引文格式：吴安辉,吴闯,胡昌华,等. 聚焦剖面研究南沙区东部海岸线和沙洲的演变[J]. 地理空间信息, 2025, 23(11): 12-16. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.11.003

聚焦剖面研究南沙区东部海岸线和沙洲的演变

吴安辉[1,2,3]，吴　闯[2,3,4*]，胡昌华[1,2,3]，宫厚诚[1,2,3]

（1. 广州市城市规划勘测设计研究院有限公司，广东 广州 510060；2. 广州市资源规划和海洋科技协同创新中心，广东 广州 510060；3. 广东省城市感知与监测预警企业重点实验室，广东 广州 510060；4. 广州湾区规划勘测设计院有限公司，广东 广州 511455）

摘　要：海岸线的历史演变对理解人类—自然相互作用至关重要。基于1986—2025年641幅卫星影像，采用聚焦剖面的研究方法和亚像素海岸线识别技术，提取了海岸线在11条研究剖面上的位置，从而分析南沙区东部海岸和近岸沙洲的演变规律。结果表明，海岸线在自然状态下缓慢向海淤积，在围垦和围填海活动影响下突变为人工岸线，早期围垦距离大于后期围填海；虎门沙滩和天后宫沙滩在围垦后发生匀速侵蚀，侵蚀速率分别为6.1、5.7 m/a，侵蚀持续时间分别为8、4 a；下横档岛沙洲的形态变化和近岸围填海工程建设存在时间上的相关性。研究结果可为海岸带管理、沙滩和沙洲的保护利用提供科学依据。

关键词：海岸线；卫星影像；海岸演变；沙洲；围填海

中图分类号：P236　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）11-0012-05

Research on the Evolution of Shoreline and Sandbar in the Eastern of Nansha District Focused on Transects

WU Anhui[1,2,3], WU Chuang[2,3,4], HU Changhua[1,2,3], GONG Houcheng[1,2,3]

(1. Guangzhou Urban Planning & Design Survey Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510060, China;
2. Collaborative Innovation Center for Natural Resources Planning and Marine Technology of Guangzhou, Guangzhou 510060, China;
3. Guangdong Enterprise Key Laboratory for Urban Sensing, Monitoring and Early Warning, Guangzhou 510060, China;
4. Guangzhou Bay Area Planning & Design Survey Institute Co., Ltd., Guangzhou 511455, China)

Abstract: Understanding the historical evolution of shoreline is essential for revealing human-nature interactions. Based on 641 satellite images from 1986 to 2025, we applied a transect-focused method combined with sub-pixel shoreline detection technology to extract shoreline positions along 11 transects, and systematically analyzed the evolution of eastern coast and nearshore sandbar in Nansha District, Guangzhou City. The findings revealed that under natural conditions, the shoreline gradually advanced seaward, while reclamation and land-filling activities abruptly transformed it into artificial shorelines, with the early-stage reclamation exhibiting greater spatial intrusion than later land-filling activities. After reclamation project, both the Humen Beach and the Tianhougong Beach experienced sustained erosion at constant rates of 6.1, 5.7 m/a for 8 and 4 years, respectively. The evolution of the Xiahengdang Island Sandbar was temporally synchronized with nearshore reclamation project. The result can offer scientific support for shoreline management and the sustainable utilization of beach-sandbar systems.

Key words: shoreline, satellite image, coastal evolution, sandbar, land-filling

在气候变化和人类活动对海岸带区域影响日益加剧的背景下，海岸演变已成为近年来国内外研究的热点问题[1-3]。近40年中国大陆海岸线变化剧烈，岸线开发利用程度持续显著增加，人类开发活动成为海岸变化的主导因素[4]。卫星具有统一的基准和固定的访问周期，且近年来积累了大量影像，是研究海岸演变良好的数据源[5]。目前基于卫星影像的海岸线时空演变研究多采用识别全部海岸线的方法，研究海岸线的长度、分形维数和端点变化速率等[6-11]；部分学者[12-15]则通过聚焦剖面的方法直接识别海岸线在研究剖面上的位置，将海岸线研究从二维的线降至一维的点，能方便且充分地利用已有卫星影像。本文首先初步分析了4期卫星影像上海岸线的整体演变，设置了11条研究剖面；再基于1986—2025年的641幅卫星影像，采用亚像素海岸线识别技术提取海岸线在研究剖面上的位置；最后综合分析南沙区东部海岸和近岸沙洲的演变规律，为海岸带管理、沙滩和沙洲的保护利用提供科学依据。

