基于Landsat和数字化岸线系统(DSAS)的惠州市海岸线近50年动态变化研究

王同皓[1]，章桂芳[1,2,3]，张珂[1,2,3]，傅强[1]

1. 中山大学 地球科学与工程学院, 珠海 519000;
2. 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广州 510275;
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519000

摘 要：海岸线动态变化反映了海陆边界的进退过程，对沿海地区环境保护与发展规划有重要意义。本研究在惠州市1973年—2019年间6期Landsat卫星影像的基础上，利用人机交互式解译的方法获取6期海岸线数据并统计其长度和类型的变化。在数字化岸线系统（DSAS）中对净移动距离（NSM）、变化率（EPR）以及线性回归率（LRR）进行分析，探讨海岸线动态变化中的潜在驱动因素。结果表明，1973年—2019年期间，惠州市海岸线的总长度由224565 m增加到249656 m，平均NSM为185.46 m，平均EPR为4.04 m/a。1973年—1984年海岸线总体表现为侵蚀特征，1984年以后总体呈趋势，其中1984年—1993年扩张幅度最高，NSM达到100.2 m。此外，不同岸线类型中人工岸线变幅最为明显（8.27%—57.45%），以大亚湾石化区、范和湾北岸围垦养殖段、惠州港、考洲洋段西部围垦养殖段以及临近黄埠镇段等区域为主。其变化原因主要有沿海养殖业的发展，港口、工业区和滨海旅游区的建设以及人口增长和经济发展需求下的建筑用地扩张。部分自然岸线段如巽寮湾段核心旅游区、双月湾东岸和西岸则在整个研究时间段内保持稳定。研究表明人为因素是惠州市近50年来海岸线变化的主要驱动因素，自然因素对海岸线变化影响较小。与整个中国大陆海岸线变化速率相比，惠州市的变化速率并不高。从近期，即2013年—2019年的变化率来看（EPR为2.51%），惠州市海岸线变化趋于稳定，预计未来一段时间内不会大范围向海扩张。

关键词：惠州市，海岸线，遥感，DSAS，动态变化

中图分类号：TP701/P2

引用格式：王同皓，章桂芳，张珂，傅强.2024.基于Landsat和数字化岸线系统(DSAS)的惠州市海岸线近50年动态变化研究.遥感学报，28(3)：689-703

Wang T H, Zhang G F, Zhang K and Fu Q. 2024. Dynamic changes of the Huizhou Coastline in nearly 50 years based on Landsat images and DSAS. National Remote Sensing Bulletin, 28(3):689-703[DOI:10.11834/jrs.20231475]

1 引 言

海岸线是海洋与陆地的分界线，其位置、走向和形态的动态变化反映了陆地与海洋之间的进退关系，是对自然和人类社会等各种动力作用的敏感性响应。海岸线动态变化研究是海岸带环境监测、资源开发与管理等研究的基础，对促进海岸带生态环境的保护和资源的可持续开发具有重要意义（侯西勇 等，2016）。

长期以来，通过野外实地调查进行海岸线研究是常用的方法，在海洋测绘中有着广泛的应用（张晓祥 等，2014）。随着遥感（RS）技术的不断发展，海岸线研究进入了新的时代。遥感技术能够快速、大范围、高效率地提取海岸线，弥补了传统测量方法费时费力费钱的缺点（于杰 等，2009；于彩霞 等，2014；冯永玖 等，2015）。采用多类型卫星数据并结合地形图、潮汐表等非遥感数据，可以对海岸线进行遥感调查与监测（赵

收稿日期：2021-07-19；**预印本：**2023-05-21

基金项目：广东省基础与应用基础研究基金(编号:2019A1515010733)；南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(编号:GML2019ZD0302)；广州市科技计划项目(编号:201707010209)；广东国家公园建设专项资金(编号:2021GJGY026)；广东省基础与应用基础研究基金(编号:2021A1515012514)

第一作者简介：王同皓，研究方向为海岸带遥感。E-mail:wangth6@mail2.sysu.edu.cn

通信作者简介：章桂芳，研究方向为地表过程RS和GIS综合分析。E-mail:zhgfang@mail.sysu.edu.cn

玉灵，2010；Kabir等，2020）。在海岸线变化研究上，利用多时相遥感影像对其进行监测是常用的方法（张霞 等，2014；李刚 等，2019）。影像的分辨率对海岸线的解译和提取有重要影响，使用高分辨率的遥感影像能够得到更准确的结果（李清泉 等，2016；张海涛，2016；Pardo-Pascual等，2018；Saleem和Awange，2019）。

在遥感解译和提取的基础上，地理信息系统（GIS）技术可以对海岸线的变化进行系统研究，量化分析海岸沉积和侵蚀速率，并对海岸管理提出合理建议（Ghosh等，2015）。通过GIS技术揭示海岸线时空变化并统计各项变化数据，在各时间尺度（孙晓宇 等，2014；Hakkou等，2018；Wang等，2019）和空间尺度（侯西勇 等，2016；Moussa等，2019；沈昆明 等，2020）上均有广泛应用。近年来，使用GIS和RS相结合的方式对海岸线进行综合分析的研究大量开展。

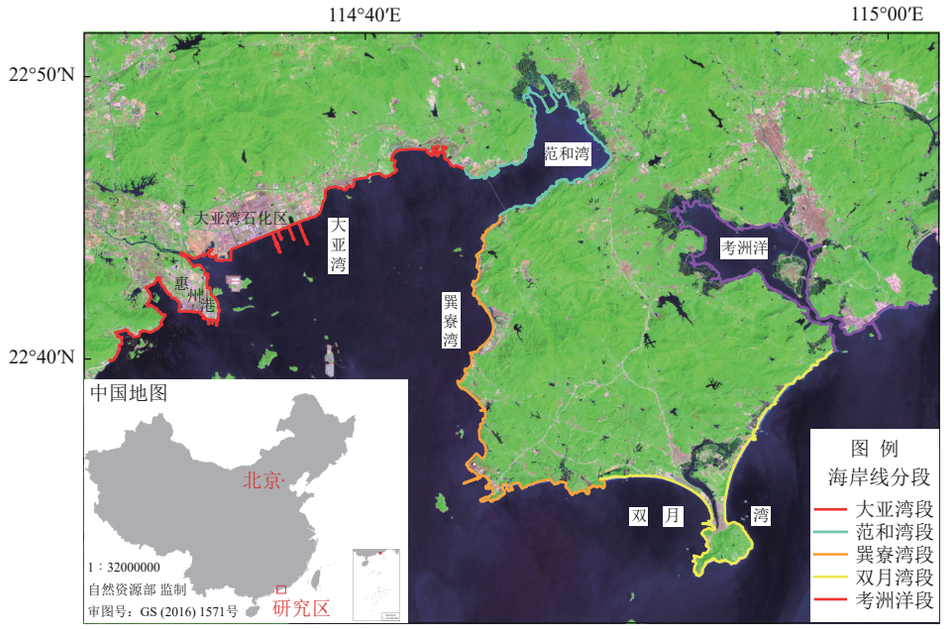
基于RS和GIS的海岸线动态变化的定量分析包括岸线长度，岸线类型，岸线变化速率等多项指标（李梅娜 等，2016；康波 等，2017）。岸线的长度、类型可通过目视解译获得，但岸线变化速率需要专门的定量工具进行计算。DSAS（Digital Shoreline Analysis System）是美国地质调查局（USGS）开发的数字化岸线分析系统，在海岸线定量变化研究中得到较多的应用，通过对DSAS各个指标的分析能够提取研究区域海岸线在不同时间尺度和空间尺度上的动态变化，并结合环境条件分析其动态变化后面的驱动因素（杨燕雄 等，2017；丁小松 等，2018；Muskananfola等，2020；沈昆明 等，2020）。通过DSAS可以计算某地区海岸线整个研究时间段和各个阶段内的短期海岸线速率变化，即长期和短期变化，同时可以通过参数的设置对部分重点区域单独计算速率变化。因此，DSAS可以实现对地区内长期和短期以及不同空间尺度的海岸线监测。

惠州市是广东省重要的沿海城市，位于粤港澳大湾区东部，海岸线较长且连续，在近几十年的发展中已成为了粤港澳大湾区重要的组成部分。针对粤港澳大湾区和广东省海岸线进行的时空演变和分形特征研究中往往会包括惠州地区（朱俊凤 等，2013；杨晨晨 等，2021；钟蕊 等，2021），但由于研究区域尺度较大，并未对惠州市海岸线进行细致的定量研究和驱动因素的深入探讨。另外，也有学者基于遥感技术利用多时相卫星数据对惠州市大亚湾海岸线进行了研究，分析了该区域海岸线变化过程（夏真 等，2000；于杰 等，2009，2014），但是已有研究选取的范围较小，仅限大亚湾海岸，且时间尺度较短，距今已有一定年限，经过近年来的经济发展和环境保护，惠州市海岸线已经产生了显著变化。因此，对惠州市开展全面细致的、较长时间尺度的海岸线动态变化研究十分必要。本研究以Landsat影像为基础对惠州市1973年—2019年间的6个时相的海岸线进行人机交互式解译，结合实地考察后对解译结果进行修正。基于海岸线解译，利用数字化岸线分析系统（DSAS）对海岸线变化进行定量分析，总结海岸线变化特征并分析其驱动因素。

