

人类活动影响下的 1989—2019 年江苏中部海岸线变化特征研究

李明亮^{1,2,3}, 吴曙亮^{1,2}, 龚绪龙^{1,2}, 杨磊^{1,2}, 苟富刚^{1,2}, 李进^{1,2}

(1. 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210018; 2. 国土资源部 地裂缝地质灾害重点实验室, 江苏 南京 210018; 3. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 海岸线是海岸带地区重要的自然资源, 也是海洋生态系统的重要组成部分。通过分析江苏中部海岸 1989—2019 年海岸线变化特点、潮滩围垦特征以及围填海潮滩断面地貌响应过程, 研究人类围填海活动对海岸线演变的影响机制。结果表明, 近 30 a 来江苏中部海岸线变化具有明显的时空不对称性, 变化速率变异系数空间差异显著, 岸线的向海推进是在人类围填海活动驱动下的被动变化过程, 二者相关性系数达 93%。另外, 在江苏中部海岸围填海对潮滩上部有促淤作用, 但也引起潮间带下部潮滩的侵蚀, 这种“上淤下侵”的潮滩地貌格局对未来海岸线资源的可持续利用和保护提出了挑战。

关键词: 江苏中部海岸; 围填海; 海岸线变化; 潮滩断面; 盐沼湿地

中图分类号: P748 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2022)03-0060-09

DOI: 10.11759/hyxx/20210512003

海岸线是典型的海陆分界线, 具有显著的生态系统调节功能, 同时也是重要的海岸带自然资源^[1]。海岸线一般定义为多年平均大潮高潮位的痕迹线^[2], 受到海陆交互作用影响, 人类在海岸带的开发利用活动、海洋动力环境的改变等都能对海岸线的演变产生显著影响^[3-4]。

江苏中部海岸发育了宽广的淤泥质潮滩, 近年来高强度的围填海活动虽然产生了大量的新生土地, 但各类海岸工程措施也改变了潮间带的海洋动力格局^[5-6], 不但直接造成岸线位置的剧烈变动, 而且对未来岸线的演变趋势产生深远影响。已有的研究多数通过遥感和 GIS 的手段针对江苏海岸线的类型、长度、曲折度以及开发利用状况的时空变化等做了较为详细的分析^[7-10], 部分研究对于海岸线演变的驱动力进行了初步分析, 指出围垦和海岸线时空变化的关联性, 如李行等^[11]通过遥感解译认为围垦是造成江苏海岸线变化的主要原因; 陈玮彤等^[12]通过研究认为围垦是江苏海岸带陆地面积增加的主要原因, 但相关研究未对围垦和岸线变化的时空关系做进一步分析。

目前, 海平面上升、海岸侵蚀逐步成为一个全球性的问题^[13-14]。在高强度围填海地区, 海岸线的向外推进和海岸侵蚀可能会同步发生, 本研究以围垦活动剧烈的江苏中部海岸为例, 通过分析 1989—

2019 年以来的围填海进程及海岸线时空变化特征, 结合典型围填海潮滩断面, 研究人类围填海驱动下的海岸线变化过程及其典型潮间带地貌响应特征, 对于未来海岸线资源保护、修复以及可持续利用具有重要支撑作用。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

江苏海岸带位于南黄海西岸, 海岸线北起连云港绣针河口, 南至启东长江口连兴港, 行政区划上包括连云港、盐城、南通 3 市。江苏海岸带地势低平, 海陆交互作用在江苏形成了由细颗粒物组成的粉砂淤泥质海岸, 海岸带潮汐作用较强, 潮波系统主要为东海前进潮波和南黄海旋转潮波, 浅海半日分潮为主, 潮差一般在 2~4 m, 辐射沙脊群海域最大

收稿日期: 2021-05-12; 修回日期: 2021-08-23

基金项目: 江苏沿海地区综合地质调查项目(20120223); 中国地质调查局项目(1212011220005); 连云港城市地质调查项目(20170821); 江苏省自然资源发展专项(JSZRHYKJ202106)

[Foundation: Comprehensive Geological Survey Project of Jiangsu Coastal Area, No. 20120223; The Chinese Geological Survey Project, No. 1212011220005; Lianyungang Urban Geological Survey Project, No. 20170821; Special Project for the Development of Jiangsu Natural Resources (No. JSZRHYKJ202106)]

作者简介: 李明亮(1988—), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 工程师, 从事海岸带沉积动力学研究, E-mail: limingliang_vp@hotmail.com; 吴曙亮(1963—), 通信作者, E-mail: 864825951@qq.com

潮差能超过 9 m^[15-16]。海岸带潮滩相对较宽, 最大宽度能达到 10 km 以上, 坡度平缓, 一般在 3% 以下^[17]。江苏海岸地貌类型多样, 北部海州湾主要为砂质海岸, 连岛及其两翼主要为基岩海岸, 江苏中部海岸主要为粉砂淤泥质海岸。从海岸冲淤看, 一般认为废黄河及其两翼为侵蚀海岸; 从射阳河口至新洋港为冲淤

过渡海岸; 新洋港河口以南为淤积海岸^[18]。

20 世纪 80 年代以来, 随着江苏经济的快速发展, 对于土地资源的需求不断加大, 通过海岸带潮滩围垦成为新增建设用地, 实现耕地占补平衡的重要手段, 年均潮滩围垦面积超过 30 km², 直接造成潮滩宽度下降、坡度变陡, 生物多样性降低^[19-20]。

