基于 LandSat 影像的近 30 年湛江 东北海岸线变迁分析

程阳艳^{1,2,3,4}, 付东洋^{1,5}*, 祁雅莉^{1,5}, 李志强^{1,5},

刘 贝1.5,余 果1.5,何露雪1.5

(1. 广东海洋大学 电子与信息工程学院,广东 湛江 524088; 2. 自然资源部 第一海洋研究所,山东 青岛 266061;
 3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室,山东 青岛 266237;

4. 自然资源部 海洋环境科学与数值模拟重点实验室, 山东 青岛 266061;

5. 广东海洋大学 海洋遥感与信息技术工程技术研究中心, 广东 湛江 524088)

摘 要:利用湛江东北海岸近 30 a 6 期 LandSat TM/OLI 遥感影像,基于人机交互方式获取海岸线空间信息,综合运用端点变率(End Point Rate, EPR)、线性回归变率(Linear Regression Rate, LRR)、岸线类型结构等多种方法或指标对湛江东北海岸线时空变迁及主要驱动因素进行了深入分析。结果表明:近 30 a 湛江东北大陆海岸线长度共增长约 27.56 km,岛屿海岸线长度共增长约 15.44 km,海岸线类型较多,自然海岸线锐减,利用类型构成趋于复杂, 且更多地受到了人类活动干扰;海岸线变迁方向整体以向海扩张为主,其中大陆海岸线的平均 LRR 和 EPR 为4.18 m/a 和 4.12 m/a,最高 LRR 达 94.26 m/a;岛屿海岸线的平均 LRR 和 EPR 为 2.24 m/a 和 3.79 m/a,最高 LRR 达 66.44 m/a。海岸线摆动剧烈区域主要集中于受围填海工程等人类工程活动影响较为显著的岸段。人类活动已成为湛江东北海岸线变迁的主导因素。

关键词:LandSat影像;湛江东北;海岸线变迁;端点变率;线性回归变率

中图分类号:P229 文献标志码:A

文章编号:1671-6647(2022)02-0261-13

doi:10.12362/j.issn.1671-6647.2022.02.009

引用格式:程阳艳,付东洋,祁雅莉,等. 基于 LandSat 影像的近 30 a 湛江东北海岸线变迁分析[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(2): 261-273. CHENG Y Y, FU D Y, QI Y L, et al. Analysis on coastline change of northeast Zhanjiang in the last 30 years based on LandSat images[J]. Advances in Marine Science, 2022, 40(2): 261-273.

湛江位于广东雷州半岛,海岸线长达1556 km,海岸带资源丰富,是海洋水产及围垦活跃的地区。受历 史的局限性和海洋环境观念淡薄的影响,在几度"与海争地,向海要粮"导向影响下,湛江先后于1958年, 1960年、1969年和1974年分别进行了4次大规模围海造地工程。1975—1994年,为满足城市建设需求又 增加了约20 km²的围填海工程,对湛江东北海岸带造成了巨大的影响^[1]。21世纪以来,由于码头、工业园区 建设需求,湛江围填海工程更频繁出现^[2-3]。因此,开展湛江市长时间序列海岸带及围填海工程的监测,认知海 岸线变迁规律,对于湛江退垦还海等海岸带生态修复保护工程及海岸带生态环境的可持续发展具有重要意义。

海岸线是多年平均大潮高潮时水陆分界的痕迹线[4]。传统海岸线测绘主要通过对海岸线拐点进行实地

收稿日期:2021-03-09

资助项目:国家自然科学基金项目——琼州海峡沿岸海滩地貌动力过程及其风暴响应研究(41676079);广东省教育厅重点项目——雷州 半岛近海典型养殖区有色溶解有机物光学遥感监测及污染示踪研究(2019KZDXM019);广东海洋大学高水平海洋学科团队项 目——海洋遥感与探测技术团队项目(002026002009);广东海洋大学 2019年"冲一流"学科建设平台项目——湛江港海域海洋 环境立体监测公共服务平台(231419026)

作者简介:程阳艳(1998—),女,硕士研究生,主要从事海洋遥感应用、海洋与气候变化及海气物质通量方面研究.

E-mail: chengyangyan@fio.org.cn

* 通信作者:付东洋(1969—),男,教授,博士,主要从事海洋水色遥感及近海环境方面研究. E-mail: fdy163@163.com

(陈 靖 编辑)

测量,按序将拐点连接的人工方法完成。这种测量的精度受拐点疏密程度的影响,且存在人力物力消耗巨大等缺点^[5]。随着卫星遥感技术的快速发展,遥感技术具有的大尺度、长时间序列优势越发突出,已成为海岸 线监测的主要技术手段^[6]。