2 研究区概况

惠州市海岸线东部与汕尾市相邻（黄埠镇东头海岸附近），西部连接深圳市大鹏新区（小桂村高山脚），北端至范和湾北岸圭景河入海口，南端为双月湾大星山西南角，海岸线范围约为22°32′40″N—22°50′04″N，114°30′27″E—115°01′33″E。惠州市海岸线类型多样，结构复杂、多内湾和河口（图1），自然岸线以砂质岸线、基岩岸线为主，淤泥质岸线、河口岸线、生物岸线仅在部分地区零星分布，人工岸线包括港口码头岸线、工业区岸线、居民区岸线、围垦养殖岸线、道路、堤坝岸线。

结合惠州市海岸线的走向、利用形式和复杂程度，本研究将该地区海岸线分为5个段落分别进行提取和研究，即大亚湾段（包含大亚湾石化区、惠州港及其相邻岸线）、范和湾段、巽寮湾段（巽寮湾及其周边海岸）、双月湾段（平海湾和红海湾湾仔以南岸线段）和考洲洋段。如图1所示，大亚湾段的起止点为惠州市海岸线最西点（小桂村东山脚，与深圳市相邻）至惠州海湾大桥北端西侧；范和湾段起止点为惠州海湾大桥北端西侧至海湾大桥南端西侧；巽寮湾段起止点为海湾大桥南端西侧至牛湾（双月湾西岸砂质海岸与基岩海岸交界处）；双月湾段起止点为牛湾至湾仔（双月湾东岸东北角）；考洲洋段起止点为湾仔至惠州市海岸线最东点（黄埠镇东头海岸附近，与汕尾市相邻），研究区域的岸线未包括海岛岸线。



审图号：GS (2021) 8843号

（a）研究区在中国海岸带的位置

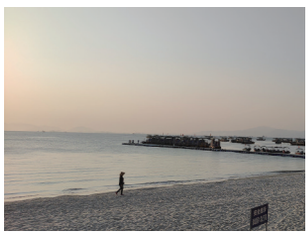
（a）Location of the Huizhou in the Coastal Zone of China

（b）实地考察拍摄大亚湾图像

（b）Picture taken in fieldwork of Daya Bay

（c）实地考察拍摄范和湾图像

（c）Picture taken in fieldwork of Fanhe Bay



（d）实地考察拍摄巽寮湾图像

（d）Picture taken in fieldwork of Xunliao Bay

（e）实地考察拍摄双月湾图像

（e）Picture taken in fieldwork of Shuangyue Bay

（f）实地考察拍摄考洲洋图像

（f）Picture taken in fieldwork of Kaozhou Bay

图1　研究区概况

Fig.1　Introduction of study area

3　数据处理和研究方法

3.1　数据概况

本研究使用的Landsat MSS/TM/OLI_TIRS卫星影像下载于地理空间数据云平台（http：//www.gscloud.cn/［2021-07-19］），共计6景，本研究采用遥感影像基本情况如（表1）所示。遥感数据条带号为121/44，时间跨度为1973年—2019年，基本以10年为间隔，2013年以后的图像选取了距今时间较近的2019年图像。为保证数据在时间上的一致性，各时期图像的成像时间均集中在10月和11月，同时该时期内地区天气状况良好，云量控制在5%以下。遥感影像处理和分析在Exelis Visual Information Solutions公司的ENVI 5.3软件和ESRI公司的ArcGIS 10.4软件上完成。

表1 本研究采用遥感影像基本情况

Table 1 The basic information of remote sensing images in this study

序号	卫星	传感器类型	条带号/行编号	获取日期	空间分辨率/m
1	Landsat 1	MSS	121/44	1973-10-31	79
2	Landsat 5	MSS	121/44	1984-11-12	79
3	Landsat 5	TM	121/44	1993-11-15	30
4	Landsat 7	ETM+	121/44	2003-10-26	30
5	Landsat 8	OLI	121/44	2013-10-05	30/15
6	Landsat 8	OLI	121/44	2019-11-07	30/15

3.2 数据预处理

首先对遥感数据进行FLASSH大气校正和辐射定标，然后以2019年Landsat 8 OLI图像为参考基准对历年遥感影像进行几何精校正，共选取50个地面控制点并控制误差低于0.5个像元。此外，对2013年和2019年影像进行了多光谱波段和全色波段的图像融合处理。

3.3 岸线分类和解译

本研究将一级岸线分为自然岸线和人工岸线，其中自然岸线分为基岩岸线、砂质岸线、淤泥质岸线、河口岸线、生物岸线，人工岸线则分为港口码头岸线、工业区岸线、城镇居民区岸线、围垦养殖岸线、人工堤坝和道路岸线（表2）。

表2 惠州市各时期各类海岸线长度变化

Table 2 Changes of Huizhou various coastlines during each period

/m

海岸线类型		年份					
		1973	1984	1993	2003	2013	2019
自然岸线	基岩岸线	89073	88944	61831	60701	49125	44913
	砂质岸线	66344	67675	65789	56830	55672	53516
	淤泥质岸线	31888	24690	2839	1249	1265	1964
	河口岸线	3420	2816	3114	2932	3616	2802
	生物岸线	15270	16102	8236	3669	3234	3033
	小计	205995	200227	141809	125381	112912	106228
人工岸线	港口码头岸线	—	—	13478	13491	14356	21211
	工业区岸线	—	—	4957	15086	24395	26932
	居民区岸线	—	—	3179	9473	11181	12602
	围垦养殖岸线	16949	20525	54634	64362	60063	44234
	道路、堤坝岸线	1621	4888	14692	11932	32235	38449
	小计	18570	25413	90940	114344	142230	143428
合计		224565	225640	232749	239725	255142	249656

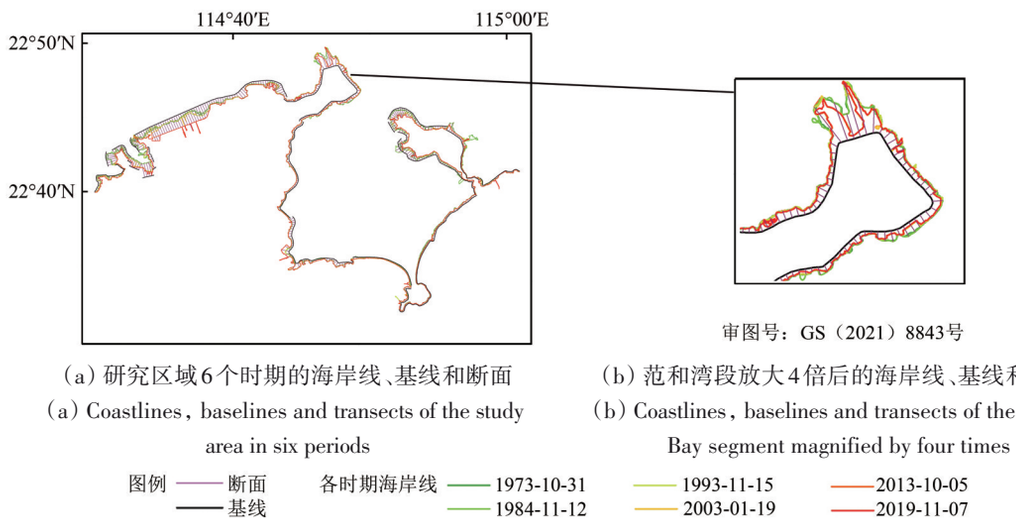
鉴于惠州市海岸线曲折，多内海，淤泥质岸线长，部分海域水陆界限难以区分等特点，本研究的岸线解译采取遥感影像人机交互式解译并结合实地考察的方法。首先参考假彩色合成影像的色调、纹理、地貌和周边地物等信息进行岸线分类；然后根据不同岸线类型确定岸线位置：基岩岸线一般取水边线（陡崖基部）；砂砾质岸线一般取滩脊顶部线、植被线；淤泥质岸线一般取植被线、杂物分布痕迹线；生物岸线一般取植被斑块向陆一侧的边线（侯西勇 等，2016）；河口岸以潮流界为限（朱俊凤 等，2013）；人工岸线参照建筑体的外部边界。初步解译后对解译成果进行验证，并对某些不确定的岸线进行实地确认，最后获得最终的岸线解译结果。需要说明的是，本文岸线解译主要为大陆岸线，未对盐洲岛等岛屿海岸线进行提取。

3.4 数字化海岸线分析系统

数字化海岸线分析系统DSAS（Digital Shoreline Analysis System）是美国地质调查局（USGS）研发的用以分析海岸线时空变化速率的分析系统（Thieler等，2009）。它以插件的形式在ArcGIS软件中运行，对各时期岸线进行计算后可以得到净

移动距离NSM（即最早时期的海岸线与最晚时期的海岸线之间的间隔距离）、终点变化率EPR（即海岸线变化的年速率）和线性回归变化速率LRR（即拟合所有断面上海岸线点的最小二乘回归线）等结果，可以计算出海岸线的时空变化速率（Himmelstoss等，2018）。由于DSAS良好的模拟效果、灵活的参数设置和准确的数据统计，已经成为国内外海岸线研究中重要的定量分析工具（Amrouni等，2019；沈昆明 等，2020）。

