线变化趋势发生转变,2 m和10 m等深线向海前进,而5 m等深线仍向岸后退,赣榆港区工程及其向南延伸区域表现不同程度的侵蚀,北部近岸局部侵蚀,而其他区域则基本表现淤积,其中远岸淤积尤为明显。

(3)赣榆港区防波堤建设引发的水动力条件减弱和泥沙自北向南运移受阻,是造成建港后潮间带北部基本稳定、略有淤积和南部明显侵蚀的主要影响因素。对于水下岸坡,建港前北部弱侵蚀、南部弱淤积的空间格局,可能与沉积物自东北向西南的净输运趋势有关,而建港后港区侵蚀向南延伸和其他区域总体淤积的空间格局,可能与人工疏浚吹填工程的改造有关。此外,采砂、河口建闸、海岸筑堤及海滩喂养等其他人类活动对研究区的冲淤变化会产生不同程度的影响,但所产生影响的时空格局和过程机制目前尚难具体掌握。受限于目前可获得的遥感影像连续性不足,风暴潮作用下的潮间带地貌响应尚无法完整提取,因此对比获得的风暴潮对潮间带地貌的影响表现与已有研究认识存在差异。

### 参考文献 (References)

- [1] Erlandson J M. As the world warms: rising seas, coastal archaeology, and the erosion of maritime history[J]. *Journal of Coastal Conservation*, 2012, 16(2): 137-142.
- [2] 季子修. 中国海岸侵蚀特点及侵蚀加剧原因分析[J]. *自然灾害学报*, 1996, 5(2): 65-75. [JI Zixiu. The characteristics of coastal erosion and cause of erosion[J]. *Journal of Natural Disasters*, 1996, 5(2): 65-75.]
- [3] 张忍顺, 陆丽云, 王艳红. 江苏海岸侵蚀过程及其趋势[J]. *地理研究*, 2002, 21(4): 469-478. [ZHANG Renshun, LU Liyun, WANG Yanhong. The mechanism and trend of coastal erosion of Jiangsu Province in China[J]. *Geographical Research*, 2002, 21(4): 469-478.]
- [4] Luijendijk A, Hagenaars G, Ranasinghe R, et al. The state of the world's beaches[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 6641.
- [5] 高义, 王辉, 苏奋振, 等. 中国大陆海岸线近30a的时空变化分析[J]. *海洋学报*, 2013, 35(6): 31-42. [GAO Yi, WANG Hui, SU Fenzhen, et al. The analysis of spatial and temporal changes of the continental coastlines of China in recent three decades[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 35(6): 31-42.]
- [6] 许宁. 中国大陆海岸线及海岸工程时空变化研究[D]. 中国科学院烟台海岸带研究所博士学位论文, 2016. [XU Ning. Research on spatial and temporal variation of China mainland coastline and coastal engineering[D]. Doctor Dissertation of Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, 2016.]
- [7] 李震, 雷怀彦. 中国砂质海岸分布特征与存在问题[J]. *海洋地质动态*, 2006, 22(6): 1-4. [LI Zhen, LEI Huaiyan. Distribution and existing problems of sandy coast in China[J]. *Marine Geology Letters*, 2006, 22(6): 1-4.]
- [8] Voudoukas M I, Ranasinghe R, Mentaschi L, et al. Sandy coastlines under threat of erosion[J]. *Nature Climate Change*, 2020, 10(3): 260-263.
- [9] 高抒, 贾建军, 于谦. 绿色海堤的沉积地貌与生态系统动力学原理: 研究综述[J]. *热带海洋学报*, 2022, 41(4): 1-19. [GAO Shu, JIA Jianjun, YU Qian. Green sea dykes: an overview of their principles of sediment, geomorphology and ecosystem dynamics[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2022, 41(4): 1-19.]
- [10] 田会波, 印萍, 阳凡林. 海南省万宁东部砂质海岸侵蚀特征分析[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(4): 44-55. [TIAN Huibo, YIN Ping, YANG Fanlin. An analysis of erosional characteristics of the sandy coast in the eastern part of Wanning, Hainan[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(4): 44-55.]
- [11] 陈子燊, 于吉涛, 罗智丰. 近岸过程与海岸侵蚀机制研究进展[J]. *海洋科学进展*, 2010, 28(2): 250-256. [CHEN Zishen, YU Jitao, LUO Zhifeng. Progresses on study of nearshore processes and coastal erosion mechanisms[J]. *Advances in Marine Science*, 2010, 28(2): 250-256.]