项目来源：广州市资源规划和海洋科技协同创新中心资助项目（2023B04J0301、2023B04J0326）。

第一作者简介：吴安辉（1984—），本科，工程师，从事海洋测绘、工程测量工作，E-mail：465533347@qq.com。

通信作者：吴闯（1997—），硕士，助理工程师，主要从事海岸演变和测绘工作，E-mail：15517813797@163.com。

1　研究区概况

南沙区位于广州市南部，是广州市海岸线长度最长的行政区。南沙区海岸线是广州塑造滨海城市形象、丰富休闲旅游类型、建设港口、临港制造的重要载体，是广州市发展海洋经济的重要基地。本文选取的研究区为南沙区东部虎门渡口至花园酒店岸段，沿海岸分布有货运码头、政法基地、游艇会、邮轮母港和花园酒店等围填海工程，虎门沙滩和天后宫沙滩的长度和宽度分别约为1 000 m和30 m。研究区包括3个近岸沙洲，沙洲在上横档岛、下横档岛和凫洲岛后方沉积形成，低潮时出露，其中上横档岛和下横档岛沙洲距南沙东部海岸线约1 500 m，凫洲岛沙洲距海岸线约500 m。虎门水道为潮流形口门，入海水、沙占珠江总量的18.5%和9.3%，年平均潮差为1.63 m[16]。

2　研究数据和方法

2.1　卫星影像来源与预处理

依据Zhang等[13]的方法，基于Google Earth Engine云平台（https://earthengine.google.com/）下载南沙东部海岸1986—2025年云量小于80%的所有Landsat和Sentinel影像，并人工删除50%海岸线不可见的影像，剩余641幅影像，其中Landsat影像433幅、Sentinel影像208幅（图1）。1986—1999年年均可利用影像约为10幅，随着Landsat7（1999年至今）、Landsat8（2013年至今）和Sentinel卫星（2016年至今）影像的叠加，后期年均可利用影像增至30余幅。Landsat和Sentinel的影像分辨率分别为30、10 m。为方便后续处理，采用双三次插值方法将Landsat的影像分辨率提升至10 m。卫星影像通过近红外、红光和绿光波段进行合成，并根据每个波段颜色值的频率分布对合成影像进行了增强，以便更好地识别海岸线位置。

