

doi: 10.12029/gc20210302

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[J]. 中国地质, 48(3): 697—707.
Yang Chenchen, Gan Huayang, Wan Rongsheng, Zhang Yaoming. 2021. Spatiotemporal evolution and influencing factors of coastline in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1975 to 2018[J]. Geology in China, 48(3):697-707(in Chinese with English abstract).

粤港澳大湾区 1975—2018 年海岸线时空演变 与影响因素分析

杨晨晨, 甘华阳, 万荣胜, 张耀明

(中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广东 广州 510700)

摘要:海岸带是陆地向海洋延伸的过渡地带,是人口最为密集、人类活动最频繁的区域,全球超过 50%的人口和 60%的 GDP 总量集聚在离海岸线不足 100 km 的区域。海岸线对海平面上升、海岸侵蚀、港湾淤积、湿地生态资源、近海海域环境等具有重要的指示作用。本研究利用遥感影像获取了粤港澳大湾区(以下简称大湾区)1975—2018 年间的大陆海岸线数据,并基于 GIS 平台,对海岸线开发利用程度以及空间位置变迁进行了定量分析,探讨了海岸线变迁的驱动力。结果表明:(1)大湾区大陆岸线时空变化明显,总体可分为两个阶段。1975—1995 年,岸线长度上升明显,岸线类型格局变化显著;1995 年后,岸线长度增长较缓,但建设用地态势增长强劲。(2)大湾区大陆岸线整体形态上不断曲折化,分形维数逐渐增长;空间位置变化上,大陆岸线不断向海推进,年平均速率达 9.91 m/a,向海延伸最远的地方出现在洪奇门至蕉门和虎跳门至鸡啼门岸段附近,最大值可达 197.88 m/a。(3)大湾区大陆岸线的开发利用程度及人类活动干预程度处于逐渐增强的趋势,人为影响主要体现为港口码头建筑岸线及围填养殖岸线。(4)大湾区的地形地貌、水文特征等自然环境是岸线演变的基础,社会经济发展和政策是岸线演变的重要驱动因素。在 20 世纪末,发展速度对海岸线的影响最大;在 21 世纪初,发展强度则为演变的主要影响因素。

关键词:海岸线变迁;粤港澳大湾区;GIS;遥感;地质调查工程

中图分类号:P737.1 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2021)03-0697-11

Spatiotemporal evolution and influencing factors of coastline in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1975 to 2018

YANG Chenchen, GAN Huayang, WAN Rongsheng, ZHANG Yaoming

(Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 510700, Guangdong, China)

Abstract: Coastline transitionally extending from land to sea is the most densely populated area with the most frequent human activities. More than 50% of the global population and 60% of GDP are concentrated in the area less than 100 km away from the coastline. Coastline plays an important indicator role in sea level rise, coastal erosion, estuary siltation, wetland ecological resources,

收稿日期:2021-03-15;改回日期:2021-05-07

基金项目:中国地质调查项目(DD20190289、DD20211394及DD20190308)资助。

作者简介:杨晨晨,女,1991年生,硕士,工程师,主要从事海岸带遥感地质调查研究;E-mail:1830124812@qq.com。

通讯作者:甘华阳,男,1979年生,博士,教授级高级工程师,主要从事海洋环境地质方面的研究;E-mail:ghuayang@126.com。

and coastal environment, etc. Remote sensing images were interpreted to acquire data about coastline of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area(GBA)from 1975 to 2018. Based on GIS platform, the spatio-temporal changes and influencing factors of shoreline were analyzed. The results reveal that the mainland coastline in GBA witnessed significant temporal and spatial changes, which could be divided into two stages. From 1975 to 1995, the length of shoreline increased significantly, the pattern of shoreline type changed significantly; after 1995, the coastline length increased slowly, but the construction land increased strongly. From 1975 to 2018, the coastline of GBA became more and more tortuous, and the fractal dimension increased. In terms of spatial position change, the coastline of the mainland continued to advance toward the sea, with an average rate of 9.91 m/a. The farthest extension to the sea occurred from Hongqimen to Jiaomen and from Hutiaomen to Jitimens with the maximum rate of 197.88 m/a. The development and utilization of the mainland coastline and the intervention of human activities on coastline evolution in GBA increased gradually. The main shorelines affected by human activities were port construction shoreline and reclamation aquaculture shoreline. The natural environment of GBA, such as topography and hydro-logical characteristics was the basis of coastline evolution. Social and economic development and policies were the important driving factors of coastline evolution. At the end of the 20th century, the development speed had the greatest impact on the coastline, and the development intensity was still the main factor at the beginning of the 21st century.

Key words: shoreline change; Guangdong; Hong Kong; Macao; GIS; RS; geological survey engineering

About the first author: YANG Chenchen, female, born in 1991, engineer, engaged in the remote sensing geological survey of coastal zone; E-mail: 1830124812@qq.com.

About the corresponding author: GAN Huayang, male, born in 1979, professor, engaged in the marine environmental geology research; E-mail: ghuayang@126.com.

Fund support: Funded by the Project of China Geological Survey(No.DD20190289, No.DD20211394 and No.DD20190308).

1 引 言

通常情况下,海岸线可简单地视为海陆分界线,在中国则多指平均大潮时的海陆界线(OSOA, 2005)。便捷的海洋运输、丰富的滨海资源环境促使海岸带地区成为人口最密集的地区,据研究表明,在全球范围内约有45%至60%的人口居住在沿海地区(Boye et al., 2018)。由于自然因素影响和人为活动的干扰,海岸带地区具有高度的动态性和持续的脆弱性(Jayakumar et al., 2016)。随着时间和空间尺度的不断变化,海岸带脆弱性可通过海岸线位置和形态的变化进行量化(Appearing Addo et al., 2008)。海岸侵蚀淤积、海平面上升等自然因素和人工建堤、围海造田等人为因素皆会导致海平面的变化(姚才华等, 2012; Rameli et al., 2015),从而影响海岸带生态环境保护与可持续发展规划(Davoodi et al., 2017; 孟伟庆等, 2017)。海岸线的变化在一定程度上可导致滨海环境的恶化和沿海社会经济的损失,对海岸线变化的持续性监测有助于查明海岸带自然演变过程和评估人为活动对海岸环境演变的影响,是海岸带管理的基础。