- [12] 陈吉余. 中国海岸侵蚀概要[M]. 北京: 海洋出版社, 2010: 88, 90, 95. [CHEN Jiyu. Overview of Coastal Erosion in China[M]. Beijing: China Ocean Press, 2010: 88, 90, 95.]
- [13] 任美镔. 江苏省海岸带和海涂资源综合调查报告[M]. 北京: 海洋出版社, 1986: 106-108. [REN Meie. Comprehensive Survey Report on Coastal Zone and Seaside Resources in Jiangsu Province[M]. Beijing: China Ocean Press, 1986: 106-108.]
- [14] 江苏省908专项办公室. 江苏近海海洋综合调查与评价总报告[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 135. [Jiangsu Province 908 Special Office.

- General Report on Comprehensive Survey and Evaluation of Jiangsu Offshore Ocean[M]. Beijing: Science Press, 2012: 135.]
- [15] 江苏省自然资源厅. 2022年江苏省海洋灾害公报 [EB/OL]. (2023-05-09)[2025-02-15]. <https://zrzy.jiangsu.gov.cn/gtxxgk/nrglIndex.action?type=2&messageID=2c90825487eacff0f187f7dc0f40186>. [Jiangsu Provincial Department of Natural Resources. 2022 Jiangsu Provincial marine disaster bulletin[EB/OL]. (2023-05-09)[2025-02-15]. <https://zrzy.jiangsu.gov.cn/gtxxgk/nrglIndex.action?type=2&messageID=2c90825487eacff0f187f7dc0f40186>.]
- [16] 项立辉, 安成龙, 张晓飞, 等. 连云港近岸海域表层沉积物沉积特征及粒径趋势分析 [J]. 应用海洋学学报, 2015, 34(3): 317-325. [XI-ANG Lihui, AN Chenglong, ZHANG Xiaofei, et al. Surface sediment characteristics and gran size trends of Lianyungang coastal waters[J]. Journal of Applied Oceanography, 2015, 34(3): 317-325.]
- [17] 范恩梅, 陈沈良, 张国安. 连云港近岸海域沉积物特征与沉积环境 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(2): 33-40. [FAN Enmei, CHEN Shenliang, ZHANG Guoan. Sediment characteristics and sedimentary environment in Lianyungang coastal waters[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29(2): 33-40.]
- [18] 汤倩, 闫玉茹, 周欣, 等. 连云港海州湾近海碎屑沉积物矿物组成及特征分析 [J]. 华东地质, 2021, 42(2): 239-245. [TANG Qian, YAN Yuru, ZHOU Xin, et al. Mineral compositions and characteristics of the offshore clastic sediments in Haizhou Bay, Lianyungang City[J]. East China Geology, 2021, 42(2): 239-245.]
- [19] 沈昆明, 李安龙, 蒋玉波, 等. 基于数字岸线分析系统的海岸线时空变化速率分析: 以海州湾为例 [J]. 海洋学报, 2020, 42(5): 117-127. [SHEN Kunming, LI Anlong, JIANG Yubo, et al. Time-space velocity analysis of coastline based on digital shoreline analysis system: a case study of the Haizhou Bay[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(5): 117-127.]
- [20] 张存勇. 海州湾近岸海域现代沉积动力环境 [M]. 北京: 海洋出版社, 2015: 2, 44. [ZHANG Cunyong. Modern Sedimentary Dynamic Environment in the Nearshore Waters of Haizhou Bay[M]. Beijing: China Ocean Press, 2015: 2, 44.]
- [21] 王宝灿, 虞志英, 刘苍宇, 等. 海州湾岸滩演变过程和泥沙流动向 [J]. 海洋学报, 1980, 2(1): 79-96. [WANG Baocan, YU Zhiying, LIU Cangzi, et al. The change of coasts and beaches and the movement of longshore sediments of Haizhou Bay[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1980, 2(1): 79-96.]
- [22] 潘海辰. 环抱式港口生态化改造研究: 以赣榆港区为例 [D]. 南京师范大学硕士学位论文, 2021. [PAN Haichen. Research on the ecological transformation of surrounding port: a case study of Ganyu port area[D]. Master Dissertation of Nanjing Normal University, 2021.]