多年来,国内外已有许多学者在利用遥感影像数据提取海岸线、分析海岸线变迁方面开展了大量的研究^[7-14]。目前,我国华南地区海岸线变迁研究主要集中于广东珠三角地区、广西北部湾地区以及福建沿岸, 而基于卫星遥感有关湛江地区海岸线变迁的研究鲜见报道。本文选取湛江东北区域为研究区,以 1989—2017 年 6 景 LandSat TM/OLI 影像为数据源,提取改进的归一化差值水体指数(Modified Normalized Difference Water Index, MNDWI)并进行阈值分割,采用人机交互的方法提取并细化修正近 30 a 湛江东北区域海岸线信息。在此基础上,运用端点变率(End Point Rate, EPR)、线性回归变率(Linear Regression Rate, LRR)、岸线类型结构等多种方法或指标,结合当地自然与社会人类活动因素,有针对性地进行湛江东北海岸线变迁、海岸线类型结构演变以及岸线变迁驱动力的研究,为进一步科学规划、合理利用湛江市海岸带空间资源提供有效参考。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

湛江位于广东西南部,地处雷州半岛,三面环海。作为我国规划的"21世纪海上丝绸之路"重要城市,湛 江是大西南与中国一东盟经济走廊的核心节点城市^[15],其海岸带港口工程开发与海岸带用地规划备受重 视。研究区位于湛江东北地区(110°01′42.18″~110°57′58.59″E,20°47′39.85″~21°26′05.07″N),海岸线不规 则且较多弯曲,可分为大陆海岸与岛屿海岸。大陆海岸东北起于吴川王村港镇,西南止于雷州东里镇。岛屿 海岸自北以南依次为南三岛、特呈岛、东头山岛、东海岛以及硇洲岛海岸(图1)。



图 1 研究区位置 Fig.1 Location of study area

1.2 数据来源及预处理

根据研究区地理位置,综合考虑图像质量、成像时间及 21 世纪以来研究区港口工程兴建频繁等因素,本 文共收集了 1989 年、2000 年、2005 年、2009 年、2013 年以及 2017 年的 LandSat TM/OLI Level 1T(L1T)系 列影像,轨道编号为 124/45,成像时间集中于冬春季且云覆盖量均小于 2%,影像参数见表 1。另以 Google Earth 影像、地形图数据及相关社会经济数据为辅助数据完成海岸线提取、海岸线变迁研究及驱动力分析。 其中,海岸线类型提取及变迁分析共使用 1989 年、2000 年、2009 年及 2017 年 4 景影像,相邻年份间隔约 10 a,可体现每 10 a 湛江东北岸线利用类型的变迁规律。而为重点体现 21 世纪以来湛江东北海岸线空间位置 频繁变迁的细节,并提高对频繁变迁的岸线时空变率的估算精度,除上述 4 景影像外,2005 年与 2013 年影 像被添加应用于湛江东北海岸线空间位置信息提取及变迁研究。数据来源于地理空间数据云网站(http:// www.gscloud.cn)以及美国地质勘探局(USGS,http://glovis.usgs.gov)。本文图像处理的主要平台为 Arc-GIS10.4.1、ENVI5.3,进行海岸线变迁定量研究时主要运用 DSAS 5.0 模块。

Table 1 Dandolat TM/ ODI Temote Sensing images data							
传感器	成像时间	分辨率/m	云量/%	传感器	成像时间	分辨率/m	云量/%
LandSat TM	1989-02-26 T10:34:56	30	0.03	LandSat TM	2009-01-16 T10:49:58	30	0.06
LandSat TM	2000-03-28 T10:39:25	30	1.41	LandSat OLI	2013-12-29 T11:06:33	30/15	0.01
LandSat TM	2005-11-21 T10:53:38	30	0.05	LandSat OLI	2017-12-08 T11:05:17	30/15	0.66

表1 LandSat TM/OLI 遥感影像数据

Table 1 LandSat TM/OLI remote sensing images data

经 DEM 进行地形校正后的 LandSat L1T 影像,由于存在日期差异,仍需对其进行辐射定标和大气校正 等预处理工作,其中大气校正模型采用的是 ENVI 平台自带的 FLAASH 大气校正模块。为保证影像几何 精度,本文利用二次多项式模型,采用双线性内插法进行重采样,校正配准误差控制在 0.5 个像元以内,且校 正后影像均采用 UTM 投影和 WGS_84 坐标系。

1.3 海岸线提取方法

根据遥感影像自动提取通常仅得到"水边线",需进行潮汐校正才能够得到准确的"海岸线"。长时间序 列潮汐数据的获取相当困难,而目视解译法既能保证提取精度高,也不依赖潮汐数据及现场实测数据^[16]。 因此,本文以尽量降低潮汐带来的误差为前提,采用人工交互方法提取海岸线。

依据相关分类方案^[5,17],结合研究区海岸线分布及当地社会活动特点,本文共将研究区海岸线划分为3 大类、8小类,并引用或制定相应的海岸线提取原则,如表2所示。其中,海岸线确定原则及解译标志对应以 4-3-2(5-4-3)波段组合显示的 LandSat TM(OLI)影像。

以改进的归一化水体指数(MNDWI)直方图为基础,采用直方图阈值分割法进行海陆阈值分割,得到初步水边线。MNDWI由下式给出^[18]:

$$MNDWI = (L_{Green} - L_{Mir}) / (L_{Green} + L_{Mir}), \qquad (1)$$

式中, L_{Green}和L_{Mir}分别为绿光波段与中红外波段像元亮度值, 在TM 传感器中分别对应 2、5 波段, 在OLI 传感器中分别对应 3、6 波段。

