

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

YIN Nannan, TANG Jun, YANG Yuanwei, et al. Variations of shoreline and land use in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1989 to 2021[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(5): 1-11.

# 1989—2021 年粤港澳大湾区海岸线变迁 及土地利用变化

尹楠楠<sup>1</sup>, 汤军<sup>1\*</sup>, 杨元维<sup>1</sup>, 高贤军<sup>1</sup>, 宋树华<sup>1,2,3</sup>, 胡谦<sup>4</sup>

(1 长江大学地球科学学院, 武汉 430100; 2 岭南师范学院数学与统计学院, 湛江 524000;

3 苍穹数码技术股份有限公司, 北京 100176; 4 中国地质大学计算机学院, 武汉 430070)

**摘要:**利用 1989—2021 年 7 期 Landsat TM/Sentinel-2 MSI 遥感影像数据, 借助 Google Earth Engine (GEE) 平台, 使用改进归一化差异水体指数 (Modified Normalized Difference Water Index, MNDWI)、Canny 边缘检测算法、遥感解译分类方法等, 完成了粤港澳大湾区 7 期海岸线信息的提取, 并从海岸线长度、变化强度、岸线多样性、海岸带陆域面积变化以及海岸带土地利用变化等方面分析了海岸线时空变化特征和驱动因素。分析结果表明: ①1989—2021 年大湾区海岸线长度持续增加, 岸线变化强度具有阶段性, 2004 年以前岸线增长缓慢, 之后岸线增长较快, 2004—2009 年为岸线增长高峰期; ②研究时期内, 大湾区各个区域内的岸线都发生了一定的变化, 其中珠海、香港、深圳、澳门岸线变化最强烈, 其他地区相对稳定; ③研究区内岸线类型变化明显, 人工岸线逐渐取代自然岸线成为海岸线的主体, 人工岸线增长达 651.17 km, 增幅较高, 自然岸线减少 407.89 km; ④大湾区围海造地面积显著增加, 增长速率较快, 岸带土地利用类型由林地、草地、水域等大幅度转向为建设用地、养殖用地; ⑤围海养殖、港口码头和填海造地等人为活动是大湾区海岸线发生变化的主要原因, 自然环境条件、人为活动是岸线演变的重要驱动力。

**关键词:**粤港澳大湾区; 水体指数; 岸线变迁; 遥感解译

中图分类号: P736.2; P539.2

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.158

## 0 引言

海岸线不仅是沿海地区的水陆分界线<sup>[1]</sup>, 还蕴含着丰富的地理环境信息。海岸线的变化对于海岸侵蚀、海岸带环境变化、生态系统兴衰等有着重要的指示作用<sup>[2]</sup>。因此, 快速准确地监测海岸线的变化, 对海岸资源的开发利用和海洋灾害的评估等

具有重要的意义。

粤港澳大湾区(以下简称“大湾区”)地处南海之滨<sup>[3]</sup>, 由广州、深圳、珠海、佛山、惠州、东莞、中山、江门、肇庆 7 个地级市和香港、澳门 2 个特别行政区组成, 是继东京湾区、纽约湾区、旧金山湾区之后的第 4 大湾区<sup>[4]</sup>。大湾区位于大陆向海洋过渡的结合地带, 其海域面积约为  $2.01 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 拥有丰富的海岸线资源, 同时也是中国海岸演变最活跃的区域之一<sup>[5]</sup>。近年来, 大湾区地带实施了一系列海洋发展战略, 沿岸区域进行了大量的围填海活动, 虽产生了大量新生土地, 带动了经济快速发展, 但各类海岸工程措施不仅造成了岸线位置的直接变动, 而且对大湾区未来岸线的演变趋势以及海岸生态环境也产生了重大影响。因此, 开展大湾区海岸线动态演变的监测和评估, 对大

收稿日期: 2022-05-17

资助项目: 自然资源部地理国情监测重点实验室开放基金(2020NGCM07); 湛江市科技局项目(2021A05040)

作者简介: 尹楠楠(1997—), 女, 在读硕士, 主要从事 GIS 空间分析方面的研究工作。E-mail: 202072508@yangtzeu.edu.cn

\* 通讯作者: 汤军(1964—), 男, 教授, 主要从事地理信息系统、数据挖掘方面的研究工作。E-mail: 374216030@qq.com

湾区海岸的保护、管理以及生态环境的可持续发展等有着重要的意义。

以往对海岸线的研究主要采用实地勘测、地质分析等方法<sup>[6]</sup>,由于技术条件的限制,这些方法通常存在人工成本高、时效性差、准度不高等问题,无法适用于大区域、长时间岸线变化趋势的研究<sup>[7]</sup>。相比实地勘测,遥感影像结合GIS技术提取、监测海岸线信息由于具有覆盖度广、获取成本低、时效性强等优势<sup>[8]</sup>,逐渐成为海岸线监测的重要技术手段。目前,采用遥感技术提取海岸线的方法有多种,除目视解译外还包括图像分类、阈值分割和边缘检测等方法<sup>[9-12]</sup>。基于提取的海岸线,对海岸线变迁分析的方法主要有基线法、面积法和动态分割等<sup>[13-15]</sup>。王璠等<sup>[16]</sup>利用遥感、GIS技术对1960—2012年的珠江口湾区海岸线和海岸带土地利用的时空变化及关系进行研究,认为海岸线发生显著变化是由城镇建设和农业发展引起。李猷等<sup>[17]</sup>利用阈值结合归一化水体指数提取分析了深圳市1978—2005年海岸线时空演变特征,认为海岸线分形维数的变化与人类活动强度呈正相关关系。夏涵韬等<sup>[8]</sup>从岸线类型、岸线开发利用主体结构上、岸线人工化指数等方面分析珠江三角洲地区海岸线时空演变情况,认为港口建设、围垦填海等是海岸线长度和分形维数增加的主要因素。朱俊凤等<sup>[18]</sup>采用Laplacian算子结合人工目视解译方法提取分析了1998—2008年珠江三角洲区域海岸线演变特点、变化趋势和原因,认为人造陆地是海岸线变迁的主要驱动力。综上所述,众多研究者运用不同的研究方法对大湾区不同范围、不同时间序列的海岸线变化进行分析,但多以大湾区部分区域为研究区,研究时限跨度短,且多探讨海岸线形态变化,对整个大湾区海岸线变迁的驱动力分析较少。因此,本文以大湾区入海地带为研究区域,基于大湾区1989、1994、1999、2004、2009、2016、2021年7期Landsat TM/Sentinel-2 MSI遥感影像数据,采用MNDWI结合Canny边缘检测算法,使用最优阈值自动获取水边线,并结合遥感解译分类方法,提取大湾区7期海岸线信息,系统分析不同时期、不同岸段的长度、类型、陆域面积侵蚀和扩张变化情况,以及不同土地利用类型的面积转化情况,并探讨了岸线变化的驱动因素,以期为大湾区海岸线资源的可持续发展、海岸带资源保护及环境保护提供一定的理论依据。

