

热带地理
Tropical Geography
ISSN 1001-5221, CN 44-1209/N

《热带地理》网络首发论文

题目： 改革开放 40 年深圳海岸线变化的遥感监测
作者： 卫诗韵，付东洋，刘大召，徐华兵，李高聪，程阳艳
DOI： 10.13284/j.cnki.rddl.003589
收稿日期： 2021-11-22
网络首发日期： 2022-12-16
引用格式： 卫诗韵，付东洋，刘大召，徐华兵，李高聪，程阳艳. 改革开放 40 年深圳海岸线变化的遥感监测[J/OL]. 热带地理.
<https://doi.org/10.13284/j.cnki.rddl.003589>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

卫诗韵, 付东洋, 刘大召, 徐华兵, 李高聪, 程阳艳. XXXX. 改革开放 40 年深圳海岸线变化的遥感监测. 热带地理, XX (XX): 1-19.

Wei Shiyun, Fu Dongyang, Liu Dazhao, Xu Huabing, Li Gaocong, and Cheng Yangyan. XXXX. Remote Sensing Monitoring of Shenzhen Coastline Changes over the Past 40 Years. *Tropical Geography*, XX (XX): 1-19.

改革开放 40 年深圳海岸线变化的遥感监测

卫诗韵¹, 付东洋^{1,2,3}, 刘大召^{1,3}, 徐华兵^{1,3}, 李高聪^{1,3}, 程阳艳¹

(1. 广东海洋大学 电子与信息工程学院, 广东 湛江 524088; 2. 广东海洋大学 深圳研究院, 广东 深圳 518108;

3. 广东省海洋遥感与信息工程技术研究中心, 广东 湛江 524088)

摘 要: 探讨改革开放近 40 年来深圳海岸线的变化有利于揭示其时空演变过程及驱动机制, 可为岸线资源的保护和利用提供参考。文章筛选 1979—2019 年 16 景深圳区域 Landsat 遥感影像, 基于遥感 (RS) 与地理信息系统 (GIS) 方法进行岸线提取, 在保证配准精度以及提取精度达到研究要求的基础上, 对深圳岸线演变时空特征、速率及驱动因素进行探讨。结果表明: 1) 40 年间深圳海岸线长度呈现持续增加趋势, 总长度增加 41.52 km, 平均每年增加 1.04 km。其中, 自然岸线总降幅达 56.61%, 人工岸线所占比例持续上升。2) 海岸线类型主要由早期的粉砂淤泥质和砂质岸线向围垦养殖和工程建设岸线转变。3) 海岸线变化经历了起始、加速和合理约束 3 个阶段, 岸线扩张显著的地区分布在宝安国际机场、前海合作区、后海深圳湾、盐田区和龙歧湾近岸。西岸的岸线最高端点变化速率 (EPR) 达到 422.19 m/a, 出现在 2004—2008 年蛇口半岛的向海扩建时期; 东岸的 EPR 最高达到 449.65 m/a, 出现在 1994—1998 年的盐田港开发建设期间。4) 人类活动、特区政策和自然因素是深圳岸线变化的主要驱动因素。

关键词: 海岸线; 围垦养殖; 工程建设; 驱动因素; 可持续发展; 深圳

中图分类号: P737.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-5221(XXXX)XX-0001-19

DOI:

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



海岸带作为海洋向陆地延伸的过渡地带, 包括海岸、潮间带以及水下岸坡, 是典型的生态交错带和脆弱区, 更是人类开发利用强度最高的区域之一 (侯西勇等, 2011; 苏奋振, 2015; 李清泉等, 2016)。近几十年来, 由于人口、沿海产业、科技产业和海洋经济的快速发展, 海岸带正承受着由高强度人类开发活动所带来的生态环境压力。海岸线是指多年平均大潮高潮所形成的海水与陆地的分界线 (杨玉娣等, 2001; Boak et al., 2005; 国家海洋局 908 专项办公室, 2005a)。海岸线被视为海岸带生态安全的重要指标, 反映海岸带自然环境的变化和人类活动的干预程度 (Fan et al., 2020), 研究沿海地区岸线时空格局变化及其驱动因素, 对城市规划、建设和可持续发展具有重要的现实意义。

海岸线的急剧变化对海岸环境产生日益显著的影响, 探究岸线变化的基本特征和规律已成为海岸线研究的重要任务。目前针对海岸线变迁的研究, 大多是基于遥感影像分析海岸线时空变化特征, 进而探究高强度社会经济建设 (Li et al., 2010; 闫秋双, 2014; 张怡, 2014; Xu et al., 2016; 陈金月, 2017; 丁小松, 2019; Ai et al., 2019; Fan et al., 2020; Zhang et al., 2020)、人口增长 (Liu et al., 2017; Sui et al., 2020)、地质 (Valeyev et al., 2019)、气候变化 (Bamunawala et al., 2018) 和其他因素 (Thoai et al., 2019) 的驱动影响。研究区主要分布于环渤海 (Xu et al., 2016; 丁小松, 2019)、苏沪大陆沿岸 (闫秋双, 2014)、珠江口海岸 (Li et al., 2010; 张怡, 2014; 陈金月, 2017; Ai et al., 2019)

收稿日期: 2021-11-22; **修回日期:** 2022-02-16

基金项目: 广东省教育厅创新强校工程项目 (2019KZDXM019); 南方海洋科学与工程广东省实验室 (湛江) 资助项目 (ZJW-2019-08); 广东海洋大学高水平海洋学科团队项目 (0002026002009)

作者简介: 卫诗韵 (1998—), 女, 广东东莞人, 硕士研究生, 主要从事海洋遥感与 GIS 技术研究, (E-mail) v162802sy@163.com;

通信作者: 付东洋 (1969—), 男, 四川阆中人, 博士, 教授, 主要从事海洋遥感应用研究, (E-mail) fdy163@163.com。

等社会经济建设开发强度大的沿岸。其中,深圳作为珠三角发展迅速且集约化的核心城市,近年来也开展了诸多关于海岸变化的研究。如李猷等(2009)基于1978—2005年的深圳遥感影像系统分析典型岸段的长度变化原因,指出人为造陆与地貌环境是影响海岸线变化的驱动因素;Li等(2010)基于1979—2003年的珠江口遥感影像进行岸线变化分析,发现深圳蛇口半岛岸线变化最为明显,且广泛的港口建设发展是岸线变化的主要原因;Wu等(2017)基于面向对象的分类方法提取深圳1988—2015年的海岸线,发现深圳东西部海岸线稳定性和变化特征完全不同,其差异主要体现在海岸线的形态变化和变化规律上;高梅等(2012)结合遥感影像与城市规划数据对1986—2020年的深圳海岸线进行分析和预测,发现沿岸的人为改造活动呈现明显的西强东弱的空间分异格局,土地资源供需矛盾、大型工程建设、水产养殖区拓展和海岸带的自然条件差异是造成海岸线时空动态变化的主要原因。

综上,遥感技术的发展使得卫星影像融合多种要素研究海岸线的多维变化成为必然趋势(Chen et al., 2005)。目前有关深圳海岸线变化的研究主要基于岸线长度、岸线类型等变化特征分析岸线变化过程及其驱动因素,而对岸线细化分段,分析岸线在不同岸线段间的具体变化特征与速率的研究较少。因此,本文基于改革开放40年的特殊时代背景,在提取深圳1979—2019年16景岸线数据的基础上,将岸线细化分为4段,结合RS与GIS技术,充分运用DSAS(数字海岸线分析系统)中多个计算模型对岸线变化进行定量分析,揭示改革开放40年来,特区政策红利下深圳海岸线时空演变过程及其驱动机制。以期为深圳海岸环境可持续发展提供决策依据。

1 数据与方法

1.1 研究范围与数据来源

深圳位于北回归线以南,其陆域范围为 $22^{\circ}27'—22^{\circ}52'N$ 、 $113^{\circ}46'—114^{\circ}37'E$,地处广东省南部,珠江口东岸,东临大亚湾和大鹏湾;西濒珠江口和伶仃洋;北接东莞、惠州两市;南与香港隔河相望(图1)。由于毗邻香港,深圳已成为华南重要的高新技术研发和制造基地。2020年,深圳计划将海洋置于战略发展位置,规划依托自身资源禀赋和区位优势发展全球海洋中心城市。

所用遥感图像来自美国地质调查局(USGS),



图1 研究区域

Fig.1 The study area

注:该图基于广东省标准地图服务网站下载的审图号为粤S(2018)011号的标准地图制作,底图无修改

综合考虑日期、云量等因素进行采集。为保证研究时相的一致性,Landsat MSS(多光谱扫描仪)/TM(专题制图仪)/OLI(陆地成像仪)遥感图像来源于1979、1988、1994、1998、2004、2008、2013和2019年的秋冬季,遥感影像数据具体参数如表1所示。各研究年份的遥感影像数据在下载完成后进行必要的预处理,包括影像镶嵌、融合、辐射定标、大气校正以及几何精校正。

1.2 岸线解译与提取方法

在建立深圳岸线解译标志及确定原则(表2)的基础上,以ArcGIS 10.4为平台,参照《我国近

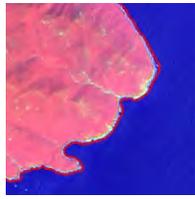
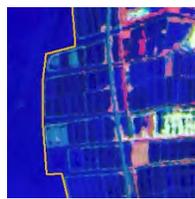
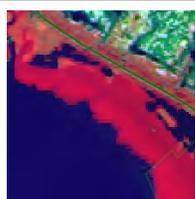
表1 研究区遥感影像数据参数信息

Table 1 Parameters of the remote sensing image data for the study area

序号	卫星	传感器类型	轨道号	成像时间	空间分辨率/m	云量/%
1	Landsat3	MSS	130/44	1979-10-18	79	0.00
2	Landsat3	MSS	131/44	1979-10-19	79	0.00
3	Landsat5	TM	121/44	1988-12-19	30	0.02
4	Landsat5	TM	122/44	1988-11-24	30	7.49
5	Landsat5	TM	121/44	1994-10-01	30	0.04
6	Landsat5	TM	122/44	1994-10-24	30	0.20
7	Landsat5	TM	121/44	1998-09-26	30	3.10
8	Landsat5	TM	122/44	1998-11-04	30	0.48
9	Landsat5	TM	121/44	2004-10-12	30	0.03
10	Landsat5	TM	122/44	2004-10-19	30	0.12
11	Landsat5	TM	121/44	2008-12-10	30	0.12
12	Landsat5	TM	122/44	2008-12-01	30	0.28
13	Landsat8	OLI	121/44	2013-10-05	15	0.01
14	Landsat8	OLI	122/44	2013-12-31	15	0.14
15	Landsat8	OLI	121/44	2019-11-23	15	4.00
16	Landsat8	OLI	122/44	2019-11-14	15	0.23

表 2 深圳海岸线解译标志及确定原则

Table 2 Interpretation mark and determination principle of Shenzhen coastline

岸线类型	利用方式	确定原则	解译标志	岸线类型	利用方式	确定原则	解译标志
自然岸线	基岩岸线	经过长期海水侵蚀和波浪冲刷所形成,多在岬湾相间地带,由坚硬岩石组成,岸线弯曲复杂,水边线不平整		自然岸线	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,则以河口突然展宽处的河流两岸连线为岸线位置所在	
	砂质岸线	影像中一般呈现亮白色的长条带状,常常堆积成一条与岸平行的脊状砂质沉积		人工岸线	围垦养殖岸线	一般呈现规则的方形片状分布,分布在淤泥质岸线附近	
	生物岸线	分布在河口附近的潮滩或者海岸沼泽区,其空间分布具有向海延伸的特征。影像中表现为红色,比陆地植被要暗,纹理平滑			工程建设岸线	主要为人工建筑所形成的岸线,在影像上具有明显的几何特征,棱角分明	
	粉砂淤泥质岸线	主要分布在一些隐蔽的港湾和平原的外端,影像表现为海底处颜色偏暗		人工分界河口岸线	通常以河口区域由海向陆所遇到的第一人工建筑(道路、桥梁或者闸门)确定		