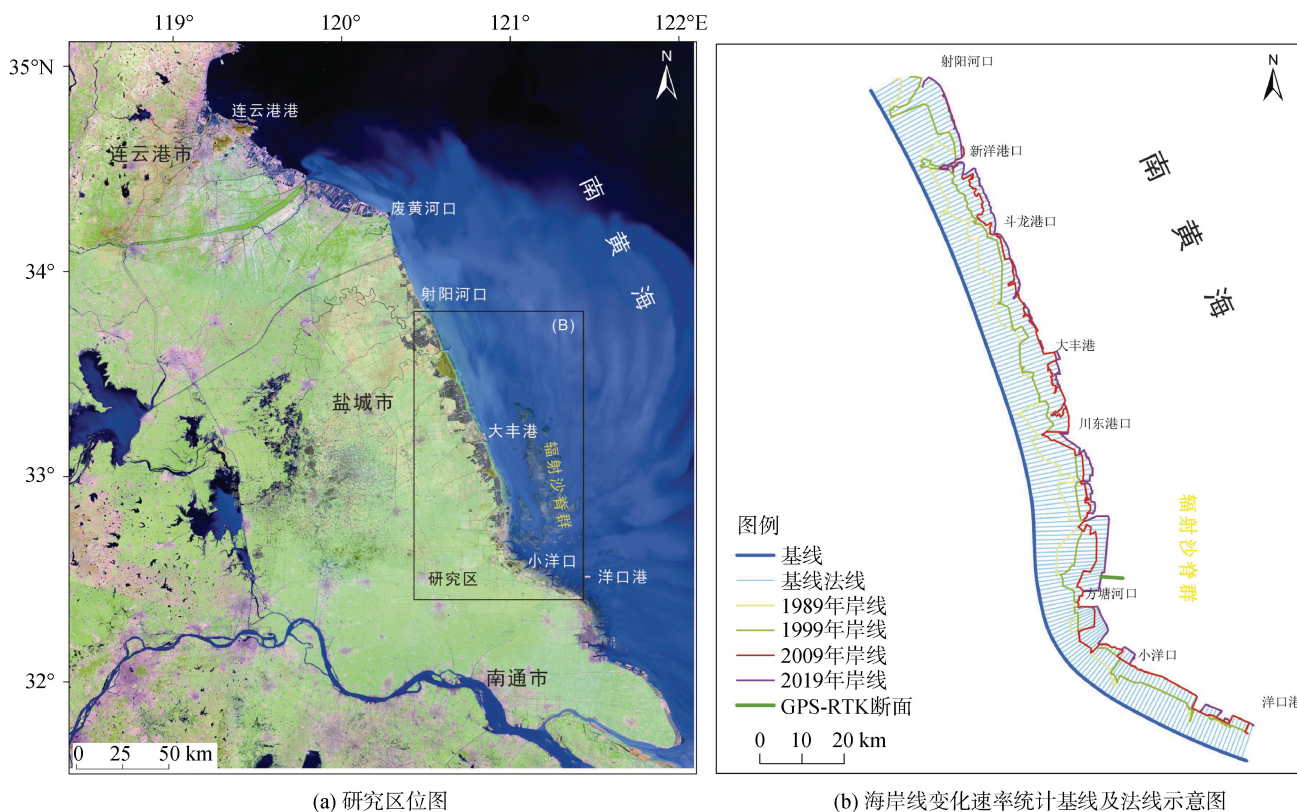


图 1 研究区位图及海岸线变化统计法线分布示意图
Fig. 1 Study area and the statistic tangent lines for four periods

1.2 数据来源

1.2.1 影像数据

为准确获取海岸带围填海、海岸线时空变化特征, 搜集 1989 年、1999 年、2009 年和 2019 年共计 4 个时段的覆盖江苏中部海岸的多源遥感影像数据 (Landsat TM、Landsat OLI), 在时刻上尽量选取低潮位时段, 云量小于 15%, 所有影像经过几何精校正处理, 使用 CGCS2000 坐标系。

1.2.2 潮汐数据

海岸线提取所需要的潮位数据主要来自国家海洋信息中心发布的江苏海岸 3 个验潮站(射阳河口、新洋港、弼港)的潮汐表数据以及在海岸带地区搜集到的洋口港验潮站数据, 满足海岸线提取所需要的潮位数据要求。

1.2.3 潮滩断面数据

根据江苏的围填海强度特征, 在围填海开发较为剧烈的盐城弼港海岸布设了一条潮滩地形观测断面, 基于 GPS-RTK 技术, 2014—2019 年开展了逐年的潮滩地形重复测量, 获取了围填海影响下高精度的潮滩断面变化数据。

2 研究方法

2.1 海岸线提取及变化分析

本次研究中, 取平均大潮高潮线作为海岸线的解译、提取标准, 对于平均大潮高潮线已经围垦的岸段, 采用目视解译法提取人工海堤或人工构筑物等作为岸线标志; 对于人类活动干扰较小的岸线, 首先利用已有的潮位数据, 基于 T_Tide 潮汐分析预报

模型^[21-22],进行潮汐的调和计算和潮位预测,然后通过遥感提取的瞬时水边线进行潮位的插值和校正,结合调和和分析结果,推算平均大潮高潮线,技术路线参考崔丹丹等^[23]在2017年提出的改进的水边线算法。本次遥感解译的误差主要来自目视解译误差和潮汐调和和分析误差,人工岸线地物特征明显,通过重复3次解译提取平均值来尽量消除数字化误差。另外,以新洋港2014年6月1日—30日实测潮位数据进行调和和分析误差统计,绝对误差平均值为8.33 cm,满足海岸线遥感推算精度要求。