表 2 湛江东北海岸线解译标志及确定原则

Table 2	Interpretation key	ys and delinea	tion of different	types of	coastlines in	northeast	Zhanjiang
---------	--------------------	----------------	-------------------	----------	---------------	-----------	-----------

岸线类型	利用方式	确定原则	解译标志
自然海岸	基岩岸线	基岩海岸通常岸线较曲折,有突出的海岬或深入陆地的小海湾,近岸礁石呈灰白色,海岸位置不受潮汐影响。取基岩向海外边界为岸线位置所在 ^[5] 。	
	生物岸线	湛江地区海岸带植物主要为红树林,红树林在影像中呈红色、成片分布、纹理光 滑、有立体感且形状不规则。以植被向陆一侧内边缘为岸线位置所在 ^[5] 。	
	砂质岸线	砂质海滩常形成一条与岸近似平行且狭窄的滩脊,干燥部分呈亮白色,含水量较高时稍暗。取其靠陆一侧人工建筑物、绿色植被或基岩等不易受潮汐影响的标 志物外缘为岸线位置所在 ^[17] 。	
	粉砂淤泥质岸线	粉砂淤泥质海滩形状不规则且宽度很大。取靠其陆地一侧人工建筑物、绿色植被或基岩等不受潮汐影响的标志物外缘为岸线位置所在 ^[17] 。	
人工海岸	围垦养殖岸线	围垦养殖岸线指用于养殖、围垦种植或碱晒的人工围堤。取上述无法被大潮高 潮淹没的人工建筑物外围为岸线位置所在 ^[5,7] 。	<u> A</u>
	工程建设岸线	工程建设岸线包括港口、丁坝以及内部为工业或住宅用地的堤坝等。取上述人 工建筑物外围为岸线位置所在 ^[7] 。	
河口海岸	自然过渡河口岸线	河口区域由海向陆若无桥梁等人工建筑物,则划定为自然过渡河口海岸。以河 口突然展宽处的河流两岸连线为岸线位置所在。	
	人工分界河口岸线	河口区域由海向陆若有桥梁等人工建筑物,则划定为人工分界河口海岸,以河口 由海向陆首个人工建筑(道路、桥梁或闸门等)为岸线位置所在。	-

采用直方图阈值分割法进行海陆阈值分割时,1989年、2000年、2005年、2009年、2013年及2017年 MNDWI影像海陆分割阈值分别为0.302、0.298、0.321、0.307、0.125、0.114,通过以上阈值可将各年份 MNDWI影像分为小于阈值的陆地部分及大于阈值的水体部分,对二值化图像进行栅格矢量转换等操作可 得到初步水边线,但并非最终海岸线。依据本文海岸解译标志及确定原则(表2),工程建设岸线、人工分界 河口岸线与基岩岸线均不受潮汐影响,可直接保留所提取的对应水边线作为海岸线所在^[17];对于其余利用 类型海岸线,则需结合表2及Google Earth影像等,采用目视解译方法进行提取。目视解译法具有提取精 度高及对现场实测数据的非依赖性等特点。 本文在海岸线提取误差分析中采用点线距离法,选择空间位置长期稳定的基岩岸线或防潮堤等作为岸 线点,用 GPS 接收机实测其位置信息,通过计算岸线点实测位置与本文所提取相应位置岸线的垂向距离,可 得出岸线均方根误差值(RMSE),公式如下^[19]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{D_1^2 + D_2^2 + D_3^2 + \dots + D_n^2}{n}},$$
(2)

式中:n为岸线点数量,D为岸线点到待评估海岸线的垂向距离。

经计算,本文提取校正的2017年海岸线均方根误差为26.4m,误差小于1个像素,达到对湛江东北海岸 线开展后续变迁研究分析的标准。

1.4 海岸线变迁研究方法

1) 基线法

数字化海岸线分析系统(Digital Shoreline Analysis System, DSAS)软件可实现对某一时期内海岸 线时空变率的估算^[20-21]。本文基于 DSAS 5.0 软件, 使用 EPR、LRR 对湛江东北海岸线时空变化进行分 析。由于研究区海岸线复杂曲折, 而 DSAS 软件对 演变剧烈的复杂海岸线分析误差较大, 故本文对岸线 采取分段处理, 设置相邻剖面平均间隔为 200 m。

2)海岸线类型多样性指数与利用程度综合指数法

参考土地利用程度综合指数分级赋值^[22]及毋 亭^[23]对该指数在海岸线利用程度研究方面的应用, 并结合研究区人类活动特点及不同岸线利用类型受 人为影响的强度,本文对不同岸线利用类型赋予相应 人力作用强度指数,如表3所示。