海海洋综合调查与评价专项海岸带调查技术规程》(国家海洋局 908 专项办公室, 2005b) 和已有研究成果(孙伟富等, 2011; 张怡, 2014; 陈金月, 2017), 将深圳岸线分为自然岸线和人工岸线两大类, 其中自然岸线进一步划分为基岩岸线、砂质岸线、粉砂淤泥质岸线、生物岸线和自然过渡河口岸线; 人工岸线进一步划分为围垦养殖岸线、工程建设岸线和人工分界河口岸线。

与归一化差异水体指数 NDWI 相比, 改进的归一化差异水体指数 MNDWI 在快速和准确提取水体信息的同时, 能够实现降低建筑物等影像因素对岸线提取误差的影响。因此利用 MNDWI 初步得到水边线, 并通过人机交互解译方法提取 16 期影像岸线类型和空间位置信息。具体操作为: 对预处理后的影像进行 MNDWI 波段计算, 公式为(徐涵秋, 2005):

$$MNDWI = \frac{Green - MIR}{Green + MIR} \quad (1)$$

式中: Green 和 MIR 分别为绿光波段和中红外波段,

其分别对应传感器 MSS 的 1、3 波段, TM 中的 2、5 波段, OLI 中的 3、6 波段。采用阈值分割法对影像进行海陆分割, 将 MNDWI 大于阈值的分割斑块设置为水体区域, 其他斑块为非水体。阈值设定的准则是在当前影像中能够区分水体区域和陆地, 采用经验阈值法, 经过矢量化、碎斑剔除、平滑等处理后初步得到水边线, 并依据海岸线解译标志及确定原则(见表 2)进行海岸线的提取。

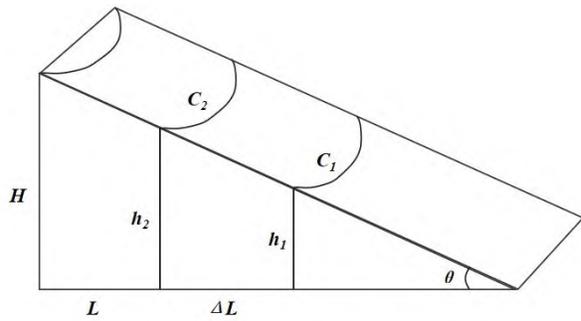
为使得海岸线的提取相对更为准确, 在提取多时相海岸线时, 位置界定在平均大潮高潮处及其临近位置, 参照已有针对潮汐数据校正海岸线的方法(申家双等, 2009; 贾明明等, 2013; 毕京鹏, 2019)进行不同岸线类型的规则提取:

计算岸滩坡度公式为:

$$\theta = \arctan\left(\frac{h_2 - h_1}{\Delta L}\right) \quad (2)$$

计算海岸水边线 C_1 到海岸线的距离的公式为:

$$L = \frac{H - h_2}{\tan \theta} \quad (3)$$



图注： C_1 、 C_2 为两景不同成像时刻影像中提取的海岸水边线； ΔL 为 C_1 与 C_2 之间的水平距离； θ 为海岸坡度； h_1 与 h_2 分别为两幅遥感影像卫星过境时刻的潮位高度（ $h_2 > h_1$ ）； H 为平均大潮高潮位的潮高； L 为岸线校正距离

图2 潮汐校正原理

Fig.2 Principle of tidal correction.

根据上述岸线潮汐校正原理可知，将所提取的海岸水边线向陆地方向移动距离 L 即可得到相对更为真实的海岸线位置。在结合Google Earth影像进行岸线提取的前提下，人工岸线、基岩岸线、河口岸线在潮汐波动下影响并不大，可在一定程度上忽略不计。此外，生物岸线、粉砂淤泥质岸线以及砂质岸线按照最靠近内陆的边缘进行提取，可在一定程度上减弱潮汐波动的影响。

1.3 岸线不确定性分析方法

卫星影像提取岸线的误差源主要有配准误差、像元误差、季节误差以及潮汐波动误差等。由于本文使用MNDWI边缘检测与目视解译结合的方法提取海岸线，一方面卫星影像时间集中在秋冬季，且提取的相对稳定的海岸线占比较高，削弱了季节性误差以及像元误差；另一方面根据岸线修正削弱了潮汐波动误差，集中考虑配准误差 σ_r 的不确定性影响。

为减小影像在同一地区不同来源因各自校正误差所带来的影响，结合2019年实地勘测的5个大致分布均匀的地面控制点（GCP）与Landsat OLI遥感影像坐标对应关系进行几何精校正。利用系统几何校正后的2019年Landsat 8 OLI影像依次配准2013、2008、2004、1998、1994、1988和1979年的Landsat MSS/TM/OLI影像，因此配准误差是2013、2008、2004、1998、1994、1988和1979年的遥感影像与2019年对应影像配准时所产生的均方根误差（RMSE），分别为3.002、2.621、7.628、7.926、8.030、12.891和29.630 m，配准误差的范围为0~

29.630 m，各自配准误差均控制在0.5个像元内，满足研究需要。

1.4 海岸线提取精度验证

海岸线数据的精度检查主要包括位置精度、类型精度和拓扑关系检查3部分。其中，海岸线的位置检查是结合海岸线属性表中记录所用到的Landsat影像信息，叠加对应年份的海岸线数据，人工修正岸线位置判断错误的地方；海岸线类型则结合Google Earth的时间工具功能，缩放到对应成像年份时间段的卫星影像，验证海岸类型；海岸线的拓扑关系检查是对海岸线线段之间空间形态特征的检查（毕京鹏，2019），本文建立的拓扑规则主要包括悬挂点、自重叠、重叠3种错误类型。其中，悬挂点错误指海岸线中间是连续的，不应该存在悬挂节点；自重叠错误指海岸线不可与自身重叠；重叠错误指海岸线类型不可与其他岸线类型重叠。

本文自西向东随机选取深圳的东、西两岸各1个验证区进行岸线精度提取的代表性检验，鉴于提取标准统一，且整个区域数据一致性较好，因此在一定程度上认为抽样检验的准确性代替总体准确性评估是可行的。针对2个验证区，随机选取1994、2019年时段的200个验证点，共800个验证点进行精度评价，计算各随机点到所提取海岸线的最短距离，若随机点位于海岸上，则距离为正值，否则为负。经统计，1994年自西向东选取的一个像素距离内的随机点比例分别为90.87%和90.60%，2019年在一个像素距离内的随机点比例分别为96.89%和97.14%，海岸线提取精度符合变化监测研究需求。

1.5 海岸线变迁研究方法

1.5.1 基线法 目前对岸线空间变迁研究方法有动态分割、基线和面积法等（Li et al., 2010; Thoai et al., 2019）。利用ArcGIS 10.4中的DSAS 5.0模块计算岸线移动变化速率等相关指标，并采用基线法以反映岸线空间分布差异性，主要步骤为：1）以1979年的海岸线为基准向陆域缓冲500 m获得岸线基线，总基线长度为184.22 km；2）沿岸线基线向海域作垂线段（剖面线）从而获得断面，相邻剖面线间隔设置为200 m，并按照岸线空间分布自东向西依次进行编号；3）利用不同的统计模型（端点变化速率EPR、线性回归速率LRR）计算海岸线变化速率。

端点变化速率（EPR）是指2个时期岸线间的

变化速率，其计算方法是将海岸线移动距离除以最旧和最近海岸线之间经过的时间，该公式表示为 (Dolan et al., 1991; Aedla et al., 2015)：

$$E_{(i,j)} = \frac{D_j - D_i}{\Delta Y_{(j,i)}} \quad (4)$$

式中： $E(i,j)$ 代表从基线延伸的某条切线 H 在相邻年份间岸线终点变化速率； D_i 为第 i 期海岸线沿切线 H 到基线的距离； D_j 为第 j 期海岸线沿切线 H 到基线的距离； $\Delta Y(j,i)$ 为第 j 期与第 i 期海岸线年份数间隔值。

线性回归速率 (LRR) 是指基于剖面，对多时相岸线与剖面的交点序列数据进行最小二乘法线性回归拟合，拟合线的斜率即为所求线性回归速率，也可理解为海岸线的变化速率；该指数特点是多时相交点序列数据全部参与计算，适用于线性均变趋势性较强的海岸，其计算公式表示为 (Dolan et al., 1991; Kermani et al., 2016)：

$$y = ax + b \quad (5)$$

$$b = \frac{n \sum_i^n x_i y_i - \sum_i^n x_i \sum_i^n y_i}{n \sum_i^n x_i^2 - (\sum_i^n x_i)^2} \quad (6)$$

$$a = \frac{\sum_i^n x_i^2 \sum_i^n y_i - \sum_i^n x_i \sum_i^n x_i y_i}{n \sum_i^n x_i^2 - (\sum_i^n x_i)^2} \quad (7)$$

式中： a 与 b 为各岸段剖面上拟合回归线的斜率与截距； x_i 为 i 时相的 X 轴坐标位置； y_i 为垂直于岸线走向的某一剖面上 i 时相点与基线点间的距离； n 为时相个数。

1.5.2 岸线类型多样性指数 参照土地利用类型多样性指数模型的概念和计算方法 (孙永光等, 2010)，构建岸线类型多样性指数 (ICTD) 以描述 40 年来深圳地区海岸线开发利用类型的多样性。具体公式为 (毋亭, 2016)：

$$ICTD = 1 - \frac{\sum_i^n L_i^2}{(\sum_i^n L_i)^2}, ICTD \in (0, 1) \quad (8)$$

式中： n 为研究区中海岸线类型的数量； L_i 为第 i 种类型的岸线长度。ICTD 值为 0~1。ICTD 值越小，表示岸线多样性越低，岸线利用结构越单一；ICTD 值越大，表示岸线多样性越高，岸线利用结构越复杂。

1.5.3 岸线利用程度综合指数 参照土地利用综合指数的概念和计算方法 (庄大方等, 1997)，基于深圳地区的不同岸线类型特点和受人为因素影响的

程度，赋予不同类岸线以人力作用强度指数 (表 3)。

表 3 深圳区域不同岸线类型的人力作用强度指数

Table 3 Intensity index of human action of different shoreline types in Shenzhen

岸线类型	利用方式	人力作用强度指数
自然岸线	基岩岸线	1
	砂质岸线	1
	生物岸线	1
	粉砂淤泥质岸线	1
	自然过渡河口岸线	1
人工岸线	围垦养殖岸线	2
	工程建设岸线	3
	人工分界河口岸线	2

结合人力作用强度指数进行计算，即可得出岸线利用程度综合指数 ICUD，计算公式为 (毋亭, 2016)：

$$ICUD = \sum_{i=1}^n (A_i \times C_i) \times 100 \quad (9)$$

式中： n 为研究区中海岸线类型的数量； A_i 为第 i 类岸线的人力作用强度指数； C_i 为该类岸线所对应的长度百分比。ICUD 值越大，表明海岸线受人类活动因素干扰越大，恢复成自然岸线的难度也较大；ICUD 值越小，则受人类社会因素干扰越小，海岸带生态系统自然恢复力越高。

2 海岸线空间结构变迁分析

从深圳近 40 年岸线空间变迁情况 (图 3、4) 可知，其西岸的岸线类型转变幅度比东岸大，主要表现为淤泥质岸线向围垦养殖和工程建设岸线转变。从时间上看 (表 4)，近 40 年来海岸线长度呈持续增长趋势，各年际段分别增加 12.17、11.61、1.46、2.35、6.82、5.86 和 1.25 km。其中，1979—1988 年为岸线增幅最大的年际段。总体而言，深圳海岸线长度在过去 40 年共增加 41.52 km，平均增长率为 1.04 km/a。其中，人工岸线共增长 149.15 km，自然海岸共减少 107.63 km。

结合图 5 和表 4 可知，深圳过去 40 年间自然岸线长度显著下降，总降幅为 52.12%。1979—1988 年，自然岸线下降比例最大，降幅为 28.80%；而人工岸线占比持续增大，ICUD 呈持续上升趋势。从图 6 可知，近 40 年 ICTD 呈现先增长后缓慢下降最后逐步趋于平稳的走势。其中，1979—1988 年为改革开放初期近 10 年，该时期工程建设岸线所占比例