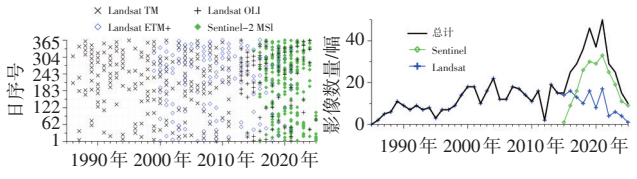


图1　1986—2025年研究区Landsat和Sentinel影像的时间、类型和数量

2.2　剖面设置和海岸线提取

本文选取4个低潮时期的卫星影像（1987-01-06、1998-12-22、2008-12-17、2021-12-10）描绘海岸线（平均大潮高潮线）位置，通过分析海岸线类型和前后变化情况初步将研究区海岸线分为Ⅰ虎门渡口和货运码头段、Ⅱ虎门沙滩段、Ⅲ游艇会码头段、Ⅳ邮轮母港段、Ⅴ天后宫沙滩段、Ⅵ花园酒店段6段，每段海岸线长度为1~2 km。在每段海岸线的中部或前后变化最大的位置设置6个研究剖面（T1~T6）（图2a），剖面起点位于陆地侧，剖面方向垂直于各段海岸线的大致走向。聚焦剖面的方法是从大量卫星影像中直接提取各段海岸线在研究剖面上的位置，再通过各研究剖面上海岸线相对位置（距离剖面起点的距离）的前后较连续变化分析各段海岸线的变化规律。依据各沙洲的形态和前后变化情况，本文共设置5个研究剖面（T7~T11）（图2b、2c）：上横档岛沙洲位于上横档岛左下方，在沙洲中部最宽处设置T7剖面；1986—2008年下横档岛沙洲基本呈直角三角形，2021年呈等腰三角形，在平行和垂直下横档岛的方向分别设置T8、T9剖面，通过提取下横档岛沙洲顶点的在两条剖面上的垂直投影位置分析下横档岛沙洲的形态和长度变化；凫州岛沙洲长宽比较大，平行于凫洲岛沙洲走向，在沙洲中部设置T10剖面，提取凫州岛沙洲顶点位置，分析其长度变化；在凫洲岛沙洲中部，垂直于T10剖面设置T11剖面，分别提取沙洲两侧的水边线位置，并取平均值和差值，研究其中心点和宽度变化。

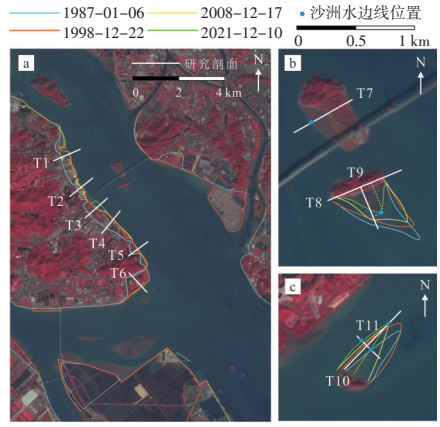


图2　研究区海岸线变化情况与研究剖面设置

审图号：粤AS(2025)030号

不同类型的海岸可识别不同的指标[17]，其中T1、T3、T4和T6剖面处早期可识别高潮线和低潮水边线，转为人工岸线后，水边线位置即代表海岸线位置；T2和T5剖面处为砂质岸线，可提取水边线和干湿线两个特征指标；沙洲低潮时出露，高潮时完成淹没，未见明显的干湿线，T7~T11沙洲剖面可提取水边线位置。本文采用CASPRS软件[13]提取海岸线位置。CASPRS软件集成了亚像素水边线自动识别算法，可在641幅卫星影像上自动识别11条研究剖面上的海岸线位置；并进行交互检查，对与目视偏差较大的数据进行人工识别和校正。CASPRS软件可通过单击按钮实现不同卫星影像和剖面之间的切换，还采用邻近、双线性和双三次插值方法对影像进行最高30倍的放大

（图3）。自动识别的分辨率为1 m，人工交互识别的分辨率取决于影像放大倍数，放大10倍则分辨率为1 m。

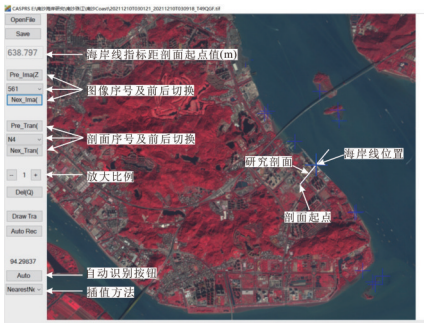


图3　CASPRS软件操作界面

审图号：粤AS(2025)030号

2.3　误差评估

T1、T3、T4和T6剖面变为人工岸线后，理论上其位置不变；但卫星影像识别的海岸线位置受卫星影像校准和识别方法的影响，存在解译误差。通过海岸线为人工岸线各时间段提取的海岸线位置数据计算标准偏差，评估本文基于卫星影像提取海岸线位置的解译误差 $\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}$，其中 n 为各时间段的数据总数；x_i 为第 i 条海岸线位置；$\bar{x}$ 为平均值。