通过构建海岸线类型多样性指数 I_{CTD} (Index of Coastline Type Diversity)与海岸线利用程度综合指数 I_{CUD} (Index of Coastline Utilization Degree),分别对近 30 a 湛江东北海岸线开发利用类型多样化特征、人类 活动对海岸带的影响特征进行描述。公式如下^[23]:

$$I_{\rm CTD} = 1 - \sum_{i=1}^{n} l_i^2 / \left(\sum_{i=1}^{n} l_i\right)^2 \qquad I_{\rm CTD} \in (0,1),$$
(3)

$$I_{\text{CUD}} = \sum_{i=1}^{n} (A_i \times C_i) \times 100, \qquad (4)$$

式中:n 为海岸线类型数;l_i为第 i 种类型的岸线长度;A_i和C_i均为无量纲量,分别代表第 i 类岸线的人力作 用强度指数和该类海岸线长度占比。

2 海岸线时空变迁及驱动力分析

2.1 大陆岸线变迁

利用 ENVI 和 ArcGIS 软件,对近 30 a 湛江东北大陆海岸线长度、岸线利用类型结构、岸线类型多样性指数 I_{CTD}、岸线利用程度综合指数 I_{CUD}等进行分析,结果如图 2 和图 3 所示。

由图 3a 可知,近 30 年 6 期大陆海岸线全长分别约 276.97、293.52、299.16、302.94、310.07、304.53 km,其

different coastline types				
岸线类型	利用方式	人力作用强度指数		
	粉砂淤泥质岸线	1		
白桦海巴	生物岸线	1		
日巛傅戶	基岩岸线	1		
	砂质岸线	1		
人工海巴	围垦养殖岸线	2		
八工酉庄	工程建设岸线	3		
河口海岸	自然过渡河口岸线	1		
仍口母庄	人工分界河口岸线	2		

表 3 不同岸线类型对应的人力作用强度指数

Table 3 Human activity index corresponding to

中 1989—2013 年间大陆海岸线长度持续增长,2013 年后出现下降,近 30 a 整体呈增长趋势,共增长约 27.56 km,平均增长率约 0.98 km/a。如图 3b 所示,近 30 a 湛江东北大陆海岸中自然岸线比例呈现下降趋势,共下降 10.77%,其中 1989—2000 年间自然岸线比例下降最快,降幅达 7.64%。结合图 2、图 3b、图 3c,大陆海岸线多样性与岸线利用程度均持续增长,湛江市区及麻斜海湾几乎全部由人类工程建设岸线构成,围垦海岸长度也不断增长,这表明大陆海岸类型构成趋于复杂,且人类对海岸的开发程度逐渐增强。



图 2 近 30 a 湛江东北大陆不同类型海岸的时空分布

Fig.2 Spatial-temporal distribution of different continental coastline types in northeast Zhanjiang in recent 30 years





Fig.3 Variations in continental coastline length and types in northeast Zhanjiang in recent 30 years

对大陆岸线所生成的共 1 092 条剖面线进行岸线变率计算,得到近 30 a 湛江东北大陆海岸线位置时空 演变如图 4 所示。其中,LRR/EPR 为正,表示岸线向海扩张;LRR/EPR 为负,表示岸线向陆后退。

结合图 4a、图 4b,近 30 a 湛江东北大陆海岸中,约 70.97%的岸段变率处于(±3)m/a之间,即呈相对 稳定趋势;约 26.28%的岸线向海扩张,其中 3.57%的岸线扩张速率大于 30 m/a;2.66%的岸线向陆后退, 其中仅 0.46%后退速率大于 12 m/a。最大变率岸线位于霞山区湛江港码头建设海岸,变率达 94.26 m/a (LRR)。大陆海岸线平均变率为 4.18 m/a (LRR),4.12 m/a (EPR),整体向海扩张,其中霞山区海岸整 体平均变率最大,其次为赤坎区,雷州市与吴川市岸线变率最小。根据图 4c,不同时段上,1989—2000 年 大陆海岸平均变率最大,约 6.48 m/a,2013—2017 年变率最小,约 0.50 m/a,说明早期人类活动对湛江东 北大陆海岸线影响较为剧烈,而近 10 a 大陆沿岸围填海工程规模受到有效管控,海岸线扩张速度大大 降低。



图 4 近 30 a 湛江东北大陆海岸线位置时空演变

Fig.4 Spatial-temporal changes of the continental coastline in northeast Zhanjiang in recent 30 years

近 30 a 典型大陆海岸变迁区段如图 5 所示。其中,图 5a 显示在鉴江入海口自然淤积与围填海活动的 共同作用下,该处海岸线共向海推进约 1.61 km²,并且由于滨海交通建设,该处原自然过渡河口海岸向人工 分界河口海岸类型发生转换;图 5b 显示霞山区湛江港围填海工程导致海岸线长度增加且海岸位置不断向海 推进,共侵占水域面积约 5.83 km²;图 5c 显示 1989—2000 年间麻章区太平镇红树林滩涂被改造为养殖池, 导致原生红树林面积骤减、斑块破碎;图 5d 显示雷州市附城镇部分粉砂淤泥质海岸随着人工红树林面积的 增加,逐渐转换为生物海岸类型。



Fig.5 Typical continental coastlines changes in northeast Zhanjiang in recent 30 years