## 1 研究区域概况及数据来源

### 1.1 研究区域概况

研究区域为大湾区入海部分(21°70′—23°96′N、120°00′—115°42′E),东起惠州-汕尾交界点,西至江门-阳江交界点,涉及广东省广州、深圳、珠海、惠州、东莞、中山、江门市以及香港、澳门特别行政区组成的城市群。以2021年大湾区三维数字地球(LocaSpaceViewer, LSV)1.5 m分辨率的遥感影像所提取的海岸线为中心,向岸约10 km,向海约100 m建立缓冲区,获取海岸区域如图1所示。



图1 粤港澳大湾区研究范围

Fig.1 Research scope of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

### 1.2 数据来源及预处理

数据来源包括:①大湾区1989—2021年7期遥感影像(表1),影像均来自GEE平台,通过编写JavaScript语言获取;②2021年5月份LSV影像(分辨率为1.5 m)提取的海岸线作为提取海岸线的验证数据;③7期大湾区土地利用分类图;④其他资料,包括大湾区行政区划图、数字高程模型(DEM)、谷歌地球(Google Earth)历史影像、海图、地方志等。

数据预处理包括影像去云、拼接、裁剪、波段合成等均在GEE上通过编写代码完成;海岸带信息通过ArcMap10.6软件中的缓冲区分析获得,并根据获得的海岸带,对原始影像进行掩膜提取。

## 2 研究方法

### 2.1 海岸线分类与提取

海岸线一般被定义为多年大潮高潮位时的海

表 1 粤港澳大湾区 1989—2021 年 7 期遥感影像

Table 1 Remote sensing images of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1989 to 2021

序列号	影像类型	时间	分辨率/m	特征
1	Sentinel-2 MSI	2021-07-12	10	无云、精纠正
2	Sentinel-2 MSI	2016-07-05	10	云量<5%、精纠正
3	Landsat5 TM	2009-05-06	30	云量<5%、精纠正
4	Landsat5 TM	2004-07-17	30	云量<5%、精纠正
5	Landsat5 TM	1999-08-04	30	云量<5%、精纠正
6	Landsat5 TM	1994-05-19	30	云量<5%、精纠正
7	Landsat5 TM	1989-07-10	30	云量<5%、精纠正

陆分界线<sup>[19]</sup>。在卫星遥感图像上直接获得的水陆分界线多为卫星过境时刻的瞬时水边线<sup>[20]</sup>, 而无法确保该水边线恰好为海岸线, 因此要确定海岸线的位置需要对提取的水边线进行校正。而目前采用

遥感技术确定海岸线主要有 2 种: ①基于遥感图像提取的水边线<sup>[21]</sup>, 结合地形坡度、潮位数据等确定海岸线的位置; ②建立不同的遥感判读标志<sup>[22-23]</sup>, 将水边线分为不同的类型, 提取海岸线。参考相关学者的研究成果<sup>[24]</sup>, 结合大湾区独特的地貌特征, 本文使用 MNDWI 增强水陆边界信息、提高水边线提取精度对海陆进行分离, 并结合 Canny 边缘检测算法确定阈值, 区分水体和陆地以获取水体, 然后依据海岸线的遥感特征, 结合地形图、海图、Google Earth 历史影像等资料, 按照《海岸线调查技术规范》的要求, 建立不同的遥感判读标志(表 2), 将大湾区海岸线分为自然岸线(包括基岩岸线、淤泥质岸线、沙砾质岸线和河口岸线)以及人工岸线(包括建设围堤岸线和围垦养殖岸线), 以此减少潮位对海岸线提取的影响, 确定海岸线的位置。

表 2 粤港澳大湾区海岸线解译标志

Table 2 Interpretation marks of coastline in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

一级分类	二级分类	特征
人工岸线	围垦养殖岸线	围垦养殖区在遥感影像上一般呈规则的长条状, 围垦养殖包括种植、盐田以及围海养殖等。其中, 盐田呈小型方块状, 在有水情况下, 盐田池在视觉上类似于裸地, 为灰色或灰白色; 围海养殖区颜色较深, 为深蓝色或天蓝色
	建设围堤岸线	主要为人工修筑的建筑物, 包括港口码头、大坝、城镇建设和道路建设的围堤。工程建设岸线呈长条状, 在影像上比较亮, 人工建筑向海一侧为工程建设岸线
自然岸线	基岩岸线	由坚硬、裸露的岩石组成, 主要特征是地势陡峭、岸线曲折绵延、滩沙狭窄, 周围地形常为山地, 且基本没有植被
	沙砾质岸线	在遥感影像上表现为反射率高, 颜色亮白, 有明显的滩脊痕迹线
	河口岸线	河口岸线分布于河流入海口, 一般由海向陆遇到的第一条道路、桥梁等人工建筑物视为河口岸线。
	淤泥质岸线	在遥感影像上, 淤泥质岸线为植物稀疏程度的分界线, 植被生长茂密的一侧呈现红色或暗红色, 没有植被的一侧, 颜色较浅

### 2.1.1 改进的归一化差异水体指数 (MNDWI)

基于 Landsat、Sentinel 遥感影像计算 MNDWI<sup>[25]</sup>对陆地与水体进行区分, 该方法优于归一化水体指数<sup>[26]</sup>(NDWI), 在海岸线提取方面得到广泛应用<sup>[27]</sup>。其公式为:

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

式中: Green 和 MIR 分别为绿光波段和中红外波段, 分别对应 Landsat 影像的 B2 和 B5 波段, Sentinel 影像的 B3 和 B8 波段。

### 2.1.2 Canny 边缘检测算法

Canny 边缘检测算法能够用于边缘梯度方向的非极大值抑制和双阈值的滞后阈值处理<sup>[28]</sup>, 使得检测结果更加准确、更加精细化。Canny 边缘检测算法步骤如下: ①去噪: 使用高斯滤波器对原图像进行平滑处理; ②用一阶偏导的有限差分来计算梯度的幅值和方向; ③对梯度幅值进行保留局部梯度最大点和非极大值的抑制; ④用双阈值算法(高、低阈

值)检测和连接边缘。

以上研究方法均是借助 GEE 平台编写代码完成。通过 GEE 设置系数多样弹性化阈值活动, 设置 Canny 边缘检测算法最优阈值(1989、1994、1999、2004、2009、2016 和 2021 年阈值分别为: 0.452、0.347、0.376、0.412、0.521、0.287、0.403)分割得到 MNDWI 二值图像(其中灰度为 0 的像素代表陆地, 灰度为 1 的像素代表水体)。然后利用 ArcGIS 10.6 软件将二值图像转化为矢量, 得到矢量化后的水岸线, 结合 Google Earth 历史影像, 采用遥感解译分类方法对获得的水岸线进行相应调整, 获得最终的海岸线矢量数据。