利用DSAS插件计算海岸线变化需要提前对海岸线（Shoreline）、基线（Baseline）和横断面线（Transect，后简称为断面）进行设置（Himmelstoss等，2018）。本研究中海岸线为遥感解译所得的6条历年岸线，基线为人工绘制接近平行于2019年海岸线某一侧的矢量线段。在基线的设置上考虑到惠州市海岸线十分曲折的特点，摒弃了简单沿海岸线走向变化进行设置的方法，改为依据海岸展布情况对不同段落分别设置基线的方式，并选择合适的间隔距离（基线与海岸线之间）。同时，在向海和向陆侧均设置基线并对各段进行分组，使海岸线变化可以分组呈现结果（图2（a）和图2（b））。断面，即基本垂直于基线并连接各时期海岸线的线段（图2（a）和图2（b））。在断面设置上，每两个断面线间隔距离为100 m。断面线延伸距离采用各自分组设置的方式来适应不同区域海岸线跨度大小的差异问题，解决了复杂海岸区域断面线延伸错乱的问题，从而使整个区域内生成的断面线准确穿过历年岸线。同时，断面线设置为剪切展示，防止出现断面线过长，相互交叉的问题（图2（a）和图2（b））。本研究以惠州市西侧海岸为起点，自西向东的5个段落共生成1707条断面，其编号分别是：大亚湾段断面范围为1—421，范和湾段断面范围为422—641，巽寮湾段断面范围为642—930，双月湾段断面范围为931—1282，考洲洋段断面范围为1283—1707。为清晰显示海岸线、基线和断面的设置情况，图2（b）为范和湾段放大4倍后的图像，图中黑色线条为基线，紫色线条横断面线，各时期海岸线用红—绿渐变浅杀表示。由断面与各时期岸线的交点可以计算整个研究时期海岸线的NSM、EPR、LRR等数据的变化，各个阶段内的短期海岸线速率变化则可以选择两条相邻时期的岸线作为DSAS中的海岸线参数进行计算。此外，考虑到部分地区人类活动强烈，本研究还对重点监测岸线段单独设置了基线来统计其速率变化。



（a）研究区域6个时期的海岸线、基线和断面
（a）Coastlines，baselines and transects of the study area in six periods

（b）范和湾段放大4倍后的海岸线、基线和断面
（b）Coastlines，baselines and transects of the Fanhe Bay segment magnified by four times

图2 数字化岸线分析系统参数情况
Fig. 2 Parameters of DSAS

4 结 果

4.1 海岸线长度和类型变化

分析1973年—2019年间6期海岸线的长度可知，1973年—2019年惠州市海岸线长度从224565 m增加到249656 m，增加了25901 m。惠州市海岸线的长度在各时期内表现出持续增长后减少的趋势：1973年—2013年该市海岸线长度一直处于增长状态，共计增长了30577 m，而2013年—2019年该

市海岸线则减少了5486 m（表2）。

从岸线类型上看（表2和图3），1973年—2019年，惠州市自然岸线长度从205995 m减少到106228 m，减少了99767 m，其中基岩岸线由89703 m降至44913 m，减少了约50%，淤泥质岸线仅剩6.16%，为1964 m，生物岸线现存3033 m，仅保留了19.9%。人工岸线从18570 m上升到143428 m，所占比例从8.27%增加到57.45%（表3），其中，港口码头岸线、工业区岸线、居民区岸线、和道路、堤坝岸线均持续增加，围垦养殖岸线前期增长，2003年后则持续减少。自然岸线中砂质岸线长度逐渐变短但变化相对较小，河口岸线基本保持稳定。

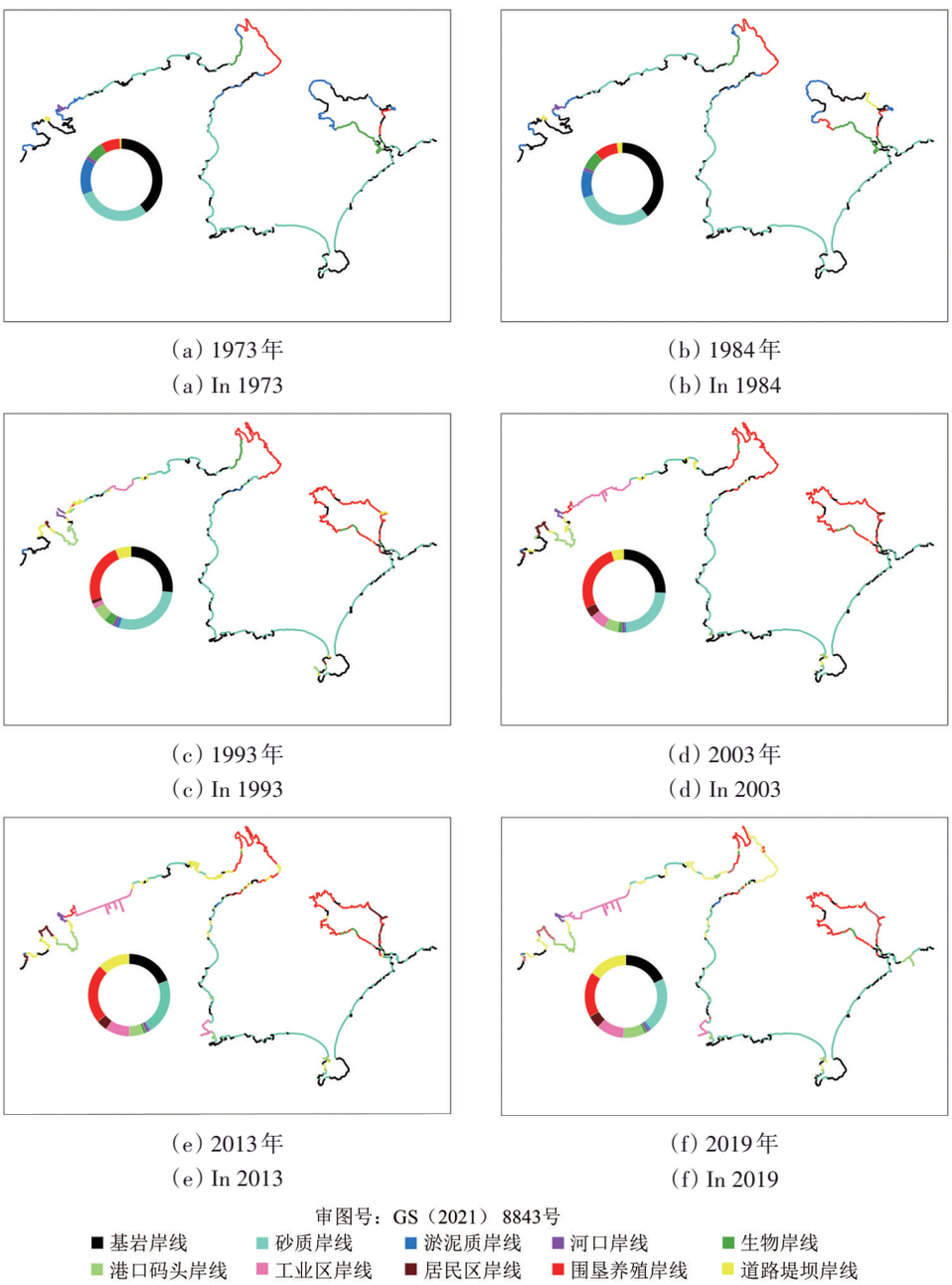


图3 惠州市各时期岸线分类结果

Fig. 3 Classification results of Huizhou coastlines in each period

从发展过程来看，海岸线类型在1973年—1984年间处于一个较稳定的状态，以自然岸线为主，人工岸线类型较少（表2），说明人类活动对该时期的海岸影响较小；1984年—1993年间，随着当地人口的增加和经济发展需求（惠州市统计局和国家统计局惠州调查队，2020），惠州市海岸

线总长度从225640 m增长到232749 m，但是自然岸线从200277 m骤减到141809 m，而人工岸线中的港口码头岸线、工业区岸线和居民区岸线则从无到有，围垦养殖岸线和道路、堤坝岸线和也有一定程度的增长（表2）；1993年—2003年间，惠州市海岸线总长度增长较少，但是自然岸线向人工岸线转换的趋势没有改变（表3），以工业区岸线和围垦养殖岸线的增加为主，工业区岸线增加了10129 m（由4957 m增长到了15086 m），围垦养殖岸线增加了9728 m（从54634 m增加到64362 m）（表2）；2003年—2013年，惠州市自然岸线比例和人工岸线比例仍分别表现出减小和上升的趋势，人工岸线长度占比达到55.74%（表3），超过了自然岸线；2013年—2019年惠州市海岸线总长度基本不变，其中基岩岸线减少了4212 m，而工业区岸线则相应增加2537 m（表2），这与考洲洋出海口右侧工业区的建设有关，曲折的基岩岸线被改造为平直的工业区岸线，而其他的人工岸线则互有消长（图3）。