2.2 海域主要岛屿岸线变迁

本文选取湛江东北海域 5 个主要岛屿,对岛屿海岸线长度、岸线利用类型结构、岸线类型多样性指数 *I*_{CTD}、岸线利用程度综合指数 *I*_{CUD}等进行定量分析,结果如图 6 和图 7 所示。



图 6 近 30 a 湛江东北海域岛屿岸线利用方式的时空演变

Fig.6 Spatial-temporal evolution of island coastline utilization in the northeast Zhanjiang in recent 30 years





Fig.7 Variations in island coastline lengths and types in northeast Zhanjiang in recent 30 years

如图 7a 所示,近 30 年 6 期岛屿海岸线全长分别约 301.17、303.24、311.47、318.18、322.14、316.61 km,其中 1989—2013 年间岛屿海岸线长度持续增长,2013 年后出现下降,近 30 a 整体呈增长趋势,共增长约 15.44 km,平均增长率约 0.51 km/a。图 7b 显示近 30 a 间岛屿自然海岸占比呈现下降趋势,共下降9.67%,其中 2009—2017 年间下降速度最快,1989—2000 年下降最慢。结合图 6、图 7b、图 7c,岛屿岸线多样性与岸 线利用程度整体上均呈增长趋势,表明岛屿海岸类型构成趋于复杂,且整体上所受人类干扰程度不断增强。由于 2000 年后南三岛沿岸部分围垦养殖用地被还原为粉砂淤泥质海滩,导致该岛岸线 *I*_{cuD}指数在 2000 年后由现下降,其余各岛海岸线 *I*_{cuD}指数在近 30 a 间均呈现较为一致的增长趋势,对应其余各岛海岸线受到 人类干扰程度的不断增强。对图 7c 中 2017 年各岛屿 *I*_{cuD}指数进行对比,发现各岛屿 *I*_{cuD}值大小排序如下:东海岛>硇洲岛>特呈岛>东头山岛>南三岛,即东海岛北部岸线受人类活动干扰程度最大,整体由生物、基岩岸线转变为工程建设岸线,东头山岛海岸受人类干扰最小,自然度最高。

对岛屿岸线所生成的共1012条剖面线进行岸线变率计算,得到近30a湛江东北海域岛屿岸线位置的时空分布如图8所示。根据图8a与图8b,近30a岛屿岸线中,约75.74%的岸线保持稳定,变率处于(±3)m/a之间;20.00%的岸线向海扩张,其中0.99%的岸线扩张速率大于30m/a;4.06%的岸线向陆后退,其中仅0.40%的岸线后退速率大于12m/a。最大变率岸线位于东海岛中北部工业园区海岸,变率达66.44m/a(LRR)。岛屿岸段整体变率平均值为2.24m/a(LRR)、3.79m/a(EPR),海岸线整体向海扩张。除特呈岛

岸线由于特呈码头工程建设处于轻度向陆后退趋势外,其余岛屿海岸均以向海扩张趋势为主,其中南三岛海 岸由于围垦养殖活跃,平均向海扩张速率最大,其次为东海岛海岸。根据图 8c,不同时段上,2009—2013 年 岛屿岸线变率最大,2000—2005 年变率最小。





Fig.8 Spatial-temporal variations in locations of island coastline in northeast Zhanjiang in recent 30 years

近 30 a 典型岛屿海岸变迁区域如图 9 所示。其中,图 9b 显示近年来特呈岛沿岸红树林普遍处于退化 状态,红树林生物海岸占比下降幅度高达 11.06%,这是由于特呈岛红树林外缘多年来受海浪严重侵蚀造成 的^[24];图 9c 显示近 10 年间,在工业项目影响下,东海岛中北部原曲折分布的自然岸线变为相对平直的工程 建设岸线,且不断向海迁移,围填海面积平均增长速率约 1.26 km²/a。





Fig.9 Typical island coastlines variations in northeast Zhanjiang in recent 30 years

2.3 岸线变迁分析

随着新港口建设、围垦养殖等人类活动的开展,近 30 a 湛江东北海岸线长度整体呈增长趋势,海岸线变 迁方向整体以向海扩张为主;由自然海岸向人工海岸的岸线类型转换现象十分频繁,自然岸线锐减,岸线利 用类型构成趋于复杂,且岸线所受人类干扰程度不断增强。

对比湛江东北大陆、岛屿海岸线变迁规律可发现,大陆海岸线于 1989—2000 年间自然岸线比例下降最快,岸线变率最大,岛屿岸线则于 2009—2017 年间自然岸线比例下降最快,岸线变率最大。这表明湛江东北海岸带开发普遍早于岛屿海岸带,而岛屿海岸带近年来受到人类工程活动影响不断增强,尤其是东海岛北部区域。

湛江东北大陆、岛屿海岸线长度出现一致的变化趋势,即 2013 年以前海岸线长度大幅增长,2013—2017 年间海岸线长度缩短。人类对海岸的开发建设对海岸线长度的影响有两种情况:一方面,填海工程会使海岸 线向海一侧扩张,进而增加海岸线长度;另一方面,若将蜿蜒、不规则的自然岸线开发为较为平直的人工岸线 则可能会导致该岸段长度缩短。综合近 30 a 湛江东北海岸线长度及人工开发程度的变化,2013 年以前海岸 线长度大幅增长原因主要为围填海工程开发,2013—2017 年间海岸线长度缩短,是由于该时段填海工程规 模减小,以及不规则的自然岸线被开发为较为平直的人工岸线。