## 2.2 海岸线定量分析

### 2.2.1 海岸线长度变化强度

海岸线长度变化强度是衡量海岸线长度随时间变化速率的差异<sup>[29]</sup>。即用研究时期内海岸线长度的变化比值来表示:

$$LCI_{ij} = \frac{L_j - L_i}{L_i(j-i)} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $LCI_{ij}$  为第  $i$  年到第  $j$  年海岸线长度的变化强度;

$L_i$  和  $L_j$  分别为第  $i$  年和第  $j$  年的海岸线长度, km。

$LCI_{ij}$  有正也有负,  $LCI_{ij}$  为正表示岸线增长,  $LCI_{ij}$  为负表示岸线缩短,  $|LCI_{ij}|$  越大, 表示岸线变化强度越大。

### 2.2.2 海岸线类型结构变化

为了刻画不同类型海岸线的构成关系, 可采用海岸线类型结构变化指标进行评估<sup>[30]</sup>, 该指标表示特定类型海岸线长度占海岸线总长度的比重, 具体计算公式如下:

$$P_i = \frac{L_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $P_i$  为第  $i$  类海岸线占海岸线总长度的比重;  $n$  为海岸线类型总数。

## 2.3 岸带地物提取与变化监测

随机森林(Random Forest, RF)算法是一种将多棵决策树进行集成的机器学习算法<sup>[31]</sup>, 该方法具有实现简单、分类精度高、运行速度快等优势, 相关文献<sup>[31-33]</sup> 已证实该方法被国内外的学者广泛应用于土地利用分类研究中。随机森林算法的原理为: 通过自助采样法<sup>[32]</sup>(Bootstrap Sampling), 在给定的  $N$  个样本数据集中有放回地重复随机选取  $M$  个样本, 根据生成的  $M$  个训练样本数据集, 构造成  $M$  个决策树组成随机森林, 并通过这  $M$  棵决策树预测的结果进行投票, 得出样本的最后分类结果。本文结合已有研究<sup>[33]</sup> 和大湾区海岸带内的土地利用特征, 构建耕地、林地、草地、建设用地、养殖用地以及水域 6 个类型的海岸带土地利用分类体系, 运用 GEE 云平台编写相关代码对 7 期海岸带进行随机森林分类, 并对分类后的结果进行比较, 进而达到动态监测的目的。

## 3 结果与分析

### 3.1 粤港澳大湾区海岸线的空间分布特征

通过对 7 期海岸线叠加分析发现, 不同时期大

湾区的海岸线, 空间位置存在差异。各时期海岸线的空间分布如图 2 所示。

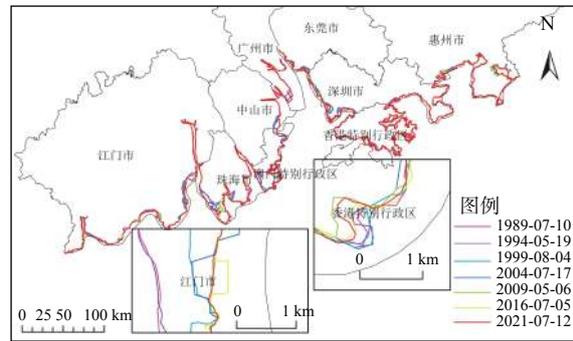


图 2 粤港澳大湾区不同时期海岸线位置

Fig.2 Location of coastlines in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area in different periods

#### 3.1.1 海岸线长度及强度变化分析

从研究区域内海岸线的总长度来看(图 3a), 1989—2021 年大湾区海岸线长度呈持续增加的状态。1989—1994 年增加了 18.1 km; 1994—1999 年增加了 5.86 km; 1999—2004 年增加了 10.51 km; 2004—2009 年增加了 150.85 km; 2009—2016 年增加了 4.13 km; 2016—2021 年增加了 53.84 km; 32 年间, 大湾区海岸线共增长了 243.28 km, 增长率达到了 7.60 km/a, 总体变化强度为 0.47%。

从时间上看(图 3b), 2004—2009 年是海岸线长度变化最剧烈的时期, 年增长率达到了 30.17 km/a, 变迁强度达到了 1.83%; 其次为 2016—2021 年, 海岸线变化强度为 0.47%; 再次为 1989—1994 和 1999—2004 年, 海岸线变迁强度分别为 0.22%、0.13%; 最后为 1994—1999 和 2009—2016 年, 海岸线变化强度分别为 0.07% 和 0.03%。

从空间上看(图 4), 大湾区内不同地区海岸线变化存在差异。1989—1994 年, 澳门特别行政区、东莞和深圳市长度变化较为显著, 岸线变迁强度分别为 1.68%、1.17%、0.71%; 1994—1999 年, 广州、江门市岸线变迁强度较大, 分别为 1.43% 和 0.68%; 1999—2004 年, 东莞、广州和江门市岸线变化强度较大, 分别为 1.32%、0.41%、0.32%; 2004—2009 年各个城市岸线长度变化均较为显著, 珠海岸线长度变化最为显著(7.27%), 其次是香港特别行政区、深圳市和澳门特别行政区, 岸线变化强度分别为 1.47%、0.90%、0.83%, 然后是东莞、惠州、江门和中山市, 岸线变化强度分别为 0.68%、0.52%、0.52%、0.47%, 最后是广州市, 岸线变迁强度为 0.38%; 2009 年之后澳门特别行政区岸线变化强度较大,