表3　惠州市各时期各区段海岸线长度变化

Table 3　Changes of coastline length in each segment during each period

区域	1973年			1984年			1993年		
	自然岸线/m	人工岸线/m	人工岸线占比/%	自然岸线/m	人工岸线/m	人工岸线占比/%	自然岸线/m	人工岸线/m	人工岸线占比/%
大亚湾段	58668	1621	2.7	55595	1665	2.91	31029	29907	49.08
范和湾段	17889	13809	43.56	19195	14086	42.32	15223	21932	59.03
巽寮湾段	38899	—	0	38030	—	0	38817	—	0
双月湾段	37570	—	0	37725	—	0	37230	3909	9.5
考洲洋段	52969	3140	5.6	49682	9662	16.28	19510	35192	64.33
惠州市	205995	18570	8.27	220227	25413	10.35	141809	90940	39.07

区域	2003年			2013年			2019年		
	自然岸线/m	人工岸线/m	人工岸线占比/%	自然岸线/m	人工岸线/m	人工岸线占比/%	自然岸线/m	人工岸线/m	人工岸线占比/%
大亚湾段	23120	43144	65.11	17308	54875	76.02	14721	52654	78.15
范和湾段	8880	29132	76.64	4314	36118	89.33	3862	35387	90.16
巽寮湾段	38091	1325	3.36	34767	9968	22.28	33589	10879	24.46
双月湾段	36157	4156	10.31	36807	3784	9.32	36518	3658	9.1
考洲洋段	19133	36587	65.66	19716	37485	65.53	17538	40850	69.96
惠州市	125381	114344	47.7	112912	142230	55.74	106228	143428	57.45

4.2　海岸线速率变化

通过DSAS分别计算1979年—2019年间惠州市5个分段及重点地区的海岸线变化指标：NSM、EPR和LRR，数据统计在表4中呈现，选取EPR作为主要结果如图4所示。

由表4，惠州市海岸线的平均NSM为185.46 m，平均EPR为4.04 m/a，平均LRR为4.67 m/a，整体表现为向海推进，但是不同区域变化特征差异较大（图4）。各个分段的海岸线长期变化情况分述如下：

4.2.1　大亚湾段

由表4可知，1973年—2019年大亚湾段的NSM为440.06 m、年变化速率9.56 m/a（EPR）和11.1 m/a（LRR），远高于惠州市海岸线NSM和EPR的平均值，是5个区段中变化最为剧烈的岸线段。大亚湾段岸线明显向海扩张的区域为石化区和惠州港，其中，石化区岸线段平均NSM达到1068 m，为整个惠州市变化最大的区域，最大增长速率出现在石化区东部码头（图4中b点）。惠州港段海岸线同样以较大幅度向海扩张（表4），最大增长速率出现在惠州港南部（图4中a点）。此外，明显后退的区域为淡澳河河口附近（图4），该段海岸线的后退分别与2008年开展的淡澳河环境整治活动有关。

各短时期变化上（图5），大亚湾段海岸线变化与惠州市的变化趋势相似，表现为先后退再持续扩张的特征：1973年—1984年为后退阶段，海

岸线NSM为-30.09 m，而1984年—2019年为持续扩张阶段，期间NSM分别为169.6 m，58.58 m，206.24 m，41.8 m，重点监测区域如惠州港和大亚湾石化区分别在1984年—1993年和2003年—2013年扩张最为激烈，至2019年上述两段岸线总长度占大亚湾段岸线总长度的比例分别达到了13.02%和31.68%，是大亚湾段人工岸线最为集中的区域。

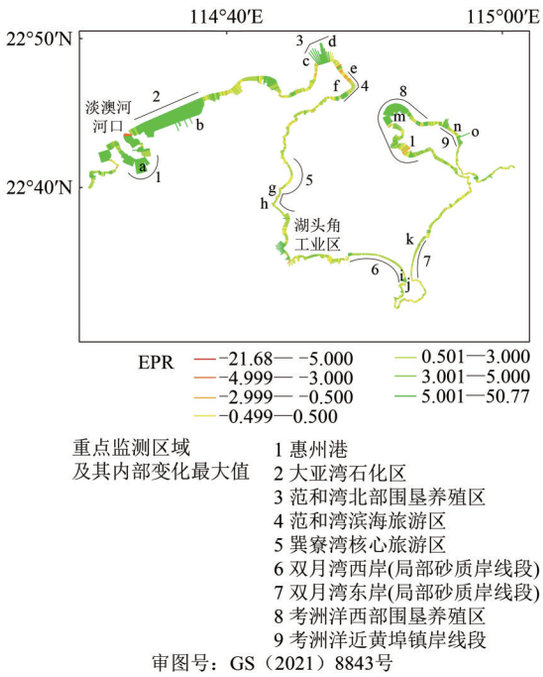


图4 惠州市1973年—2019年海岸线EPR

Fig. 4 EPR of Huizhou coastline during 1973 and 2019

表4 1973年—2019年惠州市及其重点监测区域海岸线NSM、EPR和LRR

Table 4 NSM, EPR and LRR of Huizhou coastline and its key monitoring regions from 1973 to 2019

各区域及重点监测岸线段		NSM/m	EPR/(m/a)	LRR/(m/a)
大亚湾段	全区	440.06	9.56	11.1
	惠州港	584.78	12.71	14.45
	石化区	1068	23.21	26.17
范和湾段	全区	117.02	2.54	2.97
	围垦养殖区	870.94	18.93	21.93
	滨海旅游区	81.49	1.77	2.19
巽寮湾段	全区	66.04	1.44	1.46
	核心旅游区	40.11	0.87	0.84
双月湾段	全区	53.89	1.2	1.27
	西岸	98.91	2.22	2.46
	东岸	66.97	1.46	1.57
考洲洋段	全区	158.55	3.46	4.16
	围垦养殖区	267.88	5.82	7.21
	近黄埠镇段	167.84	3.85	4.07
全市		185.46	4.04	4.67

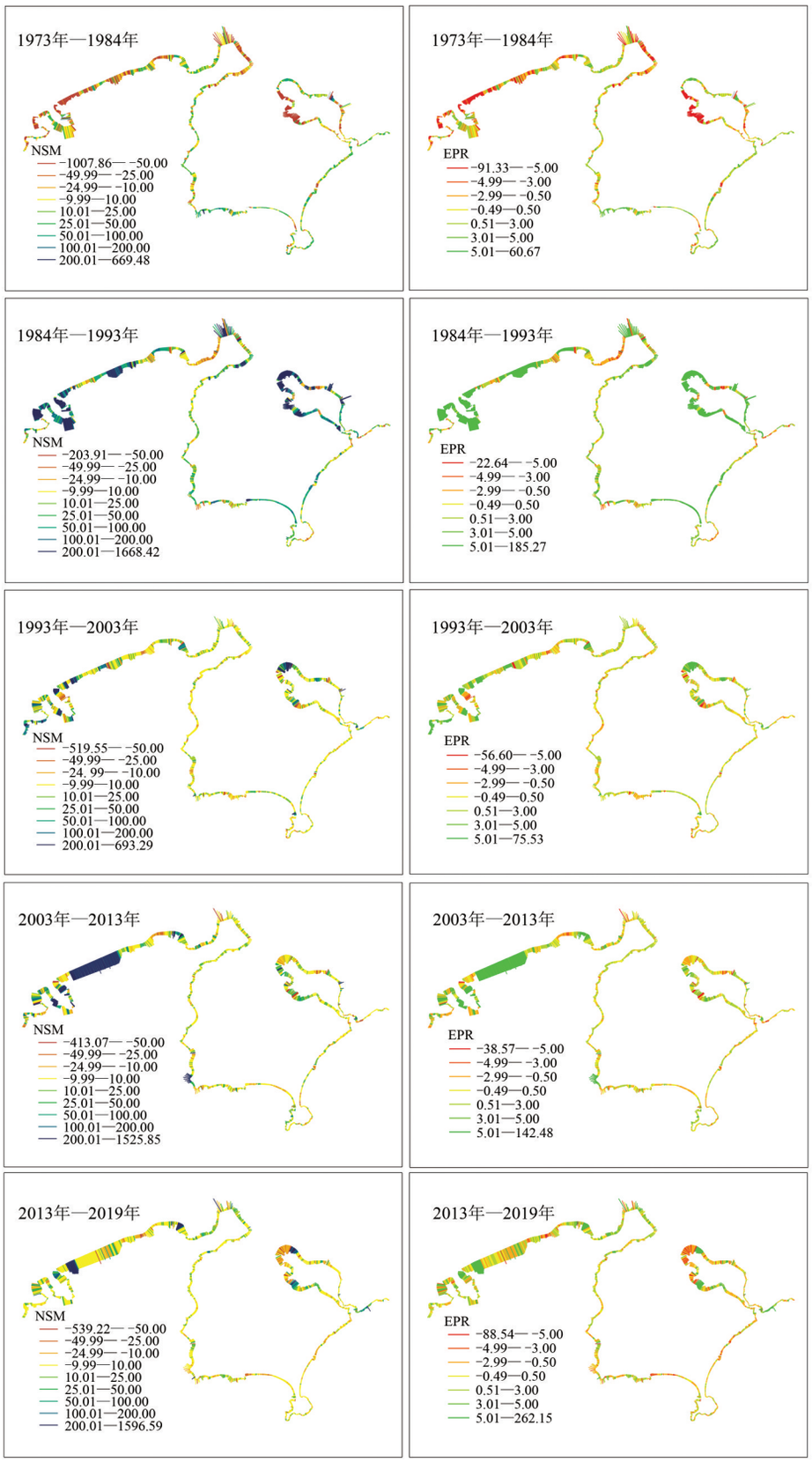
从岸线类型变化来看，大亚湾段主要是淤泥质、基岩、砂质等岸线转变为人工岸线（图3）：1973年—2019年大亚湾段人工岸线的比例由2.7%增长到78.15%，典型表现为大亚湾石化区、惠州港区以及居民区以填海造陆为主要形式的向海扩张（图4）。大亚湾段岸线的变化与该区域发展定位有关，近50年来该段海岸不断开展港口和工业区建设。同时该区域（大亚湾区）人口也逐渐增长，1993年—2019年该地区历年常住人口由4.56万增至23.83万（惠州市统计局和国家统计局惠州调查队，2020）。