综合分析可知,近 30 a 湛江东北海岸线整体长度增长、自然岸线锐减及岸线摆动剧烈的主导因素为人 类围填海工程活动。在湛江经济发展需求、沿海地价愈发高昂、围填海成本相对低廉等多重因素驱使下, 2003—2015年间湛江湾沿岸多处围填海工程建设陆续开展:2003—2007年,湛江港宝满港区建设完成; 2007—2012年,东海岛东北部多处码头建设完成;2012—2015年,湛江东海岛新区码头建设完成;而 2015年 至今,湛江港、东海岛工业园等多处工程建设岸线仍处于摆动状态。

结合数据及相关历史资料,湛江港宝满港区、东海岛中北部工业园区分别为近 30 a 湛江东北大陆、岛屿 所受人类围填海工程活动影响最为显著的海岸区域,两处岸线长度均增加显著,自然海岸比例下降,且海岸 线大大向海推进。东海岛中北部海岸线多年处于重度向海扩张状态,这是由于新填海工程项目正围绕东海 岛中北岸陆续展开:宝钢广东湛江钢铁基地项目、广东中科炼化一体化项目及巴斯夫湛江新型一体化生产基 地项目先后落户东海岛中北岸,共同形成了当前东海岛中北部工业集群。作为粤西乃至整个广东省重大工 业转移重镇,东海岛中北部产业园区围填海工程在未来短期内仍不会停止,东海岛自然岸线占比将进一步减 少,由自然岸线向工程岸线的岸线类型转换将更加频繁。

湛江东北多年围填海工程所带来的影响是错综复杂的。一方面,湛江东北地区系列围填海工程活动对 缓解湛江沿岸土地供求矛盾、获取社会和经济效益、推动城市高速发展具有重要意义。另一方面,湛江东北 围填海工程不可避免地造成当地自然海岸比例的下降,沿岸滩涂面积的骤减,对当地红树林生态环境、海湾 水动力、近岸海域水质、近海渔业资源等方面带来负面影响,引发经济发展与海岸带自然环境保护的矛盾与 冲突。其中,雷州半岛红树林存在养殖池塘侵占、人为破坏、病虫害等问题,亟待修复。而湛江湾是天然港 湾,人为粗放开发利用导致岸线破碎化,利用率低下等问题,与湛江副省级中心城市定位不符。张志飞等^[2] 认为,在 2003—2015 年湛江港、东海岛等多处大型围填海工程影响下,湛江湾海域面积缩减,纳潮量总体减 小 3.4%,工程附近海域水动力条件变化显著。尽管湛江东北尤其东海岛具备一定围填海潜力,环境容量颇 具优势^[25],但地方政府及沿海居民仍应以长远眼光看待围填海活动对生态环境的影响,围填海建设不应以 生境破坏、海域功能受损为代价,围填海建设应与维护、修复海洋环境有机结合。

近年来,在人为因素渗透影响下,华南多地海岸线长度逐年增加,岸线变迁方向主要以向海扩张为主,且 人工岸线比例明显上升。珠江三角洲海岸线在1998—2003年间变化甚微,而在2003—2008年间,人工岸线 增加显著,且方向上以向海扩张为主,人工造地是珠江三角洲海岸线变迁的主要驱动因素^[26],这与本研究区 域岸线变化趋势及动因相似。综合对比华南地区海岸线变迁情况及驱动因素,可知随着近年来华南多地海 岸线开发利用强度加大,如何科学合理利用海岸资源,促进海岸带空间的科学规划及生态环境的可持续发 展,已成为华南各地沿海城市亟待解决的海岸带共性问题。

3 结 论

对湛江东北海岸线变迁进行长时间序列的动态监测并探究其驱动因素,能为湛江海岸带空间资源的科 学规划与合理利用提供依据。本文利用卫星遥感影像数据,分析了近 30 a 湛江市东北海岸线提取方法以及 岸线时空变迁,主要结论如下:

1)近 30 a 湛江东北大陆海岸线长度共增长约 27.56 km,增长速率约 0.98 km/a,岛屿海岸线长度共增长 约 15.44 km,增长速率约 0.51 km/a。海岸线类型转换较为频繁,自然岸线锐减。大陆和岛屿海岸自然岸线 类型占比分别下降为 10.77%、9.67%。湛江东北海岸线多样性及岸线利用程度指数整体上均呈增长趋势, 表明湛江东北海岸利用类型构成趋于复杂,且受更多地到了人类活动干扰。

2)近 30 a 湛江东北海岸线总体呈向海扩张趋势。其中大陆海岸线平均变率约 4.18 m/a (LRR)、4.12 m/a (EPR),最高变率岸线位于霞山区湛江港码头建设海岸,变率达 94.26 m/a (LRR);岛屿海岸线平均变 率约 2.24 m/a (LRR)、3.79 m/a (EPR),最高变率岸线位于东海岛中北部工业园区海岸,变率达 66.44 m/a (LRR)。

