

基于遥感的江苏省大陆岸线岸滩时空演变

陈玮彤¹, 张 东^{1,2}, 崔丹丹³, 吕 林³, 谢伟军³, 施顺杰¹, 侯泽宇¹

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023; 3. 江苏省海域使用动态监视监测中心, 南京 210003)

摘要: 基于江苏省1984-2016年61景多源遥感影像数据和部分实测潮位、坡度数据, 利用遥感技术结合改进的水边线方法提取了多时相的海岸线和平均大潮低潮线, 研究了江苏省绣针河口至连兴河口大陆岸线岸滩的时空演变特征。结果表明: 1984-2016年, 由于海岸带开发, 江苏省的海岸线整体以向海推进为主, 自然岸线由458.24 km逐渐减少至166.74 km, 人工岸线由163.66 km快速增加至598.74 km, 大陆岸线长度由621.90 km增加至765.48 km。发生位置和长度变化的岸段中, 淤长岸段长127.62 km, 年均向海推进83.03 m; 围垦岸段长401.21 km, 年均向海推进87.63 m; 冲刷岸段长71.17 km, 年均离海后退10.81 m; 围垦被侵蚀岸段长25.95 km, 年均离海后退8.64 m。海岸线的空间变化导致江苏省沿海陆地面积净增加104332 hm², 其中由于围垦增加的陆地面积98520 hm², 围垦是陆地面积增加的主要原因。海岸线的离海后退主要发生在废黄河三角洲岸段, 但是到2008-2016年, 岸线的侵蚀范围已向南扩大至新洋河口至斗龙港岸段。受围垦活动及岸线侵蚀影响, 江苏省潮间带坡度不断变陡, 统计断面的平均坡度由1.4‰增加至1.9‰, 其中废黄河三角洲岸段的中山河口至扁担河口岸段坡度最陡, 基本在3~14‰之间; 辐射沙洲陆岸岸段坡度最为平缓, 但坡度也在逐渐陡化, 由0.9‰增加至1.5‰。潮间带面积由271747 hm²减少至168645 hm², 减幅38%; 潮间带平均宽度由5064 m减少至3096 m, 减幅39%。

关键词: 江苏省; 海岸线; 潮间带; 时空演变; 遥感

DOI: 10.11821/dlxb201807014

1 引言

海岸带位于陆地、海洋、大气交互作用的地区, 是典型的生态脆弱带和环境变化敏感带^[1], 也是空间资源条件优越的地区。海岸带不仅受到海平面上升、台风风暴潮冲刷等自然因素的影响产生岸滩的淤蚀变化, 同时也面临着人类资源开采和滩涂围垦建设造成自然环境的改变。江苏省作为中国综合发展水平较高的省份之一, 人口密度始终位于全国前4位^[2]。在全省建设用地迅速扩张、人均耕地面积远低于全国水平的情况下, 沿海滩涂作为土地占补平衡的重要耕地来源, 其丰富的淤泥质潮滩资源成为近年来重点开发的重

收稿日期: 2017-07-10; 修订日期: 2018-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771447); 江苏省测绘地理信息科研项目(JSCHKY201504); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(164320H116) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41771447; Scientific Research Project of Surveying and Mapping Geographic Information of Jiangsu, No.JSCHKY 201504; A Project Funded by the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions, No.164320H116]

作者简介: 陈玮彤(1992-), 男, 江苏靖江人, 博士生, 研究方向为海岸带资源开发利用。E-mail: chenweitong_em@163.com

通讯作者: 张东(1975-), 男, 江苏南通人, 博士, 副教授, 研究方向为海洋信息技术与海岸带资源开发管理。

E-mail: zhangdong@njnu.edu.cn

要土地资源。随着海洋经济的迅速发展,江苏沿海的人类活动愈发频繁,海岸带面临的开发压力不断增大。作为了解海岸带变化问题的基础,基于岸线动态变化研究江苏省岸线岸滩的时空演变具有重要意义。

海岸线位置及滩涂信息大多是动态和半动态的,岸线的实地修测费时费力^[3]。基于多源遥感影像,众多学者提出采用多种自动、半自动的岸线提取方法^[4-5]、基于潮位推算的水边线方法^[6]以及改进的水边线方法^[7-8]等,来提取海岸线,分析岸线岸滩动态变化,快速可靠的遥感监测技术已成为海岸线变化监测的有力工具。但是已有研究主要存在海岸线认定标准不一致的问题,导致分析结果的科学性和可比性变差。

对于江苏省海岸的遥感监测,赵建华等^[9]、李静等^[10]发现近年来江苏中部岸段的岸线长度及曲折度在岸滩向海推进过程中总体趋于平直化;高义等^[11]研究表明近30年江苏省岸线变化导致陆地面积不断增加;李行等^[12]认为江苏海岸显著侵蚀岸段以废黄河口为中心,淤长岸段以琼港为中心,并提出围垦是导致江苏省海岸线变化的主要原因;张云等^[13]研究发现江苏省部分岸线向海推进幅度较大;Hou等^[14]研究认为江苏海岸变化呈现侵蚀后退与围填造陆并存,但陆地面积总体增加的态势。

综合考虑到江苏省大规模的沿海开发,人工围垦改变了潮滩地形^[15],也推动了海岸线的向海推进,同时潮滩的侵蚀有时始于潮下带^[16],仅基于海岸线变化进行监测存在局限性,认为需要多角度对海岸带的动态变迁进行监测与分析。因此选取了1984年、1992年、2000年、2008年和2016年的多源遥感影像,结合改进的水边线方法^[8],利用遥感技术提取与推算人工岸线、海岸线以及平均大潮低潮线,定量分析江苏省大陆岸线岸滩的时空演变,为规划江苏省海岸带的可持续开发、利用与保护提供决策依据。

2 研究区与数据

2.1 研究区概况

江苏省位于中国大陆东部沿海,黄海与东海之滨,近海水动力受南黄海旋转潮波和东海前进潮波的控制,海区潮汐以半日潮为主,浅海分潮显著^[17]。江苏省大陆岸线北起苏鲁交界的绣针河口,南至启东连兴河口,涉及沿海连云港、盐城、南通3个市(图1)。按地貌单元划分,江苏大陆岸线可划分为3段^[18]:绣针河口至烧香河口的海州湾岸段,该段海岸内以兴庄河口为界,兴庄河口北侧为砂质海岸,南侧为淤泥质海积平原,海州湾南翼为江苏仅有的一段基岩海岸;烧香河口至射阳河口的废黄河三角洲岸段,该段海岸为粉砂淤泥质海岸,处于冲刷环境中,潮滩坡度较陡且狭窄^[19],岸滩侵蚀脆弱性较高^[20];射阳河口至连兴河口的辐射沙洲陆岸岸段,该段岸线以粉

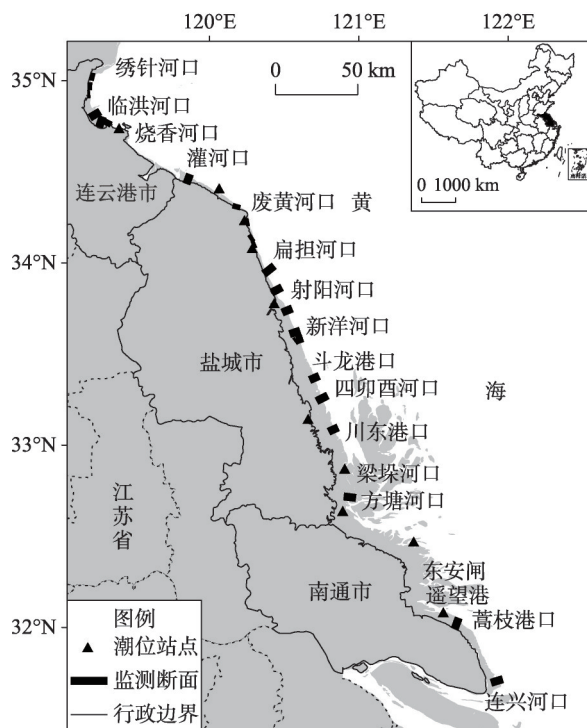


图1 研究区、潮位站点及监测断面示意图

Fig. 1 Map of the study area showing tidal stations and transects

砂淤泥质海岸为主, 滩涂资源丰富。据 20 世纪 80 年代江苏省海岸带综合调查, 扁担河口至射阳河口属于废黄河口南翼, 为由侵蚀转向稳定的过渡地带; 射阳河口至川东港口受废黄河口向南沿岸流及环向流作用, 不断得到泥沙补给, 处于淤长环境^[21-22]。但是, 近 40 年来, 江苏海岸的侵蚀岸段已不限于北部废黄河三角洲海岸, 有扩大到南部滨海平原的趋势^[16]。