3　研究结果

3.1　海岸线演变

1985—2025年T1~T6剖面处海岸线连续演变情况见图4，海岸线在围垦和围填海等人类活动的影响下，呈阶梯状向海推进，不同剖面处海岸线发生变化的时间和距离不尽相同。海岸线演变可分为3个阶段：①围垦前期，海岸线缓慢向海淤积，T1~T6剖面淤积速率分别为0.2、0.2、1.7、0.2、0.2、0.6 m/a。②围垦至围填海时期，海岸线剧烈变化，T1剖面在1991年直接向海围垦约270 m，建设虎门渡口；1990年T3、T4和T6剖面在低潮水边线处建设围垦堤（高潮时被淹没，部分影像上海岸线仍识别在原岸线处），1993年围垦基本完成，海岸线向海推进300~570 m；T1、T3和T4剖面在围垦变为人工岸线后，分别在2004年、2010年、1996年发生围填海活动，海岸线再次向海推进100~220 m；T2和T5剖面在1998年发生围垦，海岸线分别向海推进约210 m和70 m，围垦后两个剖面处海岸线分别发生持续约8 a和4 a的匀速侵蚀，侵蚀速率分别为6.1、5.7 m/a。③海岸线稳定期，T1、T3、和T4剖面海岸线均为人工岸线，位置相对不变；T2和T5剖面海岸线匀速向海淤积，速率均为0.7 m/a；T6剖面在围堤拆除后缓慢向海淤积，速率为0.3 m/a。

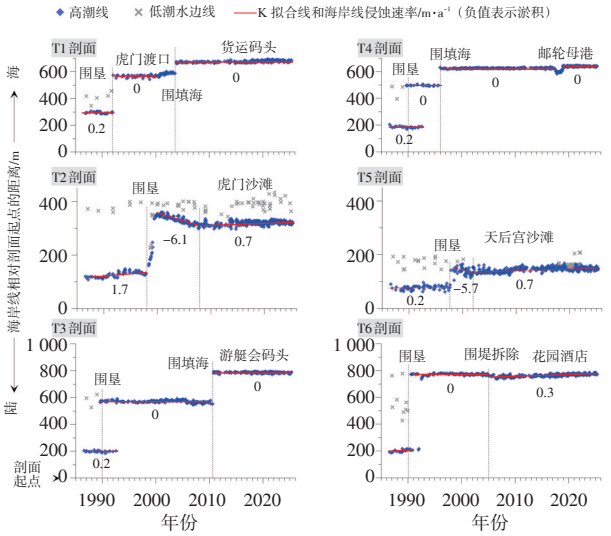


图4　T1~T6剖面上的海岸线位置变化

3.2　沙洲演变

上横档岛、下横档岛和鸟洲岛沙洲海岸线位置演变见图5，上横档岛在1993年虎门大桥建设初期被抛石围填，2007年后上横档岛外开始沉积形成沙洲，低潮时T7剖面开始提取沙洲外围水边线位置，结果显示沙洲宽度约为100 m，呈淤积趋势，速率约为0.7 m/a。