海岸线演变是人地关系长时间作用的过程,海

岸线变化趋势分析需要足够多年的数据样本,因此,提取海岸线信息成为研究海岸线演变及其驱动因素的一个关键步骤。传统的海岸线修测技术更为准确,但在区域性海岸线监测中,其对于人力物力的依赖性较大,且耗时长。随着遥感技术快速发展,其凭借覆盖范围大、效率高、成本低等优势逐渐成为海岸线提取和监测其动态变化的主要手段。目前,采用遥感技术提取海岸线的方法有多种,除了目视解译外,还有阈值分割法、边缘检测算子法、活动轮廓模型法、面向对象法等(吴一全等, 2019)。基于提取的海岸线,对海岸线进行时空变化分析的方法主要方法有基线法、动态分割法、基于面积法和缓冲非线性最小二乘法(Ai et al., 2019)。Bheeroo et al.(2016)基于数字海岸分析系统(DSAS)对毛里求斯西北海岸海滩的海岸线变化和侵蚀风险进行了研究。此外,大量的研究不仅关注海岸线的变化,同时对影响海岸线变化的驱动力也进行了分析。Rameli and Jaafar(2015)通过分析马来西亚莫里布海岸线变化相关的因素,认为海岸侵蚀是影响海岸线变化的主要驱动力;高志强等(2014)对中国海岸线的演变过程进行了研究,分析其驱动因素,对1980—2010年中国海岸线围填海状

况进行了评价。此外,孟伟庆等(2017)分析了1979—2014年中国沿海复垦负面生态效应缓解的驱动因素,并构建偏最小二乘回归模型,揭示了可能的影响因素与海岸围垦之间的关系。侯西勇等(2016)对近70年来中国海岸线的变化进行了分析,结果表明,中国近70年来海岸线的变化主要是由海洋经济的不断发展和海岸工程建设引起。

湾区是指由海湾、港湾及邻近岛屿和周边城市连接成区,人口、产业、贸易、信息等资源集聚的区域。旧金山湾区、东京湾区、纽约湾区和粤港澳大湾区(以下简称大湾区)并称为世界四大湾区。其中,东京湾区国土面积小、资源有限,对于海洋资源的利用最为严重,为缓解用地压力,日本围绕东京湾开始围海造地,近九成的海岸线被开发成人工岸线。“粤港澳大湾区”是2008年在《珠江三角洲地区改革发展规划纲要(2008—2020)》中提出的,2017年上升为国家战略,持续受到中央和地方的广泛关注,对于大湾区尤其是珠江口海岸线的研究也层出不穷。以往研究中讨论了海岸线长度和类型的变化、相应的动力过程、各种岸线类型的演变及其相关原因(张怡,2014;于杰等,2014;刘锋等,2015);但相关研究中,对大湾区海岸线从时空演变、利用程度到驱动力影响的系统分析较少。本文基于遥感和GIS,对1975—2018年大湾区大陆海岸线长度、类型、位置的时空变化研究,结合海岸线的开发利用程度,分析影响其演变的驱动力。

2 研究区概况及数据来源

大湾区涵盖广东省广州、深圳、珠海、佛山、惠州、东莞、中山、江门、肇庆9市和香港、澳门2个特别行政区。大湾区三面环山,三江汇聚,面向南海,地处海陆交互作用地带,地质条件优越,资源环境承载能力较大,但是区域差异较强(秦绪文等,2019)。

大湾区汇集珠江三角洲河网主干道之八大口门,是珠江三角洲涉外航运的必经水道,拥有世界上最大的空港群和海港群。远在唐朝已成为中国对外通商的主要航道,一千多年来是发展中国对外通商经济、文化交流的极为主要的出海通道,是广东省经济发展中心,依托其独有的区位优势,建立了以国内市场为导向的外向型经济快速发展格局。大湾区

以平原海岸为主,工商农业经济地位十分重要,但由于受地势地平、海岸侵蚀、地面下沉和填海造地等自然与人为条件的影响,其海岸线快速变化,从而引起许多环境问题(赵玉灵等,2018)。因此,研究大湾区海岸线变化具有重要的现实意义。

本文研究的大湾区大陆海岸线涉及到广东省广州、深圳、珠海、东莞、中山、江门、惠州、香港和澳门共9个城市。采用的数据为1975—2018年6期Landsat遥感影像(表1),结合DEM陆地高程数据对遥感影像进行校正,参考Google Earth卫星遥感数据获取到研究区内的海岸线数据。考虑到所用遥感影像分辨率为30 m和79 m,所选时期潮位相近,潮位对海岸线的提取影响不大。因此,本研究未对解译海岸线进行潮汐校正。

3 研究方法

3.1 海岸线时空变化分析

3.1.1 海岸线变化强度分析

利用区域内海岸线在研究时期内长度变化的比率来表示海岸线的变化程度,从而对研究区内不同区域岸线变迁特征进行研究,具体计算公式为:

$$LCI_{ij} = \frac{(L_j - L_i)}{L_{i(j-i)}} \times 100 \quad (1)$$

式中, LCI_{ij} 为海岸线变化强度, L_i 、 L_j 分别为第*i*、*j*年的海岸线长度, LCI_{ij} 的正负可以表示海岸线长度的增长与缩短,其绝对值大小可表示特定时期内海岸线的变化强度(李加林,2019)。

3.1.2 海岸线分形维数分析

分形维数能够在一定程度上表征岸线的不规则性,描述岸线局部与整体的相似性(李加林等,2019),分形维数值越大,岸线形状越曲折复杂。本文采用网格法获取大湾区大陆海岸线的分形维数。网格法是用不同长度的正方形格网连续且不重复的覆盖被测海岸线。当网格边长*r*发生变化时,全覆盖被测海岸线所需的网格数据*N(r)*也有所不同(夏涵韬等,2020),根据分形维数理论可得: $N(r) \propto r^{-D}$ 两边取对数得:

$$\ln N(r) = D \ln r + A \quad (2)$$

其中*D*表示被测海岸线的分形维数,*A*为常数。

3.1.3 海岸线空间位置变化分析

海岸线空间位置变化既可以刻画分析海岸线

表1 大湾区大陆海岸线遥感数据源信息

Table 1 The data sources and description of shoreline in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay

序号	传感器类型	轨道号	成像时间	空间分辨率/m	序号	传感器类型	轨道号	成像时间	空间分辨率/m
1	Landsat2 MSS	132/45	1973-12-08	80	16	Landsat5 TM	123/45	2000-07-27	30
2	Landsat2 MSS	130/44	1973-10-31	80	17	Landsat5 TM	122/44	2000-10-08	30
3	Landsat2 MSS	130/45	1973-10-31	80	18	Landsat5 TM	121/44	2000-09-15	30
4	Landsat2 MSS	131/45	1973-11-01	80	19	Landsat5 TM	121/45	2000-07-13	30
5	Landsat2 MSS	131/44	1975-12-24	80	20	Landsat5 TM	122/45	2010-09-18	30
6	Landsat5 TM	121/45	1986-07-23	30	21	Landsat5 TM	123/45	2010-11-12	30
7	Landsat5 TM	122/44	1986-07-30	30	22	Landsat5 TM	122/44	2010-09-18	30
8	Landsat5 TM	122/45	1986-07-30	30	23	Landsat5 TM	121/44	2010-08-10	30
9	Landsat5 TM	123/45	1986-08-06	30	24	Landsat5 TM	121/45	2010-08-26	30
10	Landsat5 TM	122/45	1995-09-09	30	25	Landsat8 OLI	122/45	2018-04-10	30
11	Landsat5 TM	123/45	1995-10-18	30	26	Landsat8 OLI	123/45	2018-09-15	30
12	Landsat5 TM	122/44	1995-09-09	30	27	Landsat8 OLI	122/44	2018-04-01	30
13	Landsat5 TM	121/44	1995-09-18	30	28	Landsat8 OLI	121/44	2018-10-03	30
14	Landsat5 TM	121/45	1995-09-02	30	29	Landsat8 OLI	121/45	2018-09-01	30
15	Landsat5 TM	122/45	2000-07-04	30					