2.2 数据与处理

(1) 遥感影像数据。为获得 1984 年、1992 年、2000 年、2008 年、2016 年覆盖江苏省的 2 条完整水边线用于推算大陆海岸线, 搜集了各研究时段 61 景多源 (Landsat4/5/7、GF-1/2、ZY-3、HJ-1) 多时相的遥感影像数据。需注意在同一时段内覆盖相同岸段的多景遥感影像, 成像时刻的潮位不宜过高, 且潮差不宜过小, 这样 2 条提取的水边线在空间上有较大的区分度。所有影像均经过几何精校正处理, 采用 WGS84 坐标系, UTM 投影 51N 分带。

(2) 潮位数据。潮位数据资料包括国家海洋信息中心发布的潮汐表数据和研究区内的实测潮位历史数据。根据潮位数据空间插值处理需求, 在江苏沿海共收集了 6 个实测潮位站和 4 个潮汐表潮位站的潮位数据。潮位站点位置如图 1 所示。

(3) 坡度数据。根据江苏沿海的地形特征, 在有典型冲淤变化的废黄河口至方塘河口岸段设置了 11 条监测断面, 2014-2016 年对断面按季节进行高程复测, 记录了滩面高程的变化。在其余岸段补充收集了江苏“908”近海海洋综合调查监测断面 11 条, 共计获得 22 条监测断面的平均坡度数据。具体断面位置如图 1 所示。

3 研究方法

3.1 改进的水边线法

水边线方法是通过遥感影像水边线蕴含的潮位信息来恢复潮滩地形, 从而推算平均大潮高、低潮线。由于地球曲率变化、潮波变形等多种因素的影响, 当研究区范围较大时, 同一条水边线上不同纬度位置的潮位差异不可忽略^[8]。改进的水边线法针对淤泥质海岸潮滩宽阔平坦的特点, 假设潮间带坡度大致均一, 首先通过潮位控制站点的实测潮位数据进行潮汐调和和潮位预测, 对遥感提取的瞬时水边线进行分段潮位插值订正^[8]; 然后通过两条水边线的潮位差, 计算对应潮滩的平均坡度, 来推算平均大潮高、低潮线。改进的水边线法流程如图 2 所示。

(1) 瞬时水边线提取。针对不同分辨率的影像、潮位及灰度值特点, 通过单波段密度分割法、面向对象分类法或采用归一化差值水体指数增强处理, 利用边缘提取算子进行瞬时水边线提取, 局部地区可结合目视解译修正。

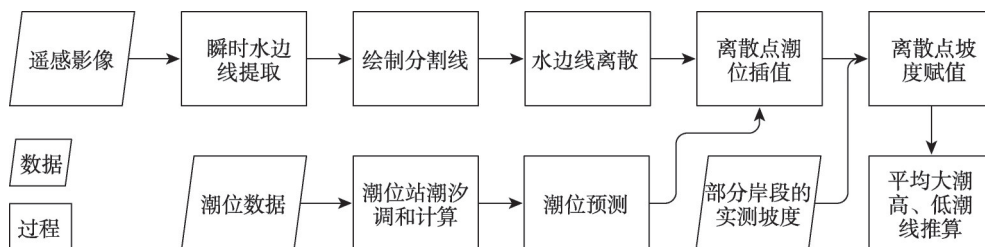


图 2 改进的水边线法流程图

Fig. 2 Flowchat of the improved water-line method

(2) 潮汐调和计算。基于搜集的潮位数据,采用Pawlowicz等^[23]提供的T-Tide程序计算潮汐调和常数,然后利用潮汐调和计算得到各时相遥感影像成像时刻的潮位站点潮位值,同时基于许家琨等^[24]提出的公式计算各潮位站点的平均大潮高、低潮位。

(3) 平均大潮高、低潮线推算。通过绘制分割线,并提取水边线与所绘制的分割线的交点,得到水边线离散点。将潮位预测的潮位结果线性插值到离散点上,完成遥感影像成像时刻的水边线潮位赋值。离散点对应的平均大潮高、低潮位插值方法同理。若该地区搜集有两条合适的水边线,利用同一条分割线上两个水边线离散点的坐标及潮位计算平均坡度;对于滩涂较窄、部分海岸线为人工岸线或未搜集到两条合适的水边线用于推算平均坡度的岸段,则通过搜集的实测断面坡度进行插值,得到分割线所在岸滩的平均坡度。利用平均坡度推算出平均大潮高潮线离散点在分割线上的位置,然后将离散点连成线,得到平均大潮高潮线。平均大潮低潮线推算方法同理。

3.2 海岸线定义与提取规则

海岸线(自然岸线)通常被定义为多年平均大潮高潮形成的海陆分界痕迹线^[25]。基于遥感的岸线监测与海岸线的实地修测不同,实地测量中,一般可根据当地的海蚀阶地、海滩堆积物、海滨植物等来界定海岸线^[26];遥感测量中,一般采用推算平均大潮高潮线的方法来得到海岸线。据此,基于遥感推算的海岸线定义为遥感推算的平均大潮高潮线与遥感提取的其他稳定的自然岸线及人工岸线的结合。

江苏省的自然岸线主要包括基岩海岸岸线、砂质海岸岸线、淤泥质海岸岸线和河口岸线。基岩海岸岸线位置界定在陡崖的基部,可直接采用瞬时水边线作为海岸线。砂质海岸岸线一般界定在滩脊顶部向海一侧。淤泥质海岸岸线主要采用改进的水边线方法推算,在部分岸线曲折的河口地区及工程区之间的岸段,可以通过目视解译植被岸线或淤渣线作为海岸线。河口岸线以河道入海的突然展宽处连线作为海岸线。

人工岸线定义为最靠近滩涂外侧、有人为建设痕迹、遥感可辨的人工地物形成的线状分界线。江苏省的人工岸线主要有盐养围堤岸线、港口码头岸线、道路海堤岸线、建设围堤岸线和河流河堤岸线5种类型。人工岸线可针对不同的岸线类型通过构建解译标志进行提取^[27]。

海岸线合成时,在砂质海岸和淤泥质海岸,若推算的平均大潮高潮线在人工岸线向陆一侧,则以人工岸线为海岸线,否则以平均大潮高潮线为海岸线;在基岩海岸,以基岩岸线为海岸线;在入海河口,以河口岸线为海岸线。最终将各分段岸线顺序连接,形成连续的海岸线。

3.3 精度验证

3.3.1 潮位预测精度验证 针对T-Tide模型的潮位计算,以2011年10月20日-11月4日射阳河口的实测潮位数据进行预测结果验证。计算的潮位平均绝对误差12 cm,残差95%的置信区间为-2.17~2.17 cm,服从均值为0的正态分布,潮位预测精度能够满足海岸线遥感推算需求。

3.3.2 坡度推算精度验证 按500 m间隔,绘制了共计1100条分割线,对提取的瞬时水边线进行分割处理,并计算分割线所在断面的岸滩平均坡度。去除部分滩涂狭窄的岸段、工程区之间的河口地区及异常点,2016年基于两景水边线可推算的坡度共计453个,推算的平均坡度与实测平均坡度对比如图3所示。通过与监测断面相距最近的2016年分割线断面的平均坡度与实测平均坡度进行精度验证,分析结果显示,均方根误差0.48‰,均方根误差低于推算坡度值一个数量级,认为推算的坡度值偏离程度较小,与实际情况基本吻合。