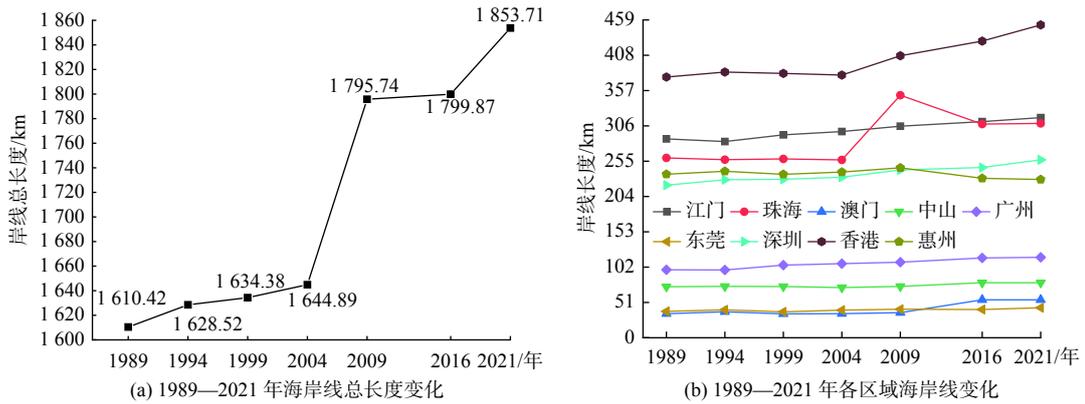


图 3 1989—2021 年海岸线长度变化  
Fig.3 Changes in coastline length from 1989 to 2021

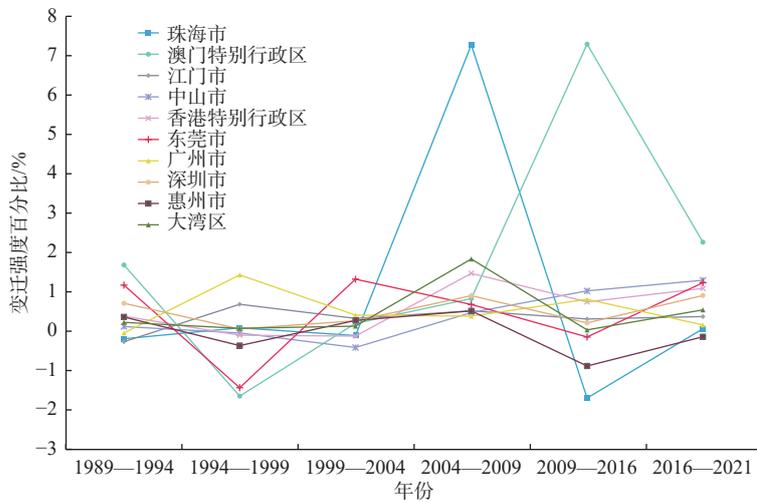


Fig.4 The shoreline change intensity of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1989 to 2021

2009—2016、2016—2021 年澳门特别行政区岸线变化强度分别为 7.29%、2.26%。究其原因,国务院于 2009 年批复澳门填海造地 360 km<sup>2</sup> 和 2009—2016 年间粤港澳大湾区的建立等人工活动进一步促成了澳门海岸线长度的大幅度增长。

3.1.2 各类型海岸线长度变化

岸线类型结构与地貌形态、海陆作用、地质构造以及人类活动等有着密不可分的联系。岸线类型中自然岸线与人工岸线的变化及比例能在一定程度上反映出海岸的自然条件和资源特征<sup>[5]</sup>。近 32 年来,大湾区不同海岸线类型情况及所占比例如图 5、表 3 所示。

各类型海岸线中,人工岸线总体上呈现增长态势(表 3),由 1989 年的 378.13 km 增加到 2021 年的 1 029.30 km,共计增加 651.17 km,增速为 20.35 km/a,所占海岸线的比例由 23.48% 增长到 55.53%。其中,建设围堤岸线(图 5b)处于持续增长态势,由 184.20 km 增加到 613.79 km,共计增加 429.59 km,

增速为 13.42 km/a,所占海岸线的比例从 11.44% 增加到 33.11%,增幅达到 233.22%。1989—1994、2004—2009、2016—2021 年是建设围堤岸线猛增阶段。1989—1994 年岸线增长幅度最大,增长幅度为 49.60%;其次为 2004—2009 年,岸线增长幅度为 33.19%;再次是 2016—2021 年,岸线增长幅度为 21.57%。1994—1999、1999—2004 年增长幅度较小,增长幅度分别为 10.27%、9.57%。

围垦养殖岸线总体上呈现先增长后减少态势,1989—2016 年,围垦养殖岸线呈持续增长态势,由 193.93 km 增长到 442.72 km,共增加 248.79 km,增速为 9.21 km/a,所占海岸线比例从 12.04% 增加到 24.60%,增幅达到 128.29%。1989—1994 年、2004—2009 年围垦养殖岸线增长幅度较大,分别为 27.03%、31.32%;其次为 1994—1999 年、1999—2004 年,增幅分别为 14.70%、15.39%;再次为 2009—2016 年增幅较小为 3.40%。2016—2021 年,围垦养殖岸线为减少态势,增幅为-6.15%。

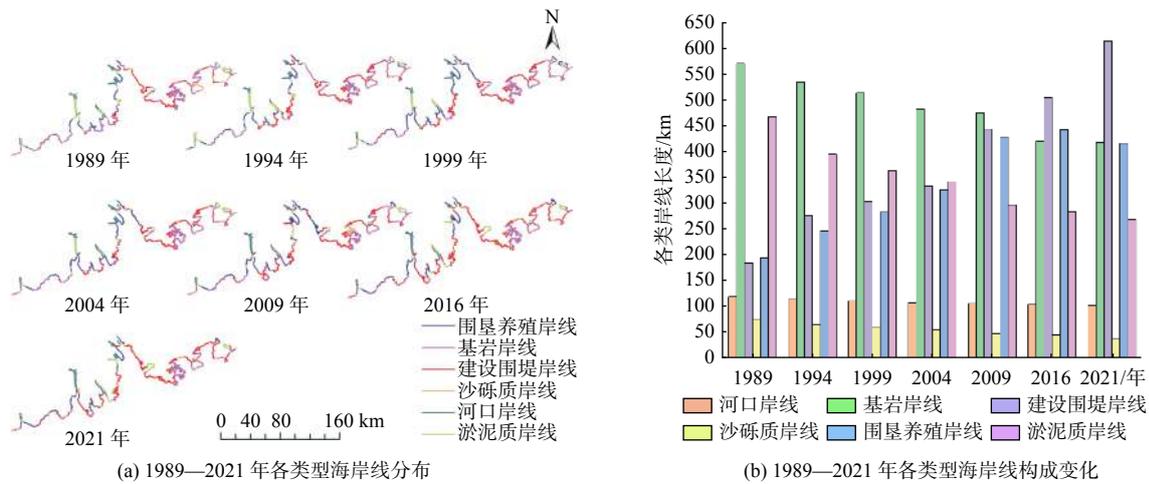


图5 1989—2021 各类型海岸线分布及构成

Fig.5 Distribution and composition of various types of coastline from 1989 to 2021

表3 1989—2021 年各类型海岸线占比

Table 3 Proportion of various types of coastline from 1989 to 2021

岸线类型	所占比例/%						
	1989年	1994年	1999年	2004年	2009年	2016年	2021年
河口岸线	7.38	6.95	6.77	6.51	5.90	5.76	5.50
基岩岸线	35.45	32.84	31.41	29.30	26.44	23.32	22.53
自然岸线	沙砾质岸线	4.67	3.93	3.71	3.34	2.62	1.98
	淤泥质岸线	29.01	24.23	22.22	20.80	16.50	14.46
	合计	76.52	67.95	64.12	59.94	51.46	44.47
	建设围堤岸线	11.44	16.92	18.59	20.24	24.69	33.11
人工岸线	围垦养殖岸线	12.04	15.13	17.29	19.82	23.84	22.42
	合计	23.48	32.05	35.88	40.06	48.54	55.53

自然岸线呈持续减少的趋势,由1989年的1 232.30 km减少到2021年的824.41 km,共计减少407.89 km,减少的速率为12.75 km/a,所占比例由76.52%减少到44.47%。其中,淤泥质岸线减少的较快,由467.26 km减少到268.13 km,共计减少199.13 km,减少速率为6.22 km/a,所占岸线比例由29.01%,减少到14.46%,减幅达到42.62%。淤泥质岸线减少的年份主要发生在1989—1994、2004—2009年这2个阶段,减幅分别为15.54%、13.39%;其次为1994—1999、1999—2004、2016—2021年,减幅分别为7.97%、5.81%、5.53%;最后为2009—2016年,减幅为4.20%。而河口岸线、基岩岸线、沙砾质岸线这3种自然岸线在研究时期内减少的幅度较小、速率较慢。