空间演化过程,又可以预测未来海岸线变化趋势。以往的研究通常采用端点速率法定量表示海岸线的空间位置变化情况,用基于两个历史海岸线位置移动的距离除以时间间隔来计算海岸线端点变化速率。其数学计算公式为:

$$EPR = \frac{(D1 - D2)}{T1 - T2} \quad (3)$$

式中, $T1$ 和 $T2$ 为研究历史岸线中最大的时间间隔, $D1$ 和 $D2$ 分别为时间 $T1$ 和 $T2$ 的岸线位置。

3.2 海岸线开发利用强度

3.2.1 海岸线人工化指数

海岸线人工化是由于人类各种活动作用自然岸线向人工岸线转变的过程,可反映人类活动对海岸线的干扰程度,其值用人工岸线占总海岸线长度的占比表示,计算公式为:

$$IA = \frac{M}{L} \quad (4)$$

式中, IA 为人工化指数, M 为被测海岸线人工岸线的长度, L 为被测海岸线总长度。

3.2.2 海岸线利用程度综合指数

海岸线利用程度综合指数可以反映研究区的人类活动对岸线变化的影响,表示海岸线对人类各种开发利用活动的响应,计算公式为:

$$ICUD = \sum_{k=1}^n (A_k \times C_k) \times 100 \quad (5)$$

式中: A_k 为第 k 种海岸线的开发利用强度指数, C_k 为第 k 种海岸线的长度百分比, n 为海岸线类型数。根据人类不同的开发活动方式对海岸线的干扰作用的大小,赋值给各岸线相应的开发利用强度指数(何改丽等,2019;李加林等,2019)(表2)。

4 大湾区大陆岸线时空演变分析

4.1 大湾区大陆岸线长度和强度变化特征分析

根据遥感数据对大湾区大陆岸线信息进行提取,可得大湾区大陆海岸线1975年、1985年、1995年、2000年、2010年和2018年6个时相的长度及变化情况(图1,图2)。综合分析,大湾区大陆岸线1975—2018年间的长度变化较为显著,总体呈增长趋势,长度变化主要集中在1975—1995年内。1975年大湾区大陆岸线长度为1435.94 km,自1979年中央正式批准广东、福建两省在对外经济活动中实行特殊政策后,大陆岸线长度急速增长,至1995年,大陆岸线长度增至1535.63 km,岸线变化强度为6.94%;1995年之后,大陆岸线长度增长相对较慢,2000年、2010年和2018年大陆岸线长度分别为1548.91 km、1582.98 km和1623.27 km,增长速度较

表2 大湾区大陆岸线开发利用强度指数表

Table 2 Utilization strength index of the coastline in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

利用方式	港口码头岸线	建筑岸线	养殖岸线	基岩岸线	砂质岸线	生物岸线
强度指数(A)	4	4	3	1	2	1

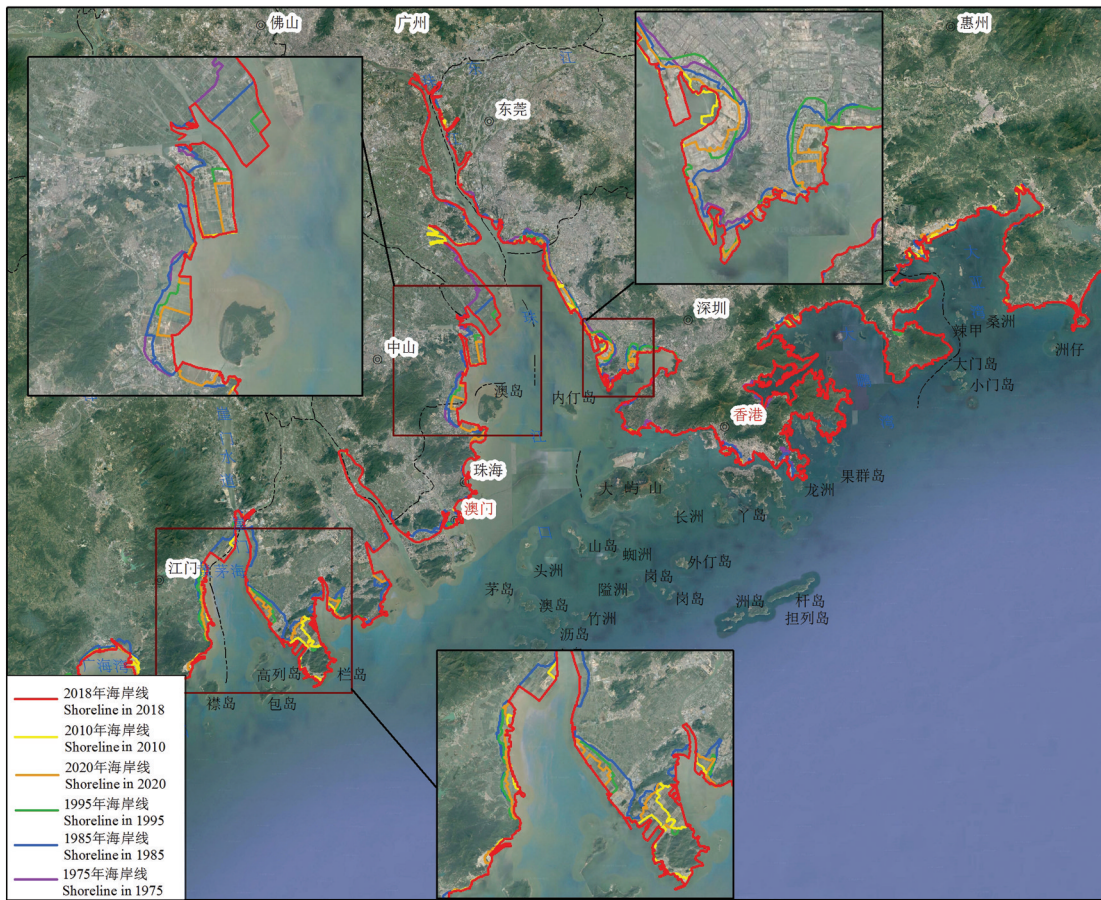


图1 大湾区大陆岸线变迁图(1975—2018年)