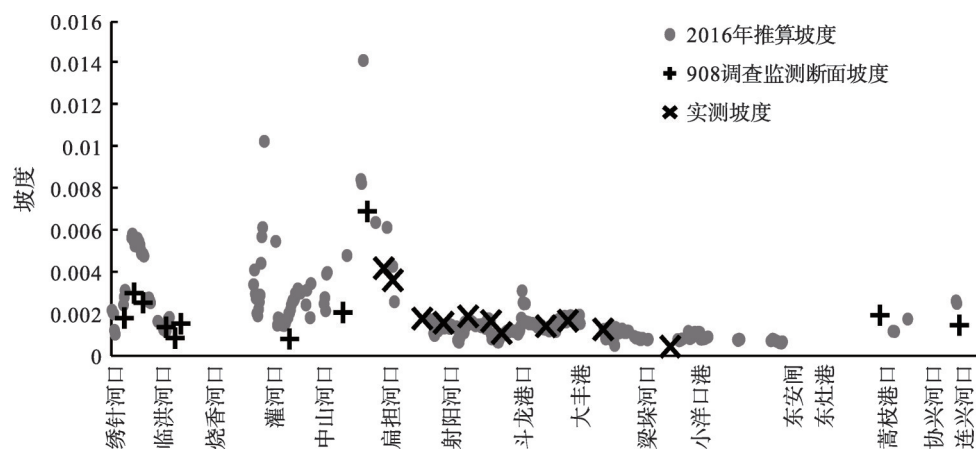


图3 2016年遥感推算的岸滩平均坡度与实测平均坡度对比
Fig. 3 Contrast in calculated mean slopes of 2016 and measured mean slopes

4 结果分析

4.1 海岸线变迁分析

4.1.1 海岸线长度变化 基于1984年、1992年、2000年、2008年、2016年5个时段的遥感影像推算的海岸线结果如图4所示，长度统计结果如表1所示。考虑到不同分辨率影像显示的地物细节情况不同，对于人工岸线部分的提取均是基于30 m分辨率影像。

1984-2016年江苏省海岸线长度不断增加，特别是2000年以来，大量港口码头的修建，以及大规模围填海工程的兴起，人工岸线所占比例越来越高。由于人工围垦推进至平均大潮高潮线向海一侧，大量自然岸线被人工岸线所替代。人工岸线建设引起的海岸线长度变化有两种趋势：中部沿海的盐城地区，人工岸线趋于平直，海岸线长度变化不

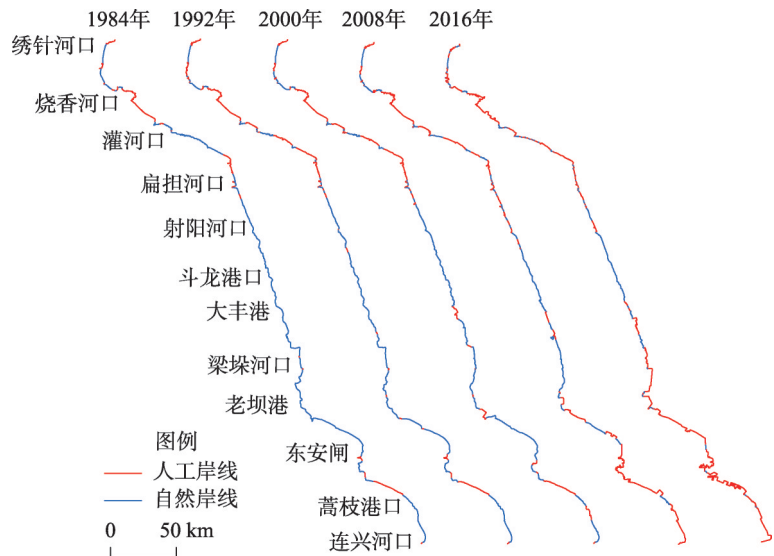


图4 1984-2016年江苏省海岸线提取结果示意图
Fig. 4 Results of coastline extraction in Jiangsu province from 1984 to 2016

表 1 1984-2016 年江苏省海岸线长度统计表(km)
Tab. 1 Coastline length data of Jiangsu province from 1984 to 2016 (km)

区域	岸线类型	1984 年	1992 年	2000 年	2008 年	2016 年
海州湾	人工岸线	51.52	72.70	60.84	72.09	95.70
	自然岸线	43.49	33.30	40.30	37.68	25.35
	海岸线	95.01	106.00	101.14	109.77	121.05
废黄河三角洲	人工岸线	68.41	115.35	123.14	134.85	142.47
	自然岸线	113.44	68.53	62.46	50.92	41.42
	海岸线	181.85	183.88	185.60	185.76	183.89
辐射沙洲陆岸	人工岸线	43.74	58.32	92.36	223.53	360.57
	自然岸线	301.31	278.62	257.80	171.14	99.97
	海岸线	345.05	336.93	350.16	394.67	460.54
江苏省	人工岸线	163.66	246.37	276.34	430.47	598.74
	自然岸线	458.24	380.44	360.56	259.73	166.74
	海岸线	621.90	626.81	636.90	690.20	765.48

大；南部沿海的南通地区，人工岸线曲折，导致海岸线长度显著增加。据统计，2016 年江苏省海岸线总长度 765.48 km，相比 1984 年增加了 143.59 km，增幅 23%。自然岸线 32 年来减少了 291.49 km，减幅 64%；人工岸线增加了 435.08 km，增幅 266%。至 2016 年，全省相对完整的自然岸线仅分布在江苏中部的射阳河口至大丰港岸段，其余地区的自然岸线均呈零星分布。

海州湾岸段的海岸线长度由 95.01 km 增加至 121.05 km，增幅 27%，岸线长度变化主要发生在临洪河口北侧及连云港区（图 5a），仅连云港区建设就导致海岸线长度增加了 16.31 km。废黄河三角洲岸段海岸线长度由 181.85 km 变化为 183.89 km，岸线长度变化不大，随着岸线的整治修复，岸线转变为相对稳定的人工岸线。辐射沙洲陆岸岸段岸线长度由 345.05 km 增加至 460.54 km，岸线长度变化幅度最大，增幅 33%，岸线长度

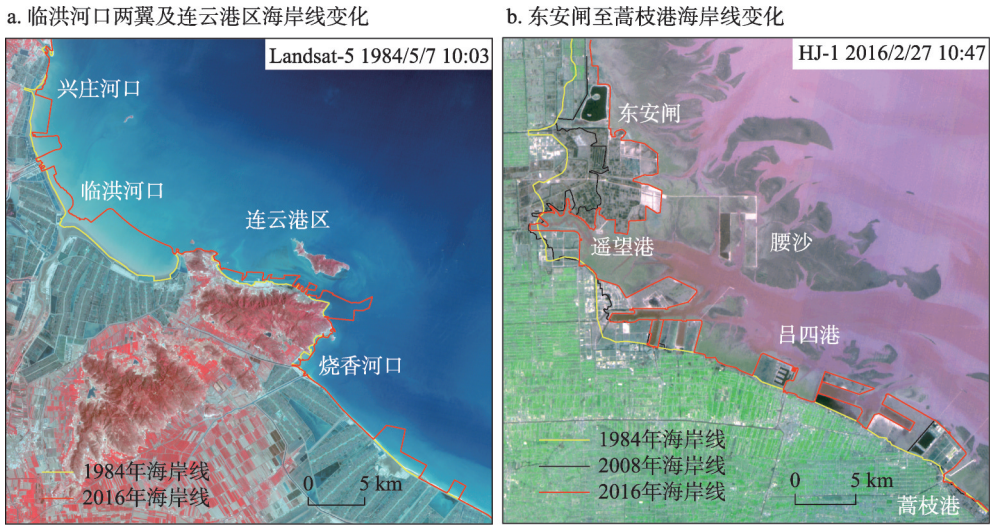


图 5 江苏省海岸线长度变化显著区域示意图
Fig. 5 Map of the significant change in length of the coastline area

变化主要发生在东安闸至蒿枝港口岸段(图5b), 为了增加人工岸线的利用率, 该段海岸人工岸线曲折, 海岸线长度增加了84.42 km, 是江苏省岸线长度变化最大的区域。

4.1.2 海岸线时空变迁 为定量分析海岸线的时空变迁情况, 将变化的海岸线分为4类: ①淤长岸段, 指海岸线向海推进, 当前为自然岸线的岸段; ②围垦岸段, 指海岸线向海推进, 当前为人工岸线的岸段; ③冲刷岸段, 指海岸线离海后退, 原为自然岸线的岸段; ④围垦被侵蚀岸段, 指海岸线离海后退, 原为人工岸线的岸段。稳定的海岸线指空间位置没有发生显著变化的岸段, 主要包括基岩海岸、部分未发生变化的人工岸线岸段和河口岸段。