3)岸线变迁存在显著时空差异性。在时间尺度上,研究区岛屿较大陆沿岸经济开发更晚,近几年人类活动对岛屿海岸线的影响逐渐加强,岛屿海岸线摆动愈发剧烈。在空间尺度上,大陆海岸以霞山区与赤坎区岸 段变率最大,岛屿海岸以东海岛、南三岛岸段变率最大;以霞山湛江港码头、东海岛中北部工业园、鉴江入海 口沿岸为代表的多处海岸线变化速率远高于整体平均值,长期处于剧烈变化之中。

随着湛江东北沿海经济不断发展,人类围填海工程活动已成为湛江东北海岸线变迁的主导因素。自然 岸线的破坏与变化对海岸带生态系统稳定性造成了重要影响,因此,充分利用卫星遥感方式监测的优势,加 强海岸带监测频度和力度,可为促进湛江市地方海洋经济和社会可持续发展提供重要技术支撑和有力保障。

参考文献(References):

- [1] 应秩甫,王鸿寿. 湛江湾的围海造地与潮汐通道系统[J]. 中山大学学报(自然科学版),1996(6):102-106. YING Z F, WANG H S. The relationship between fill-block engineering and tidal inlet system response in Zhanjiang Bay[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 1996(6): 102-106.
- [2] 张志飞,诸裕良,何杰.多年围填海工程对湛江湾水动力环境的影响[J].水利水运工程学报,2016(3):96-104. ZHANG Z F, ZHU Y L, HE J. Influences of long term reclamation works on hydrodynamic environment in Zhanjiang Bay[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(3):96-104.
- [3] 李志强. 雷州半岛海岸带生态环境脆弱性初探[J]. 资源开发与市场, 2008, 24(10): 905-907. LI Z Q. Study on ecological environment vulnerability of coastal zone in Leizhou Peninsula[J]. Resource Development & Market, 2008, 24(10): 905-907.
- [4] 国家海洋局 908 专项办公室. 海岸带调查技术规程[M]. 北京: 海洋出版社, 2005: 4-5. State Oceanic Administration People's Republic of China, 908 Project Office. Technical specification for coastal zone investigation[M]. Beijing: Ocean Press, 2005: 4-5.
- [5] 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[J]. 测绘通报, 2011(3): 41-44. SUN W F, MA Y, ZHANG J, et al. Study of remote sensing interpretation keys and extraction technique of different types of shoreline[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2011(3): 41-44.
- [6] 陈军. 中国东部近岸海域光学遥感机理及其在全球变化中的应用[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2014. CHEN J. The optical remote sensing in China eastern coastal zone and application in the global changes[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014.
- [7] 高义, 王辉, 苏奋振, 等. 中国大陆海岸线近 30 a 的时空变化分析[J]. 海洋学报, 2013, 35(6): 33-44. GAO Y, WANG H, SU F Z, et al. Spatial and temporal of continental coastline of China in recent three decades[J]. Haiyang Xuebao, 2013, 35(6): 33-44.
- [8] 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[J].海洋学报,2017,39(5):138-148. CHEN W T, ZHANG D, SHI S J, et al. Research on monitoring coastline changes by remote sensing in muddy coast, central Jiangsu coast[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(5):138-148.