Fig.1 The shoreline distribution of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1975 to 2018

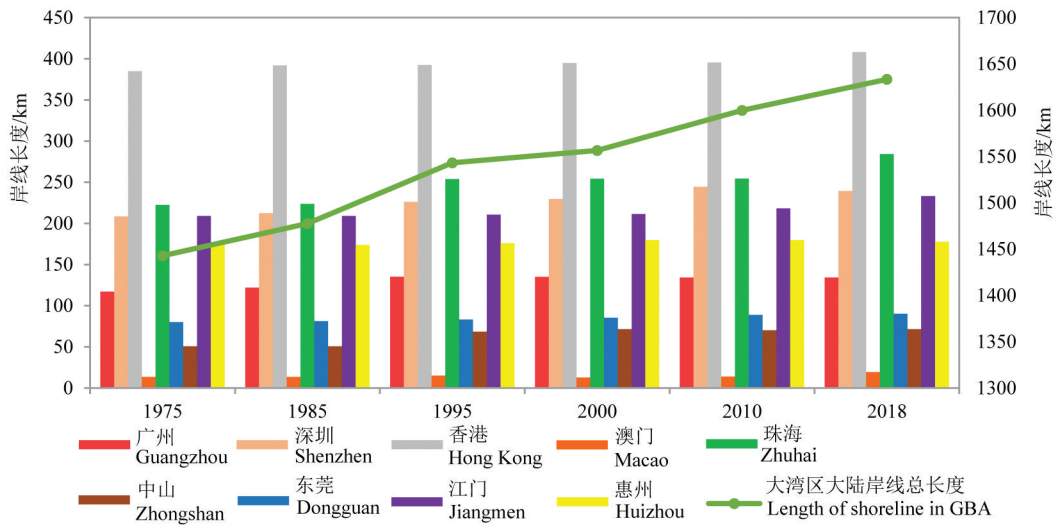


图2 大湾区大陆岸线长度变化统计图(1975—2018年)

Fig.2 The shoreline length changes of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1975 to 2018

慢,岸线变化强度也随之降低。

从空间上分析,大湾区内不同城市大陆岸线变化存在一定的差异(图3),1975—1985年,广州、深圳市和东莞在大湾区9个城市中大陆岸线的长度增长较为显著,岸线变化强度分别为4.08%、1.88%和1.82%;1985—1995年是大湾区内各个城市岸线长度变化最为显著的时期,此时期内,中山、珠海、广州和澳门的大陆岸线长度增长最快,岸线变化强度分别为35.13%、13.47%、10.9%和10.37%;1995—2000年,澳门由于南湾湖的建成,导致周边原来曲折的岸线变的规则平直,岸线长度大幅度减少,其他城市大陆岸线基本呈增长趋势,但幅度较小;2000—2018年,大湾区大陆岸线平稳增长,其中,2010—2018年,港珠澳大桥的建立和澳门新城填海区的建成使得澳门岸线大幅增长,变化强度达39.26%。

4.2 大湾区大陆岸线类型结构及多样性变化

大陆岸线类型结构与地质构造、地貌形态与海陆作用、人类活动有着密不可分的联系,是其共同影响的外在表现(李加林等,2019)。岸线类型中人工岸线与自然岸线的比例以及人工岸线的开发利用方式在一定程度上可以揭示海岸的自然条件和资源特征。受地势条件的影响,人工岸线主要集中在地形较为平坦、经济开发利用强度大的区域,自然岸线主要分布于地貌隆起岸段和河流入海

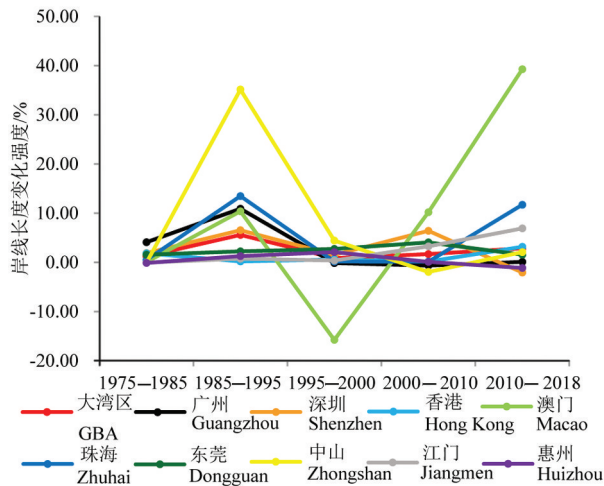


图3 大湾区大陆岸线变化强度统计图(1975—2018年)
Fig.3 The shoreline intensity changes of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1975 to 2018

处。本文中从岸线类型、岸线人工化指数以及岸线利用程度综合指数三个方面对大湾区大陆岸线的类型结构及多样性变化进行分析。

4.2.1 大湾区大陆岸线类型变化分析

大陆岸线类型结构的变化可反映出人类活动的方式及强度变化情况及转移趋势,是大湾区大陆岸线研究的重要内容。基于不同岸线类型的遥感影像特征,解译得到了大湾区各时相的岸线类型分布及变化情况(表3,图4)。结果表明,大湾区2018年大陆岸线类型以人工岸线为主,人工岸线总长度为954.59 km,占大陆岸线总长的58.02%,根据对人工岸线开发利用方式以及岸线状态恢复难易程度,可进一步分为港口码头建筑岸线和养殖岸线两种,其中港口码头建筑岸线长度为683.9 km,约占人工岸线长度的71.64%,养殖岸线为270.69 km;基岩岸线长度为581.92 km,占大陆岸线总长度的35.85%;砂质岸线长度为70.99 km,占大陆岸线总长度的4.37%;生物岸线和泥质岸线分布较少,生物岸线集中在深圳湾和中山沿海等地,泥质岸线主要分布在大亚湾。

时间序列上,1975—2018年间大湾区大陆岸线中人工岸线变化较为显著。随着1979年中央对广东省改革开放政策的提出,海洋运输业高速发展,港口建设及临港货场和加工业扩建均需大量建设用地,多地围填用海导致港口码头和建筑岸线急剧增加,1975年港口码头建筑岸线长度为367.95 km,至2000年增长为606.47 km;1975—1995年,养殖岸线也处于增长趋势,主要由于渔业经济效益高于农业,大湾区沿海城市开发了大规模的围海养殖用地,1995—2000年,多数围填养殖用地被改造为建筑用地,该时期内港口码头与建筑岸线与养殖岸线的变