江苏省海岸线各时段变化情况如图6所示, 按分割线上的变化距离统计, 海岸线变迁情况如表2所示。据统计, 江苏省70%的海岸线都在向海推进, 占主导的岸线变化类型为淤长岸段和围垦岸段。从1984-2016年变化来看, 淤长岸段海岸线长127.62 km, 占岸线总长16.67%, 围垦岸段海岸线长401.21 km, 占岸线总长52.41%。各时段占主导的岸线类型也不同, 1984-1992年淤长岸段海岸线长271.54 km, 占海岸线总长比例最高, 为43.32%。至2008-2016年围垦岸段成为占比最高的岸线类型, 长272.11 km, 占海岸线总长的35.55%。全省1984-2016年淤长岸段平均淤长速率83.03 m/a, 平均向海推进了2657 m; 围垦岸段平均围垦推进速率87.63 m/a, 平均向海推进了2804 m, 向海推进速率最高的区域为辐射沙洲陆岸岸段。关于海岸线的离海后退, 1984-2008年江苏省海岸线的侵蚀后退主要发生在废黄河三角洲岸段, 该时段可认为射阳河口是岸滩由北部侵蚀转向南部淤长的分界点。而在2008-2016年, 侵蚀范围开始向南扩张, 斗龙港口以北均存在岸线后退的现象, 但变化幅度较小, 认为目前新洋河口至斗龙港口岸段是由北部侵蚀转向南部淤长的过渡带。全省1984-2016年冲刷岸段长71.17 km, 平均后退了346 m; 围垦被侵蚀岸段长25.95 km, 平均后退了276 m。

海州湾岸段由于存在较多的城镇建设及港口建设用海活动, 岸线变化以向海推进为主。其中, 临洪河口两侧(兴庄河口至西墅)各时段都存在不同程度的向外围垦, 1984-2000年围垦速率相对较快, 监测发现围垦的人工岸线已接近平均大潮高潮线; 2000-2008年围垦速率相对放缓, 该段岸线处于相对稳定状态; 2008-2016年进行赣榆新城和连云新城建设, 并建设有高标准道路海堤, 至此, 除临洪河口北侧仅存有一段约3 km的自然岸线以外, 该岸段其余岸线全部转变为人工岸线。海州湾内的岸线后退主要局部集中发生在特定时段, 例如, 1992-2000年赣榆港区南侧、兴庄河口北岸存在围垦被荒废; 2008-2016年兴庄河口至临洪河口之间的围填海开发改变了工程区之间的河口地形, 导致岸线后退。此外, 1992-2000年龙王河口仅河口处存在岸线后退, 河口北侧的砂质海岸岸线位置一直保持稳定。

废黄河三角洲岸段整体处于冲刷环境中, 沿岸多为低标准的盐养围堤, 不断有新的养殖围垦出现, 又不断有养殖塘被冲毁, 岸线变化以离海后退为主。据图6e分段统计, 1984-2016年, 废黄河三角洲的冲刷岸段长65.91 km, 平均冲刷后退384 m; 围垦岸段长37.41 km, 平均向海推进557 m; 围垦被侵蚀岸段长24.57 km, 平均岸线后退距离285 m。该岸段海岸线后退最大距离1326 m, 位于扁担河口北侧。岸线的淤长仅现于1992-2000年时段, 双洋河口至射阳河口岸段由于护花米草扩张^[19], 岸线由侵蚀转为微弱淤长。此外仅有零星的淤长岸段分布, 如1992-2000年时段的埭子口及2000-2008年时段的灌河口, 出现淤长的原因有两方面: ①潮上带地形受围垦影响, 平均大潮高潮线的位置向海推移; ②养殖塘被冲毁荒废后, 恢复为自然岸线。但该类淤长岸段在下个时段又可能会被冲刷或围垦岸段所代替。随着近年来废黄河三角洲岸段的岸线整治, 沿海不断建

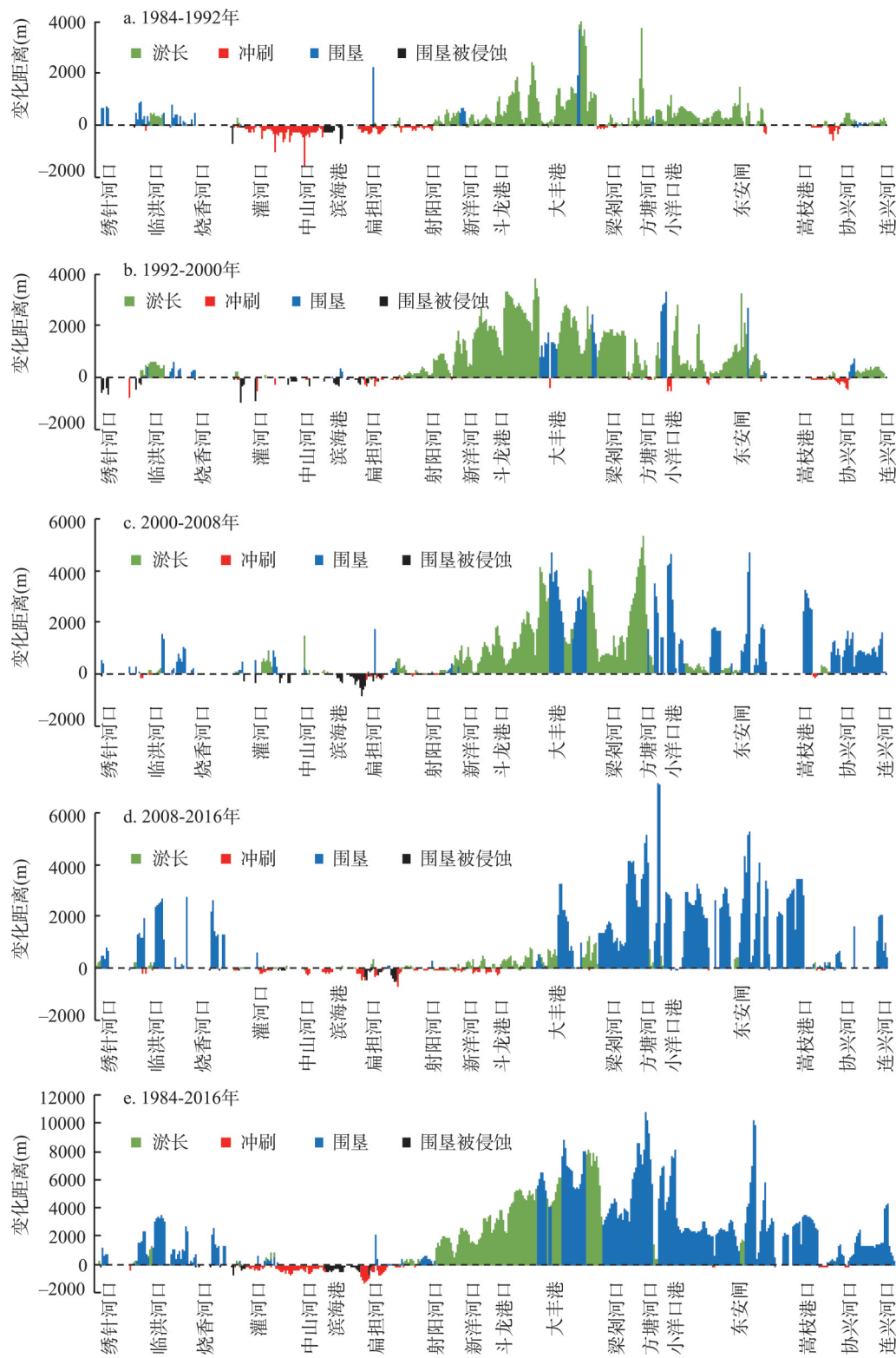


图6 1984-2016年江苏省海岸线空间变化情况

Fig. 6 Spatial changes in the coastline of Jiangsu province from 1984 to 2016

表2 1984-2016年江苏省海岸线变化情况统计表

Tab. 2 Data on changes in the coastline of Jiangsu province from 1984 to 2016

时间段	平均淤长 速率(m/a)	淤长岸段 长度(km)	平均围垦推 进速率(m/a)	围垦岸段 长度(km)	平均冲刷 速率(m/a)	冲刷岸段 长度(km)	平均围垦被侵 蚀速率(m/a)	围垦被侵蚀岸 段长度(km)
1984-1992年	60.42	271.54	46.79	49.75	-24.20	110.19	-27.34	15.27
1992-2000年	126.26	273.90	115.01	47.16	-16.75	52.50	-27.94	29.69
2000-2008年	115.78	199.08	154.96	191.07	-7.26	26.91	-27.22	26.57
2008-2016年	27.98	110.17	218.70	272.11	-16.31	71.77	-16.61	18.99
1984-2016年	83.03	127.62	87.63	401.21	-10.81	71.17	-8.64	25.95