在海岸线变化分析方面,使用美国地质调查局所提供数字岸线分析系统(Digital Shoreline Analysis System, DSAS)^[24]进行分析计算。选定作为计算基准的基线,统一设置采样间距为1 km,总共生成等间距法线共192条,其中北部(射阳河口至大丰港)共74条,中部(大丰港至南通小洋口)共83条,南部(小洋口至洋口港)共35条,使用终点速率法(End Point Rate, EPR)^[25]计算海岸线变化速率。

2.2 围填海信息提取

基于1989年、1999年、2009年和2019年4期遥感影像数据,根据海岸带不同土地利用类型的纹理和光谱特征,采用专家目视解译提取不同时期围填海活动时空分布特征,本次研究未对围填海后的土地利用类型做进一步区分。

2.3 典型潮滩断面观测

在江苏中部琼港典型围填海岸滩布设了一条潮

间带地貌监测断面,使用德国Leica公司的GPS-RTK进行地形测量与取样。潮滩断面长度超过3 km,滩面测点间距控制在100 m以内,平面误差精度控制在1~2 cm,高程误差控制在1 cm。在进行高程测量的同时,使用取样薄片进行表层沉积物取样,深度控制在1~2 cm,质量在30~100 g,在实验室内使用激光粒度仪进行粒径分析。2014—2019年共完成6次围填海典型潮滩断面重复观测。

3 结果与讨论

3.1 海岸线时空变化特征

基于DSAS岸线分析系统,对于获取的192条法线进行统计分析,得出1989年以来不同时期江苏中部海岸线的变化速率(图2)。从统计结果看,1989年以来江苏中部岸线整体上呈现快速向海推进趋势,平均推进速率达到201.28 m/年,最大推进速率为447.47 m/年,从空间分布看,大丰港至小洋口岸段推进较快,平均推进速率为228.4 m/年,小洋口至洋口港平均推进速率为80.75 m/年,射阳河口至大丰港平均推进速率为214.88 m/年。各个时期而言,1989—1999年期间岸线呈向海推进趋势,平均推进速率为250.47 m/年,变化剧烈的岸段主要分布在江苏斗龙港两翼和方塘河口以北岸段,最大推进速率为742.48 m/年。方塘河口以南总体上变动幅度较小,仅小洋口以北8 km范围内有明显推进,北部的射阳河口总体上变动幅度较小;1999—2009年期间江苏中部岸线呈现明显的向海推进趋势,平均推进速率

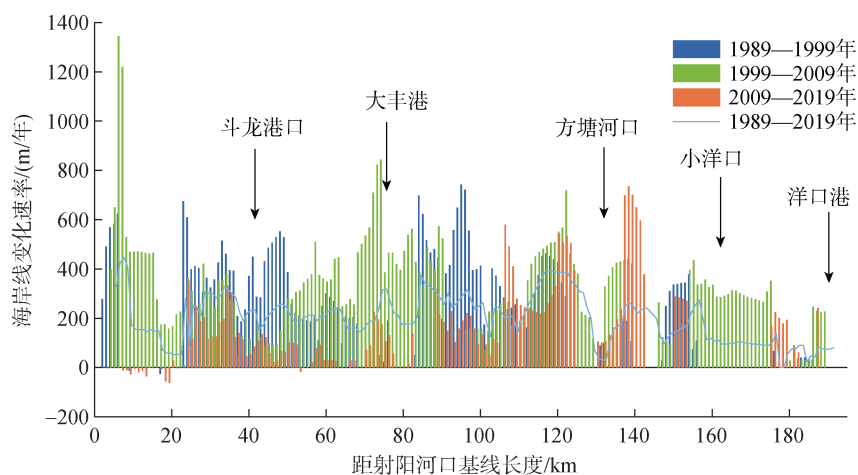


图2 江苏中部海岸1989—2019年海岸线变化速率统计图

Fig. 2 Statistic map of coastline change speed from 1989 to 2019 in central Jiangsu province

正值表示海岸线向海推进,负值表示海岸线后退

为 318.3 m/年, 最大推进速率为 1 344.67 m/年, 位于射阳河口以南 10 km 范围内, 该时期内向海推进岸线主要集中在射阳港、大丰港、洋口港等港口附近; 2009—2019 年期间岸线的变化差异较大, 推进岸段集中在方塘河口南北两翼, 后退岸段集中在射阳河口以南约 20 km 范围内部分岸段, 其余岸段总体上变化幅度较小, 总体上看岸线趋势仍然以向海推进为主, 平均速率为 139.11 m/年, 后退岸段后退速率为 7.67 m/年。

从岸线的时空变化特征看, 江苏中部岸线推进速率整体上呈现出先增大后减小的变化趋势, 在不同时期、不同岸段内岸线的向海推进也呈现出明显的差异性特征, 即江苏中部海岸线的时空变化过程具有明显的不均一性。从岸线变化统计图(图 2)上可以看出, 1989 年以来在大部分岸线都向海推进的同时, 少量岸段位置相对稳定, 并没有受到附近岸线变化的影响, 从遥感影像(图 3a)上可以看到这些岸段大部分位于河口附近。此外, 在射阳河口至新洋港口口的部分岸段, 海岸线出现了侵蚀后退现象(图 3b)。使用 Landsat TM、OLI 影像解译了近 30 a 江苏中部海岸潮滩围垦过程, 通过分析北部(射阳河口~大丰

港)、中部(大丰港~小洋口)、南部(小洋口~洋口港) 3 个岸段潮滩围垦速率和岸线变化速率的统计关系(图 4), 发现在人类围填海的驱动下, 江苏中部海岸线的变化和潮滩的围垦呈现出明显的正相关性。