### 3.1.3 海岸线变迁引起海陆格局变化

在Arcgis10.6软件中,结合面积分析法<sup>[14]</sup>,将1989—2021年7期海岸线按照时间顺序进行空间叠加分析发现(图6),研究时期内粤港澳大湾区海

岸线变迁引起陆域面积扩张共583.84 km<sup>2</sup>,侵蚀面积91.04 km<sup>2</sup>,净增面积492.80 km<sup>2</sup>,增长速率为15.4 km<sup>2</sup>/a。1989—1994年扩张面积116.65 km<sup>2</sup>,侵蚀面积15.07 km<sup>2</sup>,净增面积101.53 km<sup>2</sup>;1994—1999年陆域面积变化最大,扩张面积129.35 km<sup>2</sup>,侵蚀面积15.67 km<sup>2</sup>,净增面积113.68 km<sup>2</sup>,增长速率为22.736 km<sup>2</sup>/a;1999—2004年扩张面积107.09 km<sup>2</sup>,侵蚀面积15.32 km<sup>2</sup>,净增面积91.77 km<sup>2</sup>;2004—2009年扩张面积97.84 km<sup>2</sup>,侵蚀面积20.67 km<sup>2</sup>,净增面积77.17 km<sup>2</sup>;2009—2016年扩张面积104.23 km<sup>2</sup>,侵蚀面积17.40 km<sup>2</sup>,净增面积86.83 km<sup>2</sup>;2016—2021年陆域面积变化最小,扩张面积28.68 km<sup>2</sup>,侵蚀面积6.91 km<sup>2</sup>,净增面积21.77 km<sup>2</sup>。对这9个城市及特别行政区分析(表4)发现,珠海和江门市岸滩面积变化较大,分别增加了179.33和96.53 km<sup>2</sup>,增长速率为5.60和3.02 km<sup>2</sup>/a。2004—2009年,珠海岸滩扩张速率最快,为12.34 km<sup>2</sup>/a,与王璠等<sup>[16]</sup>、杨雷等<sup>[34]</sup>对珠海海岸带的观测结果是一致的。珠

海是珠三角中海洋面积最大<sup>[14]</sup>、岛屿最多、海岸线最长的城市,且位于珠江出海口西岸核心区域,其年输沙量占珠江入海量总量的 1/3,2009 年横琴也被纳入珠海经济特区范围,陆域面积显著增加。而江门市内河流属珠江和粤西沿海诸河两大水系,境内

河流纵横交错,大量水沙汇聚于此,形成丰富的浅滩淤泥资源,适合造陆围垦。澳门特别行政区相较于其他 8 个市区及特区,海岸线长度较短,陆域面积较小,滩涂面积增加也较少,为 15.76 km<sup>2</sup>。其他市或特区的岸滩面积也有不同程度增加。

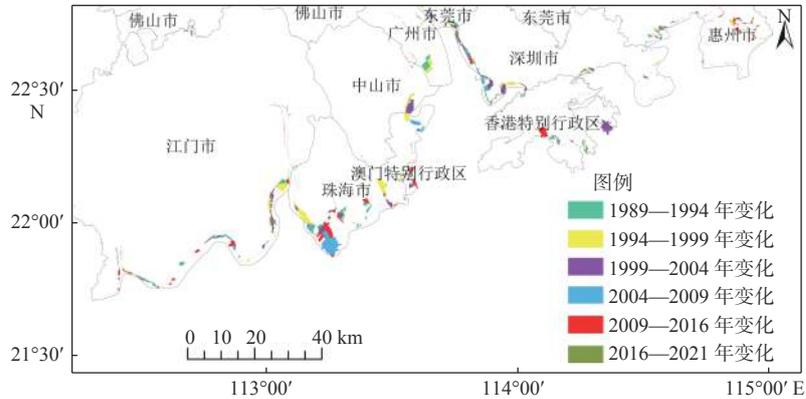


图 6 粤港澳大湾区海岸带侵蚀/扩张变化 (1989—2021 年)

Fig.6 Changes of coastal erosion or expansion in the Greater Bay Area of Guangdong-Hong Kong-Macao from 1989 to 2021

表 4 各时期沿海区域土地侵蚀/扩张面积

Table 4 Land erosion or expansion of coastal area in each time period

地区	各时期侵蚀/扩张面积/km <sup>2</sup>					
	1989—1994年	1994—1999年	1999—2004年	2004—2009年	2009—2016年	2016—2021年
江门侵蚀	1.44	1.62	1.88	2.30	4.76	1.05
江门扩张	27.33	29.13	17.95	10.41	17.82	6.94
珠海侵蚀	3.34	1.92	2.77	2.50	1.56	0.99
珠海扩张	27.08	48.98	18.28	61.70	33.45	2.92
澳门侵蚀	0.06	0.24	0.09	0.65	0.16	0.13
澳门扩张	2.89	1.34	2.28	1.89	8.55	0.14
中山侵蚀	1.19	0.39	0.32	0.63	0.40	0.40
中山扩张	1.94	6.92	13.25	0.67	0.96	0.97
广州侵蚀	0.41	1.60	0.67	0.48	1.06	1.08
广州扩张	13.81	10.76	2.00	0.98	0.85	1.05
东莞侵蚀	0.39	0.93	2.34	0.51	0.55	0.12
东莞扩张	7.38	3.06	5.72	0.41	1.33	0.87
深圳侵蚀	1.62	2.42	1.48	1.58	3.32	1.35
深圳扩张	14.01	18.65	24.32	15.48	6.42	6.86
香港侵蚀	3.91	1.59	1.48	8.24	4.75	1.11
香港扩张	10.93	5.62	18.39	2.36	13.70	5.21
惠州侵蚀	2.71	4.96	4.29	3.78	0.84	0.68
惠州扩张	11.28	4.89	4.90	3.94	21.15	3.72

### 3.2 海岸带土地利用变化

#### 3.2.1 海岸带土地利用分类精度验证

在 GEE 平台支持下,结合对应年份的遥感影像,分别在海岸线上和研究区内部选取建设用地、林地、水域、耕地、草地以及养殖用地各 200 个采

样点,对照 Google Earth 卫星历史影像对每个采样点进行土地利用类型属性判别,以总体精度和 Kappa 系数进行精度评价,最终得到的精度结果如表 5 所示。可以看出,基于随机森林分类方法的精度及 Kappa 系数均在 0.88 以上,表明分类结果符合本次研究要求,并且 2016 和 2021 年的总体精度、