设高标准的道路海堤，以及海岸线被侵蚀后退至人工岸线，海岸线侵蚀后退现象减弱，并逐渐趋于稳定。

辐射沙洲陆岸岸段的海岸线整体向海大幅推进，各时段岸线类型均以淤长岸段或围垦岸段为主。1984-1992年，淤长岸段长243.43 km，占海岸线的72.25%，平均向海推进513 m。1992-2000年，由于向海围垦的速度大幅加快，改变了滩涂地形，淤长岸段长224.59 km，与上一时段相近，但是淤长岸段平均向海推进距离高达1179 m，约为1984-1992年的2倍。2000-2008年，随着围垦的推进，大量自然岸线开始被人工岸线所替代，该时间段的淤长岸段长154.57 km，占岸线长度的39.16%；围垦岸段长132.73 km，占岸线长度的33.63%。至2008-2016年时段，围垦岸段长210.09 km，占岸线长度的比例上升至45.62%。从1984-2016年时间段来分析，围垦岸段合计长达283.41 km，占辐射沙洲陆岸岸线长度的61.54%。32年来，淤长岸线的平均向海推进速度呈“慢—快—慢”的变化趋势，而围垦岸段的平均向海推进速度则一直在加快。其中，向海推进变化距离最大的岸段均是由人工围垦引起，例如东台市梁垛河口与方塘河口之间的条子泥围垦工程，使岸线平均向海推进7 km左右，通州湾的围填海工程使岸线向海最大推进超过10 km等。关于辐射沙洲陆岸少量的岸线后退现象，其中蒿枝港口至协兴港口岸段以及2008-2016年间的射阳河口至斗龙港口岸段，是由海岸侵蚀引起的；其余零星分布的冲刷岸段，实质为工程区之间的河道清淤或河道治理导致的岸线小幅后退。

4.1.3 陆地面积变化 海岸线在空间位置上的迁移会直接导致海岸带的陆地面积发生相应的变化。将各年份海岸线依次两两构成封闭面域，进行陆地面积变化统计，1984-2016年各时段统计结果对比如表3所示。

江苏省1984-2016年净增加陆地面积104332 hm²，其中2000-2008年净增加陆地面积最多，为33316 hm²。海州湾岸段1984-2016年净增加陆地面积5783 hm²，由于临洪河口

表3 1984-2016年各时段陆地面积变化统计表 (hm²)

Tab. 3 Data on changes in area at different periods between 1984 and 2016 (hm²)

时间段	海州湾		废黄河三角洲		辐射沙洲陆岸		江苏省	
	增加陆地 面积	减少陆地 面积	增加陆地 面积	减少陆地 面积	增加陆地 面积	减少陆地 面积	增加陆地 面积	减少陆地 面积
1984-1992年	1212	36	155	2073	11687	491	13055	2599
1992-2000年	989	176	802	590	27316	624	29107	1391
2000-2008年	699	65	1242	700	32359	219	34300	984
2008-2016年	3232	71	1325	876	29642	405	34198	1353
1984-2016年	5819	36	2255	2970	99304	40	107378	3046

两侧城镇建设填海和连云港开发，在2008-2016年陆地面积大幅增加3232 hm²。废黄河三角洲岸段1984-2016年净减少陆地面积715 hm²，1984-1992年时段陆地面积减少最为严重，1992年后陆地面积整体小幅增长。该岸段陆地面积变化主要的原因是低标准盐养围海开发和围垦被侵蚀两者交错。辐射沙洲陆岸岸段是江苏省陆地面积增加的主要区域，1992年以来表现出持续快速增加的趋势，在1984-2016年间陆地面积净增加99264 hm²。

江苏省陆地面积变化监测中发现，2000年后开展的围垦活动开始大量占用平均大潮高潮线向海一侧的滩涂。对1984-2016年增加的陆地面积进行分类统计（图7）。江苏省1984-2016年增加陆地面积107378 hm²，其中增加的围垦面积98520 hm²，占绝对优势。且射阳河口至新洋河口岸段、斗龙港至大丰港岸段的自然岸线内侧的围垦活动已逼近海岸线，因此认为围垦是江苏省陆地面积增加的主要原因。

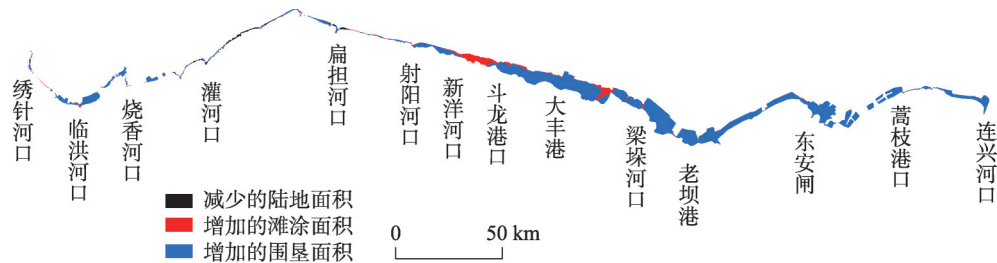


图7 1984-2016年江苏省陆地面积变化情况
Fig. 7 Map showing the land changes in the study area from 1984 to 2016

4.1.4 淤长岸段岸线内侧围垦活动对海岸线位置变化的影响 岸线动态变化监测中发现，淤长岸段随着岸线内侧人工围垦的向海推进，推算的平均大潮高潮线也不断向海推进，尤其临洪河口两侧、射阳河口至川东港该特征较为明显。Wang 等从沉积动力学的角度分析了围垦活动对潮滩坡度及冲淤的影响^[15]，本文从遥感的角度定量探讨这一过程。依据所绘制的分割线，统计各时段江苏省淤长岸段海岸线向海推进距离与其内侧人工岸线向海推进距离，定量分析两组数据的相关性。计算结果如表4所示。

表4 淤长岸段海岸线与其内侧人工岸线空间变化的相关性统计结果

Tab. 4 The correlation of spatial variation between deposited coastlines and its inner artificial shorelines

	1984-1992年	1992-2000年	2000-2008年	2008-2016年
相关系数	0.28	0.55	0.59	0.78

1984-1992年淤长岸段海岸线与其内侧人工岸线向海推进距离相关系数为小于0.3，两者相关性较小，此时段辐射沙洲陆岸岸段大多数的围垦活动尚未接近平均大潮高潮线。1992-2000年、2000-2008年、2008-2016年3个时段两者的相关系数在0.5~0.8之间，两者中度相关，且随着围垦活动离平均大潮高潮线越来越近，其相关性也越来越强。尤其2008-2016年，部分岸段的围垦活动已逼近平均大潮高潮线，对潮上带地形影响相对最大。据此，可认为淤长岸段海岸线向海推进速度受自然淤长和人工促淤共同影响，且随着淤长岸段内侧围垦活动加剧，其对海岸线空间位置的影响越显著。

4.2 平均大潮低潮线变迁分析

相对于海岸线，平均大潮低潮线受围垦活动影响相对较小，对平均大潮低潮线变迁的监测有助于全面了解海岸的实际冲淤情况。基于分割线，统计了各时段平均大潮低潮线的距离变化。统计结果显示，平均大潮低潮线变化幅度较小，各时段均有超过95%的平均大潮低潮线部分空间变化距离小于2000 m。变化幅度最大的地区是梁垛河口至方塘