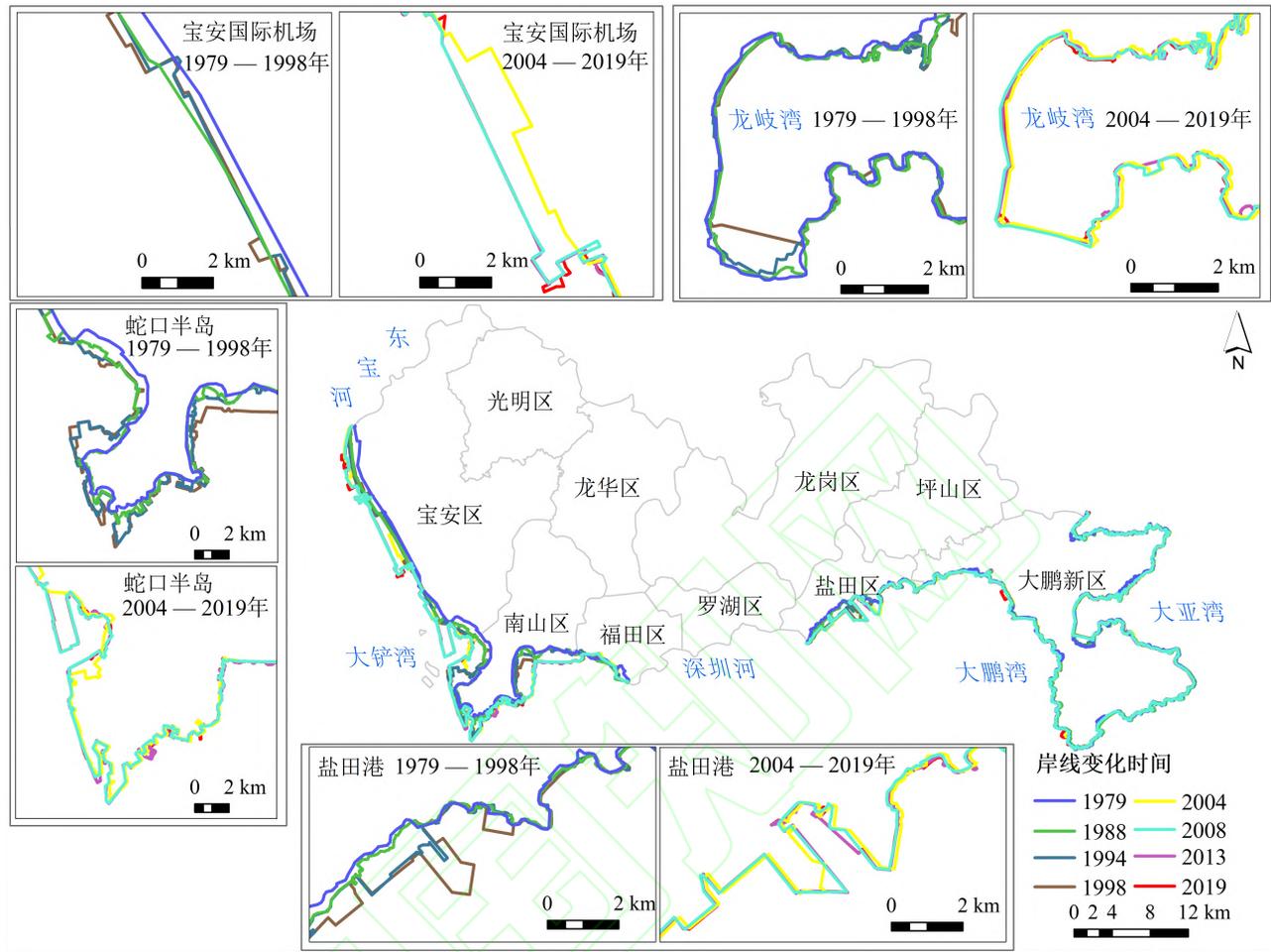


图3 1979—2019年深圳市海岸线空间变化

Fig.3 Spatial change of Shenzhen coastline from 1979 to 2019

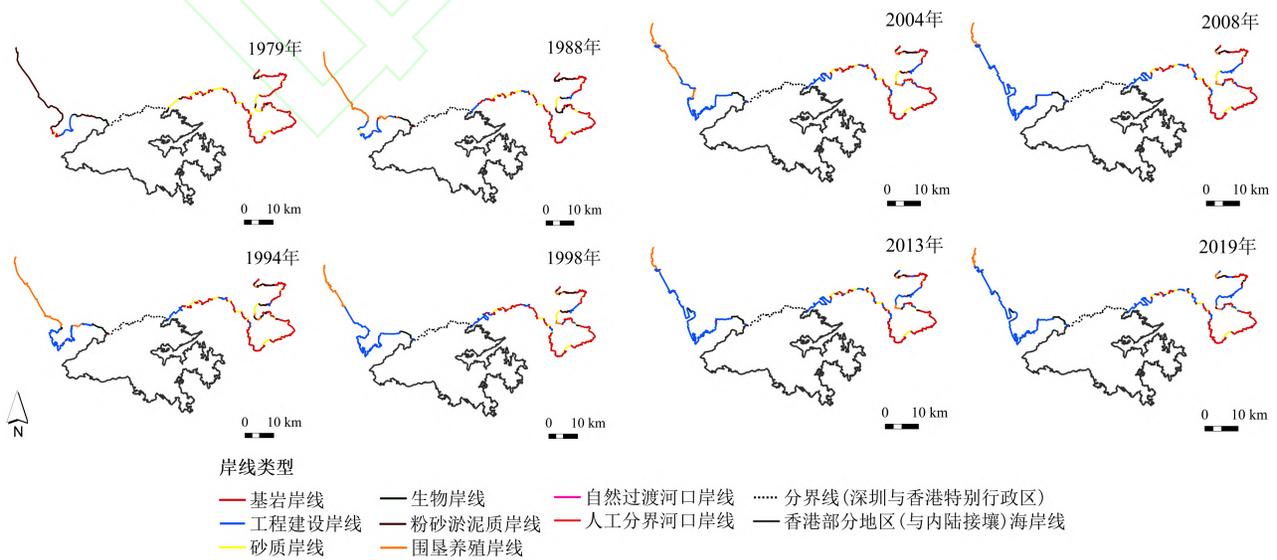


图4 深圳市不同类型海岸线的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of different coastline types in Shenzhen

表 4 近 40 年来深圳不同海岸类型的岸线长度

Table 4 Coastline length of different coastal types in Shenzhen in recent 40 years		km							
岸线类型	利用方式	1979年	1988年	1994年	1998年	2004年	2008年	2013年	2019年
自然海岸线	基岩岸线	106.49	86.88	82.24	81.93	74.68	74.46	67.90	61.50
	砂质岸线	39.65	33.00	27.16	22.19	25.49	23.00	22.20	22.83
	粉砂淤泥质岸线	51.84	21.54	17.39	12.57	8.71	6.51	5.98	4.73
	生物岸线	8.02	5.43	7.10	5.16	5.95	6.99	8.61	9.66
	自然过渡河口岸线	0.52	0.20	0.19	0.18	0.20	0.20	0.16	0.17
	总计	206.52	147.05	134.08	122.03	115.03	111.16	104.85	98.89
人工海岸线	围垦养殖岸线	0.00	41.62	43.97	28.56	35.81	17.77	16.65	15.24
	工程建设岸线	11.54	41.06	63.43	92.41	94.74	123.07	136.23	144.35
	人工分界河口岸线	0.00	0.50	0.36	0.30	0.07	0.47	0.60	1.10
	总计	11.54	83.18	107.76	121.27	130.62	141.31	153.48	160.69
	总计	218.06	230.23	241.84	243.30	245.65	252.47	258.33	259.58

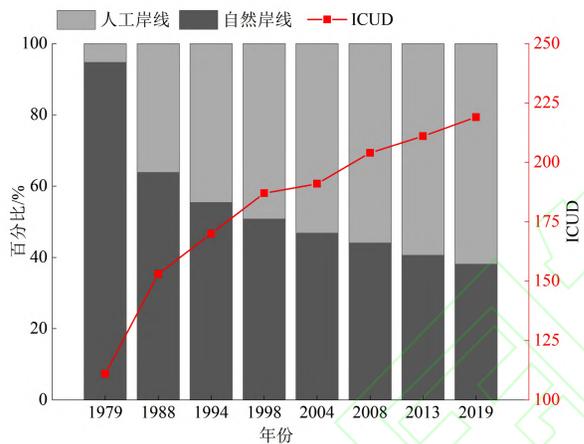


图 5 海岸线利用方式及其利用程度综合指数

Fig.5 A comprehensive index of coastline utilization mode and utilization degree

上升 12.54%，而起初占据西岸大比例的粉砂淤泥质岸线已大部分转为围垦养殖岸线；ICTD 在这 10 年间从 0.67 增长到 0.76，涨幅较为明显。1988—1994 年，城市经济开发建设活力不断提高，ICTD 虽不变但人工岸线占比增长迅速，同期工程建设岸线占比增加 8.4%，围垦养殖岸线占比基本维持不变。1994—1998 年，ICTD 减小 0.04，但工程建设岸线占比上升至 37.98%，涨幅约 11.75%，仅次于改革开放初期的开发强度。1998—2004 年，深圳的发展方向开始发生转变，工程建设岸线占比持续增加。2004—2019 年，人工岸线占比超过 50% 以上，围垦养殖岸线占比下降明显，ICTD 从 0.72 逐年下降到 0.62，呈现自然岸线向人工岸线过渡发展趋势。

3 海岸线变迁速率分析

将深圳海岸线分为 4 段，并分别对各岸段进行分析。参照刘鹏等（2015）对岸线前进、后退、平

衡的速率划分，并综合考虑遥感影像的分辨率以及配准精度误差，选取 ± 3 、 ± 60 、 ± 90 m/a 为临界速率划分各岸段的速率区间。其中， $(-\infty, -90]$ 、 $(-90, -60]$ 、 $(-60, -30]$ 、 $(-30, 30)$ 、 $[30, 60)$ 、 $[60, 90)$ 、 $[90, +\infty)$ 分别对应背陆向海方向上的重度侵蚀、中度侵蚀、轻度侵蚀、平衡发展、轻度扩张、中度扩张、重度扩张 7 种变化趋势。

3.1 东宝河河口—大铲湾岸段

由图 7 可知，东宝河河口—大铲湾岸段中 41.44% 的岸线变化速率在 ± 30 m/a 以内，即处于平衡发展的状态；44.75% 的岸段以平均 41.68 m/a 的速率向海轻度扩张，8.84% 的岸段以平均 70.60 m/a 的速率向海中度扩张，4.97% 的岸段扩张速率 > 90 m/a，处于重度扩张的状态。其中，最高年均向海扩张速率达到 99.19 m/a (LRR)，位于大铲湾前海自贸区近岸。1979—1988 年由于围垦养殖业的兴起，导致该岸段向海扩张速率最高达到 105.68 m/a (EPR)；1988—1994 年前海湾开始扩张建设，该时期的最高向海扩张速率增至 356.61 m/a (EPR)；1994—1998 年西岸部分粉砂淤泥质岸线出现向陆后退侵蚀的现象，最高侵蚀速率为 -119.76 m/a (EPR)；1998—2008 年岸线扩张速率呈现正比例递增的趋势，地区发展方向发生改变，围垦养殖岸线占比下降，但滩涂区面积仍向海扩张，其中，蛇口半岛以西的岸段变迁速率于 2004—2008 年达到最大，为 422.19 m/a (EPR)；2008—2019 年，大部分岸线处于稳定发展的状态，岸线扩张速率相对减缓。

3.2 大铲湾—深圳河河口岸段

由图 8 可知，大铲湾—深圳河河口岸段中 60.56% 的岸线变率处于 ± 30 m/a 之间，即处于平衡发展状态；19.72% 的岸线以平均 42.40 m/a 的速率