Kappa 系数均大于 1989、1994、1999、2004 以及 2009 年,说明分类精度受影像空间分辨率影响较大。

表 5 研究区内土地分类精度

Table 5 Accuracy of land classification in the Greater Bay Area from 1989 to 2021

年份	总体分类精度/%	Kappa系数
1989	90.725 7	0.887 4
1994	91.334 6	0.892 1
1999	90.867 2	0.886 7
2004	92.110 3	0.903 2
2009	93.472 3	0.916 3
2016	94.362 5	0.927 1
2021	94.781 4	0.938 4

### 3.2.2 海岸带土地利用变化分析

根据分类结果得到 1989—2021 年近岸 10 km 范围内海岸带土地空间分布(图 7)情况,利用 ArcGIS10.6 软件计算出各地类所占面积及其所占百分比,分析其结构组成的时空变化(表 6)。1989—2021 年建设用地面积呈现大幅增加趋势,从 1988 年的 610.70 km<sup>2</sup> 增长至 2021 年的 2 437.53 km<sup>2</sup>,增长率为 57.09 km<sup>2</sup>/a,其所占总地类面积的比重由 7.11% 增加到 28.38%。1989—1994、1994—1999 年期间建设用地增长幅度较大,增长率分别达到 135.58、124.85 km<sup>2</sup>/a。在此期间,大湾区经济快速上涨,其中广州、深圳的 GDP 年均增速分别为 31.60%、37.39%<sup>[35]</sup>,珠海、广州、东莞、深圳市等海岸带区域城镇扩张系数均在 10 以上<sup>[16]</sup>。其次养殖用地一直呈现增长趋势,从 664.98 km<sup>2</sup> 增加到

805.25 km<sup>2</sup>,所占总地类面积的比重由 7.74% 增加到 9.38%。1999—2004、2004—2009 年段养殖用地增加较多,增速分别达到 41.17、51.83 km<sup>2</sup>/a,归因于 1995—2005 年期间,渔业产生的经济效益高于农业<sup>[36]</sup>。渔业由 1995 年的 272.53 亿元增长至 2005 年的 523.79 亿元,增速为 25.13 亿元/年,农业由 1995 年的 777.72 亿元增长至 2005 年的 959.97 亿元,增速为 18.23 亿元/年。32 年间,水域、林地、草地面积则逐年减少,水域面积由 786.86 km<sup>2</sup> 减少到 483.74 km<sup>2</sup>,所占总地类面积比重从 9.16% 减少到 5.63%;林地面积由 3 326.97 km<sup>2</sup> 减少到 2 676.79 km<sup>2</sup>,所占总地类面积比重从 38.74% 减少到 31.17%;草地面积由 2 054.61 km<sup>2</sup> 减少到 788.66 km<sup>2</sup>,所占总地类面积比重从 23.92% 减少到 9.18%;耕地面积所占空间整体比例起伏不大,呈先增加后减少再增加的态势,1989—1994 年耕地面积增加,增加速率为 73.77 km<sup>2</sup>/a,1994—1999 年下降,下降速率为 36.06 km<sup>2</sup>/a,1999—2021 年又略有增加,增加速率趋于平稳,所占比例保持在 16.30% 左右。

## 4 岸线变迁驱动力分析

研究区在 1989—2021 年间海岸线与海岸带的土地利用类型都发生了明显变化,主要表现为岸线增长、向海扩张、自然岸线转为人工岸线以及土地利用类型由水域、林地、耕地、草地等转为建设、养殖用地。而影响大湾区海岸线及海岸带变化的原因可归纳为以下 2 个方面:

(1) 河口侵蚀和淤积等自然因素 大湾区的地

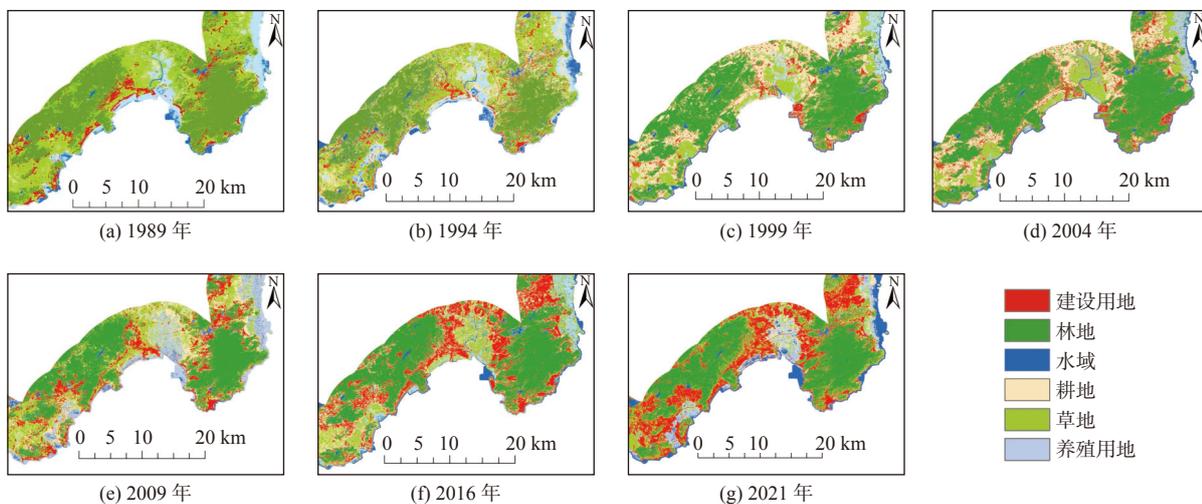


图 7 1989—2021 年粤港澳大湾区海岸带土地利用时空分布

Fig. 7 Temporal and spatial distribution of land use in coastal zone of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1989 to 2021

表 6 1989—2021 年大湾区海岸带各土地利用类型面积及比例

Table 6 Area and proportion of various land use types in the coastal zone of the Greater Bay Area from 1989 to 2021

年份	建设用地		林地		水域		耕地		草地		养殖用地	
	面积/km <sup>2</sup>	百分比/%										
1989	610.70	7.11	3 326.97	38.74	786.86	9.16	1 144.81	13.33	2 054.61	23.92	664.98	7.74
1994	1 288.59	15.00	3 194.52	37.19	708.60	8.25	1 513.67	17.62	1 214.35	14.14	669.20	7.79
1999	1 912.82	22.27	3 079.82	35.86	548.61	6.39	1 333.38	15.52	1 032.15	12.02	682.15	7.94
2004	1 988.04	23.15	3 008.60	35.03	528.70	6.16	1 399.93	16.30	940.34	10.95	723.32	8.42
2009	2 018.70	23.50	2 962.96	34.50	505.56	5.89	1 408.54	16.40	918.02	10.69	775.15	9.02
2016	2 125.53	24.75	2 921.97	34.02	499.02	5.81	1 423.95	16.58	823.88	9.59	794.58	9.25
2021	2 437.53	28.38	2 676.79	31.17	483.74	5.63	1 396.96	16.26	788.66	9.18	805.25	9.38