从不同时期来看, 江苏中部海岸的围填海具有明显的空间差异性, 这和海岸线变化的空间不均一性是一致的。1989—1999 年期间, 研究区的围填海总面积为 394.89 km², 围填海活动主要发生在方塘河口以北海岸, 其中射阳河口~大丰港围填海速率为 20.16 km²/年, 同期岸线推进速率为 223.69 m/年; 大丰港~小洋口围填海速率为 19.03 km²/年, 同期岸线推进速率为 223.15 m/年; 小洋口~洋口港围填海速率为 0.30 km²/年, 同期岸线推进速率为 6.48 m/年, 海岸线的变化是受到人类围填海活动驱动下的被动向外推进过程, 和围垦的面积、空间分布密切相关。1999—2009 年期间, 研究区围填海总面积为 816.66 km², 整个研究区围填海较为普遍且围垦的面积较大、宽度较宽, 如大丰港在此期间的围垦宽度超过 8 km。从岸段看, 射阳河口~大丰港围填海速率达到 31.19 km²/年, 同期岸线推进速率 308.92 m/年; 大丰港~小洋口围填海速率为 33.56 km²/年, 同期岸线

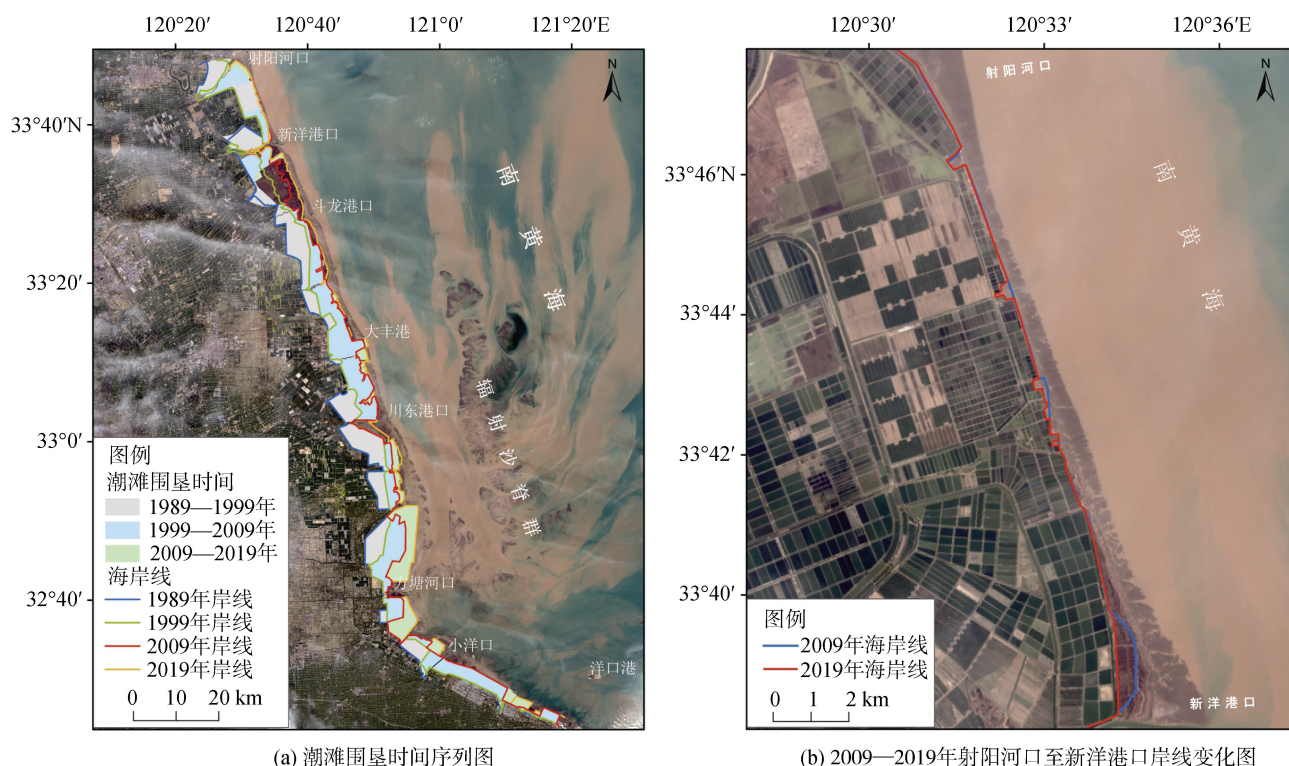


图 3 江苏中部海岸 1989 年以来潮滩围垦和岸线变化空间分布特征

Fig. 3 Tidal flat reclamation and coastline change from 1989 in central Jiangsu province