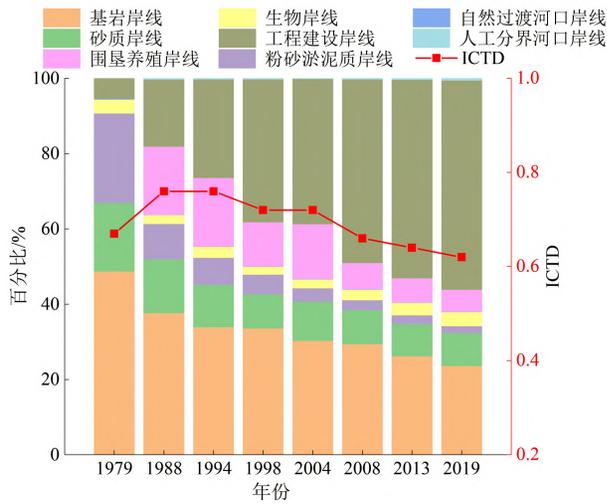


图6 不同海岸类型结构及多样性指数

Fig.6 The structure and diversity index of different coastal types

向海轻度扩张；19.7%的岸段以平均72.99 m/a的速率向海中度扩张，最高年均向海扩张速率达到81.45 m/a (LRR)，位于蛇口半岛建设开发区沿岸。1979—1998年蛇口半岛大肆新建，岸线最大增长速率为363.08 m/a (EPR)；而该时期背海向陆的侵蚀速率也在不断加大，主要是红树林区生物岸线不断

蔓延，最大侵蚀速率达到-87.41 m/a (EPR)，其中1994—1998年的年平均岸线扩张趋势最快，最大扩张速率达到76.31 m/a (EPR)；从1998年开始，蛇口半岛以东集中商业用地扩建，期间向海扩张的变化速率逐年降低至51.18 m/a (EPR)，生物岸段中向陆后退的趋势也在慢慢减小至-1.23 m/a (EPR)，总体上岸线年均变化率逐步趋于稳定状态。

3.3 沙头角—大鹏湾东岸岸段

由图9可知，沙头角—大鹏湾东岸岸段范围内除开发建设区外其余属于旧改区和生态保护区，开发可能性小，因此无明显侵蚀现象。其中，96.46%的岸线变迁率处于 ± 30 m/a之间，处于平衡发展状态；2.76%的岸线在以平均34.66 m/a的速率在向海轻度扩张；0.79%的岸线在以平均72.24 m/a的速率在向海中度扩张；岸线变率最大的区域集中在沙头角到盐田港的建成区附近，其最大的年均扩张速率为73.37 m/a (LRR)。1979—1988年该岸段变化趋于稳定，岸线平均扩张速率为1.33 m/a (EPR)，开发强度弱；1988—1994年，由于盐田港区的规划建设导致岸线扩张速率迅速上升，向海扩张变率最高达到154.83 m/a (EPR)，并在1994—1998年进一步达到449.65 m/a；1998—2008年，大鹏湾东岸的生

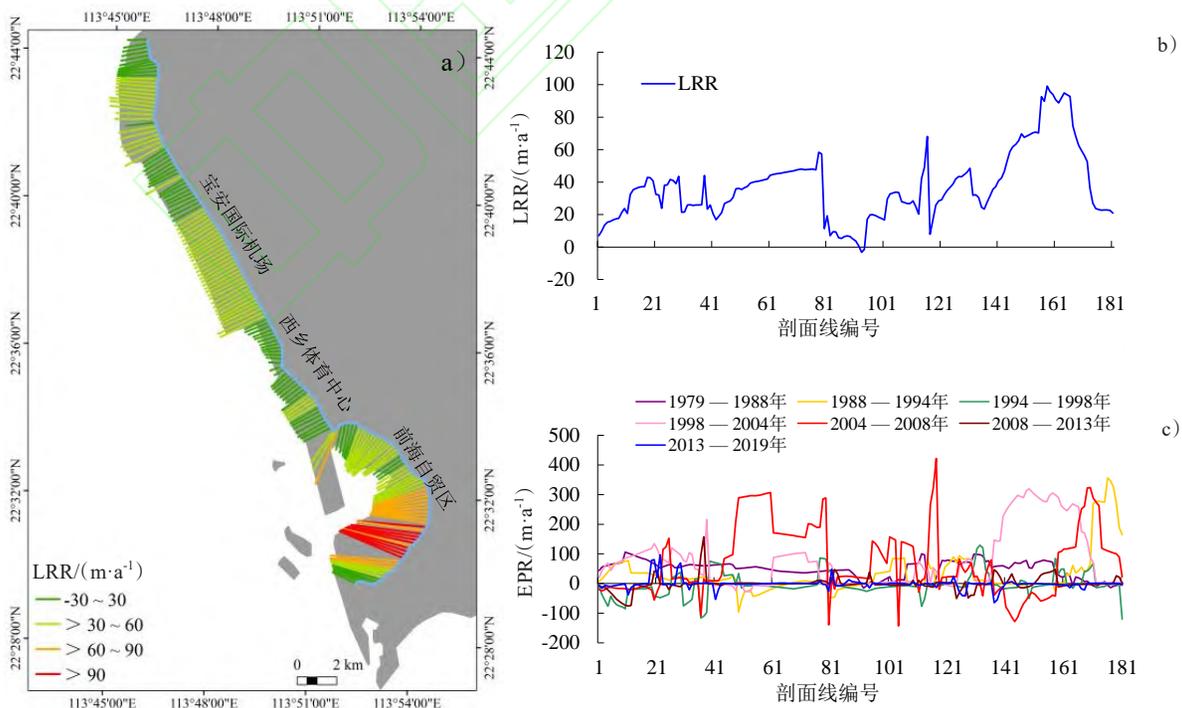


图7 东宝河口—大铲湾岸线变迁速率 (a. 线性回归速率LRR空间分布; b. LRR分布统计; c. EPR分布统计)

Fig.7 The coastline change rate of Dongbao River estuary-Dachan Bay (a. spatial distribution of Linear Regression Rates (LRR); b. Linear Regression Rates (LRR) distribution statistics; c. End Point Rates (EPR) distribution statistics)

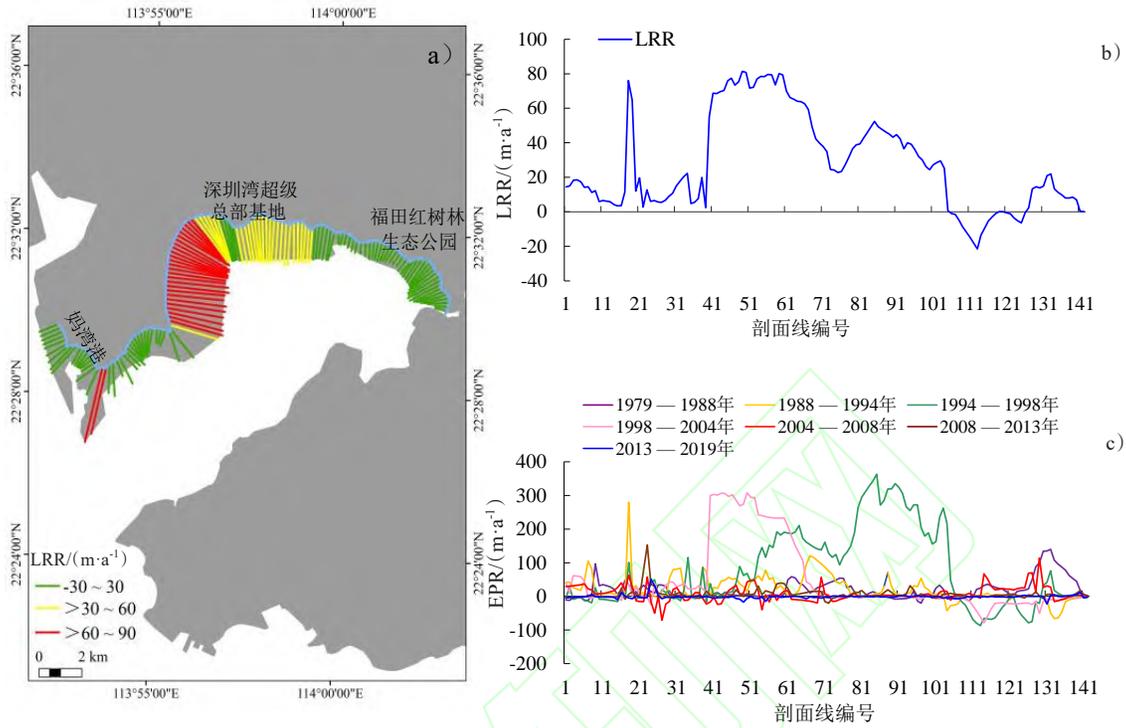


图8 大铲湾—深圳河口岸线变迁速率 (a. 线性回归速率LRR空间分布; b. LRR分布统计; c. EPR分布统计)
 Fig.8 The coastline change rate of Dachan Bay-Shenzhen River port line (a. Spatial distribution of Linear Regression Rates (LRR); b. Linear Regression Rates (LRR) distribution statistics; c. End Point Rates (EPR) distribution statistics)

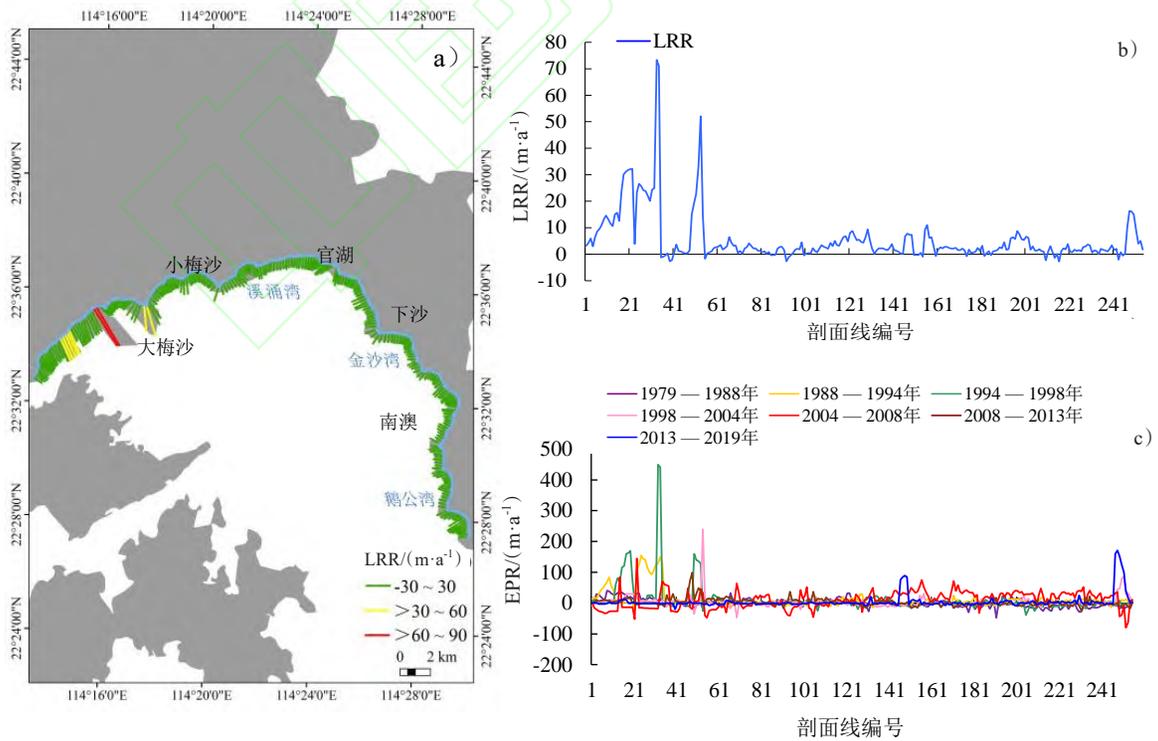


图9 沙头角—大鹏湾东岸岸线变迁速率 (a. 线性回归速率LRR空间分布; b. LRR分布统计; c. EPR分布统计)
 Fig.9 Change rate of the eastern shoreline of Sha Tau Kok - Dapeng Bay (a. Spatial distribution of Linear Regression Rates (LRR); b. Linear Regression Rates (LRR) distribution statistics; c. End Point Rates (EPR) distribution statistics)

态管控区中自然岸线逐步在被侵蚀，砂质岸线受损，最大侵蚀速率为-79.44 m/a (EPR)，与此同时岸线向海扩张变化速率增长至239.56 m/a (EPR)。