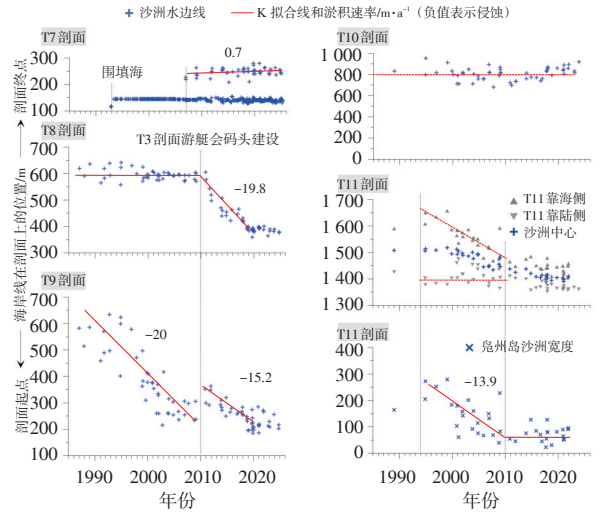


图5　T7~T11剖面上的海岸线位置变化

根据提取的4期海岸线分析，下横档岛沙洲形态在1987年、1998年和2008年均为钝角三角形，2021年为锐角三角形。T8剖面结果显示，沙洲顶部投影位置在2010年前基本不变，2010年后匀速向下横档岛中部移动，沙洲形态的变化速率为19.8 m/a。T9剖面结果显示，近40年下横档岛沙洲长度持续减小，侵蚀速率在2010年发生突变，前后分别为15.2、20 m/a。T10剖面结果显示，鸟洲岛沙洲的长度约为800±100 m（±100 m为受潮位影响的变化）。T11剖面结果显示，靠海侧在1994—2012年剧烈侵蚀，而靠陆侧位置基本

稳定，鸟洲岛沙洲的宽度约减小200 m，宽度减小速率为13.9 m/a。

3.3　误差结果

本文选取T1、T3、T4和T6剖面处为人工岸线时间段（图4中海岸线变化速率为0）提取的海岸线位置数据，计算海岸线解译误差。各剖面用于计算的数据量和结果见表1。本文基于卫星影像提取的海岸线解译误差为2.5~6.5 m，T4剖面的解译误差较小与此处海岸线平直且稳定有关。

表1　T1、T3、T4和T6剖面基于卫星影像提取海岸线的解译误差

剖面	人工岸线时间段	数据量/个	影像数量/幅	提取率/%	解译误差/m	总数据量/个	总解译误差/m
T1	1992—2000	49	82	60	6.2	427	6.5
	2003—2025	378	491	77	6.5		
T3	1989—2010	225	252	89	8.1	507	5.8
	2010—2025	282	377	75	3.9		
T4	1990—1996	30	50	60	3.3	489	2.5
	1996—2017	259	326	79	2.5		
	2019—2025	200	212	94	2.4		
T6	1990—2005	135	176	77	5.9	135	5.9

进一步针对T1、T3、T4和T6剖面处为人工岸线时间段，计算每年海岸线位置的标准偏差，并与年度数据量进行分析，结果见图6，可以看出，当年度数据量为10时，年度标准偏差分布较集中，而当年度数据量大于20时，年度标准偏差未见明显减小。本文在下载卫星影像时云量的筛选标准为80%，后期人工删除50%海岸线不可见的影像，受卫星影像质量和云团分布等影响，数据提取率为60%~94%。基于卫星影像研究海岸线演变，建议在海岸线变化较大的时间段，尽可能多的保留影像数量，以展示和分析海岸线的连续变化情况，而在海岸线变化较小的时间段，则可提高卫星影像的筛选标准，控制年均卫星影像数量在10幅左右，以进一步降低海岸线的解译误差。

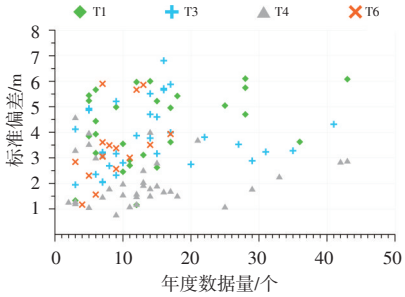


图6　海岸线的年度数据量与标准偏差分布图

4　结果分析

4.1　海岸线演变及其影响因素

已有相关研究表明，研究区近40年的海岸线时空变化与城市发展阶段高度相关，自然岸线减少、人工岸线剧烈增加，海岸线结构趋于复杂，在人类活动的影响下剧烈向海推进[7-8,18]。基于大量卫星影像，通过聚焦剖面的方法研究发现，人类活动造成的海岸线变化往往是发生在某一年的突变，且不同岸段的人类活动类型和变化时间往往不同；人类活动的影响可分为早期围垦和后期围填海两种类型，在T1、T3、T4和T6剖面处，早期围垦至低潮水边线后，海岸转为人工岸线，后期再次围填海。围垦造成的海岸线变化距离（270~570 m）大于围填海（100~220 m）。