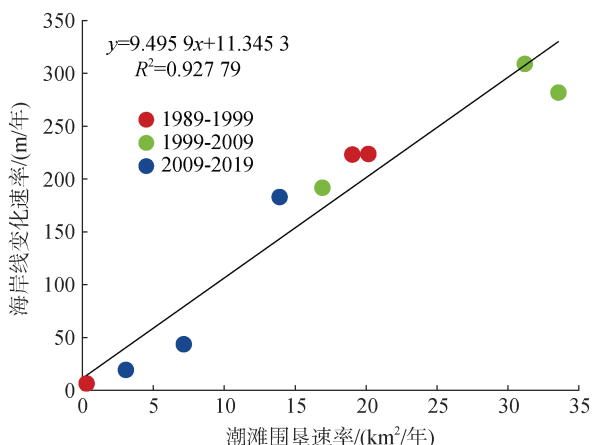


图4 潮滩围垦速率和海岸线变化速率统计关系图

Fig. 4 Statistic map of coastline change speed and tidal reclamation speeds

推进速率 281.78 m/年; 小洋口~洋口港围填海速率为 16.92 km²/年, 同期岸线推进速率为 191.73 m/年, 总体上该段时间内围填海速率和岸线向外推进速率均达到峰值。2009—2019 年期间, 研究区围填海总面积 241.18 km², 相比以往面积锐减, 围填区主要集中在方塘河口南北两翼, 其余岸段围填海面积较小。从岸段看, 射阳河口~大丰港围填海速率为 3.07 km²/年, 同期岸线推进速率 19.34 m/年, 在新洋港北部部分岸段出现了退垦, 围垦区受到海洋动力作用泥沙被侵蚀导致岸线后退, 平均后退速率达到 8.75 m/年; 大丰港~小洋口围填海速率为 13.90 km²/年, 同期岸线推进速率为 182.91 m/年; 小洋口~洋口港围填海速率为 7.15 km²/年, 同期岸线推进速率为 43.6 m/年。通过拟合上述岸段不同时期围填海速率和岸线变化速率, 二者线性相关性达 93%, 表明人类主导的围填海活动在近 30 a 的时间尺度内造成了江苏中部海岸线在时间和空间变化上的不均一性。

另外, 从海岸线的自然演化过程来看, 岸线的变化主要和海岸海洋动力过程相关, 如海岸物质组成、泥沙供给、海岸潮汐、波浪以及极端天气等均可以在不同的时间尺度上影响海岸冲淤。在江苏中部海岸, 海岸带的底质基本上为淤泥质粉砂, 潮间带宽度较宽、坡度平缓, 盐沼植被随着海岸的淤涨逐步向外扩展, 这些特征可以作为分析海岸线自然变化的定量标志。江苏海岸在 1982 年开始引种互花米草(*Spartina alterniflora* Loisel)^[26], 在新洋港~斗龙港岸段存在着大片的盐沼湿地, 1989 年以来受到人类围垦影响较小, 目前属于盐城世界自然遗产保护区核心区。通过分析新洋港口~斗龙港口盐沼岸

线的变化速率发现, 1989—2019 年期间的平均推进速率为 291.61 m/年, 1989—1999 年期间推进速率为 352.16 m/年, 1999—2009 年推进速率为 273.9 m/年, 2009 至 2019 年推进速率为 169.43 m/年, 推进速率迅速变小, 与整个中部海岸先大后小的岸线变化趋势差异明显。从数据对比上可以看出, 除 1999—2009 年间, 其余时间段新洋港口~斗龙港口自然岸线推进速率均大于整体平均值。

对比海岸线变化空间分布特征(图 2), 可以看出每个时期的岸线推进并非南北同步的, 差异非常显著, 除垦区外大部分岸线变幅较小。通过计算岸线变化速率的变异系数(为不同时期岸线变化速率标准差和平均值的比值, 反映不同时期内岸线变化的波动强度), 发现新洋港口~斗龙港之间人工干预较少盐沼的变异系数较小(图 5), 一般在 0.4 以下, 另外南部的几个围垦较少的河口如方塘河口等变异系数也较小, 其余岸段变异系数均较大且无明显的空间分布规律, 表明江苏中部海岸的向外推进是在人类围填海活动主导下的一种被动、随机的变化过程。另外, 1999—2009 年整体岸线推进速率显著大于未围垦盐沼推进速率, 表明该时期存在过渡围垦现象, 这也是 2009 年以后盐沼岸线及其余岸段向外推进速率急剧下降的重要原因。

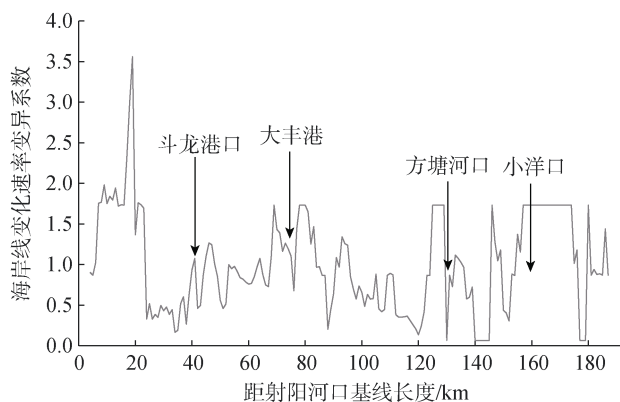


图5 海岸变化速率变异系数空间分布图

Fig. 5 Coefficient of variation of coastline change speed dotted line means the coastline or estuary with less human activities

3.2 围填海影响下的潮滩断面侵淤特征

海岸线本质上是海陆交互作用的痕迹线, 一般以平均高潮线作为海岸线标志, 在江苏中部海岸, 受到人类大规模围填海影响, 平均高潮线大部分和海堤重合, 在严禁围填海背景下, 潮滩侵淤不但影

响海堤稳定性,对于未来岸线的推进或者后退同样至关重要。本次研究以中部海岸近年来围填海较为剧烈的条子泥潮滩为例,通过对2013年7月围堤合龙后海岸潮滩断面多次重复观测和取样分析,发现围填海工程能对潮滩的冲淤变化产生显著影响。在围堤合龙后3 a时间内(2014—2016年),第一次测量断面形态平缓(图6a),坡度为0.44‰,断面中上部发育多个小型沟槽。随时间推移,围堤前部快速淤高,沟槽消失,断面逐步从双凸演化为上凸形态,坡度变陡,2016年实测坡度为0.96‰,在此期间潮滩断面