3.4 大鹏湾东岸—大亚湾西岸岸段

由图10可知，大鹏湾东岸—大亚湾西岸大部分岸线还未开发，99.71%的岸线变化率在±30 m/a之间，处于平衡发展状态；剩下0.29%的岸段向海扩张率高于30 m/a，属轻度扩张，位于龙岐湾近岸。1979—1994年该岸段变化趋于稳定，人工利用强度

弱；1994—1998年岸线人工利用率大幅度提高，大亚湾西岸开始扩建规划，海岸向海扩张速率最高达到235.37 m/a (EPR)，平均变化速率为14.03 m/a；1998—2004年向海扩张趋势减缓，生态岸线的向陆侵蚀也在减轻，平均变化速率降低至1.56 m/a；2004—2008年生态保护区域的岸线侵蚀较为严重，最大向陆侵蚀速率达到-91.47 m/a；2008—2019年生态海岸逐渐趋于稳定状态，但地势平缓、有沙滩的岸线占比逐渐减少。

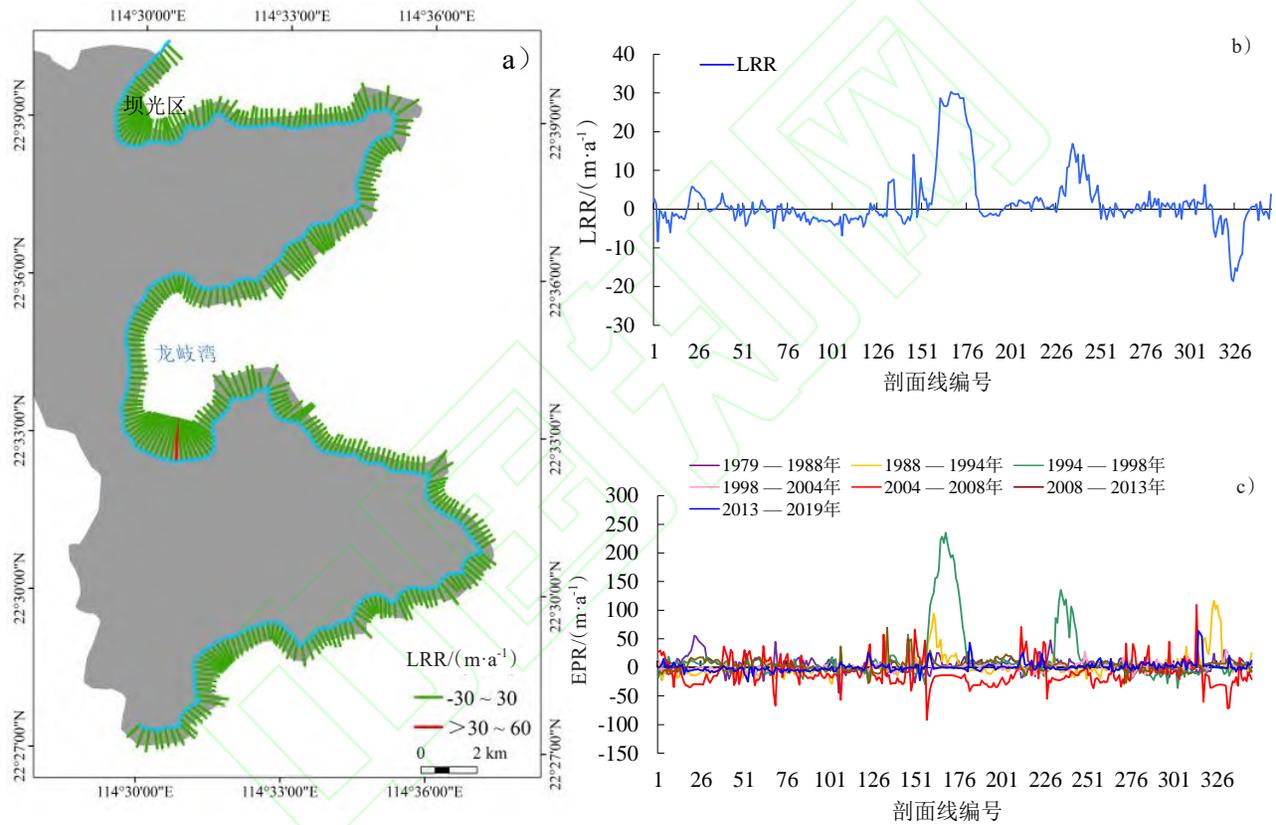


图10 大鹏湾东岸—大亚湾西岸岸线变迁速率 (a. 线性回归速率LRR空间分布; b. LRR分布统计; c. EPR分布统计)
 Fig.10 The coastline change rate of the eastern coast of Dapeng Bay and the western coast of Daya Bay (a. Spatial distribution of Linear Regression Rates (LRR); b. Linear Regression Rates (LRR) distribution statistics; c. End Point Rates (EPR) distribution statistics)

4 讨论

4.1 海岸线变迁结果对比分析

近40年来深圳海岸线总长度呈现持续增加趋势，特区开放后10年（1979—1988年）海岸线总长度增幅最大。同期ICUD均有不同程度的增加，人工海岸线的扩张经历了起始、加速和适度控制阶段，自然海岸线则处于逐年持续侵蚀的状态，但自然侵蚀率远低于人为扩张率。ICTD呈现先上升后

缓慢下降最后趋于稳定的走势，主要的变化趋势是早期的粉砂淤泥质和砂质岸线转变为围垦养殖和工程建设岸线，这主要与国家公共建设项目的实施有关。其中，东宝河河口—大铲湾岸段扩张形式以围垦养殖、大铲湾码头建设以及前海自贸区建设为主，这表明在过去的发展进程中深圳的土地资源稀缺尤为严重，因此填海造陆的大规模城市建设活动不可避免，如机场、西乡体育中心以及自贸区的扩张或建设。大铲湾—深圳河河口岸段除了红树林海

滨生态公园、福田红树林生态公园等以红树林生态保护区为主的原生态岸线外，其余岸线为填海造陆形成的人工岸线，基本开发完毕，可用建设的住宅用地几乎为零，现如今，该岸段沿线区域陆续规划建设了沙河高尔夫球场、深圳湾超级总部基地、欢乐海岸、深圳湾公园等主要工程项目。沙头角一大鹏湾东岸岸段的人工岸线主要集中在盐田港附近，而此部分岸线形态已被破坏，剩余部分被纳入“十三五”旧改规划的社区，如大小梅沙、溪涌、官湖、南澳等。大鹏湾东岸一大亚湾西岸岸段开发区域集中于龙岐湾近岸及坝光区，其余岸线大多属于生态保护区，处于严格管控状态。

对比深圳的东西部岸线类型空间变迁可知，西部大部分岸线早期为滩涂区，后经填海造陆形成人工海岸，其自然形态因此被破坏，其中以蛇口半岛的工程建设最为典型。生物岸线主要集中于深圳湾附近的红树林生态保护区岸段。东部岸线以自然岸线为主，工程建设岸线占比较低，主要集中在盐田港段以及大亚湾核电站段。剩余岸线除 1/3 位于“十三五”旧改区的地势平缓、有沙滩的砂质岸线和粉砂淤泥质岸线外，其余均为生态管控严格的基岩岸线区域，这与李猷等（2009）李猷等（2009）基于地貌条件差异对深圳东西两岸岸线动态变化成因分析结果一致。结合改革开放 40 年时间历程看，1979—1988 年，西岸水产养殖规模在政策支持下迅速发展；1994—2008 年，西岸转变发展方向，兴起填海扩张发展趋势，并陆续向海上扩展建设沿岸公共设施。自 2008 年以来，海岸保护逐渐受到重视，相关部门开始加大对围海造陆活动的限制力度。

4.2 岸线驱动因素分析

4.2.1 人类活动因素 人类活动通过形成新的岸线结构进而改变原有自然或人工海岸线的类型和空间位置。由岸线的变化速率可知，由人为因素造成的岸线扩张速率远大于自然海岸的侵蚀速率。全市岸线变迁速率较大的海岸线地区为：宝安机场岸段、前海合作区、后海深圳湾、盐田区沿岸以及龙岐湾近岸，这与高梅等（2012）高梅等（2012）得出的深圳海岸线动态变化热点区域一致。这些岸线变迁剧烈的地区均为特区开放初期人工填海造陆的主要公用事业计划开发区，表明人为因素是岸线变迁速率发生巨变、岸线总长度不断增长的主要根源。结合表 5、6 可知，东宝河河口到大铲湾的扩张主要以宝安国际机场和前海合作区的形式出现，近年来不断增加的扩张需求给海洋生态造成巨大的负担。大

铲湾到深圳河口扩张主要是填海形成的人工海岸线，而蛇口半岛的扩建是其扩张的主要原因。此外，西岸的岸线扩张主要包括盐田港的进一步发展，其余生态岸线、“十三五”规划下旧改地区的岸线扩张主要是围绕产业与环境高度一致的发展框架下建设生态绿岛（古希婷，2016；林逸涛，2018），比如，规划大鹏新区辖区内的龙岐湾段定位为历史人文展示及海上休闲旅游胜地，桔钓沙岸段定位为海洋综合保障、海上运动及科普教育基地，东西涌岸段定位为滨海旅游度假区、高端国际会展及独特生态科普教育区，下沙—沙鱼涌岸段定位为多元滨海人文旅游度假区，溪涌—大小梅沙岸段定位为滨海旅游和海上运动区。

大规模的海岸带人工改造为深圳的快速发展提供了对外交通、休闲娱乐等的空间支持，但同时也导致深圳的人地矛盾日益突出，其生态负面效应难以治理。部分填海造地工程对海洋生态环境造成不可弥补的损害。西岸大量滩涂的占用导致海水水质下降，无法满足海水环境的功能要求（Huang et al., 2018）。因此，为避免各种生态负面影响的持续加剧，迫切需要对深圳未来沿海改造和利用进行正确指导。

4.2.2 政策因素 1981 年国务院通过国家水产总局《关于当前水产工作若干问题的请示报告》（国务院，1981），提出加速发展水产养殖的目标，调动国家、集体、个人等几方面的积极性，尽快把适合养殖的水面和滩涂利用起来，因此，深圳西岸出现滩涂区淤泥和砂质岸线大幅向围垦养殖岸线转换的现象。1988 年《国务院关于深圳市在国家计划中实行单列的批复》（国务院，1988）明确指出进一步搞活深圳特区经济并加快实现沿海经济的发展战略，同意深圳市在国家计划中实行单列并赋予其相当于省一级的经济管理权限。因此，深圳沿海往后 10 余年间在产业的经济转型、全球经济一体化的驱使下开始迅速发展和重组，大部分自然海岸资源逐渐成为填海工程的牺牲品。由此可知，特区的政策优势带来的社会经济发展需要是深圳填海的重要驱动力。

近 10 年来深圳海岸带区位优势进入一个崭新的时期，与其相对应的政策措施也步入一个理性阶段。2008 年，国家海洋局发布《关于改进围填海造地工程平面设计的若干意见》（国家海洋局，2008），提出尽快转变围填海造地工程设计的理念，保护稀缺岸线和近岸海域资源。2012 年深圳在全国

表5 人为扩张热点地区主要扩张过程
Table 5 The expansion process of key artificial sites

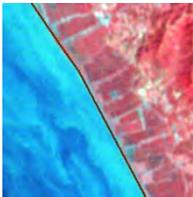
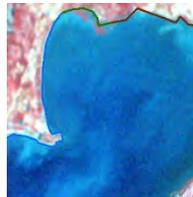
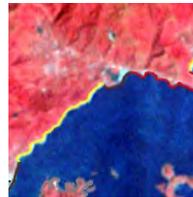
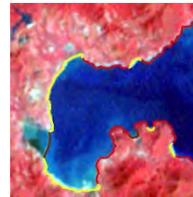
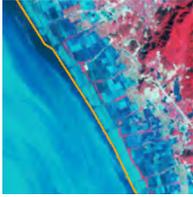
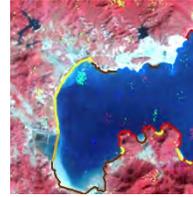
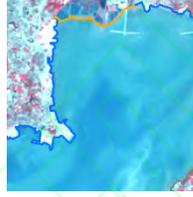
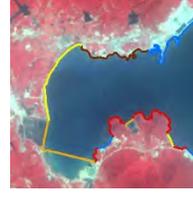
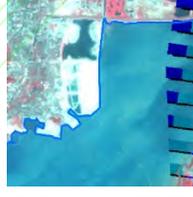
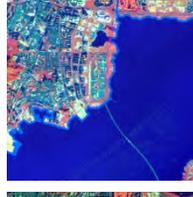
时间	宝安国际机场	前海合作区	后海深圳湾	盐田区近岸	龙岐湾近岸
1979年					
1988年					
1994年					
1998年					
2004年					
2008年					
2013年					
2019年					