4.2.2 范和湾段

范和湾段1973年—2019年的NSM为117.02 m，年变化速率2.54 m/a（EPR）和2.97 m/a（LRR）（表4）。在范和湾段重点监测区域中，北部围垦养殖区域年变化速率达到了18.93 m/a（EPR），是惠州市围垦养殖区域中变化最大的段落（图4中的3分段），最大增长速率出现在三连洲（图4中d点），EPR为47.72 m/a，最大侵蚀率出现在石角头附近（图4中c点），EPR为-0.22 m/a。该区域速率较高的原因是当地修建围垦堤坝将水中沙洲与陆地相连，导致该段岸线急速向海扩张。此外，该段东部滨海旅游区岸线速率变化较为稳定，最大增长和最大侵蚀速率分别出现在青洲仔东侧（图4中f点）和近芙蓉村海岸（图4中e点）为7.45 m/a、-1.65 m/a（EPR）。

1973年—2019年间，范和湾段海岸线总体变化表现为前期向陆后退，后期急速向海推进，并逐渐稳定（图5）。其中，1984年—1993年为范和湾北部围垦养殖区快速建设时期，NSM高达515.76 m，EPR为57.27 m/a。范和湾早期（1973年—1984年）海岸线主要为淤泥质岸线（图3），潮间带宽阔。1973年该区域人工岸线比例43.56%，2019年人工岸线比例增长到90.16%（表3）。

与早期同为淤泥质海岸为主的考洲洋段相比，范和湾段海岸线人工化比例较高（表3）。并且，范和湾北岸海岸带地势低平，易于开发围垦。1973年范和湾段海岸线人工化程度已经达到43.56%，远高于考洲洋段（5.6%）。至2019年该段部分岸线段经历了由淤泥质岸线向围垦养殖岸线再向道路、堤坝（防潮堤）岸线转变的过程（图3），开发程度和岸线转化频率高于考洲洋段。



审图号：GS（2021）8843号

图 5　惠州市各时期海岸线NSM和EPR

Fig. 5　NSM and EPR of Huizhou coastline during each period

4.2.3 巽寮湾段

1973年—2019年巽寮湾段的NSM为66.04 m，年变化速率1.44 m/a（EPR）和1.46 m/a（LRR），是5个区段中变化最小的两个区域之一（表4）。该段核心旅游区域海岸线年变化速率为0.87 m/a（EPR），是各重点监测岸线段中变化最小的。核心旅游区域海岸线最大增长速率出现在长咀角东侧（图4中h点），EPR为5.69 m/a，最大侵蚀率出现在下新村附近海岸（图4中g点），EPR为−0.96 m/a。

1973年—2019年间巽寮湾段海岸线空间位置稳定，EPR均低于3 m/a，5个阶段里的EPR分别为2.02 m/a、2.53 m/a、0.29 m/a、1.93 m/a、0.38 m/a（图5）。从岸线类型的变化来看，1973年该地区无人工岸线，2019年人工岸线比例增长到24.46%（表3）。

与双月湾段类似，巽寮湾段早期人工岸线比例极低，但2019年巽寮湾段人工岸线比例远高于双月湾段，这与二者地理位置、交通便利程度和开发历史有关。巽寮湾的开发历史较早，2014年建成的跨海大桥提高了巽寮湾的交通便利程度。人为因素对该段部分区域有驱动作用，巽寮湾段人工岸线比例的较大提高与其西南湖头角工业区平海发电厂的建设有关。自然岸线段如巽寮湾核心旅游区，在1973年—2019年岸线类型上没有变化，并且速率稳定（EPR为0.87 m/a），由此可以推断自然因素对该段海岸线的变化影响较小。

4.2.4 双月湾段

1973年—2019年双月湾段的NSM为53.89 m，年变化速率1.2 m/a（EPR）和1.27 m/a（LRR），如表4所示，是惠州市变化最小的分段。该段重点监测区域中，双月湾西岸海岸线最大增长速率为8.8 m/a，出现在港口镇出海码头（图4中j点），最大侵蚀为−0.2 m/a，出现在港口镇出海码头以北300 m附近（图4中i点）。双月湾东岸海岸线最大增长速率为3.43 m/a（EPR）（图4中k点，牛头岭以南1 km附近），无后退岸线段。

双月湾段岸线位置展布的总体变化相比其他地区最小，在5个阶段内，EPR分别为1.27、4.11、0.63、0.1、−0.67 m/a，除1984年—1993年间因滩顶植被后退导致变化较大外，其余时期均十分稳定。受海岸沉积作用影响，双月湾段西岸和东岸的砂质岸线在都有略微向海扩张的趋势（图5），但速率上有一定差异，如1973年—2019年双月湾西岸EPR为2.22 m/a，东岸EPR为1.46 m/a（表4）。在各研究期内双月湾西岸和东岸的变化有一致性，均在前3个时期内增长，后两个时期内后退。此外，双月湾西岸和东岸均在1984年—1993年具有较大变化，EPR为8.94 m/a、5.14 m/a。

双月湾段是惠州市人工岸线比例最低的岸线段，该段岸线的变化可以反映惠州市自然岸线段的主要变化情况以及自然因素对海岸线变化的影响程度。由表4所示，双月湾东、西岸砂质岸线段在近50年来变化十分稳定（EPR为1.46 m/a，2.22 m/a），可以推断自然因素对该段海岸线变化影响较小。与巽寮湾段相同，双月湾段早期无人工岸线，至2019年人工岸线比例为9.1%，低于巽寮湾段的24.46%。这与政府对巽寮湾段海岸开发历史较早，基础设施（如交通条件）更完善有关。

4.2.5 考洲洋段

考洲洋段是惠州市变化较为剧烈的区域，仅次于大亚湾段。如表4所示，1973年—2019年区域内海岸线的NSM为158.55 m，年变化速率3.46 m/a（EPR）和4.16 m/a（LRR）。在该段重点监测岸线中，西部围垦养殖区域海岸线最大增长速率为22.37 m/a（EPR）（图4中m点，鹅岗头西侧海岸），最大侵蚀为−1.19 m/a（EPR）（图4中l点，新寮小学附近海岸）。近黄埠镇区域海岸线最大增长速率为23.12 m/a（EPR）（图4中o点，霞坑村西侧海岸），最大侵蚀为−0.13 m/a（EPR）（图4中n点，新吉盐公路黄埠镇岸线段）。

考洲洋段岸线展布具有先后退再持续向海扩张的趋势，可以分为后退（1973年—1984年）、快速增长（1984年—1993年）、缓慢增长（1993年—2019年）3个阶段（图5），快速增长阶段时的EPR达17.48 m/a。考洲洋段与范和湾类似，较早时期以淤泥质海岸为主，但该段海岸大区域开发时间相对较晚。前期考洲洋周边区域人口较少，且该段海岸基岩分布较多（图3），难以开发进行围垦养殖活动，因此人工岸线比例较低。随着人口增加（惠州市统计局 等，2020）当地对加快对海岸线的开发，使岸线人工化比例短期内迅速提高：从1973年的5.6%增长到2019年的69.96%（表3）。该段海岸线的剧烈变化主要发生在1984年—1993年间，这与考洲洋西部围垦养殖岸线快速发展有关，将淤泥

质海岸进行围垦开展水产养殖和海盐产业（图3）。

5 讨 论

本研究提取了1973年、1984年、1993年、2003年、2013年、2019年共计6个时相的海岸线数据，统计各个时期的海岸线NSM和EPR（图5）。总体来说惠州市海岸线近50年来受人类活动影响较大，人工岸线比例持续上升并超过了自然岸线。短期来说1973年—1984年海岸线略微后退，此后呈现快速向海扩张的态势，但近几年（2013年—2019年）表现趋于稳定。在发展趋势上辽东湾北部海岸与惠州市相似，1985年—1993年和2002年—2014年是辽东湾北部区海岸带发生显著向陆侵蚀和向海扩张时期（闫晓露 等，2019）。

岸线驱动力可以分为自然因素和人为因素。以自然因素为主驱动海岸线变化往往发生在人类活动较少的地区，如位于孟加拉国Meghna河口的Hatiya岛，其海岸线变化主要受降雨量、河流输沙量等自然因素影响（Ghosh等，2015）。本研究区位于南海北部地区，其海岸线变化可能受到海平面的影响。但近来的研究表明广东沿海相对海平面上升速率仅为2—3 mm/a（汤超莲 等，2009），近岸带水动力相对稳定，因此在百年尺度内，海平面的升降对海岸带影响较小。以双月湾段为例，该段自然岸线比例达到90.9%，1973年—2019年双月湾段海岸线变化十分稳定（EPR为1.2 m/a）。同时，巽寮湾核心旅游区岸线在研究期间岸线类型保持不变，速率较低，是重点监测区域中最稳定的。由此可见，自然因素对惠州市海岸线的影响较小，近50年来产生的明显变化应主要由人类活动所主导。