整体上淤积为主。从2015年9月开始断面下部开始侵蚀,范围逐步向上扩展,至2016年6月断面下部1 km范围内均为侵蚀,平均侵蚀速率为16.69 cm/年,但在此期间上部持续淤高,平均淤积速率为38.14 cm/年。在围堤合龙后6 a时间内(2017—2019年),断面的坡度继续变大,2019年实测坡度为1.5‰,断面侵蚀开始扩大到断面中上部。整体上看(图6b),2014—2019年断面整体平均淤积速率4.27 cm/年,中下部平均侵蚀速率达21.66 cm/年,断面上部平均淤积速率达到19.82 cm/年(图6b)。

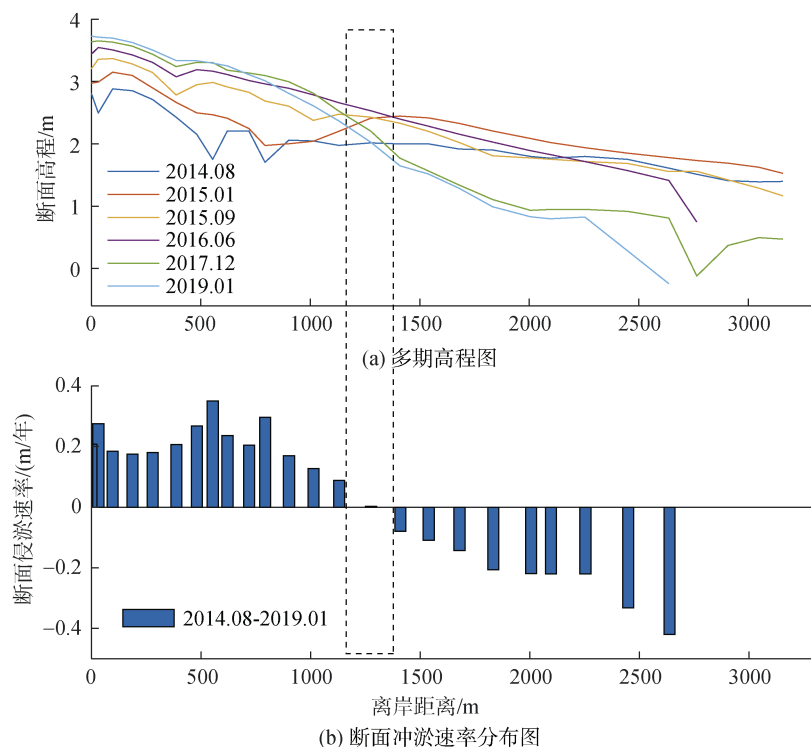


图6 条子泥潮滩围填海断面高程分布图

Fig. 6 Tidal flat profile of Tiaozini tidal reclamation area

注:黑线框内为观测期内潮滩冲淤变动较小位置

从岸线围填后的潮滩冲淤变化来看,围填海初期人工岸线外部潮滩呈现普遍淤积状况,这和陈才俊^[27]、汪亚平^[5]等在江苏中部海岸观测的结果是一致的。在潮滩围垦初期,海堤对潮波的反射削弱了潮流搬运能力,引起泥沙在堤前持续淤积,造成了新的潮滩断面上部开始逐步淤高。对整个潮滩断面而言,更多的物质向上部输运,打破了原有的动力-地貌平衡,为维持越来越陡的地貌形态(图6a),泥沙在垂向潮流的作用下从最易侵蚀的下部逐步向中上部输运直到地貌形态和潮波能量达到一个新的均衡态,在这个过程中,断面的中部区域可能同时发生着泥沙

的“源-汇”过程,该处侵蚀的泥沙是上部的“源”,同时也成为下部侵蚀泥沙的“汇”,进而能保持一个相对的稳态,到围垦后约4~5 a的时间断面的地貌也趋近于均衡态^[28-29]。从2014年以来的观测结果看,潮滩中上部离岸1 100~1 300 m范围内地形总体上变幅较小(图6虚线框),淤积和侵蚀对该区域影响较小,表明此处是整个断面冲淤转换的过渡带,整个断面围绕过渡带形成的“上淤下侵”的演变格局是近岸潮滩对围填海活动的地貌响应模式,随着上部淤高到平均高潮线附近,开始发育互花米草盐沼(图7),进一步促进了上部断面的淤涨,逐步形成新的岸线。

需要关注的是,人类围填海活动虽然一定程度上促进了岸线的向海推进,但是也造成了岸线前部潮滩的侵蚀。对于江苏海岸而言,海平面上升和泥沙物源减少都是未来海岸带管理者需要考虑的实际问题,在这个背景下,海岸岸线-潮滩地貌系统的稳定性或许会面临更大的挑战。



图7 断面上部发育的互花米草盐沼

Fig. 7 Saltmarsh of *Spartina alterniflora* Loisel in the upper part of the tidal flat

4 结论

1989—2019年期间江苏中部海岸线具有时空变化的不均一性,海岸线的平均向海推进速率为201.28 m/年,但在不同时期、不同岸段的变化速率差异显著,海岸线变化速率变异系数差异较大,总体来看,大丰港至小洋口岸段属于岸线变化较为剧烈区域。

1989年以来江苏中部海岸围填海面积为1 452.72 km²,人类围填海速率和岸线变化速率二者相关性系数达93%,结合岸线变化变异系数空间分布特征,认为主要是人类围垦活动驱动了近30 a来江苏中部海岸线的向海推进。

在江苏中部海岸,围填海促进了岸线的推进,但同时也造成潮间带岸滩中下部的侵蚀,这种“上淤下侵”的潮滩地貌过程对于未来岸线以及潮滩资源的可持续利用提出挑战。建议下阶段根据海平面上升情景以及海岸带开发利用规划对海岸线的演变趋势做进一步分析。

参考文献:

[1] 刘百桥,孟伟庆,赵建华,等. 中国大陆1990—2013年海岸线资源开发利用特征变化[J]. 自然资源学报, 2015, 30(12): 2033-2044.
LIU Baiqiao, MENG Weiqing, ZHAO Jianhua, et al. Variation of coastline resources utilization in China

from 1990 to 2013[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 32(12): 2033-2044.

