

马苑浩, 辜鹏, 周春艳, 等. 基于遥感影像的浙江省三门湾近 40 年海岸线及海岸带时空变化分析[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(4): 60-70.  
MA Yuanhao, GU Peng, ZHOU Chunyan, et al. Analysis of spatiotemporal changes of coastline and coastal zone in Sanmen Bay, Zhejiang Province in recent 40 years based on remote sensing[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(4): 60-70.

# 基于遥感影像的浙江省三门湾近 40 年海岸线及海岸带时空变化分析

马苑浩<sup>1</sup>, 辜鹏<sup>2</sup>, 周春艳<sup>1\*</sup>, 汪求顺<sup>3</sup>

(1 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 南京 210098; 2 南京水科院瑞迪科技集团有限公司, 南京 210009;  
3 浙江省水利河口研究院, 杭州 310020)

**摘要:**根据 1985、1995、2005、2013 和 2020 年的 Landsat 卫星图像, 采用人机交互手段将三门湾海岸线分为基岩岸线、砂质岸线、淤泥质岸线、人工岸线和河口岸线。采用交互式监督分类将三门湾海岸带的土地利用分为水体、林地、裸地、建设用地和农业用地。研究表明: 近 40 年三门湾人工岸线和基岩岸线变化最大, 分别增加了 80.3 km 和减少了 79.3 km; 近 40 年三门湾海岸带面积累计增加了 130 km<sup>2</sup>, 建设用地和水体是围填海新增土地的主要利用类型, 主要的土地转移形式为裸地向建设用地、农业用地的转变以及林地转为建设用地; 近 40 年三门湾岸线分形维数由 1.22 减小至 1.201, 人工岸线比例和建设用地占比分别上升了 13% 和 22.57%, 总体上呈现向海推进、人工化加强的趋势。人类活动是造成三门湾岸线及海岸带变化的主要原因, 随着对海岸带保护与合理利用的推进, 三门湾海岸带开发利用格局正逐渐稳中向好。

**关键词:** Landsat 卫星图像; 三门湾; 岸线时空变化; 土地利用; 遥感

中图分类号: P748; P737.1 文献标识码: A DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.070

## 0 引言

海岸线是陆地和海洋的分界线, 多被定义为平均大潮高潮位时的水陆分界线。中国海岸带和海涂资源综合调查规定, 由海岸线向陆侧延伸 10 km、向海至 15 m 水深线间区域为海岸带。作为陆地与海洋的衔接, 海岸线和海岸带的变化直接反映了人类社会经济、资源与生态环境间的相互影响, 因此, 分析海岸线和海岸带长期变化特征, 对当地经济社会与自然环境间的可持续发展具有重要指导意义。

收稿日期: 2023-03-23

资助项目: 国家自然科学基金(41606042); 海岸灾害及防护教育部重点实验室(河海大学)开放基金(202207)

第一作者: 马苑浩(1999—), 男, 在读硕士, 主要从事近海水动力数值模拟方面的研究工作. E-mail: myh@hhu.edu.cn

\* 通讯作者: 周春艳(1985—), 女, 博士, 副教授, 主要从事海岸动力学方面的研究工作. E-mail: cyzhou@hhu.edu.cn

随着高精度遥感影像的普及, 基于遥感影像的海陆信息提取方法已被广泛应用于海岸线变化<sup>[1-2]</sup>、土地利用变化<sup>[3-5]</sup>、围填海监测<sup>[6]</sup>等研究领域。丁晟平等<sup>[1]</sup>采用 Landsat 系列遥感影像, 从分形维数、岸线开发利用指数和土地利用指数等维度, 探究了马銮湾 1957—2019 年海岸线变迁和围填海的时空演变特征; 张翔等<sup>[2]</sup>选取 Landsat 系列遥感影像, 采用改进的归一化差异水体指数和边缘检测算法分析了山东半岛海岸线近 40 年的时空变化规律。张华玉等<sup>[7]</sup>基于多时相遥感数据, 系统分析了 2010—2018 年广西海岸带土地利用类型时空演变规律与景观格局, 并探讨了其演变的驱动因子。目前对近海区域的遥感分析多集中在岸线变化或土地利用方面, 对两者联动变化的系统分析有待进一步探讨。本文基于 Landsat 影像数据提取了三门湾近 40 年各类岸线和海岸带土地利用的变化, 对海岸线和海岸带演变规律及成因进行了系统分析。

研究表明, 频繁的人类活动显著改变了三门湾

海湾形态,引发了诸如湿地面积减少<sup>[8]</sup>、水体营养盐化<sup>[9]</sup>等生态环境问题,但对三门湾海岸线和海岸带在较长时间尺度上的变化特征尚不清楚。Landsat 等系列卫星为三门湾提供了多年连续长周期的遥感影像信息,采用人机交互的手段可以快速准确地识别研究区的岸线和土地利用变化,兼具识别速度与精度优势。因此,基于遥感影像对三门湾海岸线和土地利用长期演变的研究,对海岸带的生态环境保护与科学管理具有重要意义,并为三门湾动态监测与可持续发展提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

三门湾位于浙江省中部沿海(28°57′—29°22′N, 121°25′—121°58′E), 下设台州和宁波两市, 北承长江经济带, 东接海上丝绸之路。湾内岸线曲折, 港口资源丰富, 正成为中国“一带一路”发展战略的新