综合来看，影响惠州市海岸线变化的人为因素包括围垦养殖、港口工业区建设、滨海旅游区建设及填海造陆等活动。

（1）1973年—2003年惠州市海岸线变化最显著的特征是围垦养殖岸线由16949 m增加到了64362 m（表2）。惠州市海岸围垦养殖活动由来已久，尤以范和湾段周围村镇开展较多，1973年—1984年围垦养殖岸线主要分布在此（图3）；1984年后围垦养殖岸线在范和湾段及考洲洋段快速发展，至2003年其长度达到最大值；2003年后范和湾段部分围垦养殖岸线因旅游业的发展改成了滨海旅游区的海岸围堤（防潮堤）；由于黄埠镇于2000年调整农业结构，加快海水养殖业发展，考洲洋段内围垦岸线基本稳定。范和湾和考洲洋地区的围垦养殖业发展迅速主要为它们均属于半封闭海湾，以淤泥质海岸为主，水动力较弱，具备沿岸养殖的有利条件。

（2）1993年—2019年惠州市海岸线变化受港口和工业区建设影响较大（表2）。惠州市港口和工业区的建设时间较晚，但发展速度很快，特别在大亚湾段表现最为突出。1990年惠州港举行奠基仪式并持续建设，以及1991年南海石化项目（一期）立项，使得这两个区域岸线长度快速增加，并不断向海扩张。除大亚湾段外，港口和工业区岸线在其他区域也有零星分布：2008年位于巽寮湾段西南的湖头角工业区（平海发电厂）开始建设；考洲洋段也有工业区岸线分布，考虑到其区位优势，在未来一段时间内其区段内港口和工业区岸线可能还会有一定发展。

（3）从遥感影像解译发现考洲洋段近黄埠镇岸线段自1973年以来持续进行填海造陆工程，将淤泥质岸线逐渐转变为临近居民区的人工堤坝岸线并向海推进，阶段上在1984年—1993年表现最为迅猛（图5）。该段海岸线变化与人口增长之下的城市化建设密切相关，考洲洋所在的惠东县历年暂住人口由1997年的4.17万增长到了2019年的22.7万（惠州市统计局和国家统计局惠州调查队，2020）。

（4）滨海旅游区建设对惠州海岸线的驱动主要在2003年以后，且在范和湾段影响较大，主要表现为淤泥质或围垦养殖岸线改造为海岸围堤（图3），这改变了人工岸线的结构（表3），表明该段岸线由围垦养殖产业驱动转变为旅游业驱动。滨海旅游产业的快速发展也促使政府加强了基础设施的建设，道路堤坝岸线在2003年—2013年增加了20303 m（表2），如海湾大桥北岸沿海公路的建设，连接了多个沿岸滨海旅游区，形成了具有集聚效应的滨海旅游带。相反以旅游为核心产业的巽寮湾段和双月湾段的人工岸线比例却较低，原因在于巽寮湾段和双月湾段的核心旅游资源为砂质海岸，政府及当地居民非常重视对砂质海岸的保护。同时但旅游业的快速发展还是间接改变了巽寮湾段和双月湾段部分区域岸线类型，如巽寮湾段内区红月湾、磨子石公园岸线段在2003年—2013年期间被改为旅游码头，1993年—2003年双

月湾段西岸南端砂质海岸被改为码头。此外，大亚湾段东部海岸开展的滨海旅游区建设也促进了该区自然岸线向人工岸线的转变，并表现出向海扩张的趋势（图3）。

惠州市海岸线在1973年—2019年间表现出快速人工化的特征，尤其是1984年以来，人工岸线比例从10.35%升高至57.45%，这与中国大陆海岸线的变化特征相似：从1980年—2010年，中国大陆海岸人工岸线比例从24.6%增至56.1%（高义 等，2013）。中国大陆海岸线发生显著变化的时间节点是1990年，而惠州市海岸线在1984年后人工化进程明显，表明惠州市海岸线的人工开发早于全国的平均时期。

中国海岸线具有北方海岸变化速率高于南方海岸的特征（高义 等，2013），比如，北方海岸中莱州湾地区1985年—2015年海岸线年变化速率即EPR为139.5 m/a（丁小松 等，2018），远高于南方海岸中北部湾1987年—2013年的变化速率（3.48 m/a）（黎良财 等，2015），而惠州市海岸线在1984年—2019年期间的变化速率是5.52 m/a，与北部湾地区变化相近，由此可见，中国海岸线整体增长的趋势下各地区变化速率仍存在一定差异。

通过近50年的发展，惠州市对海岸的利用越来多元化，形成了以工业建设为主，围垦养殖和滨海旅游共同开发的格局。珠江口海岸带在2010年—2017年期间85%以上为人工岸线（张云芝 等，2019），其主要改造因素是围垦养殖和填海造地，但是惠州市在2019年的人工岸线比例为55.74%，远低于珠江口的平均比例，这与惠州市重视砂质岸线和基岩岸线等优质旅游岸线的保护密切相关。惠州市对海岸带的开发早期以开发围垦养殖为主，后期以工业建设为主，虽然旅游业发展迅速，但是对海岸线的直接改变较小，仅在部分岸线段如范和湾滨海旅游区将淤泥质和围垦岸线改造成了海岸围堤以及砂质岸线段旅游码头的建设。惠州市重视巽寮湾和双月湾的环境保护，同时持续建设大亚湾石化区和惠州港等区域。该市海岸线开发方针与同在粤港澳大湾区的深圳市实行严格保护自然生态区域（如大鹏半岛），重点开发经济发达区域（盐田区、南山区和宝安区）的政策（贾凯 等，2022；李猷 等，2009）相似。

本研究中，惠州市海岸线向海推进的区域主要是港口码头、工业区和围垦区，并在经济相对发达的地带表现最为显著，由此造成人工岸线比例不断上升，砂质岸线段则基本稳定。鉴于本次研究区为人口较为密集地区，通过近几十年的发展，海岸线的开发已达到较高程度，因此在未来一段时间内该区域岸线不会出现大范围向海扩张的现象，变化相对较为稳定。

6 结 论

本研究基于1973年—2019年间的6期Landsat影像数据，解译惠州市各个时期的海岸线位置和类型，通过DSAS分析1973年—2019年间惠州市海岸线的变化情况（NSM、EPR和LRR），并结合当地自然和人为因素对海岸线在空间和时间上的动态变化进行分析，得到以下结论：

（1）1973年—2019年期间，惠州市海岸线的总长度由224565 m增加到249656 m，人工岸线比例由8.27%上升到57.45%，变化最大的时间段为1984年—1993年（10.35%—39.07%）。大亚湾段、考洲洋段和范和湾段变化显著（EPR分别为9.56 m/a，3.46 m/a和2.54 m/a），巽寮湾段和双月湾段较为稳定（EPR分别为1.46 m/a和1.27 m/a）。

（2）惠州市1973年—2019年平均NSM为185.46 m，平均EPR为4.04 m/a，平均LRR为4.67 m/a。1973年—1984年期间海岸线总体后退，1984年以后不断向海推进，其中1984年—1993年扩张速度最高，NSM达到100.2 m。各子岸线段中，大亚湾段在1984年—2019年为持续扩张，其段落内惠州港和大亚湾石化区分别在1984年—1993年和2003年—2013年发展最为迅速。考洲洋段变化主要发生在1984年—1993年间，并主要由围垦养殖和填海造陆驱动。范和湾段在1984年—1993年向海扩张迅速，此时间段为其北部盐田围垦区快速建设时期。巽寮湾段和双月湾段在各时间段内总体较为稳定。

（3）影响惠州市海岸线变化的主要因素为围垦养殖、港口工业区、滨海旅游区建设及人口增长下的填海造陆活动。其中，围垦养殖活动在1973年—2003年在考洲洋段和范和湾段大力开展；港口工业区在1993年后不断建设，主要分布在大亚湾段；滨海旅游区岸线段在范和湾段分布最长，该活动直接改变了海岸线类型但未使海岸线大幅扩张或后退；填海造陆工程活动自1973年以来在黄埠镇岸线段附近持续进行。自然因素对惠州市

海岸线变化影响较小，典型自然岸线段如巽寮湾核心旅游区和双月湾东、西岸海岸线在近50年内均十分稳定。

（4）惠州市海岸线变化趋势与中国大陆一致，均表现为岸线的快速人工化，且惠州市海岸线的人工开发早于全国的平均时期。惠州市1984年—2019年海岸线变化速率为5.52 m/a，与同时期的北方莱州湾海岸线相比变化速率较低，但高于南方地区部分海岸。

（5）惠州市重视砂质岸线和基岩岸线等优质旅游岸线的保护，人工岸线比例远低于珠江口平均水平。目前，惠州市形成了以工业建设为主，围垦养殖和滨海旅游共同开发海岸的格局，预计该市海岸线短期内不会发生较大改变。