表 6 人为扩张热点地区主要发展历程

Table 6 The main development history of hot spots of artificial expansion

地点	年份	事件
宝安国际机场	1991	建设完成,正式通航
	1994—1998	续建货运站,航站楼扩建
	2004—2008	B号候机楼扩建,飞行区扩建,机场南停机坪扩建
	2008—2013	T3航站楼扩建
	2013—2019	航站区与跑滑系统扩建,三跑道扩建
前海合作区	2010	合作区建成
	2013	产业准入
	2013—2019	前海合作区和前海蛇口自贸片区"双扩区"
后海深圳湾	1980—1988	集中在蛇口半岛南部的填海开发
	1995—2000	扩建南山商业文化中心区、滨海大道、赤湾码头、蛇口码头
	2001—2005	后海中心区初步形成
	2013—2019	CBD超级基地形成
盐田区近岸	1989	盐田港建设完成
	1999	大梅沙海滨公园竣工
	2013—2019	万科天琴湾建成
龙岐湾近岸	2013—2019	龙岐湾1号建成、桔钓沙旅游片区、较场尾沿岸民宿小镇兴起 海滨路—滨海养殖区绿岛规划建设

率先实现规划、国土和海洋管理的三合一，建立陆海统筹的机制体制平台。2017年5月，在国际社会大力提倡发展蓝色经济背景下，《全国海洋经济发展“十三五”规划》（国家发展改革委和国家海洋局，2017）提出“推进深圳、上海等城市建设全球海洋中心城市”，这是中国首次提出“全球海洋中心城市”概念。2018年9月，《深圳市海岸带综合保护与利用规划（2018—2035）》（深圳市规划和自然资源局，2018）正式出炉，对深圳自东至西的15段海岸段进行明确定位，从保护和利用2个方面为海岸带综合管理提供制度上的辅助支撑。2019年8月，《中共中央国务院关于支持深圳建设中国特色社会主义先行示范区的意见》（国务院，2019）明确提出，支持深圳加快建设全球海洋中心城市，按程序组建海洋大学和国家深海科考中心，探索设立国际海洋开发银行，为深圳建设全球海洋中心城市指明方向。2019年12月，深圳人大通过了《深圳经济特区海域使用管理条例》（深圳市人民政府，2019），提出除国家批准建设的重大项目以外全面禁止围填海，从源头上保障海域资源的可持续利用，并于2020-05-01正式实施。2020年9月，《关于勇当海洋强国尖兵加快建设全球海洋中心城市的实施方案（2020-2025年）》正式印发，提出组建海洋大学、推动设立中国海洋大学深圳研究院。由此可见，深圳正全力加快全球海洋中心城市、海洋现代产业体系建设（李孝娟，2019；深圳市政协人资环委课题组，2020）。

国家高端智库 CDI 资深研究员李津逵曾言，“深圳在未来的城市发展中，不再是姓社姓资的问题，而是姓海还是姓陆的问题”。深圳城市规划管理者以及顶层制度决策者显然意识到这个问题，自改革开放 40 年来，深圳大部分岸线处于不断向西部推进开发的趋势，随着前海的不断填海开发，深圳向西发展几乎没有空间。于是，近年来深圳在对标全球海洋中心城市建设的发展规划中，政策制定重点逐渐偏向东部的协调开发，开始将政策制定的终点转向海岸生态环境与产业角度相协同的平衡发展模式。未来，深圳西岸的严格控制围填海、生态维护的发展方式将与东岸的生态环境、产业发展高度协调下的规划发展策略双双并进，虽然“西强东弱、西密东疏”的不均衡城市发展格局在未来很长一段时间难以彻底改变，但至少在顶层制度决策上可促进形成协调发展方向上的重要驱动力。

4.2.3 自然因素 近年来，影响深圳沿海变化的自然因素主要有海平面上升、风暴潮和地貌环境变化（Zhang et al., 2004；丁小松，2019）。其中，海平面上升可能导致局部沿海地区海水入侵，通常表现为沿海地区的潮位上升、淤积减缓、砂质海岸线和淤泥质岸线的明显海侵和海岸线后退（杨桂山，2001），因此，这也是造成深圳海岸线侵蚀的主要自然因素。深圳属于典型的南亚热带季风气候，其所在的珠江三角洲是中国受台风影响较大的地区之一，一旦台风入侵，往往都会伴随暴雨等恶劣的天气现象，对流域内的港口、海湾和防潮堤等产生直

被破坏力,最终造成洪涝灾害的加重和堤围防御能力的降低。

此外,海岸地貌环境虽然不会对海岸形态造成快速直接的影响,但会潜移默化地在宏观上通过坡度和岩性等因子制约人类对于海岸线的开发活动(卜心国等,2008)。深圳西部地形平缓,早期大部分海岸为淤泥质岸线,由粉沙和黏土等细颗粒物质构成,处于珠江河口区的浑浊带范围,造地成本低和填海条件优越,使其可以进行开发强度较大的滩涂围垦和填海造地(陈俊侠,2003);而深圳东部地形较高,其岸线大部分为基岩和砂质海岸,基岩海岸通常为花岗岩山地,直接临海,水底坡度大、海拔较高等条件使其不具备开发的先天优势,剩余的部分砂质海岸由沙和砾石组成,开发强度较弱,以旅游开发为主(郭伟等,2007),因此东岸只有少部分海湾地区具有填海潜力,现阶段还保留部分天然的岸线,属于生态严控的范围。

虽然深圳近40年来的发展因海而生、因海而兴,但自然生态系统与海岸的开发建设应该是理性且可持续的,填海面积与自然生态环境间是负反馈,自然生态环境的诉求将反过来影响填海进程,制约填海面积的增加(于海波等,2009)。一旦动摇自然生态系统的根基,人地矛盾将陷入恶性循环的境地。因此,在未来的海域发展中,应该要正视自然与人类之间的关系,逐步开展近海岸的生态补偿工作,为未来海岸带的发展提供预留空间和用海保障。

4.3 问题和建议

长久以来,中国的海洋经济发展处于初级阶段,依靠渔业为支撑。十八大以后,随着海洋强国战略的出台,深圳经济发展进入新时期,滨海产业经济加速发展。作为一个建设在海岸带上的新兴城市,本该在适度有效的环境管理以及海洋资源的有序开发基础上发展为友好和谐的绿色屏障,但至今为止,深圳在对海洋和城市之间的管理依然存在不足。主要体现在以下几个方面(周凯等,2012;李孝娟等,2019):

1) 陆海发展存在使用功能上的冲突,深圳东岸分布着大亚湾核电站等能源设施建设地,其特有的安全管控要求与生态环境产业发展定位存在一定的空间矛盾;西岸海域滩涂区广阔且水动力不足,水深较浅却需要承担填海造陆以及大型港口通航的重大负担。

2) 陆海发展之间缺乏空间衔接的互动性。深

圳东部海岸带存在宝安国际机场、港口等临近海岸线边缘的大型基础设施,其建筑等退线不足造成亲海空间缺乏。剩余的漫长海岸线大部分被酒店、政府培训基地等占据,变相私有化严重,公众近海却难以亲海。

3) 陆海管理条块分割明显,缺乏协调。目前对海岸线的管理模式并没有详细的规范和模式上的提升,管理单位无法针对更多新兴业态提供专业有效的管理,事权划分不够明晰导致相关管理容易造成矛盾冲突并且难以协商。

4) 陆海规划管控思路差异明显。陆域管理以地方政府为主导,但海洋规划以国家以及省政府为主导,自上而下的垂直管理导致地方政府难以介入。如海洋自然保护区的建立可为城市回馈生态价值,但其建立面临两大阻力:行政成本与深港两地的沟通成本。

若要改变海岸带开发和海洋生态的不合理状况,必须从源头上厘清目前深圳对于海岸带基线保护和资源利用的相关背景。基于《深圳市海岸带综合保护与利用规划(2018—2035)》可知,深圳对于海岸带规划的保护和利用是多方面的,基于底线思维的保护下应该建立岸线分级保护机制,划定禁止建设区域,严格控制关乎海岸带的人为扩张改造活动,落实生态岸段的维护和修复策略,加强对已破坏的岸线的生态修复,促进自然岸线占比的提高。此外,推进陆海协同发展应依托海岸带推动城市由陆向海全方位合理拓展,要重视把海岸带作为陆地和海洋空间耦合的发展轴带,通过编制相关规划政策合理引导岸线资源的利用,从而构建“一带、三区、多单元”的发展新格局(图11)。

综上,针对深圳海岸带的可持续管理与发展,提出以下建议:

1) 重视临海区域空间管制。以海洋生态红线与陆域生态红线为空间指引,相关部门出台并完善相关民众使用滨海的管理政策和法律法规,加强海域使用许可督查,定期发布红线保护状态信息以及成效评价。明确各管理单位责权,严禁将公共岸线区变相私有化,保障公众对滨海海域的使用权。

2) 重视差异化的海岸带产业方向重塑。在目前“西城东憩”的海岸发展格局中,应顺应差异化的城市产业转型。以海岸带为核心,统筹陆海空间利用,促进陆海功能对接。其中,西部滨海地区属于国际化水平的战略性地区,加速西部产业转型与功能提升,进一步延续轴带紧凑的新型现代化服务

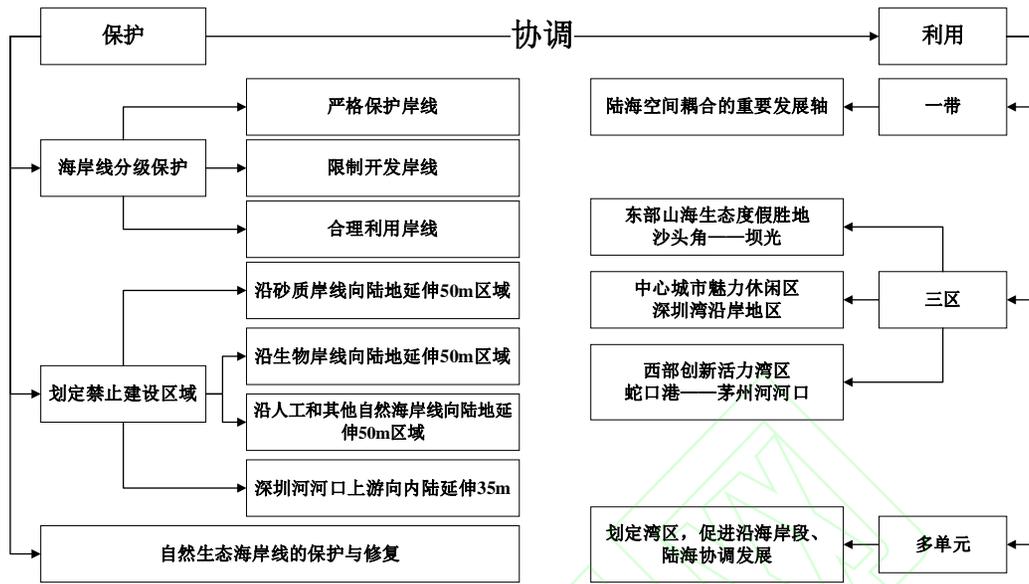


图 11 深圳市海岸带保护与利用规划发展格局框架

Fig.11 Framework of coastal zone protection and utilization planning and development pattern in Shenzhen.