- [2] 贾建军,蔡廷禄,刘毅飞,等. 考虑人类活动的海岸线分类体系-近期浙江省海岸线调查的实践与思考[J]. 海洋科学, 2019(10): 3-6.
JIA Jianjun, CAI Tinglu, LIU Yifei, et al. A classification of coastline considering the impacts of human activities: remarks on latest practices on coastline survey in Zhejiang Province[J]. Marine Sciences, 2019(10): 3-6.
- [3] 侯西勇,刘静,宋洋,等. 中国大陆海岸线开发利用的生态环境影响与政策建议[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(10): 1143-1150.
HOU Xiyong, LIU Jing, SONG Yang, et al. Environmental-ecological effect of development and utilization of China's coastline and policy recommendations[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(10): 1143-1150.
- [4] 李加林,田鹏,邵姝遥,等. 中国东海区大陆岸线变迁及其开发利用强度分析[J]. 自然资源学报, 2019, 34(9): 1886-1901.
LI Jialin, TIAN Peng, SHAO Shuyao, et al. The change of continental coastline and its development and utilization intensity in the East China Sea[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(9): 1886-1901.
- [5] WANG Y P, GAO S, JIA J J, et al. Sediment transport over an accretional intertidal flat with influences of reclamation, Jiangsu coast, China[J]. Marine Geology, 2012, 291/294: 147-161.
- [6] YU Q, WANG Y W, SHI B W, et al. Physical and sedimentary processes on the tidal flat of central Jiangsu coast, China: headland induced tidal eddies and benthic fluid mud layers[J]. Continental Shelf Research, 2017, 133: 26-36.
- [7] 陆晓燕,杨智翔,何秀凤. 2000-2009年江苏沿海海岸线变迁与滩涂围垦分析[J]. 地理空间信息, 2012, 10(5): 57-59.
LU Xiaoyan, YANG Zhixiang, HE Xiufeng. Analysis of monitoring shoreline changes and tidal flat reclamation of Jiangsu from 2000 to 2009[J]. Geospatial Information, 2012, 10(5): 57-59.
- [8] 朱晓华,查勇,陆娟. 海岸线分维时序动态变化及其分形模拟研究-以江苏省海岸线为例[J]. 海洋通报, 2002, 21(4): 37-43.
ZHU Xiaohua, ZHA Yong, LU Juan. On dynamic change of fractal dimensions of temporal series and fractal simulation of coastline: A case study of Jiangsu coastline[J]. Marine Science Bulletin, 2002, 21(4): 37-43.
- [9] 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[J]. 海洋通报, 2014, 33(6): 630-636.
PENG Xiuqiang, XIA Fei, ZHANG Yongzhan. Analysis of the dynamic changes of the coastline along the aban-