理位置、地形地貌、水文特征等自然环境条件是大湾区海岸线演变的基础。大湾区地势上呈现西北高东南低的态势,以珠江河口为中心,由东江、西江、北江冲积而成复合三角洲,西侧以淤泥质岸线为主,东侧以基岩岸线为主。受海侵和新构造运动的影响,大湾区海区外缘分布有许多列岛,形成了三角洲的口门屏障,以阻止从上游水系带来的大量泥沙流入海中而形成沙洲,从而便于围滩造田导致岸线不断向海推进。自然岸线中淤泥质岸线受海平面上升、河流水系变迁和河流入海沙量变化等复杂自然因素影响,人类活动程度从低平地区逐渐向高峻地区减弱<sup>[37]</sup>,使得淤泥质海岸全面进行填海造陆和滩涂围垦,海岸线变化明显。基岩岸线曲折且曲率大<sup>[38]</sup>,受自然因素影响较小,除局部岸段外,未进行大规模开发。大湾区沿岸区域除人工岸线外,广泛分布着坡度较大的基岩海岸,海岸线变化不明显。沙砾质岸线主要由沙和砾石组成,可以进行开发强度较大的填海造陆和围垦养殖等活动,但目前大湾区沿海地区以旅游开发为主<sup>[39]</sup>,开发强度较弱,沙砾质岸线变化不明显。

(2) 围海养殖、港口码头和填海造地等人为因素与自然因素相比,人为因素对研究区内的海岸线变化影响较大。32 年来人工岸线占岸线总长度的比例由 23.48% 增加到 55.53%, 海岸开发活动主要从围海养殖转向为港口码头建设、海水养殖、旅游开发等为主。研究区域内有丰富的滩涂资源,适合养殖,1989—2009 年是围海养殖快速扩张期,主要是淤泥滩涂转变为围垦养殖用地,围垦养殖岸线占岸线总长度的比例由 12.04% 增长到 23.84%。2004—2009 年填海造陆扩张速率较快,受城市化进程、海洋经济快速发展驱动以及 2005 年南沙区的设立,进一步加快了岸线转变和向海推进,研究区域内的自然岸线持续减少,建设围堤岸线持续增加,岸线

不断向海扩张。2010 年后,随着国家对海洋合理开发愈加重视、海洋环境管理制度逐渐完善,海岸线变化强度、填海造陆、岸线利用的速度已趋于缓和。2017 年,随着《海岸线保护与利用管理办法》政策的制定和实施,沿海区域的岸线转变、围填海等情况进一步得到了有效控制。

## 5 结论

本文以 Landsat TM 和 Sentinel 影像为基础,借助 GEE 平台,采用 Canny 边缘检测算法和 MNDWI 指数结合遥感解译分类方法提取了粤港澳大湾区 1989—2021 年 7 期的海岸线信息,并对 32 年来大湾区海岸带进行土地利用类型转变及时空变化特征分析,得出结论如下:

(1) 粤港澳大湾区海岸线在人为开发和各种自然因素的共同作用影响下,海岸线长度变化显著:1989、1994、1999、2004、2009、2016 和 2021 年大湾区海岸线长度分别为 1 610.42、1 628.52、1 634.38、1 644.89、1 795.74、1 799.87 和 1 853.71 km,海岸线总长度呈逐渐增长的趋势。从时间上看,2004—2009 年变化最显著;从空间上看,香港特别行政区、珠海和深圳市海岸线变化最显著。

(2) 从岸线类型上看,建设围堤岸线快速增长,自然岸线持续减少,淤泥质岸线减少较为显著。大湾区人工岸线持续增加,建设围堤是研究区域最重要的开发利用方式,1989 年后建设围堤岸线快速增长。

(3) 从各区域陆域面积变化情况来看,各区域陆域面积在 32 年间都出现了扩张或侵蚀的情况,珠海、江门两地面积变化最为显著。以珠海市为例,研究时段内岸线变化使得该区域各时期的土地面积增加较大,共计增加了 179.33 km<sup>2</sup>。其中,2004—

2009年珠海海岸线附近土地面积扩张最大,土地增长面积最大,土地增长速率较快( $12.34\text{ km}^2/\text{a}$ ),其他区域土地面积在该时间段也有相应增加,使得这个时期研究区内的土地面积整体增加较多。

(4)建设用地面积、养殖用地持续增加,所占比例也逐渐增大,水域、林地、草地面积相应减少。结合岸线长度和类型、海陆面积变化情况发现,人类活动是导致海岸线变迁、陆域面积扩张及海岸带土地利用类型转变的主导因素。人类活动导致了海岸线长度快速增加,自然岸线持续减少,人工岸线持续增加,海岸带面积持续向海扩张,海岸带土地利用类型从农耕地转变为建设用地和养殖用地为主。