表3 大湾区大陆岸线类型长度(km)统计(1975—2018年)
Table 3 The shoreline type length changes of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1975 to 2018

年份	港口码头 /建筑岸线	养殖岸线	基岩岸线	砂质岸线	生物岸线
2018	683.9	270.69	581.92	70.99	15.77
2010	643.5	269.41	586.32	70.87	12.88
2000	606.47	261.8	591.74	76.56	12.34
1995	476.73	370.6	594.01	82.25	12.04
1985	390.94	361.41	597.65	82.19	12.15
1975	367.95	357.53	615.83	82.27	12.36

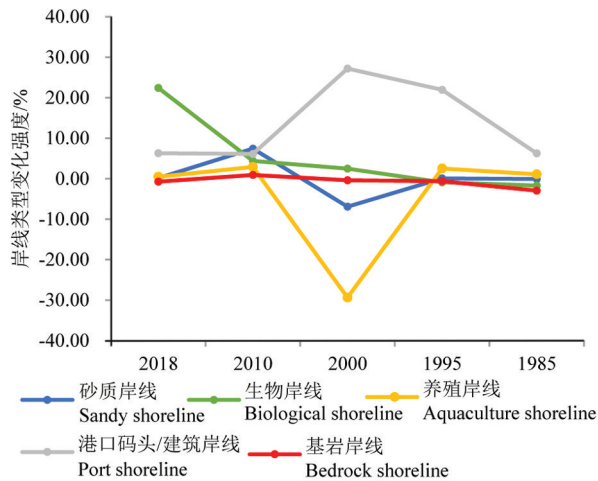


图4 大湾区大陆岸线类型变化统计图(1975—2018年)
Fig.4 The shoreline type changes of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1975 to 2018

化呈现互补状态;2000年之后大湾区大陆岸线类型转用进入相对平缓期,但是港口码头岸线和建筑岸线的长度一直处于增长状态。1975—2018年间,大湾区大陆岸线中自然岸线总体处于下降趋势,其中砂质岸线和基岩岸线一直处于减少的趋势,1975—2000年,生物岸线长度减少,2000年后由于环境保护和生态修复的提出,生物岸线长度有所上升。

4.2.2 大湾区大陆岸线人工化指数分析

通过计算,得到1975—2018年间大湾区及其9个沿海城市大陆岸线的人工化指数(表4)。大湾区大陆岸线人工化指数自1975年来持续增长,1975年人工化指数为50.50%,至2018年增长为58.02%,长期对大陆岸线高强度开发破坏了岸线的自然属性,使其不断向人工岸线转变。从9个沿海城市分析,广州、澳门、东莞和中山的大陆岸线人工化指数较高,且与大湾区大陆岸线演化趋势一致,不断上升;而香港、深圳和珠海人工化指数前期由于高强度的

围填造地进行人工养殖、港口码头的建设等开发活动快速增长,后期开发强度有所缓解后,随着大陆岸线围填后新滩涂资源的生成,新的自然岸线占比有所增加,人工化指数降低。

4.2.3 大湾区大陆岸线利用程度综合指数分析

海岸线利用程度反映了人类活动对于海岸线的开发程度。根据式(5)得到大湾区大陆岸线利用程度综合指数(图5)。自1975年以来,大湾区大陆岸线利用程度综合指数由232.34增加到262.43,呈稳定上升状态,表明该时期内,大湾区人类活动对海岸线的利用在不断加剧,体现了大湾区40余年来在社会经济快速发展的背景下人类活动的效应。

不同时期内,大湾区的9个沿海城市的大陆岸线利用程度综合指数变化幅度存在一定差异,澳门、东莞、广州、珠海和中山的利用程度综合指数相对较高,其中澳门由于其人口密度大,国土空间拓展最多,对岸线的人工利用程度最高,多年来均为400。由于地形地势的限制,香港、深圳、东莞和惠州多为海湾与半岛,基岩岸线开发利用难度大,大陆岸线的开发利用主要集中在海湾等平坦的区域;相对泥沙的自然淤积,岸线的围垦养殖以及港口码头的建设等开发活动占据一定优势。因此,以上区域大陆岸线的利用程度综合指数上升较快。

4.3 大湾区大陆岸线分形时空特征变化分析

根据式(2)得到大湾区大陆岸线的分形维数(表5),结果表明,1975—2018年期间,大湾区大陆岸线分形维数呈逐渐上升的趋势。1975年大湾区大陆岸线分形维数为1.0239,除香港澳门外,大湾区大陆岸线基本处于未开发状态,随着城市急剧扩张,人们向海用地程度不断加剧,岸线形态不断破碎化,至2010年,大湾区大陆岸线分形维数增长至1.0455;2010年以来,围填速度趋于缓和,大湾区大陆岸线形态趋于稳定,分形维数变化不大。

表4 大湾区大陆岸线人工化指数(%)统计(1975—2018年)

Table 4 Artificial shoreline index of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1975 to 2018

年份	江门	珠海	中山	澳门	广州	东莞	深圳	香港	惠州	大湾区
2018	72.74	82.90	100.00	100.00	100.00	100.00	49.33	18.16	31.06	58.02
2010	64.05	81.01	100.00	100.00	100.00	100.00	50.41	17.61	30.21	56.54
2000	63.87	80.36	100.00	100.00	100.00	100.00	56.08	14.14	22.78	55.54
1995	63.74	80.33	98.68	100.00	100.00	100.00	44.95	17.00	22.24	53.81
1985	63.51	85.55	96.81	98.79	98.32	97.98	41.42	14.90	20.27	52.05
1975	63.63	82.10	95.43	96.98	96.51	95.23	40.40	12.58	20.13	50.50

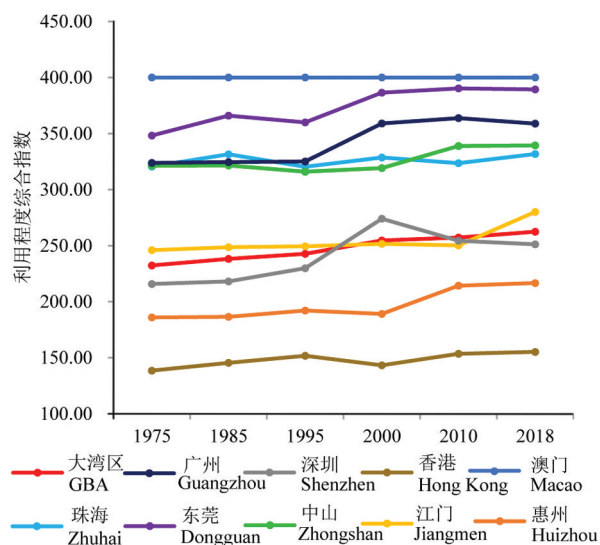


图5 大湾区大陆岸线利用程度综合指数变化统计图
(1975—2018年)