本研究中使用的Landsat卫星数据因其良好的时序性被广泛用于海岸线多时相监测，但受限于分辨率问题，海岸线提取具有一定误差。未来海岸线研究中可以使用更高分辨率图像和其他高精度数据源，以期获得更精确的海岸线。

参考文献（References）

Amrouni O, Hzami A and Heggy E. 2019. Photogrammetric assessment of shoreline retreat in North Africa: anthropogenic and natural drivers. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 157: 73-92 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.09.001]

Ding X S, Shan X J, Chen Y L, Jin X S, Yuan Z H and Yang T. 2018. 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. Marine Science Bulletin, 37(5): 565-575 (丁小松, 单秀娟, 陈云龙, 金显仕, 原作辉, 杨涛. 2018. 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. 海洋通报, 37(5): 565-575) [DOI: 10.11840/j.issn.1001-6392.2018.05.010]

Feng Y J, Yuan J Y, Song L J and Jiang F. 2015. Coastline mapping and change detection along Hangzhou Bay using remotely sensed imagery. Remote Sensing Technology and Application, 30(2): 345-352 (冯永玖, 袁佳宇, 宋丽君, 蒋芳. 2015. 杭州湾海岸线信息的遥感提取及其变迁分析. 遥感技术与应用, 30(2): 345-352) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2015.2.0345]

Gao Y, Wang H, Su F Z and Liu G M. 2013. The analysis of spatial and temporal changes of the continental coastlines of China in recent three decades. Acta Oceanologica Sinica, 35(6): 31-42 (高义, 王辉, 苏奋振, 刘桂梅. 2013. 中国大陆海岸线近30a的时空变化分析. 海洋学报, 35(6): 31-42) [DOI: 10.3969/j. issn. 0253-4193.2013.06.004]

Ghosh M K, Kumar L and Roy C. 2015. Monitoring the coastline change of Hatiya Island in Bangladesh using remote sensing techniques. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 101: 137-144 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.12.009]

Hakkou M, Maanan M, Belrhaba T, El Khalidi K, El Ouai D and Benmohammadi A. 2018. Multi-decadal assessment of shoreline changes using geospatial tools and automatic computation in Kenitra coast, Morocco. Ocean and Coastal Management, 163: 232-239 [DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2018.07.003]

Himmelstoss E, Henderson R E, Kratzmann M G and Farris A S. 2018. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide. Reston: U.S. Geological Survey [DOI: 10.3133/ofr20181179]

Hou X Y, Wu T, Hou W, Chen Q, Wang Y D and Yu L J. 2016. Characteristics of coastline changes in mainland China since the early 1940s. Science China Earth Sciences, 59(9): 1791-1802 (侯西勇, 毋亭, 侯婉, 陈晴, 王远东, 于良巨. 2016. 20世纪40年代初以来中国大陆海岸线变化特征. 中国科学: 地球科学, 46(8): 1065-1075) [DOI: 10.1007/s11430-016-5317-5]

Huizhou Municipal Bureau of Statistics and Survey Office of National Bureau of Statistics in Huizhou. 2020. Huizhou Statistical Yearbook 2020. Beijing: China Statistics Press (惠州市统计局, 国家统计局惠州调查队. 2020. 惠州统计年鉴-2020. 北京: 中国统计出版社)

Jia K, Chen S S and Jiang W G. 2022. Long time-series remote sensing monitoring of mangrove forests in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. National Remote Sensing Bulletin, 26(6): 1096-1111 (贾凯, 陈水森, 蒋卫国. 2022. 粤港澳大湾区红树林长时间序列遥感监测. 遥感学报, 26(6): 1096-1111) [DOI: 10.11834/jrs.20221451]

Kabir M A, Salauddin M, Hossain K T, Tanim I A, Saddam M M H and Ahmad A U. 2020. Assessing the shoreline dynamics of Hatiya Island of Meghna estuary in Bangladesh using multiband satellite imageries and hydro-meteorological data. Regional Studies in Marine Science, 35: 101167 [DOI: 10.1016/j.rsma.2020.101167]

Kang B, Lin N, Xu W B, Wang N and Liu Q Q. 2017. Spatial-temporal changes of the coastline in five south island of Long Island in recent three decades on RS and GIS. Marine Science Bulletin, 36(5): 585-593 (康波, 林宁, 徐文斌, 王娜, 刘庆群. 2017. 基于遥感和GIS的长岛南五岛近30年海岸线时空变迁分析. 海洋通报, 36(5): 585-593) [DOI: 10.11840/j.issn.1001-6392.2017.05.015]

Li G, Sun G H, Yao Y J, Zhu B Q and Zhang Y M. 2019. Spatial-temporal evolution of the Sansha Bay coastline. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 49(1): 196-205 (李刚, 孙桂华, 姚永坚, 朱博勤, 张耀明. 2019. 三沙湾海岸线时空演变. 吉林大学学报(地球科学版), 49(1): 196-205) [DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.20180134]

Li L C, Lu D S, Zhang X L, Zhu C M and Deng L. 2015. Coastline change in the Beibu gulf of South China Sea using time series Landsat images. Transactions of Oceanology and Limnology, (4): 132-142 (黎良财, Lu D S, 张晓丽, 朱长明, 邓利. 2015. 基于遥感的1987-2013年北部湾海岸线变迁研究. 海洋湖沼通报, (4): 132-142) [DOI: 10.13984/j.cnki.cn37-1141.2015.04.020]

Li M N, Chen X Y, Liu J Q, Wu Z and Song W. 2016. Coastline change in Weihai based on remote sensing. Marine Geology and Quaternary Geology, 36(6): 79-84 (李梅娜, 陈小英, 刘金庆, 吴振, 宋委. 2016. 基于遥感的威海岸线变迁分析. 海洋地质与第四纪地质, 36(6): 79-84) [DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2016.06.010]

Li Q Q, Lu Y, Hu S B, Hu Z W, Li H Z, Liu P, Shi T Z, Wang C S, Wang J J and Wu G F. 2016. Review of remotely sensed geo-environmental monitoring of coastal zones. Journal of Remote Sensing, 20(5): 1216-1229 (李清泉, 卢艺, 胡水波, 胡忠文, 李洪忠, 刘鹏, 石铁柱, 汪驰升, 王俊杰, 邬国锋. 2016. 海岸带地理环境遥感监测综述. 遥感学报, 20(5): 1216-1229) [DOI:10.11834/jrs.20166168]

Li Y, Wang Y L, Peng J, Wu J S and Lü X F. 2009. Research on dynamic changes of coastline in Shenzhen City based on Landsat image. Resources Science, 31(5): 875-883 (李猷, 王仰麟, 彭建, 吴健生, 吕晓芳. 2009. 深圳市1978年至2005年海岸线的动态演变分析. 资源科学, 31(5): 875-883) [DOI: 10.3321/j.issn:1007-7588.2009.05.022]

Moussa R M, Fogg L, Bertucci F, Calandra M, Collin A, Aubanel A, Polti S, Benet A, Salvat B, Galzin R, Planes S and Lecchini D. 2019. Long-term coastline monitoring on a coral reef island (Moorea, French Polynesia). Ocean and Coastal Management, 180: 104928 [DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2019.104928]

Muskananfola M R, Supriharyono and Febrianto S. 2020. Spatio-temporal analysis of shoreline change along the coast of Sayung Demak, Indonesia using Digital Shoreline Analysis System. Regional Studies in Marine Science, 34: 101060 [DOI: 10.1016/j.rsma.2020.101060]

Pardo-Pascual J E, Sánchez-García E, Almonacid-Caballer J, Palomar-Vázquez J M, de los Santos E P, Fernández-Sarría A and Balaguer-Beser Á. 2018. Assessing the accuracy of automatically extracted shorelines on microtidal beaches from Landsat 7, Landsat 8 and Sentinel-2 imagery. Remote Sensing, 10(2): 326 [DOI: 10.3390/rs10020326]

Saleem A and Awange J L. 2019. Coastline shift analysis in data deficient regions: exploiting the high spatio-temporal resolution Sentinel-2 products. Catena, 179: 6-19 [DOI: 10.1016/j.catena.2019.03.023]

Shen K M, Li A L, Jiang Y B and Liu C X. 2020. Time-space velocity analysis of coastline based on digital shoreline analysis system: a case study of the Haizhou Bay. Haiyang Xuebao, 42(5): 117-127 (沈昆明, 李安龙, 蒋玉波, 刘鑫仓. 2020. 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. 海洋学报, 42(5): 117-127) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4193.2020.05.011]

Sun X Y, Lü T T, Gao Y and Fu M. 2014. Driving force analysis of Bohai bay coastline change from 2000 to 2010. Resources Science, 36(2): 413-419 (孙晓宇, 吕婷婷, 高义, 付敏. 2014. 2000-2010年渤海湾岸线变迁及驱动力分析. 资源科学, 36(2): 413-419)

Tang C L, You D W, Chen T G, Chen H M and Yu K F. 2009. Sea-level changes along the coast of Guangdong Province during 1986-2008. Tropical Geography, 29(5): 423-428 (汤超莲, 游大伟, 陈特固, 陈海明, 余克服. 2009. 1986-2008年广东沿海海平面变化趋势. 热带地理, 29(5): 423-428) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-5221.2009.05.004]