河口的辐射沙洲内缘区以及东安闸至遥望港的腰沙地区, 这两个区域因大型潮沟、沙脊摆动明显, 平均大潮低潮线的向海推进和向陆后退交替发生。1984-1992年及1992-2000年腰沙地区小庙洪水道的摆动, 造成平均大潮低潮线最大变化距离超过7000 m。

图8显示了1984-2016年平均大潮低潮线空间变化引起的面积变化。平均大潮低潮线向海推进的岸段有临洪河口两侧岸段、梁垛河口至方塘河口的辐射沙洲内缘区、东安闸至蒿枝港口的腰沙地区及部分辐射沙洲南翼岸段, 该结论与海岸线空间变化规律一致。平均大潮低潮线离海后退的岸线范围相对海岸线中冲刷岸段及围垦被侵蚀岸段的范围更大, 包括绣针河口至龙王河口的砂质海岸、整个废黄河三角洲海岸, 以及射阳河口至东台河口岸段。向海推进和离海后退交替发生的岸段有方塘河口至东安闸的辐射沙洲中部岸段、蒿枝港口至连兴河口岸段。此外, 射阳河口的平均大潮低潮线向海推进, 认为与2008-2016年间射阳河口建设的导堤导致河口两侧泥沙淤积有关。而射阳河口至新洋河口岸段, 2008-2016年平均大潮低潮线表现为离海后退, 同时段该段岸线的海岸线表现为冲淤交替, 考虑到该段岸线内侧围垦向海推进对平均大潮高潮线空间位置造成的影响, 认为该段岸线应处于冲刷环境中。

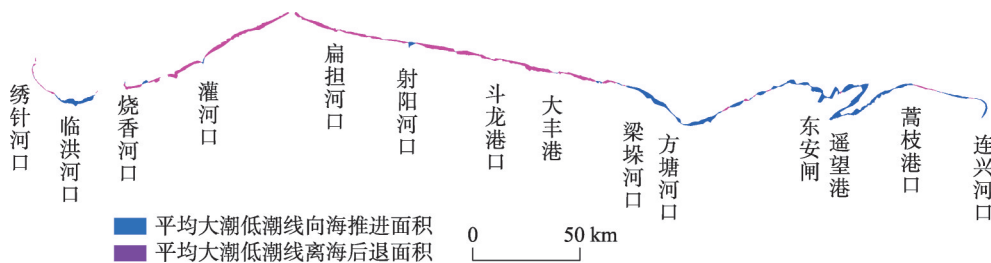


图8 1984-2016年平均大潮低潮线位移引起的面积变化

Fig. 8 Map showing the changes in area caused by the mean low tide line from 1984 to 2016

4.3 潮间带变化分析

4.3.1 潮间带坡度变化 随着围垦的向海推进, 部分岸段的潮间带不断变窄, 可搜集到两景合适影像用于推算潮间带坡度的岸线越来越少。在江苏沿海1100条分割线断面中, 1984年、1992年、2000年、2008年和2016年可进行平均坡度推算的断面分别有786个、654个、604个、561个和453个, 32年来可推算断面数减少了近42%。各年份推算结果如图9所示。将推算结果相对完整的3个典型岸段各年份的平均坡度进行统计(表5)。

统计发现, 江苏省遥感推算的岸滩断面平均坡度大多小于2‰, 射阳河口至东安闸之间坡度最平缓。1984年、1992年、2000年、2008年和2016年推算坡度小于2‰的断面分别占该年份可推算断面坡度总数的81.52%、86.57%、85.57%、79.92%、80.47%, 分别占总断面数的58.25%、51.47%、46.99%、40.76%、33.14%。江苏省各年份所有统计断面的平均坡度分别为1.4‰、1.3‰、1.4‰、1.8‰、1.9‰(由于可统计断面数量原因, 该结果应比实际平均坡度要小), 认为江苏省的岸滩在不断变陡。

海州湾岸段内, 绣针河口至临洪河口岸段平均坡度由北向南呈“缓—陡—缓”的变化趋势, 在龙王河口北侧的砂质海岸达到平均坡度的最高值, 近6‰。绣针河口南侧的一段淤泥质海岸以及临洪河口两侧的淤泥质海岸坡度均小于2‰。整个海州湾岸段平均坡度稳定在3‰以内。

废黄河三角洲岸段的冲刷环境加上潮滩较窄, 岸滩平均坡度变化较为剧烈。灌河口至中山河口之间平均坡度相对较缓, 1984-2000年坡度相对稳定, 基本小于2‰; 2000-

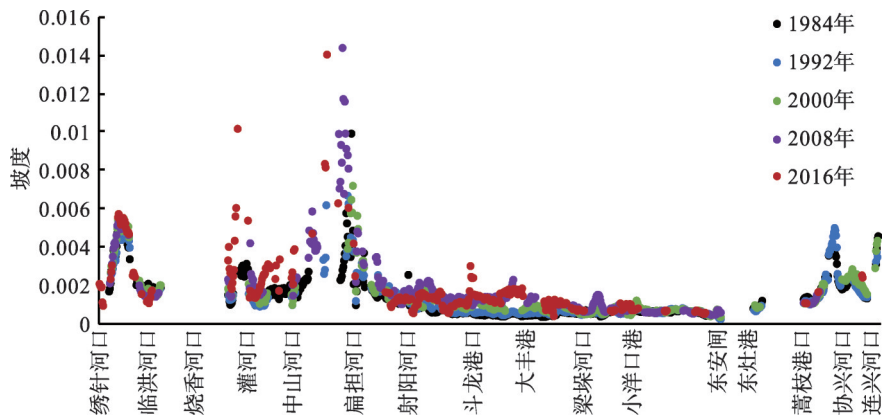


图9 1984-2016年江苏省潮间带平均坡度推算结果

Fig. 9 Calculation results of mean slope for intertidal zone in Jiangsu province from 1984 to 2016

表5 典型岸段平均坡度变化情况统计表 (‰)

Tab. 5 Data on average slopes of typical coasts (‰)

区域	1984年	1992年	2000年	2008年	2016年
灌河口至中山河口岸段	1.58	1.17	1.42	1.98	2.26
射阳河口至大丰港岸段	0.67	0.76	1.14	1.27	1.38
大丰港至东安闸岸段	0.61	0.66	0.76	0.86	0.88

2016年坡度开始变陡,平均坡度达2.26‰。中山河口至扁担河口岸段,潮滩狭窄,海岸线中有大量以养殖围堤为主的人工岸线,潮滩坡度难以用改进的水边线法进行推算,少量零星的断面推算坡度结果显示该段岸线坡度在3‰~14‰之间。

辐射沙洲陆岸岸段潮滩宽阔,坡度最为平缓,但近年来的围垦活动也使得坡度小幅变陡。其中,射阳河口至大丰港岸段属于增幅相对较大的岸段,平均坡度由1984年的0.67‰增大至2016年的1.38‰;大丰港至东安闸岸段为当前坡度最为平缓的岸段,坡度变化也最缓,平均坡度由1984年的0.61‰增加至2016年的0.88‰,该段岸线内的梁垛河口至方塘河口岸段坡度的变化是由于大型潮沟摆动引起的推算结果的变化。蒿枝港口至连兴河口岸段从推算结果看,潮滩坡度相对稳定,整体呈变陡的趋势,该段岸线中部的塘芦港口至协兴港口之间、连兴河口北侧坡度最陡,部分岸段坡度大于4‰。整个辐射沙洲陆岸岸段的平均坡度由1984年的0.9‰增加至2016年的1.5‰。

4.3.2 潮间带面积变化 潮间带是指海岸线与平均大潮低潮线之间的滩涂(本文不考虑岸外沙洲)。潮间带面积为基于ARCGIS统计推算的海岸线与平均大潮低潮线之间的面积,潮间带平均宽度为基于分割线统计,统计结果如表6所示。由于基于遥感推算的海岸线中自然岸线部分相对江苏“908”近海海洋综合调查中的海岸线更靠近大陆外侧,因此计算的潮间带面积相对调查中的滩涂面积要小。