Fig.5 The shoreline utilization index of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1975 to 2018

区域空间分布上,深圳、香港、珠海和东莞的大陆岸线中多为复杂曲折的港口岸线,由于大量海岸建筑活动、连岛工程等使得岸线形态更为复杂,导致其岸线分形维数相对较高;反之,广州和中山大陆岸线中以大量平直的人工围填岸线为主,岸线曲折度较低,分形维数较低。

4.4 大湾区大陆岸线变化引起的海陆格局变化

采用端点速率法对大湾区大陆岸线空间位置变化进行定量分析。基于数字海岸线分析系统(DSAS),以大湾区1975年大陆岸线向陆50 m缓冲线作为基准线,以100 m为间隔,沿基准线向海一侧做垂直于基准线的等间隔横断面,其中有效断面13010条,根据不同时相断面长度及分布情况对大湾区大陆海岸线的空间位置变化速率进行分析。

从岸线变迁方向上看,1975—2018年大湾区大

陆岸线端点变化速率几乎均为正值,说明岸线空间位置变化在持续向海推进,向陆侵蚀岸段分布较少。向陆侵蚀后退的岸线主要分布在大亚湾和大鹏湾的部分砂质海岸段,该区域海岸线侵蚀受岬湾海岸控制,内凹有限,侵蚀强度较小。

从岸线端点变化速率上看,40余年间,大湾区大陆岸线平均端点变化速率为9.91 m/a,最大值可达197.88 m/a;不同岸段区域岸线空间位置变化差距较大,向海推进最远的地方出现在洪奇门至蕉门和虎跳门至鸡啼门岸段(图6,图7中B和A区域),其中洪奇门至蕉门段向海推进主要是由于中山马鞍岛和广州万顷沙农垦区开发导致,虎跳门至鸡啼门主要由于珠海港高栏港区的不断扩建,高栏连岛大堤的顺利合龙,将高栏岛与珠海陆地相连接,改变了该区域海陆格局;深圳湾蛇口半岛区域岸线向海推进也比较显著(图6,图7中C区域),1979年随着蛇口移山填海第一炮打响,蛇口工业区成立,自此之后的40年中,蛇口半岛不断向海扩张,陆地面积大大增加。

5 驱动力分析

1975—2018年大湾区大陆岸线发生了显著变化,综合岸线时空演变规律结合人工利用程度等因素,影响大湾区大陆岸线的驱动力可归纳为自然环境条件、社会经济发展和政策推动三个方面。

(1)自然环境条件。大湾区是溺谷湾内淤积成的复合三角洲,在地球自转作用下,大湾区向东的海岸淤积冲刷形成的浅滩较多,向西的以基岩海岸为主,因此香港和深圳相比其他沿海城市具有突出的海港优势;而珠江各口门泥沙淤积较厚,便于围滩造田,同样导致岸线不断向海推进(刘旭拢等,2017),如蕉门至横门之间的万顷沙;作为珠江主流西江主要出海口的磨刀门,基于其强径弱潮的水动力环境,潮滩迅速向海推进,为区域内填海造地提

表5 大湾区大陆岸线分形维数变化统计(1975—2018年)

Table 5 The shoreline fractal features changes of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1975 to 2018

年份	江门	珠海	中山	澳门	广州	东莞	深圳	香港	惠州	大湾区
2018	1.0174	1.0239	0.9741	1.0238	0.9791	1.0155	1.0527	1.1156	1.0331	1.0406
2010	1.0181	1.0280	0.9731	1.0261	0.9809	1.0560	1.0562	1.1132	1.0347	1.0415
2000	1.0133	1.0201	0.9758	1.0214	0.9868	1.0401	1.0432	1.1096	1.0342	1.0357
1995	1.0150	1.0193	0.9742	1.0109	0.9856	1.0385	1.0319	1.1102	1.0305	1.0294
1985	1.0127	1.0165	0.9779	1.0103	0.9943	1.0293	1.0176	1.1085	1.0321	1.0278
1975	1.0132	1.0260	0.9642	1.0097	0.9931	1.0244	1.0127	1.1079	1.0311	1.0239

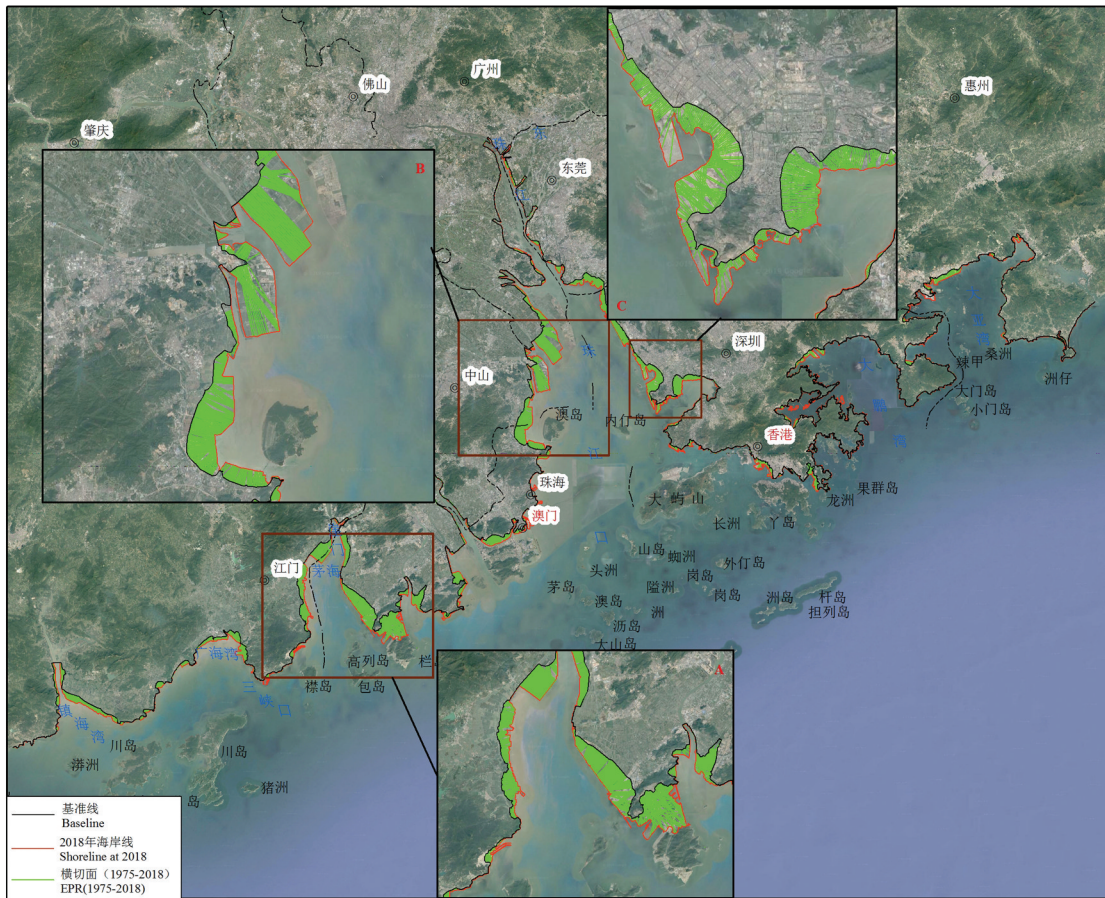


图6 大湾区大陆岸线端点变化横切面示意图

Fig.6 The endpoint change of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1975 to 2018