产业链，可进一步推进产城融合发展。东部地区可定位为生态保留区，发展为以滨海度假为特色的战略性新兴地区，实施分散发展结构。

3) 重视建立海岸带全域生态系统。加强环评调查工作，完善区域联防联控，逐步改善沿海区域生态体系，重点推进深圳湾、大鹏新区沿岸等为海岸带重点生态经济示范区。其中，深圳湾内可强化对红树林自然保护区的管理，逐步修复完善深圳河口湿地生态系统功能。大鹏新区沿岸应积极实施生态维护策略，加强海洋生物资源保护，如对大小梅沙附近存在的珊瑚礁、坝光地区沿岸红树林的生态防线进行保护；此外，还应控制污染企业进入，开展污染综合治理。

4) 重视将陆海作为生命共同体。海洋和城市的可持续发展需要人类之间的合理协调才能达到城海相融的人海和谐局面，若要可持续发展的概念具体化为鼓舞人心的未来形象，则需要开放的规划过程和利益相关者的共同参与，而不仅仅靠相关部门的顶层制度决策推动。

5 结论

基于 1979—2019 年 16 景遥感影像，通过遥感 GIS 技术提取数字化海岸线，分析海岸线类型、结构以及长度变化，对海岸线时空演变特征、速率以及驱动因素进行探讨。得出以下结论：

1) 改革开放 40 年来，深圳海岸线总增长为

41.52 km，年均增长 1.04 km，主要表现为人工海岸线的急剧增加和自然海岸线的持续减少；其中，人工岸线共增长 149.15 km，自然海岸共减少 107.63 km。海岸线变化较大的地区集中在宝安国际机场、前海合作区、后海深圳湾、盐田区以及龙岐湾近岸，且深圳西部整体海岸变化相对于东岸更为剧烈。西岸的最高端点变化速率（EPR）达到 422.19 m/a，出现在 2004—2008 年蛇口半岛以西的向海扩建时期；东岸最高 EPR 达到 449.65 m/a，位于 1994—1998 年的盐田港开发建设期间。

2) 深圳海岸线主要由早期的粉砂淤泥质和砂质岸线向围垦养殖岸线和工程建设岸线转变，即由自然海岸向人工海岸过渡。其中，1979—1988 年岸线长度增幅最大，1979—1994 年为海岸线变化最为剧烈的时期，1994—2008 年为填海造陆的峰值时段。而从 2008 年起，深圳岸线开发逐步进入一个可持续、理性的阶段。

3) 深圳海岸线是动态的、连续的变化过程，其海岸发展进程是人类活动、特区政策与自然因素之间的博弈与综合，影响海岸变化过程的主要驱动力为城市扩张下的工程建设。此外，自然地貌条件是海岸变化的潜在因素，间接制约人类开发的强度。特区政策是深圳人口扩张和城市蔓延的核心动力，也是深圳沿海自然岸线减少和人工岸线增长的根本原因。

参考文献 (References):

- Aedla R, Dwarakish G S and Reddy D V. 2015. Automatic Shoreline Detection and Change Detection Analysis of Netravati-Gurpurrivermouth Using Histogram Equalization and Adaptive Thresholding Techniques. *Aquatic Procedia*, 4: 563-570.
- Ai B, Zhang R, Zhang H, Ma C and Gu F. 2019. Dynamic Process and Artificial Mechanism of Coastline Change in the Pearl River Estuary. *Regional Studies in Marine Science*, 30: 100715.
- Bamunawala J, Ranasinghe R, Van Der Spek A, Maskey S and Udo K. 2018. Assessing Future Coastline Change in the Vicinity of Tidal Inlets via Reduced Complexity Modelling. *Journal of Coastal Research*, 85: 636-640.
- 毕京鹏. 2019. 海岸线时空变迁遥感监测与分析——以泰国和马六甲海峡为例. 青岛: 山东科技大学. [Bi Jingpeng. 2019. *Remote Sensing Monitoring and Analysis of Temporal and Spatial Changes of Coastlines: A Case Study of Thailand and Malacca Strait*. Qingdao: Shandong University of Science and Technology.]
- Boak E H and Turner I L. 2005. Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, 21(214): 688-703.
- 卜心国, 王仰麟, 吴健生. 2008. 深圳快速城市化中地形对景观垂直格局的影响. 地理学报, 63 (1): 75-82. [Bu Xinguo, Wang Yanglin and Wu Jiansheng. 2008. The Effect of Topography on Landscape Vertical Pattern in Rapid Urbanization of Shenzhen. *Journal of Geographical Sciences*, 63(1): 75-82.]
- 陈金月. 2017. 基于 GIS 和 RS 的近 40 年珠江三角洲海岸线变迁及驱动因素研究. 成都: 四川师范大学. [Chen Jinyue. 2017. *Study on Shoreline Changes and Driving Factors of Pearl River Delta in Recent 40 Years Based on GIS and RS*. Chengdu: Sichuan Normal University.]
- 陈俊侠. 2003. 岸线规划的一个案例——深圳西海岸线的现状与未来. 中外房地产导报, (9): 28-29. [Chen Junxia. 2003. A Case of Shoreline Planning: The Present Situation and Future of Shenzhen West Shoreline. *Real Estate Guide at Home and Abroad*, (9): 28-29.]
- Chen S S, Chen L F, Liu Q H, Li X and Tan Q Y. 2005. Remote Sensing and Gis-Based Integrated Analysis of Coastal Changes and Their Environmental Impacts in Lingding Bay, Pearl River Estuary, South China. *Ocean & Coastal Management*, 48(1): 65-83.
- 丁小松. 2019. 渤海海岸线和沿岸栖息地破碎化的时空变化研究. 上海: 上海海洋大学. [Ding Xiaosong. 2019. *Temporal and Spatial Changes of Coastline and Coastal Habitat Fragmentation in Bohai Sea*. Shanghai: Shanghai Ocean University.]
- Dolan R, Fenster M S and Holme S J. 1991. Temporal Analysis of Shoreline Recession and Accretion. *Journal of Coastal Research*, 7: 723-744.
- Fan Q D, Liang L K, Liang F and Sun X F. 2020. Research Progress on Coastline Change in China. *Journal of Coastal Research*, 99: 289-295.
- 高梅, 曾辉. 2012. 深圳市 1986—2020 年间海岸线动态变化特征及成因分析. 热带地理, 32 (3): 274-279. [Gao Mei and Zeng Hui. 2012. Characteristics and Causes of Coastal Dynamic Change in Shenzhen from 1986 to 2020. *Tropical Geography*, 32 (3): 274-279.]
- 古希婷. 2016. 深圳市大鹏新区第三产业集群升级中的政府责任分析. 武汉: 华中师范大学. [Gu Xiting. 2016. *Analysis of Government Responsibility in the Upgrading of Tertiary Industry Cluster in Dapeng New District, Shenzhen*. Wuhan: Central China Normal University.]
- 郭伟, 李书恒, 朱大奎. 2007. 深圳东部海岸地貌环境与可持续发展. 地理学报, 62 (4): 377-386. [Guo Wei, Li Shuheng and Zhu Dakui. 2007. Geomorphological Environment and Sustainable Development of the Eastern Coast of Shenzhen. *Journal of Geographical Sciences*, 62(4): 377-386.]
- 国家发展改革委和国家海洋局. 2017. 全国海洋经济发展“十三五”规划 (发改地区 [2017] 861 号). (2017-05-10) [2021-10-08]. <https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/dqs/sjdt/201705/P020190909487471217145.pdf>. [National Development and Reform Commission and State Oceanic Administration. 2017. The 13th Five-Year Plan for Global Marine Economy Development (Development and Reform Region [2017] No. 861). (2017-05-10) [2021-10-08]. <https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/dqs/sjdt/201705/P020190909487471217145.pdf>.]
- 国家海洋局. 2008. 关于改进围填海造地工程平面设计的若干意见 (国海管字 [2008] 37 号). (2008-08-14) [2021-10-09]. http://gc.mnr.gov.cn/201806/t20180615_1796672.html. [State Oceanic Administration. 2008. The Land Reclamation Works on Improving Reclamation of Graphic Design Several Opinions (Sealand Tube Word [2008] No. 37). (2008-08-14) [2021-10-09]. http://gc.mnr.gov.cn/201806/t20180615_1796672.html.]
- 国务院. 1981. 国务院批转国家水产总局关于当前水产工作若干问题的请示报告的通知. (1981-05-04) [2021-10-07]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-10/18/content_5120779.htm. [State Council. 1981. Notice of The State Council Approving and Transferring to the State Fisheries Administration the Request Report on Some Problems in the Current Work of Aquatic Products. (1981-05-04) [2021-10-07]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-10/18/content_5120779.htm.]
- 国务院. 1988. 国务院关于深圳市在国家计划中实行单列的批复 (国函 [1988] 121 号). (1988-10-03) [2021-10-08]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2011-11/15/content_5083.htm. [State Council. 1988. Reply of The State Council Concerning the Implementation of Separate Listing in the State Plan of Shenzhen (State Letter [1988] No. 121). (1988-10-03) [2021-10-08]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2011-11/15/content_5083.htm.]
- 国务院. 2019. 中共中央国务院关于支持深圳建设中国特色社会主义先行示范区的意见. (2019-08-09) [2021-10-07]. <http://www.mofcom.gov.cn/article/b/g/201909/20190902900710.shtml>. [State Council. 2019. Opinions of the CPC Central Committee and The State Council on Supporting Shenzhen in Building a Pilot