江苏省潮间带面积1984-2016年间减少了103102 hm²,减幅38%;潮间带平均宽度缩短了1967 m,减幅39%,滩涂面积减少明显。海州湾岸段1984-2008年由于围垦速率相对较缓,且临洪河口两侧的淤泥质海岸处于微弱的淤长环境中,整个岸段潮间带面积及平均宽度相对稳定;而至2008-2016年,由于兴起了大面积、大规模的围填海活动,导致潮间带面积及平均宽度降低明显。废黄河三角洲岸段由于处于冲刷环境,32年来潮间带面积减少44%,平均宽度减少43%。辐射沙洲陆岸岸段潮间带面积变化与海岸线空间变

表6 1984-2016年江苏省潮间带面积及平均宽度统计表

Tab. 6 Data on area and average width of the intertidal zone in Jiangsu province from 1984 to 2016

年份	海州湾		废黄河三角洲		辐射沙洲陆岸		江苏省	
	潮间带 面积(hm ²)	平均 宽度(m)	潮间带 面积(hm ²)	平均 宽度(m)	潮间带 面积(hm ²)	平均 宽度(m)	潮间带 面积(hm ²)	平均 宽度(m)
1984年	11166	2060	26410	1810	234171	7297	271747	5064
1992年	11238	2095	24691	1671	225410	6899	261339	4785
2000年	10982	2082	20431	1390	192309	5774	223722	4041
2008年	11038	2104	18022	1221	162833	4834	191893	3458
2016年	8541	1691	14819	1035	145285	4320	168645	3096

化相对应, 4个时间段减幅分别为4%、15%、15%、11%, 潮间带平均宽度也由7297 m缩短至4320 m, 当前潮间带最宽的岸段为川东港口至遥望港岸段。

5 结论

利用遥感技术结合改进的水边线方法获取了江苏省1984年、1992年、2000年、2008年和2016年的海岸线及平均大潮低潮线, 通过对岸线长度、空间位置、滩涂面积变化等指标的定量监测, 分析了江苏省大陆岸线岸滩的时空动态变化特征。主要结论如下:

(1) 1984-2016年江苏省海岸线长度由621.90 km增加至765.48 km, 其中自然岸线由458.24 km减少至166.74 km, 人工岸线由163.66 km快速增加至598.74 km。1984-2000年海岸线长度相对稳定, 2000年后大规模的围垦活动使得部分岸线越来越曲折, 导致海岸线长度大幅增加。

(2) 1984-2016年江苏省除废黄河三角洲岸段外, 海岸线整体向海推进。淤长岸段长127.62 km, 年均向海推进83.03 m; 围垦岸段长401.21 km, 年均向海推进87.63 m; 冲刷岸段长71.17 km, 年均离海后退10.81 m; 围垦被侵蚀岸段长25.95 km, 年均离海后退8.64 m。1984-2016年间各时段的主要岸线变化类型由淤长岸段逐渐转变为围垦岸段。海州湾岸段岸线变化以围垦岸段为主, 淤长岸段主要分布在临洪河口两侧; 废黄河三角洲岸段处于冲刷环境中, 岸线不断被侵蚀后退, 同时也不断有新的养殖围垦导致岸线向海推进, 但是岸线冲淤变化幅度不大; 辐射沙洲陆岸岸段海岸线向海大幅推进, 岸线变化类型以淤长岸段和围垦岸段为主。

(3) 江苏中部海岸的侵蚀现象已由废黄河三角洲地区向南扩展至新洋河口—斗龙港口岸段。1984-1992年射阳河口为北部侵蚀转南部淤长的分界。1992-2000年随着护花米草的扩张, 双洋河口至射阳河口岸段的侵蚀现象有所改善。2008-2016年岸滩侵蚀现象向南延伸至斗龙港口, 新洋河口至斗龙港口岸段目前成为江苏海岸侵蚀转换的过渡带。

(4) 1984-2016年江苏省陆地面积净增加104332 hm², 其中围垦增加的陆地面积98520 hm², 岸滩自然淤长增加的陆地面积8858 hm², 岸滩侵蚀减少的陆地面积3046 hm²。围垦是导致陆地面积增加的主要原因。

(5) 淤长岸段海岸线向海推进速度受自然淤长和人工促淤的双重影响。随着淤长岸段岸线内侧围垦活动向海岸线的逼近, 其对海岸线向海推进速率的影响越来越显著。

(6) 与岸滩冲刷和围垦被侵蚀导致海岸线后退相比, 平均大潮低潮线离海后退的范围更大, 包括了绣针河口至龙王河口的砂质海岸、整个废黄河三角洲海岸, 以及射阳河口至东台河口岸段。

(7) 江苏省潮间带平均坡度呈不断变陡的趋势, 各时段所有统计断面的平均坡度由1984年的1.4‰增加至2016年的1.9‰。海州湾岸段坡度变化相对稳定, 平均坡度在3‰以内; 废黄河三角洲岸段坡度变化最为剧烈, 且坡度较陡, 中山河口至扁担河口岸段坡度基本在3‰~14‰之间, 是全省岸滩坡度最陡的岸段; 辐射沙洲陆岸岸段平均坡度最为平缓, 但坡度也在不断变陡, 统计断面的平均坡度32年来由0.9‰增加至1.5‰。

(8) 江苏省潮间带面积自1984-2016年由271747 hm²减少至168645 hm², 32年来减少了103102 hm², 减幅38%; 潮间带平均宽度由5064 m减少至3096 m, 缩短1968 m, 减幅39%。川东港口至遥望港岸段为当前全省潮间带平均宽度最宽的岸段。

参考文献(References)

- [1] Zhang Junjue, Su Fenzhen, Zuo Xiuling, et al. Research on the spatial differentiation of coastal land development surrounding South China Sea coastal land development surrounding South Sea. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(2): 319-332. [张君珏, 苏奋振, 左秀玲, 等. 南海周边海岸带开发利用空间分异. *地理学报*, 2015, 70(2): 319-332.]
- [2] Deng Yu, Liu Shenghe, Cai Jianming, et al. Spatial pattern and its evolution of Chinese provincial population and empirical study. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(10): 1473-1486. [邓羽, 刘盛和, 蔡建明, 等. 中国省际人口空间格局演化的分析方法与实证. *地理学报*, 2014, 69(10): 1473-1486.]
- [3] Yang Xiaomei, Gong Jianming, Gao Zhenyu. The research on extracting method of microscale remote sensing information combination and application in coastal zone. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(2): 40-48. [杨晓梅, 龚剑明, 高振宇. 海岸带遥感微尺度信息及其组合挖掘提取和方法应用研究. *海洋学报*, 2009, 31(2): 40-48.]
- [4] Shen Jiashuang, Zhai Jingsheng, Guo Haitao. Study on coastline extraction technology. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2009, 29(6): 74-77. [申家双, 翟京生, 郭海涛. 海岸线提取技术研究. *海洋测绘*, 2009, 29(6): 74-77.]
- [5] Gens R. Remote sensing of coastlines: detection, extraction and monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(7): 1819-1836.
- [6] Mason D C, Davenport I J, Robinson G J, et al. Construction of an inter-tidal digital elevation model by the 'Water-Line' method. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22(23): 3187-3190.
- [7] Liu Yanxia, Huang Haijun, Qiu Zhongfeng, et al. Monitoring change and position of coastlines from satellite images using slope correction in a tidal flat: A case study in the Yellow River Delta. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(3): 377-387. [刘艳霞, 黄海军, 丘钟锋, 等. 基于影像间潮滩地形修正的海岸线监测研究: 以黄河三角洲为例. *地理学报*, 2012, 67(3): 377-387.]
- [8] Chen Weitong, Zhang Dong, Shi Shunjie, et al. Research on monitoring coastline changes by remote sensing in muddy coast, central Jiangsu coast. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 39(5): 138-148. [陈玮彤, 张东, 施顺杰, 等. 江苏中部淤泥质海岸岸线变化遥感监测研究. *海洋学报*, 2017, 39(5): 138-148.]
- [9] Zhao Jianhua, Li Fei. Quantitative analysis of coastline variation in middle areas of Jiangsu Province. *Yangtze River*, 2016, 47(6): 1-5. [赵建华, 李飞. 基于定量分析的江苏中部海岸线动态监测. *人民长江*, 2016, 47(6): 1-5.]
- [10] Li Jing, Zhang Ying. Analysis of coastline change based on remote sensing measurement. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2012, 40(2): 224-228. [李静, 张鹰. 基于遥感测量的海岸线变化与分析. *河海大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(2): 224-228.]
- [11] Gao Yi, Wang Hui, Su Fenzhen, et al. Spatial and temporal of continental coastline of China in recent three decades. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 35(6): 31-42. [高义, 王辉, 苏奋振, 等. 中国大陆海岸线近30a的时空变化分析. *海洋学报*, 2013, 35(6): 31-42.]
- [12] Li Xing, Zhang Lianpeng, Ji Changchen, et al. Spatiotemporal changes of Jiangsu coastline: A remote sensing and GIS approach. *Geographical Research*, 2014, 33(3): 414-426. [李行, 张连蓬, 姬长晨, 等. 基于遥感和GIS的江苏省海岸线时空变化. *地理研究*, 2014, 33(3): 414-426.]
- [13] Zhang Yun, Zhang Jianli, Li Xueming, et al. Stability of continental coastline in China since 1990. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(10): 1288-1293. [张云, 张建丽, 李雪铭, 等. 1990年以来中国大陆海岸线稳定性研究. *地理科学*, 2015, 35(10): 1288-1293.]
- [14] Hou X Y, Wu T, Hou W, et al. Characteristics of coastline changes in mainland China since the early 1940s. *Science*