供了有利条件。

(2) 社会经济发展。大湾区发展向海而兴,是国家海洋综合开发实验区之一,对海洋资源的利用和海洋经济的发展成为必然选择,其大陆岸线的演化与社会经济的发展密不可分。港口码头建设、海水养殖、旅游开发等人类活动对大陆岸线尤其是人工岸线的演化极为重要。在珠江口近岸,工程建设和城市建设对土地资源的需求日益增加,大陆岸线向海持续推进。

在经济全球化背景的影响下,1985—2000年,大湾区国际贸易增多,海洋交通运输业高速发展,港口建设及相关港口配套设施持续扩建,如深圳港蛇口、盐田、大铲等港区的开发建设,使得大湾区大陆岸线由原来的自然岸线主导格局向以人工岸线为主快速转变。

(3) 政策因素。国家和地区政策的调整对于岸线的演变具有明显的推动作用。随着1979年中央

对广东省改革开放政策的提出,深圳和珠海被列为经济特区,珠江口地区开始大力发展工业,广州、深圳、香港和珠海迅速发展为现代化都市,对于岸线的人工改造和利用随之加剧。

2002年,在建设用地受控的背景下,填海造地成为沿海城市推进工业化、城镇化进程的不二之选。珠江口南拓战略性调整填海造地,包括万顷沙填海区、珠海高栏经济区等,此时大陆岸线持续向海推进。2010年后,填海造地的速度趋于缓和,2018年7月,国务院印发了《加强滨海湿地保护严格管控围填海的通知》中对围填海进行管控限制,确保大陆自然岸线保有率不降低。这将对大湾区人工岸线的形态演变产生一定的缓解抑制作用,同时加快了对自然岸线的保护与修复。

6 结论

大湾区地处我国沿海开放前沿,以泛珠三角区

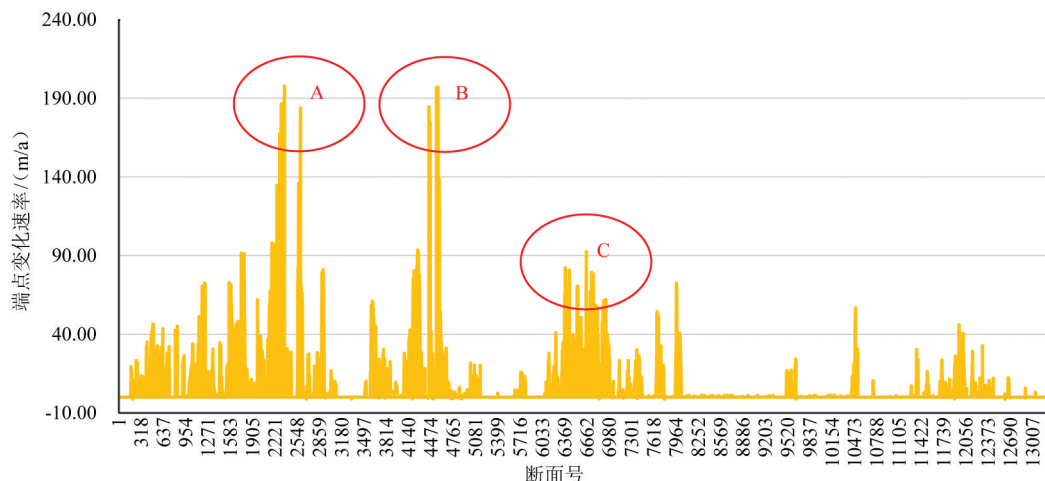


图7 大湾区大陆岸线变化速率统计图(1975—2018年)

Fig. 7 The endpoint change rates of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1975 to 2018

域为广阔发展腹地,在“一带一路”建设中具有重要地位。本文采用RS和GIS技术,对其大陆岸线信息进行提取,分别对岸线长度变化、岸线类型变化、岸线形态结构变化以及岸线的空间位置变化进行研究,主要结论如下:

(1)大湾区大陆岸线时空变化显著。自1975年以来,岸线长度变化过程主要有两个阶段:1975—1995年,岸线长度显著上升,该时期内,中山、珠海、广州和澳门的大陆岸线长度增长最快;1995—2018年,大陆岸线长度增长相对较慢,其中2000年后,持续多年的围海造地使曲折复杂岸线变得规整平直,澳门、广州、深圳以及中山4个城市的大陆岸线长度均有不同程度的下降。

(2)大湾区大陆岸线开发利用程度不断增加。1975—2018年,人类对大湾区大陆海岸线演化的干预程度逐渐加强,且具有阶段性,1975—2000年以促进演化为主,2020—2018年对岸线演化具有一定程度的抑制作用。受人类活动影响的海岸线主要是港口码头建设岸线以及围填养殖岸线,空间分布上以对广州、澳门、东莞和中山的大陆岸线影响最为显著。

(3)大湾区大陆岸线空间形态结构逐渐曲折化。大湾区沿海城市中深圳、香港、珠海和东莞的大陆岸线中多为复杂曲折的港口海岸,并且由于近年来大量海岸构筑活动使得岸线形态更加破碎。