虎门沙滩和天后宫沙滩是广州市稀有的沙滩旅游资源。已有研究表明，沙滩干湿线可代表平均大潮高潮线，受潮位变化影响较小，可直接用于研究沙滩的长期演变情况，无需进行潮位校正[12,14]。T2和T5剖面分别反映两处沙滩的演变，在发生围垦前虎门沙滩的淤积速率（1.7 m/a）大于天后宫沙滩（0.2 m/a），这可能与两处沙滩的海岸线形态有关，虎门沙滩海岸线整体呈弧形凹向陆地，沉积效应更强[19]。两处沙滩均在1998年围垦后发生剧烈侵蚀，侵蚀速率相近，但虎门沙滩的侵蚀持续时间（8 a）大于天后宫沙滩（4 a），这与虎门沙滩围垦距离（约210 m）远大于天后宫沙滩（约70 m）有关。在围垦后的海岸稳定期，两处沙滩均保持长期匀速的缓慢淤积，速率均为0.7 m/a。与传统海岸沙滩不同[12,14]，两处沙滩位于珠江虎门水道岸边，受海洋潮汐和波浪的影响较小，沙滩发育较小较窄，变化速率较小，基于卫星影像的研究精度有限，因此对两处沙滩的后期保护和利用需要结合实测资料和无人机影像等多源数据进行更加精细化的监测和研究[20]。

4.2　沙洲演变及其影响因素

受上横档岛、下横档岛和鸟洲岛阻隔影响，珠江河流泥沙在海岛后方沉积形成沙洲。沙洲的形态和面积受河流泥沙和区域水动力条件影响，卫星影像上提取的沙洲水边线位置数据受瞬时水位影响[21]，研究区的年平均潮差为1.63 m，由图5可知，瞬时潮位造成的剖面上海岸线位置变化在±100 m之内（拟合线上同一年份的上下点位偏差），远小于近40年长期水边线位置变化（200~400 m），因此本文分析沙洲长期演变时忽略瞬时潮位造成的变化。

1993年之前上横档岛被抛石围填，2007年沙洲才出露水面，沙洲岸线缓慢淤积，速率为0.7 m/a。下横档岛和鸟洲岛沙洲的形成是珠江河流泥沙在海岛后方长期沉积的结果。在珠江入海泥沙减少的背景下[22]，

近40年下横档岛沙洲的长度持续匀速减小，2010年下横档岛沙洲的长期演变趋势发生变化，表现为沙洲长度的侵蚀速率减小，沙洲尾部持续匀速向沙洲中部移动，沙洲形态由近直角三角形变化为近等腰三角形。结合附近区域的海岸演变分析发现，2010年T3剖面附近建设了游艇会码头和防波堤，导致海岸线向海推进约200 m。游艇会码头与下横档岛沙洲位于虎门水道的同一横截面上，直线距离约为1 km，海岸与沙洲的演变空间相近、时间相关，下横档岛沙洲长期演变趋势可能与该处近岸工程改变了区域的水动力条件有关。已有大量研究揭示了类似围填海工程对海岸沙滩和河口沙洲的影响[13,15-17]，围填海工程造成的水动力环境改变对附近沙洲的演变存在持续影响[23]。扩大分析的空间尺度发现，下横档岛沙洲距离虎门水道东莞市海岸大于南沙区海岸，下横档岛走向与南沙区海岸夹角为锐角，与东莞市海岸夹角为钝角，且附近东莞市海岸的围垦和围填海在1998年前已完成，后期海岸线无较大变化，未发现与下横档岛沙洲演变存在明显的时间相关性。需注意的是，下横档岛与东莞市海岸之间存在广州港出海航道，不定期的航道疏浚可能对下横档岛沙洲的演变存在潜在影响[24]。