- [23] 范彦斌, 张晓飞, 孙祝友, 等. 连云港赣榆港区水下地形地貌研究 [J]. 地质学刊, 2017, 41(4): 651-654. [FAN Yanbin, ZHANG Xiaofei, SUN Zhuyou, et al. Research of the underwater topography in Ganyu Dockland in Lianyungang City[J]. Journal of Geology, 2017, 41(4): 651-654.]
- [24] Vos K, Splinter K D, Harley M D, et al. *CoastSat*: a Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery[J]. Environmental Modelling & Software, 2019, 122: 104528.
- [25] Caldwell P C, Merrifield M A, Thompson P R. Sea level measured by tide gauges from global oceans as part of the Joint Archive for Sea Level (JASL) since 1846[R]. NOAA National Centers for Environmental Information, 2015.
- [26] 巫统仁, 刘培, 于吉涛, 等. 平衡剖面模式下海岸线遥感提取中不同潮位校正方法对比研究 [J]. 热带海洋学报, 2023, 42(6): 52-62. [WU Tongren, LIU Pei, YU Jitao, et al. Comparative study on different tide level correction methods in remote sensing extraction of coastline under balanced profile model[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2023, 42(6): 52-62. ]
- [27] 吴一全, 刘志林. 遥感影像的海岸线自动提取方法研究进展 [J]. 遥感学报, 2019, 23(4): 582-602. [WU Yiquan, LIU Zhonglin. Research progress on methods of automatic coastline extraction based on remote sensing images[J]. Journal of Remote Sensing, 2019, 23(4): 582-602.]
- [28] 张东, 崔丹丹, 吕林. 江苏省海岸线时空动态变化遥感监测技术、方法与应用 [M]. 北京: 海洋出版社, 2018: 10-12. [ZHANG Dong, CUI Dandan, LV Lin. Remote Sensing Monitoring Technology, Method and Application of Spatiotemporal Dynamic Changes of Coastline in Jiangsu Province[M]. Beijing: China Ocean Press, 2018: 10-12.]
- [29] 王慧, 李文善, 范文静, 等. 2020年中国沿海海平面变化及影响状况 [J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(1): 122-128. [WANG Hui, LI Wenshan, FAN Wenjing, et al. Coastal sea level change and impacts in China: the state of 2020[J]. Climate Change Research, 2022, 18(1): 122-128.]
- [30] 张晓祥, 严长清, 徐盼, 等. 近代以来江苏沿海滩涂围垦历史演变研究 [J]. 地理学报, 2013, 68(11): 1549-1558. [ZHANG Xiaoxiang, YAN Changqing, XU Pan, et al. Historical evolution of tidal flat reclamation in the Jiangsu coastal areas[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(11): 1549-1558.]
- [31] 张长宽, 陈君, 林康, 等. 江苏沿海滩涂围垦空间布局研究 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2011, 39(2): 206-212. [ZHANG Changkuan, CHEN Jun, LIN Kang, et al. Spatial layout of reclamation of coastal tidal flats in Jiangsu Province[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2011, 39(2): 206-212.]
- [32] 刘家驹, 喻国华. 海岸工程泥沙的研究和应用 [J]. 水利水运科学研究, 1995(3): 221-233. [LIU Jiaju, YU Guohua. Study and application on sediment of coastal engineerings[J]. Hydro-Science and Engineering, 1995(3): 221-233.]
- [33] 江苏省农业资源开发局. 江苏沿海垦区 [M]. 北京: 海洋出版社, 1999: 180-188. [Jiangsu Provincial Agricultural Resources Development Bureau. Jiangsu Coastal Reclamation Area[M]. Beijing: China Ocean Press, 1999: 180-188.]
- [34] 陈君, 林祥. 江苏海岸侵蚀及其防护工程研究进展 [J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(5): 1-6,31. [CHEN Jun, LIN Xiang. Research progress on coastal erosion and protection engineering in Jiangsu Province[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(5): 1-6,31.]
- [35] Feng L, He J, Ai J Y, et al. Evaluation for coastal reclamation feasibility using a comprehensive hydrodynamic framework: a case study in Haizhou Bay[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 100(1): 182-190.
- [36] 夏东兴, 王文海, 武桂秋, 等. 中国海岸侵蚀述要 [J]. 地理学报, 1993,

- 48(5): 468-476. [XIA Dongxing, WANG Wenhai, WU Guiqiu, et al. Coastal erosion in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1993, 48(5): 468-476.]