- [9] 黎良财, LU Dengsheng, 张晓丽, 等. 基于遥感的 1987—2013 年北部湾海岸线变迁研究[J]. 海洋湖沼通报, 2015(4): 132-142. LI L C, LU D S, ZHANG X L, et al. Coastline change in the Beibu Gulf of South China Sea using time series LandSat images[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2015(4): 132-142.
- [10] 丁小松,单秀娟,陈云龙,等. 基于数字化海岸分析系统(DSAS)的海岸线变迁速率研究:以黄河三角洲和莱州湾海岸线为例[J].海洋 通报,2018,37(5):565-575. DING X S, SHAN X J, CHEN Y L, et al. Study on the change rate of shoreline based on Digital Coastal Analysis System (DSAS): taking the shoreline of the Yellow River Delta and Laizhou Bay as an example[J]. Marine Science Bulletin, 2018,37(5):565-575.
- [11] KWADWO Y A, KWASI A, WAHAB S L. Short-term shoreline evolution trend assessment: a case study in Glefe, Ghana[J]. Jàmbá: Journal of Disaster Risk Studies, 2012, 4(1): 1-7.
- [12] AEDLA R, DWARAKISH G S, REDDY D V. Automatic shoreline detection and change detection analysis of Netravati-Gurpur Rivermouth using histogram equalization and adaptive thresholding techniques[J]. Aquatic Procedia, 2015, 4: 563-570.
- [13] 林松,俞晓牮,庄小冰,等. 厦门岛海岸线分形特性演变规律的研究[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(1): 121-129. LIN S, YU X J, ZHUANG X B, et al. Fractal characteristic evolution of coastline of the Xiamen Island[J]. Advances in Marine Science, 2020, 38(1): 121-129.
- [14] 孙贵芹, 徐艳东, 林蕾, 等. 基于遥感和 GIS 的烟台芝罘湾海岸线变迁研究[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(1): 140-152. SUN G Q, XU Y D, LIN L, et al. Coastline changes in the Zhifu Bay of Yantai City based on remote sensing and GIS[J]. Advances in Marine Science, 2020, 38(1): 140-152.
- [15] 汤晓龙. 创新港口城市发展模式 建设"一带一路"核心交汇点——以广东湛江为例[J]. 财经理论研究, 2017(4): 17-23. TANG X L. Innovating port city development model and constructing the core intersection of "One Belt and One Road"[J]. Journal of Finance and Economics Theory, 2017(4): 17-23.
- [16] 孙丽娥. 浙江省海岸线变迁遥感监测及海岸脆弱性评估研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2013. SUN L E. Coastline changes monitoring with remote sensing of the Zhejiang Province and research on coastal vulnerability assessment[D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography, SOA, 2013.
- [17] 于杰,陈国宝,黄梓荣,等.近10年间广东省3个典型海湾海岸线变迁的遥感分析[J].海洋湖沼通报,2014(3):91-96.YU J, CHEN G B, HUANG Z R, et al. Changes in the coastline of three typical bays in Guangdong during recent 10 years revealed by satellite image [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2014(3):91-96.
- [18] 徐涵秋.利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005(5): 589-595. XU H Q. A study on information extraction of water body with the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)[J]. Journal of Remote Sensing, 2005 (5): 589-595.
- [19] 刘善伟,张杰,马毅,等. 遥感与 DEM 相结合的海岸线高精度提取方法[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(5): 613-618. LIU S W, ZHANG J, MA Y, et al. Coastline extraction method based on remote sensing and DEM[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(5): 613-618.
- [20] DOLAN R, HAYDEN B, HEYWOOD J. A new photogrammetric method for determining shoreline erosion[J]. Coastal Engineering, 1978(2):21-39.
- [21] 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/OL]. [2021-03-01]. US Geological Survey, 2009. DOI: 10.3133/ofr20081278. https:// pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20081278
- [22] 庄大方,刘纪远.中国土地利用程度的区域分异模型研究[J].自然资源学报,1997(2):10-16. ZHUANG D F, LIU J Y. Study on the model of regional differentiation of land use degree in China[J]. Journal of natural resources, 1997(2): 10-16.
- [23] 毋亭. 近 70 年中国大陆岸线变化的时空特征分析[D]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所, 2016. WU T. Analysis of spatio-temporal characteristics of mainland coastline changes in China in nearly 70 years[D]. Yantai: Yantai Institute of Coastal Zone Research Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [24] 曾群英,刘素青,黄剑坚,等. 特呈岛严重干扰下的红树林林窗边界木特征[J]. 福建林学院学报, 2014, 34(1): 33-37. ZENG Q Y, LIU S Q, HUANG J J, et al. Border tree characteristics of seriously disturbed mangrove gap in Techeng Island[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2014, 34(1): 33-37.
- [25] 熊江. 基于湛江中科炼化项目选址的环保研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012. XIONG J. Based on the location of the project Zhanjiang Zhongke refining environmental studies[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [26] 朱俊凤,王耿明,张金兰,等.珠江三角洲海岸线遥感调查和近期演变分析[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(3): 130-137. ZHU J F, WANG G M, ZHANG J L, et al. Remote sensing investigation and recent evolution analysis of Pearl River Delta coastline[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2013, 25(3): 130-137.

Analysis on Coastline Change of Northeast Zhanjiang in the Last 30 Years Based on LandSat Images

CHENG Yang-yan^{1,2,3,4}, FU Dong-yang^{1,5}, QI Ya-li^{1,5}, LI Zhi-qiang^{1,5}, LIU Bei^{1,5}, YU Guo^{1,5}, HE Lu-xue^{1,5}

School of Electronic and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;
 First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;

3. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China;

4. Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, MNR, Qingdao 266061, China;

5. Marine Remote Sensing and Information Technology Engineering Research Center,

Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: We extracted and obtained the spatial distribution of the coastline in the northeast Zhanjiang Coast by using human-computer interaction technique based on 6 scenes of LandSat TM/OLI images in recent 30 years. The spatial-temporal variations of the coastline and its driving factors are further investigated by combining the End Point Rate (EPR), the Linear Regression Rate (LRR), and the Coastline Type Structure analysis. The total length of the coastline increased during the last 30 years while natural coastline decreased. The coastline categories changed frequently and their utilization types became complicated due to human activities. The results show that the average LRR and EPR of the continental coastline were 4.18 m/a and 4.12 m/a, respectively, with the highest LRR 94.26 m/a. And the ones of the island coastline were 2.24 m/a and 3.79 m/a, respectively, with the highest LRR 66.44 m/a. Furthermore, coastline with the largest changing rate were mainly affected by human activities, which was proved to be the leading factor for the coastline change in the northeast Zhanjiang during the last 30 years. **Key words:** LandSat images; northeast Zhanjiang; coastline variations; EPR; LRR

Received: March 9, 2021