由图5可知，凫洲岛沙洲的长度未发生明显减小，但宽度显著减小，且宽度的改变主要是由其靠海侧侵蚀导致，侵蚀持续至2010年后保持稳定。T6剖面在围垦前距离凫州岛沙洲距离约为1 km，围垦后距离约为400 m，未见凫州岛沙洲演变与T6剖面存在明显的相关性。扩大分析的空间尺度发现，在凫州水道南岸，鸡抱沙（距凫州岛最短直线距离约为3.3 km）在1987—1994年进行了区域大面积围垦（图2a），围垦后蕉门口水沙主要经凫州水道流出，围垦极大地改变了蕉门口外的边界格局，使凫洲水道涨、落潮主流北移[25]，且受不规则岸线挑流影响，经凫洲水道下泄的径流与虎门水道涨落潮流交角较大，两股水流交汇区流态混乱[26-27]。凫州岛沙洲位于凫州水道与虎门水道的交界处，沙洲外围的侵蚀可能是受鸡抱沙围垦造成的挑流以及虎门水道强潮流的综合影响。

5 结 论

基于1986—2025年641幅Landsat和Sentinel卫星影像，本文利用CASPRS软件识别11条研究剖面上海岸线位置，进而对南沙区东部海岸和近岸沙洲的演变进行分段研究和协同分析，主要结论包括：

1）近40年南沙区东部海岸在围垦和围填海活动影响下变为人工岸线，海岸线演变呈阶梯状向海推进，不同岸段的变化时间和距离不尽相同，早期围垦造成的海岸线变化距离大于后期的围填海。

2）南沙区东部海岸在自然状态下匀速向海淤积，淤积速率为0.2~1.7 m/a。虎门沙滩和天后宫沙滩在围垦后发生匀速侵蚀，速率分别为6.1、5.7 m/a，侵蚀持续时间分别为8、4 a。

3）上横档岛在围填海后14 a形成沙洲，下横档岛沙洲的长度和凫洲岛沙洲的宽度分别约减小了400、200 m，侵蚀速率分别为15.2~20 m/a和13.9 m/a。2010年距离下横档岛约1 km的游艇会码头建成后，下横档岛沙洲形态发生匀速变化，速率为19.8 m/a。

4）基于大量卫星影像，综合利用聚焦剖面的研究方法和亚像素海岸线提取技术，可将海岸线解译误差降低至2.5~6.5 m，展示海岸线连续的演变过程，为海岸带区域的开发和可持续管理提供科学依据。

参考文献

[1] Luijendijk A, Hagenaars G, Ranasinghe R, et al. The State of the World's Beaches[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 230-236

[2] Turner I L, Harley M D, Almar R, et al. Satellite Optical Imagery in Coastal Engineering[J]. Coastal Engineering, 2021, 167:103 919

[3] Vitousek S, Vos K, Splinter K D, et al. A Model Integrating Satellite-derived Shoreline Observations for Predicting Fine-scale Shoreline Response to Waves and Sea-level Rise Across Large Coastal Regions[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2023, 128(7):e2022JF006936

[4] 侯西勇，毋亭，侯婉，等. 20世纪40年代初以来中国大陆海岸线变化特征[J]. 中国科学:地球科学，2016,46(8):1 065-1 075

[5] Josep P P, Sánchez-García Elena, Jaime A C, et al. Assessing the Accuracy of Automatically Extracted Shorelines on Microtidal Beaches from Landsat7, Landsat8 and Sentinel-2 Imagery[J]. Remote Sensing, 2018, 10(2):326

[6] 梅元勋，井发明，陈海珍. 基于多时相遥感数据的宁波市海岸线变迁研究[J]. 地理空间信息，2018，16(10):62-66

[7] 苏倩欣，李婧，李志强，等. 1980—2020年大湾区海岸线变迁及影响因素分析研究[J]. 热带海洋学报，2022，41(4):116-125

[8] 尹楠楠，汤军，杨元维，等. 1989—2021年粤港澳大湾区海岸线变迁及土地利用变化[J]. 海洋地质前沿，2023，39(5): 1-11

[9] 义家吉，沈成，常建宇，等. 韩江三角洲1982—2020年海岸线时空演变与影响因素分析[J]. 海洋通报，2024，43(1):140-149

（下转第21页）