- [37] 中华人民共和国自然资源部. 1989-2022年中国海洋灾害公报 [EB/OL]. [5-02-15]. <https://www.mnr.gov.cn/sj/sjfw/hy/gb/gg/zghyzhgb/index.html>. [Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Bulletin of China marine disaster from 1989 to 2022[EB/OL]. [2025-02-15]. <https://www.mnr.gov.cn/sj/sjfw/hy/gb/gg/zghyzhgb/index.html>.]
- [38] 于吉涛, 陈子燊. 砂质海岸侵蚀研究进展 [J]. *热带地理*, 2009, 29(2): 112-118. [YU Jitao, CHEN Zishen. Study progress of sandy coastal erosion[J]. *Tropical Geography*, 2009, 29(2): 112-118.]
- [39] 何泽良, 帅力. 广东台山岬湾砂质海岸侵蚀影响因素 [J]. *海洋地质前沿*, 2021, 37(2): 31-36. [HE Zeliang, SHUAI Li. Influence factors on sandy coast erosion in the Headland Bay in Taishan of Guangdong[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2021, 37(2): 31-36.]
- [40] 张鑫, 李萍, 杨奇铮, 等. 广西北海涠洲岛典型岸滩剖面短期冲淤变化特征 [J]. *海洋科学*, 2016, 40(6): 77-83. [ZHANG Xin, LI Ping, YANG Qizheng, et al. Short-term shore change characteristics of erosion and deposition on Weizhou Island in Beihai, Guangxi Province[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(6): 77-83.]
- [41] 杨奇铮, 李萍, 高伟, 等. 东海岛东北部典型岸段短期冲淤变化及影响因素分析 [J]. *海洋科学进展*, 2016, 34(4): 532-541. [YANG Qizheng, LI Ping, GAO Wei, et al. Short-term coastal erosion-deposition variation analysis of northeastern Donghai Island[J]. *Advances in Marine Science*, 2016, 34(4): 532-541.]
- [42] 龚政, 黄诗涵, 徐贝贝, 等. 江苏中部沿海潮滩对台风暴潮的响应 [J]. *水科学进展*, 2019, 30(2): 243-254. [GONG Zheng, HUANG Shihan, XU Beibei, et al. Evolution of tidal flat in response to storm surges: a case study from the central Jiangsu Coast[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(2): 243-254.]
- [43] Wang C, Yang G, Li C H, et al. The response of sediment transport and morphological evolution to storms with different characteristics[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 946: 173987.
- [44] 陈伯琳. 江苏海堤建设史 [J]. *江苏水利*, 1999(4): 48. [CHEN Bolin. History of seawall construction in Jiangsu Province[J]. *Jiangsu Water Resources*, 1999(4): 48.]
- [45] 卢志坚, 范伟义, 李澄澄. 自建码头竟成为非法采砂的“避风港”[J]. *方圆*, 2019(14): 40. [LU Zhijian, FAN Weiyi, LI Chengcheng. Self-built docks have become a 'safe haven' for illegal sand mining[J]. *Fangyuan Magazine*, 2019(14): 40.]
- [46] 朱孟东, 范兴业. 石梁河水库非法采砂案件查处的实践与思考 [J]. *江苏水利*, 2022, 38(S1): 56-58,81. [ZHU Mengdong, FAN Xingye. Practice and reflection on the investigation and handling of illegal sand mining cases in Shilianghe reservoir[J]. *Jiangsu Water Resources*, 2022, 38(S1): 56-58,81.]
- [47] 何聪, 王伟健. 好风景里有好发展 [N]. *人民日报*, 2022-02-28(14). [HE Cong, WANG Weijian. Good scenery leads to good development[N]. *Renmin Ribao*, 2022-02-28(14).]
- [48] 连云港市生态环境局. 连云港市生态环境局2023年4月13日关于建设项目环境影响评价文件受理情况的公示 [EB/OL]. (2023-04-13)[2025-02-15]. <https://www.lyg.gov.cn/zglygzfzfmhwhz/jsxmsp/content/dd7b2fea-45df-4c4b-a714-465e6fbb629c.html>. [Lianyungang Municipal Ecological and Environment Bureau. Lianyungang Municipal Ecological and Environment Bureau on April 13, 2023, on the acceptance of environmental impact assessment documents of construction projects[EB/OL]. (2023-04-13)[2025-02-15]. <https://www.lyg.gov.cn/zglygzfzfmhwhz/jsxmsp/content/dd7b2fea-45df-4c4b-a714-465e6fbb629c.html>.]