(4)大湾区大陆岸线空间位置在持续向海推进。1975—2018年大湾区大陆岸线端点变化速率几乎均为正值,高值区集中在洪奇门至蕉门和虎跳

门至鸡啼门岸段,中山马鞍岛和广州万顷沙农垦区开发、珠海港高栏港区不断扩建改变了该区域岸段的海陆格局;其次深圳湾蛇口半岛区域岸线向海推进也比较显著。

References

- Ai B, Zhang R, Zhang H. 2019. Dynamic process and artificial mechanism of coastline change in the Pearl River Estuary[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 30:100715.
- Addo K A, Walkden M, Mills J P. 2008. Detection, measurement and prediction of shoreline recession in Accra, Ghana[J]. *Remote Sensing*, 63 (5):543-558.
- Boye C B, Addo K A, Wiafe G, Dzibodi-Ad Jimah K. 2018. Spatio-temporal analyses of shoreline change in the Western Region of Ghana[J]. *Journal of Coastal Conservation*, 22 (4):769-776.
- Bheeroo R A, Chandrasekar N, Kaliraj S, Magesh N S. 2016. Shoreline change rate and erosion risk assessment along the Trou Aux Biches-Mont Choisy beach on the northwest coast of Mauritius using GIS-DSAS technique[J]. *Environmental Earth Sciences*, 75 (5):1-12.
- Da Voodi H, Gharibreza M, Negarestan H, Mortazavi, M S, Lak R. 2017. Ecological risk assessment of the Assaluyeh and Bassatin estuaries (northern Persian Gulf) using sediment quality indices[J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 192:17-28.
- Gao Zhiqiang, Liu Xiangyang, Ning Jicai, Lu Qingshui. 2014. Analysis on changes in coastline and reclamation area and its causes based on 30-year satellite data in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 30(12):140-147 (in Chinese with English abstract).
- He Gaili, LI Jialin, Liu Yongchao, Shi Xiaoli, Ma Jingwu. 2019. Spatio-temporal analysis of land development and utilization

- intensity in Tampa Bay watershed from 1985 to 2015[J]. *Journal of Natural Resources*, 34(1):66–79(in Chinese with English abstract).
- Hou Xiyong, Wu Ting, Hou Wan, Chen Qing, Wang Yuandong, Yu Liangju. 2016. Characteristics of coastline changes in mainland China since the early 1940s [J]. *Science China Earth Sciences*, 59(9): 1791–1802.
- Jayakumar K, Malarvannan S. 2016. Assessment of shoreline changes over the Northern Tamil Nadu Coast, South India using Web GIS techniques[J]. *Journal of Coastal Conservation*, 20(6):477–487.
- Li Jialin, Tian Peng, Shao Shuyao, Wang Haifeng, Wang Lijia, Ye Mengyao. 2019. The change of continental coastline and its development and utilization intensity in the East China Sea[J]. *Journal of Image and Graphics*, 9(10): 1249–1257(in Chinese with English abstract).
- Liu Feng, Tan Chao, Kun Song. 2015. Study on the evolution of the mud in the mud of the Ramen of the Pearl River after mass reclamation[C]//“One belt One Road” Strategy and Marine Technology Innovation—Collection of Academic Papers of China Ocean Society(in Chinese).
- Li Hongyuan, Wang Zhongliang, Meng Weiqing, Mo Xunqiang. 2017. Temporal–spatial variations and driving factors analysis of coastal reclamation in China[J]. *Estuarine coastal and shelf science*, 191: 39–49.
- Li Xulong, Deng Ruru, Xu Jianhui, Gong Qinghua. 2017. Spatiotemporal evolution characteristics of coastlines and driving force analysis of the Pearl River Estuary in the past 40 years[J]. *Journal of Geo-information Science*, 19(10):1336–1345.
- Office of the State Oceanic Administration 908 Special (OSO). 2005. *Regulations of Coastal Investigation Techniques*[M]. Beijing China Ocean Press, 1–2.
- Rameli N, Jaafar M. 2015. Changes of Coastline: A study case of Carey Island–Morib Coast, Selangor, Malaysia[J]. *The Malaysia–Japan Model on Technology Partnership*, 10:301–309.
- Wu Yiquan, Liu Zhonglin. 2019. Research progress on methods of automatic coastline extraction based on remote sensing images[J]. *Journal of Remote Sensing*, 23(4):582–602(in Chinese with English abstract).
- Xia Hantao, Long Yuannan, Liu Cheng. 2020. Spatio–temporal evolution analysis of the coastline in the Pearl River Delta from 1973 to 2018[J]. *Journal of Marine Sciences*, 38(2):26–37(in Chinese with English abstract).
- Yao Caihua, Wu Ziyin. 2012. Shoreline migration and scour–and–siltation alternation in the Lingdingyang estuary over past 30 year[J]. *Journal of Marine Sciences*, 30(3):44–55(in Chinese with English abstract).
- Yu Jie, Chen Guobao, Huang Ziyong, Chen Zuozhi. 2014. Changes in the coastline of three typical bays in Guangdong during recent 10 years revealed by satellite image[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, (3):91–96(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yi. 2014. Analyzing Shoreline Changes of the Pearl River Estuary Based on Remote Sensing in Recent Forty Years[D]. Inner Mongolia Normal University(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yuling. 2018. Remote sensing survey and proposal for protection of the natural resources in Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 30(4):139–147(in Chinese with English abstract).

参考文献

- 高志强, 刘向阳, 宁吉才, 芦清水. 2014. 基于遥感的近30a中国海岸线和围填海面积变化及成因分析[J]. *农业工程学报*, 30(12):140–147.
- 何改丽, 李加林, 刘永超, 史小丽, 马静武. 2019. 1985–2015年美国坦帕湾流域土地开发利用强度时空变化分析[J]. *自然资源学报*, 34(1):66–79.
- 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[J]. *中国科学:地球科学*, 59(9): 1791–1802
- 李加林, 田鹏, 邵姝遥, 汪海峰, 王丽佳, 叶梦姚. 2019. 中国东海区大陆岸线变迁及其开发利用强度分析[J]. *自然资源学报*, 34(9): 1886–1901.
- 刘锋, 谭超, 坤松. 2015. 大规模围垦后珠江磨刀门河口拦门沙演变研究[C]. “一带一路”战略与海洋科技创新——中国海洋学会2015年学术论文集.
- 刘旭拢, 邓孺孺, 许剑辉, 宫清华. 2017. 近40年来珠江河口区海岸线时空变化特征及驱动力分析[J]. *地球信息科学学报*, (10): 1336–1345.
- 秦绪文, 何俊美. 2019. 粤港澳大湾区子自然资源与环境图集[M]. 北京: 科学出版社.
- 吴一全, 刘忠林. 2019. 遥感影像的海岸线自动提取方法研究进展[J]. *遥感学报*, 23(4):582–602.
- 夏涵韬, 隆院男, 刘诚, 刘晓建. 2020. 1973—2018年珠江三角洲海岸线时空演变分析[J]. *海洋学研究*, 38(2):26–37.
- 姚才华, 吴自银. 2012. 30a来伶仃洋海岸线变迁及海底冲淤变化[J]. *海洋学研究*, 30(3):44–55.
- 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[J]. *海洋湖沼通报*, (3):91–96.
- 张怡. 2014. 近40年来珠江口海岸线变迁遥感分析[D]. 内蒙古师范大学.
- 赵玉灵. 2018. 粤港澳大湾区自然资源遥感调查与保护建议[J]. *国土资源遥感*, 30(4):139–147.