#### 参考文献:

- [1] 高义,王辉,苏奋振,等. 中国大陆海岸线近30a的时空变化分析[J]. *海洋学报(中文版)*, 2013, 35(6): 31-42.
- [2] 刘惠惠,车向红,李丽,等. 基于Landsat影像的连云港1984—2018年海岸线时空变化分析[J]. *遥感信息*, 2022, 37(3): 129-134.
- [3] 徐婷婷,郑锐滨,陈龙,等. 粤港澳大湾区海岸线时空变化及驱动力分析[J]. *环境生态学*, 2022, 4(11): 34-42.
- [4] 叶有华,林珊玉,何玉琳,等. 粤港澳大湾区海岸带生态系统修复框架[J]. *生态学报*, 2021, 41(23): 9186-9195.
- [5] 张云芝,张千力,胡云锋. 2010—2017年珠江河口海岸线遥感监测和动态变化分析[J]. *海洋通报*, 2019, 38(2): 217-224.
- [6] 齐宇,任航科. 基于厦门岛的海岸线自动提取方法研究[J]. *城市勘测*, 2012, 130(5): 75-78.
- [7] 马建华,刘德新,陈衍球. 中国大陆海岸线随机前分形分维及其长度不确定性探讨[J]. *地理研究*, 2015, 34(2): 319-327.
- [8] 夏涵韬,隆院男,刘诚,等. 1973—2018年珠江三角洲海岸线时空演变分析[J]. *海洋学研究*, 2020, 38(2): 26-37.
- [9] 罗艳,娄全胜,谢健,等. 深圳湾海岸带景观格局变化特征和趋势预测[J]. *海洋开发与管理*, 2017, 34(12): 46-50.
- [10] 郭碧云,潘磊剑, MANTRAVADI V S. 基于遥感图像增强的海岸线提取方法[J]. *海洋开发与管理*, 2020, 37(7): 42-44.
- [11] 纪轩禹,李旭文,姜晟,等. 基于GF-1卫星数据的连云港地区海岸带时空变化分析[J]. *环境生态学*, 2019, 1(8): 42-48.
- [12] 刘晓莉,范玉茹. 常用边缘检测算法在不同影像海岸线中提取比较研究[J]. *测绘与空间地理信息*, 2014, 37(11): 149-151.
- [13] 姚晓静,高义,杜云艳,等. 基于遥感技术的近30a海南岛海岸线时空变化[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(1): 114-125.
- [14] 刘琳. 基于遥感影像数据的内蒙古湖泊时空演变分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2021.
- [15] 杨超,张小芳,张畅. 1995—2017年福建省海岸线时空变化分析[J]. *应用海洋学报*, 2021, 40(3): 485-492.
- [16] 王璉,吴志峰,李少英,等. 珠江口湾区海岸线及沿岸土地利用变化遥感监测与分析[J]. *地理科学*, 2016, 36(12): 1903-1911.
- [17] 李猷,王仰麟,彭建,等. 快速城市化地区海岸线分维动态演变研究: 以深圳市为例[J]. *热带地理*, 2009, 29(5): 429-433.
- [18] 朱俊凤,王耿明,张金兰,等. 珠江三角洲海岸线遥感调查和近期演变分析[J]. *国土资源遥感*, 2013, 25(3): 130-137.
- [19] 陈金月. 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[D]. 成都: 四川师范大学, 2017.
- [20] 苏倩欣,李高聪,李志强,等. 基于遥感数据的水边线提取方法比较以海南岛为例[J]. *海洋技术学报*, 2022, 41(2): 20-27.
- [21] 樊彦国,张淑芹,侯春玲,等. 基于遥感影像提取海岸线方法的研究以黄河三角洲地区黄河口段和刁口段海岸为例[J]. *遥感信息*, 2009, 104(4): 67-70, 74.
- [22] 张旭凯,张霞,杨邦会,等. 结合海岸类型和潮位校正的海岸线遥感提取[J]. *国土资源遥感*, 2013, 25(4): 91-97.
- [23] 刘善伟,张杰,马毅,等. 遥感与DEM相结合的海岸线高精度提取方法[J]. *遥感技术与应用*, 2011, 26(5): 613-618.
- [24] 刘旭拢,邓孺孺,许剑辉,等. 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*, 2017, 19(10): 1336-1345.
- [25] 林金城,毋亭. 20世纪40年代以来福建省大陆海岸带利用程度时空变化分析[J]. *科技导报*, 2021, 39(4): 104-111.
- [26] 王素甫江·如素力,李兰海,等. 基于Landsat ETM+的内陆湖泊水体信息提取方法研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(12): 227-234.
- [27] 王李娟,牛铮,赵德刚,等. 基于ETM遥感影像的海岸线提取与验证研究[J]. *遥感技术与应用*, 2010, 25(2): 235-239.
- [28] 梁立,刘庆生,刘高焕,等. 基于遥感影像的海岸线提取方法综述[J]. *地球信息科学学报*, 2018, 20(12): 1745-1755.
- [29] 王茜,孙贵芹,李雪飞,等. 1985—2020年滨州和东营海岸线时空演变分析[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(15): 6013-6021.
- [30] 柏叶辉. 近30年南海海南大陆海岸线时空变化研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
- [31] 魏帆,韩广轩,韩美,等. 1980—2017年环渤海海岸线和围填海时空演变及其影响机制[J]. *地理科学*, 2019, 39(6): 997-1007.
- [32] 付杰,宋伦,雷利元,等. 最优尺度和随机森林算法下盘锦海岸带遥感监测[J]. *遥感信息*, 2022, 37(2): 7-15.
- [33] 方涛,王冬至. 基于ULAT的珠海市海岸带土地利用变化分析[J]. *地理空间信息*, 2020, 18(3): 69-717.
- [34] 罗正宇,张丽,陈博伟,等. 1990—2020年泰国海岸线时空变迁分析[J]. *海洋学研究*, 2021, 39(1): 56-66.
- [35] 杨雷,孙伟富,马毅,等. 近10年珠海海岸带海岸线时空变化遥感分析[J]. *海洋科学*, 2017, 41(2): 20-28.
- [36] 高义,苏奋振,孙晓宇,等. 近20a广东省海岛海岸带土地利用变化及驱动力分析[J]. *海洋学报(中文版)*, 2011, 33(4): 95-103.
- [37] 张景奇,介东梅,刘杰. 海岸线不同解译标志对解译结果的影响研究: 以辽东湾北部海岸为例[J]. *吉林师范大学学报(自然科学版)*, 2006(2): 54-56.
- [38] 李明显. 基于RS和GIS的辽宁省海岸线时空变化及驱动因素分析[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2011.
- [39] 吴开军. 粤港澳大湾区旅游业发展状况及竞争优势提升路径[J]. *广西社会科学*, 2019(4): 74-80.

## Variations of shoreline and land use in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1989 to 2021

YIN Nannan<sup>1</sup>, TANG Jun<sup>1\*</sup>, YANG Yuanwei<sup>1</sup>, GAO Xianjun<sup>1</sup>, SONG Shuhua<sup>1,2,3</sup>, HU Qian<sup>4</sup>

(1 College of Earth Sciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 2 School of Mathematics and Statistics, Lingnan Normal University, Zhanjiang 524000, China; 3 Sky Digital Technology Co., Beijing 100176, China; 4 School of Computer Science, China University of Geosciences, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Using 7 periods of the Landsat TM/Sentinel-2 MSI remote sensing image data from 1989 to 2021 with the help of Google Earth Engine (GEE) platform, we extracted 7 periods of shoreline information from Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area using the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), Canny edge detection algorithm, and remote sensing interpretation classification method. The spatial and temporal characteristics and drivers of shoreline evolution were analyzed in terms of shoreline length, intensity of change, shoreline diversity, shoreline land area change, and shoreline land use change. The results show that: ① The shoreline length of the Greater Bay Area continued to increase from 1989 to 2021, with the total increase of 243.28 km. The variation intensity of shoreline evolution was in phase: slow growth before 2004, and fast growth after 2004 during which 2004–2009 was the fastest period. ② The shorelines in each region of the Greater Bay Area varied to some extents, of which Zhuhai, Hong Kong, Shenzhen and Macao had the greatest shoreline changes while other regions were relatively stable. ③ From 1989 to 2021, the shoreline types changed significantly as artificial shorelines grew notably, which gradually replaced the natural shorelines as the main body of shorelines. The artificial shorelines were increased by 651.17 km in total at the high rate of 172.21%, while the natural shorelines were decreased by 407.89 km. ④ During the study period, the area of land was extended significantly in the Greater Bay Area by 492.80 km<sup>2</sup> with a fast growth rate of 15.4 km<sup>2</sup>/a, and the type of land use in the shore zone shifted remarkably from forest land, grassland, and water to construction land and farming land. ⑤ Human activities such as sea-farming, port construction, and land reclamation were the main causes of shoreline changes in the Greater Bay Area; and the natural environmental conditions and anthropogenic activities were the important drivers of shoreline evolution in the Greater Bay Area.

**Key words:** Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area; Modified Normalized Difference Water Index; shoreline evolution; remote sensing interpretation