- China Earth Sciences, 2016, 59(9): 1791-1802.
- [15] Wang Y P, Gao S, Jia J J, et al. Sediment transport over an accretional intertidal flat with influences of reclamation, Jiangsu coast, China. *Marine Geology*, 2012, 291-294: 147-161.
- [16] Zhang Renshun, Lu Liyun, Wang Yanhong. Mechanism and tendency of Jiangsu coast erosion. *Geographical Research*, 2002, 21(4): 469-478. [张忍顺, 陆丽云, 王艳红. 江苏海岸侵蚀过程及其趋势. *地理研究*, 2002, 21(4): 469-478.]
- [17] Zhang Changkuan. The Basic Status of Marine Environmental Resources in the Coast of Jiangsu. Beijing: China Ocean Press, 2013: 103-109. [张长宽. 江苏省近海海洋环境资源基本现状. 北京: 海洋出版社, 2013: 103-109.]
- [18] Xu Ming, Li Peiying, Lu Peidong. Research on Appropriate Reclamation Scale of Prograding Tidal Flat: A Case Study of Jiangsu Province. Beijing: Science Press, 2012: 1-6. [徐敏, 李培英, 陆培东. 淤涨型潮滩适宜围填规模研究: 以江苏省为例. 北京: 科学出版社, 2012: 1-6.]
- [19] Peng Xiuqiang, Xia Fei, Zhang Yongzhan. Analysis of the dynamic changes of the coastline along the abandoned Yellow River Delta of northern Jiangsu, China. *Marine Science Bulletin*, 2014, 33(6): 630-636. [彭修强, 夏非, 张永战. 苏北废黄河三角洲海岸线动态演变分析. *海洋通报*, 2014, 33(6): 630-636.]
- [20] Liu Xiaoxi, Chen Shenliang, Jiang Chao, et al. Vulnerability assessment of coastal erosion along the abandoned Yellow River Delta of northern Jiangsu, China. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(5): 607-618. [刘小喜, 陈沈良, 蒋超, 等. 苏北废黄河三角洲海岸侵蚀脆弱性评估. *地理学报*, 2014, 69(5): 607-618.]
- [21] Ren Meie. Investigation Report of Coastal Zone and Coastal Resources in Jiangsu. Beijing: China Ocean Press, 1986: 114-116. [任美镔. 江苏省海岸带与海涂资源调查报告. 北京: 海洋出版社, 1986: 114-116.]
- [22] Chen Jun, Wang Yigang, Zhang Renshun et al. Stability study on the Dongsha sandbanks in submarine radial sand ridges field off Jiangsu coast. *The Ocean Engineering*, 2007, 25(1): 105-113. [陈君, 王义刚, 张忍顺, 等. 江苏岸外辐射沙脊群东沙稳定性研究. *海洋工程*, 2007, 25(1): 105-113.]
- [23] Pawlowicz R, Beardsley B, Lentz S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers & Geosciences*, 2002, 28(8): 929-937.
- [24] Xu Jiakun, Liu Yanchun, Xu Xiqi, et al. Scientific locating and practical describing on mean high water springs. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2007, 27(6): 19-24. [许家琨, 刘雁春, 许希启, 等. 平均大潮高潮面的科学定位和现实描述. *海洋测绘*, 2007, 27(6): 19-24.]
- [25] Suo Anning, Cao Ke, Ma Hongwei, et al. Discussion on classification system of coastline. *Science Geographica Sinica*, 2015, 35(7): 933-937. [索安宁, 曹可, 马红伟, 等. 海岸线分类体系探讨. *地理科学*, 2015, 35(7): 933-937.]
- [26] Zhao Mingcai, Zhang Dachu. Discussions of the definition of shoreline. *Coastal Engineering*, 1990, 9(3): 91-99. [赵明才, 章大初. 海岸线定义问题的讨论. *海岸工程*, 1990, 9(3): 91-99.]
- [27] Sun Weifu, Ma Yi, Zhang Jie, et al. Study of remote sensing interpretation keys and extraction technique of different types of shoreline. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2011(3): 41-44. [孙伟富, 马毅, 张杰, 等. 不同类型海岸线遥感解译标志建立和提取方法研究. *测绘通报*, 2011(3): 41-44.]

Monitoring spatial and temporal changes in the continental coastline and the intertidal zone in Jiangsu province, China

CHEN Weitong¹, ZHANG Dong^{1,2}, CUI Dandan³, LV Lin³,
XIE Weijun³, SHI Shunjie¹, HOU Zeyu¹

(1. Department of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China; 3. Sea Area Use Dynamic Surveillance and Monitoring Center of Jiangsu Province, Nanjing 210003, China)

Abstract: This study examines spatial and temporal changes in the continental coastline and the intertidal zone from the Xiuzhen estuary to the Lianxing estuary in Jiangsu province from 1984 to 2016. This work employed an improved water-line method based on 61 multi-source remote-sensing images, as well as tide and measured slope data. The coastline is a combination of the mean high-tide line and artificial coastline. The mean high-tide line was derived from elevation data contained in the waterlines through the improved water-line method. Water lines were extracted from remote sensing images using object-oriented classification, band operation, etc. Then, tides at the tide stations at image acquisition times were predicted using the T-Tide program. The predicted tides were assigned to water lines and intertidal slopes were calculated. Finally, mean high-tide and low-tide lines were determined from measured and calculated slopes. The quantitative analysis of the coastline, mean low tide line, and intertidal zone yielded the following main conclusions. From 1984 to 2016, Jiangsu's coastline advanced mainly towards the sea because of coastal development. The natural shoreline decreased from 458.24 to 166.74 km, while the artificial shoreline increased from 163.66 to 598.74 km. The length of Jiangsu's continental coastline also increased from 621.90 to 765.48 km. During this period, the positions and lengths of different segments of the coastline changed. The deposited coast, which advanced toward the sea at an annual rate of 83.03 m, was 127.62 km long. The reclaimed coast, which advanced towards the sea at an annual rate of 87.63 m, was 401.21 km. The erosional coast, which receded at an annual rate of 10.81 m, was 71.17 km long. The eroded reclaimed coast, which receded at an annual rate of 8.64 m, was 25.95 km long. The area of Jiangsu underwent a net increase of 104332 hm², primarily due to reclamation, with reclaimed land representing 98520 hm². Erosion mainly occurred in the abandoned Yellow River Delta, but during 2008-2016, it extended southward from the Xinyang to the Doulong harbor. The slopes of the intertidal zone became steeper due to reclamation and shoreline erosion, changing from 1.4‰ to 1.9‰. The abandoned Yellow River Delta experienced the most severe change in slope, with its mean slope in the range of 3‰-14‰. The mean slope of the radial sandbank of the onshore coast, which had the gentlest slope, increased from 0.9‰ to 1.5‰. The intertidal area decreased by 38% from 271747 to 168645 km², while the mean width of the intertidal zone decreased by 39% from 5064 m to 3096 m.

Keywords: Jiangsu province; coastline; intertidal zone; spatial and temporal change; remote sensing