Thieler E R, Himmelstoss E A, Zichichi J L and Ayhan E. 2009. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.3. U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278

Wang Y X, Liu Y X, Jin S, Sun C and Wei X L. 2019. Evolution of the topography of tidal flats and sandbanks along the Jiangsu coast from 1973 to 2016 observed from satellites. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 150: 27-43 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.02.001]

Xia Z, Chen T H and Zhao Q X. 2000. Study on the shoreline changes by multiseasonal satellite remote sensing data--take Dayawan Bay as a pilot. South China Sea Geology, (12): 102-108 (夏真, 陈太浩, 赵庆献. 2000. 多时相卫星遥感海岸线变迁研究——以大亚湾地区为例. 南海地质研究, (12): 102-108)

Yan X L, Zhong J Q, Han Z L, Sun C Z and Liu M. 2019. Driving forces analysis and landscape succession features of coastal wetland both outside and inside reclamation areas in the northern Liaodong Bay, China in recent 40 years. Scientia Geographica Sinica, 39(7): 1155-1165 (闫晓露, 钟敬秋, 韩增林, 孙才志, 刘淼. 2019. 近40年辽东湾北部围垦区内外滨海湿地景观演替特征及驱动力分析. 地理科学, 39(7): 1155-1165) [DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2019.07.014]

Yang C C, Gan H Y, Wan R S and Zhang Y M. 2021. Spatiotemporal evolution and influencing factors of coastline in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1975 to 2018. Geology in China, 48(3): 697-707 (杨晨晨, 甘华阳, 万荣胜, 张耀明. 2021. 粤港澳大湾区1975-2018年海岸线时空演变与影响因素分析. 中国地质, 48(3): 697-707) [DOI: 10.12029/gc20210302]

Yang Y X, Liu X J, Qiu R F and Yang W. 2017. The analysis of shoreline changes respond to artificial island project of Dongjiao Coco Forest based on DSAS and SMC. Periodical of Ocean University of China, 47(10): 162-168 (杨燕雄, 刘修锦, 邱若峰, 杨雯. 2017. 运用DSAS和SMC分析人工岛建设对岸线变化的影响. 中国海洋大学学报(自然科学版), 47(10): 162-168) [DOI: 10.16441/j.cnki.hdxb.20160480]

Yu C X, Wang J Y, Xu J, Peng R C, Cheng Y and Wang M. 2014. Advance of coastline extraction technology. Journal of Geomatics Science and Technology, 31(3): 305-309 (于彩霞, 王家耀, 许军, 彭认灿, 成毅, 王沫. 2014. 海岸线提取技术研究进展. 测绘科学技术学报, 31(3): 305-309) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-6338.2014.03.018]

Yu J, Du F Y, Chen G B, Huang H H and Li Y Z. 2009. Research on coastline change of Daya Bay using remote sensing technology. Remote Sensing Technology and Application, 24(4): 512-516 (于杰, 杜飞雁, 陈国宝, 黄洪辉, 李永振. 2009. 基于遥感技术的大亚湾海岸线的变迁研究. 遥感技术与应用, 24(4): 512-516) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2009.4.512]

Yu J, Chen G B, Huang Z R and Chen Z Z. 2014. Changes in the coastline of three typical bays in Guangdong during recent 10 years revealed by satellite image. Transactions of Oceanology and Limnology, (3): 91-96 (于杰, 陈国宝, 黄梓荣, 陈作志. 2014. 近10年间广东省3个典型海湾海岸线变迁的遥感分析. 海洋湖沼通报, (3): 91-96) [DOI: 10.13984/j.cnki.cn37-1141.2014.03.013]

Zhang H T. 2016. Monitoring of coastline change in Zhuhai based on high resolution remote sensing. Bulletin of Surveying and Mapping, 11: 55-59, 71 (张海涛. 2016. 珠海市海岸线变化高分辨率遥感监测分析. 测绘通报, (11): 55-59, 71) [DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2016.0365]

Zhang X, Zhuang Z, Zhang X K and Yang B H. 2014. Coastline extraction and change monitoring by remote sensing technology in Qinhuangdao city. Remote Sensing Technology and Application, 29(4): 625-630 (张霞, 庄智, 张旭凯, 杨邦会. 2014. 秦皇岛市海

岸线遥感提取及变化监测 . 遥感技术与应用, 29(4): 625-630) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2014.4.0625]

Zhang X X, Wang W W, Yan C Q, Yan W B, Dai Y X, Xu P and Zhu C X. 2014. Historical coastline spatio-temporal evolution analysis in Jiangsu coastal area during the past 1 000 years. Scientia Geographica Sinica, 34(3): 344-351 (张晓祥, 王伟玮, 严长清, 晏王波, 戴煜暄, 徐盼, 朱晨曦 . 2014. 南宋以来江苏海岸带历史海岸线时空演变研究 . 地理科学, 34(3): 344-351) [DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2014.03.344]

Zhang Y Z, Zhang Q L and Hu Y F. 2019. Remote sensing monitoring and dynamic analysis of the Pearl River Estuary coastline during 2010-2017. Marine Science Bulletin, 38(2): 217-224 (张云芝, 张千力, 胡云锋 . 2019. 2010-2017年珠江河口海岸线遥感监测和动态变化分析 . 海洋通报, 38(2): 217-224) [DOI: 10.11840/j.issn.1001-6392.2019.02.013]

Zhao Y L. 2010. The remote sensing dynamic monitoring of the evolution of shoreline and mangrove wetlands in the Zhujiang River estuary in the past 30 years. Remote Sensing for Land and Resources, (S1): 178-184 (赵玉灵 . 2010. 珠江口地区近30年海岸线与红树林湿地遥感动态监测 . 国土资源遥感, (S1): 178-184)

Zhong R, Liu C S and Chen X X. 2021. Fractal characteristics and spatial heterogenicity of continental coastline in Guangdong Province. Journal of Guangdong Ocean University, 41(4): 70-76 (钟蕊, 刘春杉, 陈鑫祥 . 2021. 广东省大陆海岸线分形特征及空间分异 . 广东海洋大学学报, 41(4): 70-76) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-9159.2021.04.008]

Zhu J F, Wang G M, Zhang J L and Huang J L. 2013. Remote sensing investigation and recent evolution analysis of Pearl River delta coastline. Remote Sensing for Land and Resources, 25(3): 130-137 (朱俊凤, 王耿明, 张金兰, 黄金兰 . 2013. 珠江三角洲海岸线遥感调查和近期演变分析 . 国土资源遥感, 25(3): 130-137) [DOI: 10.6046/gtzyyg.2013.03.22]

Dynamic changes of the Huizhou Coastline in nearly 50 years based on Landsat images and DSAS

WANG Tonghao[1], ZHANG Guifang[1, 2, 3], ZHANG Ke[1, 2, 3], FU Qiang[1]

1. School of Earth Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519000, China;
2. Guangdong Provincial Key Lab of Geodynamics and Geohazards, School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Zhuhai 519000, China

Abstract: Dynamic changes of the coastline reflect the transgression-regression process of the sea – land interaction, which is of great significance to the environmental protection and development planning of coastal areas. On the basis of six periods of Landsat satellite images from 1973 to 2019, this paper obtained coastline data of each period and calculated the changes in their length and type by means of human-machine interactive interpretation.

Detailed analysis in terms of Net Shoreline Movement (NSM), End Point Rate (EPR), and Linear Regression Rate (LRR) in the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) were conducted to explore the potential driving factors regarding the dynamic changes of the coastline.

Results show that from 1973 to 2019, the total length of the Huizhou coastline increased from 224,565 m to 249,656 m, with an average NSM of 185.46 m and an average EPR of 4.04 m/a. The coastline was mainly characterized by erosion from 1973 to 1984 and showed an overall expansion trend afterwards. The expansion amplitude of the coastline exceeded the highest during 1984—1993, with the NSM reaching 100.2 m. In addition, the artificial coastline, which is mainly distributed in Daya Bay Petrochemical Zone, northern Fanhe Bay reclamation and aquaculture Section, Huizhou Port, western Kaozhou Bay reclamation and aquaculture section, and the vicinity of Huangbu Town section, showed the most remarkable change (8.27%—57.45%) among the different coastline types. The main reasons of coastline change include the development of a coastal aquaculture; the construction of ports, industrial areas, and coastal tourist areas; and the expansion of construction land due to population growth and economic development. Some coastline segments, such as the core area of Xunliao Bay and the east and west flanks of Shuangyue Bay, remained stable during the whole period.

We conclude that human impact was the main driving factor and that natural factors have little influence in the coastline change during past nearly 50 years. Compared with other coastal zones in mainland China, the rate of change in Huizhou is less remarkable. Judging by the EPR (2.51%) from 2013 to 2019, the change of coastline in Huizhou remained stable. Thus, we estimate that there will be no significant expansion toward the sea in the future.

Key words: Huizhou City, coastline, remote sensing, DSAS, dynamic change

Supported by GuangDong Basic and Applied Basic Research Foundation (No. 2019A1515010733); Innovation Group Project of Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai) (No. GML2019ZD0302); Science and Technology Program of Guangzhou, China (No. 201707010209); Guangdong Special Fund for National Park Construction (No. 2021GJGY026); GuangDong Basic and Applied Basic Research Foundation (No. 2021A1515012514)