- Demonstration Zone of Socialism with Chinese Characteristics. (2019-08-09) [2021-10-07]. <http://www.mofcom.gov.cn/article/bg/201909/20190902900710.shtml>.]
- 国家海洋局 908 专项办公室. 2005a. 908 全国海岸线调查技术规程. 北京: 海洋出版社. [Special Office of the State Oceanic Administration. 2005a. *908 Technical Regulations for National Coastline Survey*. Beijing: China Ocean Press.]
- 国家海洋局 908 专项办公室. 2005b. 我国近海海洋综合调查与评价专项海岸带调查技术规程. 北京: 海洋出版社. [State Oceanic Administration 908 Special Office. 2005b. *Technical Regulation of Coastal Zone Investigation for Marine Comprehensive Survey and Evaluation*. Beijing: China Ocean Press.]
- 侯西勇, 徐新良. 2011. 21 世纪初中国海岸带土地利用空间格局特征. 地理研究, 30 (8): 1370-1379. [Hou Xiyong and Xu Xinliang. 2011. Spatial Pattern of Land Use in Coastal Zone of China in the Early 21st Century, China. *Geographical Research*, 30(8): 1370-1379.]
- Huang F, Xu Y, Tan Z, Wu Z, Xu H, Shen L, Xu X, Han Q, Guo H and Hu Z. 2018. Assessment of Pollutions and Identification of Sources of Heavy Metals in Sediments from West Coast of Shenzhen, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 25: 3647-3656.
- 贾明明, 刘殿伟, 王宗明, 汤旭光, 董张玉. 2013. 面向对象方法和多源遥感数据的杭州湾海岸线提取分析. 地球信息科学学报, 15 (2): 262-269. [Jia Mingming, Liu Dianwei, Wang Zongming, Tang Xuguang and Dong Zhangyu. 2013. Coastline Extraction and Analysis of Hangzhou Bay Using Object-Oriented Method and Multi-Source Remote Sensing Data. *Journal of Geo-Information Science*, 15(2): 262-269.]
- Kermani S, Boutiba M, Guendouz M, Guettouche M S and Khelfani D. 2016. Detection and Analysis of Shoreline Changes Using Geospatial Tools and Automatic Computation: Case of Jijelian Sandy Coast (East Algeria). *Ocean & Coastal Management*, 132: 46-58.
- 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, 郭国锋. 2016. 海岸带地理环境遥感监测综述. 遥感学报, 20 (5): 1216-1229. [Li Qingquan, Lu Yi, Hu Shuibao, Hu Zhongwen, Li Hongzhong, Liu Peng, Shi Tiezhu, Wang Chisheng, Wang Junjie and Wu Guofeng. 2016. Overview of Remote Sensing Monitoring of Coastal Geographical Environment. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 1216-1229.]
- Li X and Damen M C J. 2010. Coastline Change Detection with Satellite Remote Sensing for Environmental Management of the Pearl River Estuary, China. *Journal of Marine Systems*, 82: S54-S61.
- 李孝娟, 傅文辰, 繆迪优, 苏广明. 2019. 陆海统筹指导下的深圳海岸带规划探索. 规划师, 35 (7): 18-24. [Li Xiaojuan, Fu Wenchen, Miao Diyou and Su Guangming. 2019. Coastal Zone Planning and Exploration in Shenzhen Under the Guidance of Land-Sea Coordination. *Planners*, 35(7): 18-24.]
- 李薛, 付东洋, 张莹, 刘大召, 丁又专, 王文芳, 栾虹, 蒋城飞. 2016. 超强台风“威马逊”对南海西北海域海洋环境的影响. 热带海洋学报, 35 (6): 19-28. [Li Xue, Fu Dongyang, Zhang Ying, Liu Dazhao, Ding Youzhan, Wang Wenfang, Luan Hong and Jiang Chengfei. 2016. Effects of Super Typhoon Rammason on Marine Environment in Northwestern South China Sea. *Journal of Tropical Oceanography*, 35(6): 19-28.]
- 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. [Li You, Wang Yanglin, Peng Jian, Wu Jianshen and Lyu Xiaofang. 2009. Dynamic Evolution of Shenzhen Coastline from 1978 to 2005. *Resources Science*, 31(5): 875-883.]
- 林逸涛. 2018. 深圳市生态系统补偿体制机制研究. 武汉: 武汉大学. [Lin Yitao. 2018. Study on Ecosystem Compensation System and Mechanism in Shenzhen City. Wuhan: Wuhan University.]
- Liu C, Wu X, Cao X and Wu G. 2017. Analysis of Coastline Changes and the Socio-Economic Driving Mechanisms in Shenzhen, China. *Marine Geodesy*, 40(6): 378-403.
- 刘鹏, 王庆, 战超, 王昕, 杜国云, 李雪艳. 2015. 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. 海洋与湖沼, 46 (3): 585-594. [Liu Peng, Wang Qing, Zhan Chao, Wang Xin, Du Guoyun and Li Xueyan. 2015. Study on Shoreline Evolution and Influencing Factors of Yellow River Delta from 1959 to 2002 Based on DSAS and FA. *Oceanologia et Limnologia Sinica (in Chinese)*, 46(3): 585-594.]
- 申家双, 翟京生, 郭海涛. 2009. 海岸线提取技术研究. 海洋测绘, 29 (6): 74-77. [Shen Jiashuang, Zhai Jingsheng and Guo Haitao. 2009. Study on Coastline Extraction Technology. *Marine Surveying and Mapping*, 29(6): 74-77.]
- 深圳市规划和自然资源局. 2018. 深圳市海岸带综合保护与利用规划 (2018—2035). (2018-09-07) [2021-10-07]. http://pnr.sz.gov.cn/ywzy/ghzs/content/post_5841608.html. [Shenzhen City Planning and Natural Resource Bureau. 2018. Shenzhen Comprehensive Protection and Utilization of Coastal Zone Planning (2018-2035). (2018-09-07) [2021-10-07]. http://pnr.sz.gov.cn/ywzy/ghzs/content/post_5841608.html.]
- 深圳市人民政府. 2019. 深圳经济特区海域使用管理条例. (2019-12-31) [2021-10-28]. http://sf.sz.gov.cn/fggzsjcx/content/post_7260475.html. [Shenzhen City People's Government. 2019. Waters Using the Management Regulations of Shenzhen Special Economic Zone. (2019-12-31) [2021-10-28]. http://sf.sz.gov.cn/fggzsjcx/content/post_7260475.html.]
- 深圳市政协人资环委课题组. 2020. 推进深圳全球海洋中心城市建设. 特区实践与理论, (2): 70-78. [Research Group of Human Resources and Environment Committee of Shenzhen CPPCC. 2020. Promoting the Construction of Shenzhen as a Global Marine Center City. *Special Zone Practice and Theory*, (2): 70-78.]
- 苏奋振. 2015. 海岸带遥感评估. 北京: 科学出版社. [Su Fenzhen. 2015. *Remote Sensing Evaluation of Coastal Zone*. Beijing: Science Press.]
- Sui L, Wang J, Yang X and Wang Z. 2020. Spatial-Temporal

- Characteristics of Coastline Changes in Indonesia from 1990 to 2018. *Sustainability*, 12: 3242.
- 孙伟富, 马毅, 张杰, 刘善伟, 任广波. 2011. 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*, (3): 41-44. [Sun Weifu, Ma Yi, Zhang Jie, Liu Shanwei and Ren Guangbo. 2011. Research on the Establishment and Extraction Methods of Different Types of Coastline Remote Sensing Interpretation Markers. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (3): 41-44.]
- 孙永光, 李秀珍, 何彦龙, 贾悦, 马志刚. 2010. 长江口不同区段围垦区土地利用/覆被变化的时空动态. *应用生态学报*, 21(2): 434-441. [Sun Yongguang, Li Xiuzhen, He Yanlong, Jia Yue and Ma Zhigang. 2010. Spatio-Temporal Dynamics of Land Use/Cover Change in Different Reclamation Areas of the Yangtze River Estuary. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 21(2): 434-441.]
- Thoai D T, Dang A N and Oanh N T K. 2019. Analysis of Coastline Change in Relation to Meteorological Conditions and Human Activities in Ca mau cape, Viet Nam. *Ocean & Coastal Management*, 171: 56-65.
- Valeyev A, Karatayev M, Abitbayeva A, Uxukbayeva S, Bektursynova A and Sharapkhanova Z. 2019. Monitoring Coastline Dynamics of Alakol Lake in Kazakhstan Using Remote Sensing Data. *Geosciences*, 9: 404.
- 毋亭. 2016. 近 70 年中国大陆岸线变化的时空特征分析. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所. [Wu Ting. 2016. *Temporal and Spatial Characteristics of Shoreline Changes in China during the Past 70 Years*. Yantai: Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences.]
- Wu X, Liu C and Wu G. 2017. Spatial-Temporal Analysis and Stability Investigation of Coastline Changes: A Case Study in Shenzhen, China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(1): 45-56.
- 徐涵秋. 2005. 利用改进的归一化差异水体指数 (MNDWI) 提取水体信息的研究. *遥感学报*, (5): 589-595. [Xu Hanqiu. 2005. Study on Water Information Extraction Using Improved Normalized Difference Water Index (MNDWI). *Journal of Remote Sensing*, (5): 589-595.]
- Xu N, Gao Z and Ning J. 2016. Analysis of the Characteristics and Causes of Coastline Variation in the Bohai Rim (1980 - 2010). *Environmental Earth Sciences*, 75(8): 719.
- 闫秋双. 2014. 1973 年以来苏沪大陆海岸线变迁时空分析. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所. [Yan Qiushuang. 2014. *Temporal and Spatial Analysis of Shoreline Changes in Jiangsu and Shanghai Mainland Since 1973*. Qingdao: First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration.]
- 杨桂山. 2001. 中国海岸环境变化及其区域响应. 南京: 中国科学院研究生院 (南京地理与湖泊研究所). [Yang Guishan. 2001. *Coastal Environmental Change and Regional Response in China*. Nanjing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (Nanjing Institute of Geography and Limnology).]
- 杨玉娣, 边淑华. 2001. 海岸线及其划定方法探讨. *海洋开发与管理*, (3): 34-35. [Yang Yudi and Bian Shuhua. 2001. Discussion on Coastline and Its Demarcation Methods. *Ocean Development and Management*, (3): 34-35.]
- 于海波, 莫多闻, 吴健生. 2009. 深圳填海造地动态变化及其驱动因素分析. *地理科学进展*, 28(4): 584-590. [Yu Haibo, Mo Duowen and Wu Jiansheng. 2009. Dynamic Change of Land Reclamation in Shenzhen and Its Driving Factors. *Progress in Geography*, 28(4): 584-590.]
- Zhang K, Douglas B C and Leatherman S P. 2004. Global Warming and Coastal Erosion. *Climatic change*, 64(1): 41-58.
- Zhang Y and Hou X. 2020. Characteristics of Coastline Changes on Southeast Asia Islands from 2000 to 2015. *Remote Sensing*, 12: 519.
- 张怡. 2014. 近 40 年来珠江口海岸线变迁遥感分析. 呼和浩特: 内蒙古师范大学. [Zhang Yi. 2014. *Remote Sensing Analysis of Shoreline Changes of Pearl River Estuary in Recent 40 Years*. Hohhot: Inner Mongolia Normal University.]
- 周凯, 王壮雄. 2012. 强化深圳海岸和海域管理 科学利用海洋资源. *海洋开发与管理*, 29(3): 35-37. [Zhou Kai and Wang Zhuangxiong. 2012. Strengthening the Management and Scientific Utilization of Marine Resources in Shenzhen Coast and Sea Area. *Ocean Development and Management*, 29(3): 35-37.]
- 庄大方, 刘纪远. 1997. 中国土地利用程度的区域分异模型研究. *自然资源学报*, (2): 10-16. [Zhuang Dafang and Liu Jiyuan. 1997. Study on Regional Differentiation Model of Land Use Degree in China. *Journal of Natural Resources*, (2): 10-16.]

作者贡献声明:

卫诗韵: 数据收集处理, 制图分析并撰写初稿。

付东洋: 框架确定, 全程指导并修改。

刘大召: 参与文章指导。

徐华兵: 参与文章指导。

李高聪: 参与文章指导。

程阳艳: 协助初期数据收集。

Remote Sensing Monitoring of Shenzhen Coastline Changes over the Past 40 Years

Wei Shiyun¹, Fu Dongyang^{1,2,3}, Liu Dazhao^{1,3}, Xu Huabing^{1,3}, Li Gaocong^{1,3} and Cheng Yangyan¹

(1. College of Electronics and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. Shenzhen Research Institute of Guangdong Ocean University, Shenzhen 518018, China; 3. Provincial Engineering and Technology Research Center of Marine Remote Sensing and Information Technology, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: Since the reform and opening-up, the ecological environment of the coastline of Shenzhen has been under pressure from high-intensity human exploitation activities. Additionally, the structure, type, and length of the coastline has undergone significant changes. Studying the changes of the Shenzhen coastline over the past 40 years is helpful to reveal its spatial and temporal evolutionary processes and driving mechanisms to provide a reference for the protection and utilization of coastline resources. This study screened 16 scenes of the Shenzhen regional Landsat remote sensing images from 1979 to 2019, and performed a coastline extraction using remote sensing (RS) and geographic information system (GIS) methods to ensure alignment, accuracy, and extraction precision to meet the research requirements. Based on four coastline evaluation indexes (End Point Rates, Linear Regression Rates, Coastline-type Diversity Index, and Comprehensive Index of Coastline Utilization), the spatiotemporal characteristics of the coastline length, structure, types, and rate of change were analyzed to explore the factors driving the spatio-temporal evolution of the Shenzhen coastline. The results found that over the past 40 years, (1) the length of the Shenzhen coastline has experienced a continuously increasing trend, with a total increase of 41.52 km, and an average annual growth of 1.04 km. All the natural coastlines within the coastal area of Shenzhen decreased significantly to varying degrees, with a total decrease of 56.61%, while the proportion of artificial coastlines increased rapidly. (2) The change in coastline type in Shenzhen is mainly from the early muddy and sandy coastline to the farming reclamation and engineering construction coastline, i.e., the transition from natural to artificial shore. Among them, coastline length increased the most from 1979 to 1988. The most drastic coastline change was observed from 1979 to 1994, and the peak period of land reclamation was from 1994 to 2008. After 2008, Shenzhen coastline development gradually entered a sustainable and rational stage. (3) The spatial vicissitudes of the Shenzhen coastline have progressed through the stages of initiation, acceleration, and rational restriction. Areas with significant coastline expansion were located in Bao'an International Airport, Qianhai Cooperation Zone, Shenzhen Bay of Houhai, Yantian District, and near Longqi Bay. The change in the west coast of Shenzhen is more drastic than that of the east coast. The maximum rate of change (EPR) on the west coast reaches 422.19 m/a, which occurred during the Shekou Peninsula seaward extension period from 2004 to 2008. The EPR on the east coast reached the highest level of 449.65 m/a during the development and construction of Yantian Port from 1994 to 1998; and (4) the Shenzhen coastline change is a dynamic and a continuous process of change. Human activities, special zone policies, and natural factors were the main driving forces of the coastline changes. The special zone policy is the core driving force for Shenzhen's population expansion, urban sprawl, and the fundamental reason for the reduction in natural coastlines and the growth of artificial coastlines. This study provides important guidance for future sustainable urban development in Shenzhen.

Keywords: coastline; farming reclamation; engineering construction; driving factors; sustainable development; Shenzhen