- done Yellow River Delta of northern Jiangsu, China[J]. Marine Science Bulletin, 2014, 33(6): 630-636.
- [10] 吕林, 崔丹丹, 陈艳艳, 等. 1984—2016 年江苏省海岸线和沿海滩涂的变迁[J]. 海洋开发与管理, 2019, 36(8): 52-54.
LV Lin, CUI Dandan, CHEN Yanyan, et al. The changes of coastline and coastal beach in Jiangsu Province from 1984 to 2016[J]. Ocean Development and Management, 2019, 36(8): 52-54.
- [11] 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[J]. 地理研究, 2014, 33(3): 414-426.
LI Xing, ZHANG Lianpeng, JI Changchen, et al. Spatiotemporal changes of Jiangsu coastline: A remote sensing and GIS approach[J]. Geographical Research, 2014, 33(3): 414-426.
- [12] 陈玮彤, 张东, 崔丹丹, 等. 基于遥感的江苏省大陆岸线岸滩时空演变[J]. 地理学报, 2018, 73(7): 1365-1380.
CHEN Weitong, ZHANG Dong, CUI Dandan, et al. Monitoring spatial and temporal changes in the continental coastline and the intertidal zone in Jiangsu province, China[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(7): 1365-1380.
- [13] BRUUN P. Sea-level rise as a cause of shore erosion[J]. Journal of the Waterways and Harbors Division, 1962, 88(1): 117-132.
- [14] ZHANG K, DOUGLAS B C, LEATHERMAN S P. Global warming and coastal erosion[J]. Climatic Change, 2004, 64(1/2): 41-46.
- [15] 李明亮, 杨磊, 龚绪龙, 等. 围垦工程影响下的淤涨型潮滩演化: 以江苏掠港潮滩为例[J]. 海洋通报, 2016, 35(6): 683-693.
LI Mingliang, YANG Lei, GONG Xulong, et al. The geomorphologic response of accreting intertidal flat to reclamation: a case from Jianggang, Jiangsu[J]. Marine Science Bulletin, 2016, 35(6): 683-693.
- [16] 丁贤荣, 康彦彦, 茅志兵, 等. 南黄海辐射沙脊群特大潮差分析[J]. 海洋学报, 2014, 36(11): 12-20.
DING Xianrong, KANG Yanyan, MAO Zhibing, et al. Analysis of largest tidal range in radial sand ridges southern Yellow Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(11): 12-20.
- [17] 朱大奎, 柯贤坤, 高抒. 江苏海岸潮滩沉积的研究[J]. 黄渤海海洋, 1986, 4(3): 19-27.
ZHU Dakui, KE Xiankun, GAO Shu. Tidal flat sedimentation of Jiangsu flat[J]. Journal of Oceanography of Huanghai&Bohai Seas, 1986, 4(3): 19-27.
- [18] 王艳红, 温永宁, 王建, 等. 海岸滩涂围垦的适宜速度研究——以江苏淤泥质海岸为例[J]. 海洋通报, 2006, 25(2): 15-20.
WANG Yanhong, WEN Yongning, WANG Jian, et al. Feasible rate of tidal flat reclamation: Jiangsu mud coast as a case Study[J]. Marine Science Bulletin, 2006, 25(2): 15-20.
- [19] 陈才俊. 围垦对潮滩动物资源环境的影响[J]. 海洋科学, 1990, 14(6): 48-50.
CHEN Caijun. Influences of tidal reclamation to animal resources[J]. Marine Sciences, 1990, 14(6): 48-50.
- [20] 沈永明, 冯年华, 周勤, 等. 江苏沿海滩涂围垦现状及其对环境的影响[J]. 海洋科学, 2006, 30(10): 39-43.
SHEN Yongming, FENG Nianhua, ZHOU Qin, et al. The status and its influence of reclamation on Jiangsu coast[J]. Marine Sciences, 2006, 30(10): 39-43.
- [21] PAWLOWICA R, BEARDSLEY B, LENTZ S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE[J]. Computers & Geosciences, 2002, 28(8): 929-937.
- [22] 黄辰虎, 冯义楷, 欧阳永忠, 等. 半日潮特征海域平均大潮高潮面的计算方法[J]. 海洋测绘, 2016, 2: 21-25.
HUANG Chenhu, FENG Yikai, OUYANG Yongzhong, et al. An algorithm for calculating mean high water springs at semidiurnal tide sea waters[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2016, 2: 21-25.
- [23] 崔丹丹, 张东, 吕林, 等. 基于潮汐分带校正的海岸线遥感推算研究[J]. 海洋测绘, 2017, 5: 52-55.
CUI Dandan, ZHANG Dong, LV Lin, et al. Coastline remote sensing prediction based on tide zoning correction[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2017, 5: 52-55.
- [24] THIELER E R, HIMMELSTOSS E A, ZICHICHI J L, et al. The digital shoreline analysis system(DSAS) version 4.0-an ArcGIS extension for calculating shoreline change[R]. Reston, VA: US Geological Survey, 2009.
- [25] 刘鹏, 王庆, 战超, 等. 基于 DSAS 和 FA 的 1959—2002 年黄河三角洲海岸线演变规律及影响因素研究[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(3): 585-594.
LIU Peng, WANG Qing, ZHAN Chao, et al. Quantitative analysis of coastline change in the yellow river delta from 1959 to 2002[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2015, 46(3): 585-594.
- [26] 高建华, 杨桂山, 欧维新. 互花米草引种对苏北潮滩湿地 TOC, TN 和 TP 分布的影响[J]. 地理研究, 2007, 26(4): 799-808.
GAO Jianhua, YANG Guishan, OU Weixin. The influence after introduction of *Spartina alterniflora* on the distribution of TOC, TN and TP in the national Yancheng rare birds nature reserve, Jiangsu Province, China[J]. Geographical Research, 2007, 26(4): 799-808.
- [27] 陈才俊. 江苏中部海堤大规模外迁后的潮水沟发育[J]. 2001, 20(6): 71-79.
CHEN Caijun. Change in tide creek after mudflat being enclosed in the middle coast of Jiangsu Province[J]. Marine Science Bulletin, 2001, 20(6): 71-79.

- [28] 龚政, 白雪冰, 靳闯, 等. 基于植被和潮动力作用的潮滩剖面演变数值模拟[J]. 水科学进展, 2018, 29(6): 877-886.
GONG Zheng, BAI Xuebing, JI Chuang, et al. A numerical model for the cross-shore profile evolution of tidal flats based on vegetation growth and tidal processes[J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(6): 877-886.
- [29] 张长宽, 黄婷婷, 陶建峰, 等. 江苏海岸潮滩剖面形态与动力泥沙响应关系[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 245-251.
ZHANG Changkuan, HUANG Tingting, TAO Jianfeng, et al. Response relationship of tidal flat profile and dynamic sediment along Jiangsu Coast[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2020, 48(3): 245-251.

Characteristics of coastline change under the influence of human activities in central Jiangsu Province from 1989 to 2019

LI Ming-liang^{1, 2, 3}, WU Shu-liang^{1, 2}, GONG Xu-long^{1, 2}, YANG-lei^{1, 2},
GOU Fu-gang^{1, 2}, LI Jin^{1, 2}

(1. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China; 2. Key Laboratory of Earth Fissures Geological Disaster, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210018, China; 3. School of Geographic and Oceanic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Received: May 12, 2021

Key words: central Jiangsu coast; tidal flat reclamation; coastline change; tidal flat profile; saltmarsh wetland

Abstract: The coastline is an important natural resource in coastal areas, which is also a crucial part of the coastal ecosystem. By analyzing the characteristics of coastline change processes from 1989 to 2019 in central Jiangsu province and the reclamation processes and tidal flat profile morphological response process to human tidal reclamation, this work studies the influence of human reclamation on the coastline evolution. Results show that the change in the coastline has an obvious asymmetry in time and space and the coefficient of variation of accretion speed is significantly different in different parts of the coast. All the above data prove that the change in the coastline is a passive process driven by human reclamation, and the two have positive relativity as high as 93%. However, tidal reclamation has the effect of cement accretion and can also cause the erosion of the lower tidal flat. This “accretion in the higher part and erosion in the lower part” makes a challenge for future coastline sustainable usage and protection.

(本文编辑: 谭雪静)