支点与构筑“浙江大湾区”的新引擎<sup>[10]</sup>。湾内港汊呈五指状分布, 多年平均潮差 4 m, 最大潮差可达 7 m, 是典型的半封闭式强潮多汊道海湾。

### 1.2 数据源

Landsat 系列卫星是美国国家航空航天局发射的陆地卫星, 已被广泛应用在农业、制图、林业、区域规划等领域中。本研究先后获取了 1985、1995、2005、2013 和 2020 年 Landsat 影像 12 景(表 1)。为确保海岸线和海岸带的精确提取分析, 本研究提取的数据均取自云量 < 10% 或研究区清晰的遥感影像。三门湾内岸线以基岩岸线和人工岸线为主, 潮汐作用对三门湾岸线提取影响不显著<sup>[11]</sup>。本研究选用过境时刻石浦潮位站(29°13′N, 121°58′E)潮位与平均海平面高程差 ± 0.1 m 影像提取的瞬时水边线对淤泥质海滩等受潮汐作用影响较大的岸线进行修正。为减小人工误差, 对多年未变迁岸线与人工修复岸线采用 2014 年和 2020 年实测数据进行修编。

表 1 遥感影像数据信息

Table 1 Information of the remote sensing image data

| 过境时间<br>(年-月-日T时:分:秒) | 卫星类型      | 传感器 | 分辨率/m | 轨道编号   | 云量/%  | 过境时刻石浦潮位站潮位/m |
|-----------------------|-----------|-----|-------|--------|-------|---------------|
| 2020-12-22T02:25:51   | Landsat-8 | OLI | 30    | 118-40 | 0.27  | 0.08          |
| 2020-08-16T02:25:33   | Landsat-8 | OLI | 30    | 118-40 | 10.24 | 0.07          |
| 2020-10-04T02:25:42   | Landsat-8 | OLI | 30    | 117-40 | 14.61 | -1.38         |
| 2013-04-12T02:27:41   | Landsat-8 | OLI | 30    | 118-40 | 0.35  | -0.38         |
| 2013-08-29T02:27:35   | Landsat-8 | OLI | 30    | 118-40 | 10.17 | 0.13          |
| 2013-12-03T02:27:09   | Landsat-8 | OLI | 30    | 118-40 | 1.54  | 0.42          |
| 2005-11-27T02:14:16   | Landsat-5 | TM  | 30    | 118-40 | 0     | 0.13          |
| 2005-06-04T02:13:02   | Landsat-5 | TM  | 30    | 118-40 | 4.1   | -0.08         |
| 1995-09-13T01:27:38   | Landsat-5 | TM  | 30    | 118-40 | 0     | -1.93         |
| 1995-08-12T01:29:09   | Landsat-5 | TM  | 30    | 118-40 | 0.08  | -2.79         |
| 1995-11-16T01:25:04   | Landsat-5 | TM  | 30    | 118-40 | 2.83  | 0.01          |
| 1985-11-09T01:18:52   | Landsat-5 | TM  | 30    | 117-40 | 0     | 0.06          |

### 1.3 岸线提取及分类

根据各类岸线在不同波段中的波谱特点, 通过比值计算可以有效抑制与水体无关的背景信息, 快速提取水体。徐涵秋<sup>[12]</sup>利用以中红外波段替换近红外波段构成的改进的归一化差异水体指数法(MNDWI), 提取水体信息具有快速、简便、准确等优点。

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

式中: Green 为 TM 和 OLI 遥感数据中绿光波段数据;

MIR 为中红外波段数据。

本文将研究区海岸线分为人工岸线与自然岸线 2 个大类, 并根据岸线特征将自然岸线进一步分为基岩岸线、淤泥质岸线、砂质岸线和河口岸线。根据海岸线解译标志和提取原理, 采用目视解译方法对自动提取的海岸线进行校正与分类。根据多种伪彩色波段组合与不同海岸线的纹理、形状、色调等特征建立各海岸线的解译标志库, 岸线解译样

例如图1所示,岸线解译的波段组合及解译标志如表2所示。

#### 1.4 海岸带土地利用分类

本研究沿各时相海岸线向内陆延伸 10 km 建立缓冲区,以缓冲区为掩膜裁剪三门湾海岸带各时相遥感影像,采用交互式监督分类将海岸带土地利用分为水体、林地、裸地、建设用地与农业用地(图2)。

交互式监督分类原理为最大似然分类法,其判别规则为假设某待分类像元 $X$ 满足公式(2):

$$D = \ln(a_i) - [0.5(\text{Cov}_i)] - [0.5(X - M_i)^T (\text{Cov}_i^{-1})(X - M_i)] \quad (2)$$

式中: $D$ 、 $i$ 、 $X$ 分别为加权距离、某一特征类型和像元的测量矢量;

$M_i$ 、 $\text{Cov}_i$ 、 $a_i$ 分别为类别 $i$ 的样本均值、协方差矩阵和待分像元属于类别 $i$ 的概率。

#### 1.5 岸线变化强度

岸线平均变化率<sup>[13]</sup>与分形维数<sup>[14]</sup>均为反映岸线长度与人工化程度变化的常用参数。

岸线平均变化率(LCI)指不同类型海岸线在一定时期内岸线年变化百分比,如公式(3)所示:

$$\text{LCI}_{mn} = \frac{L_m - L_n}{L_n(m - n)} \times 100 \quad (3)$$

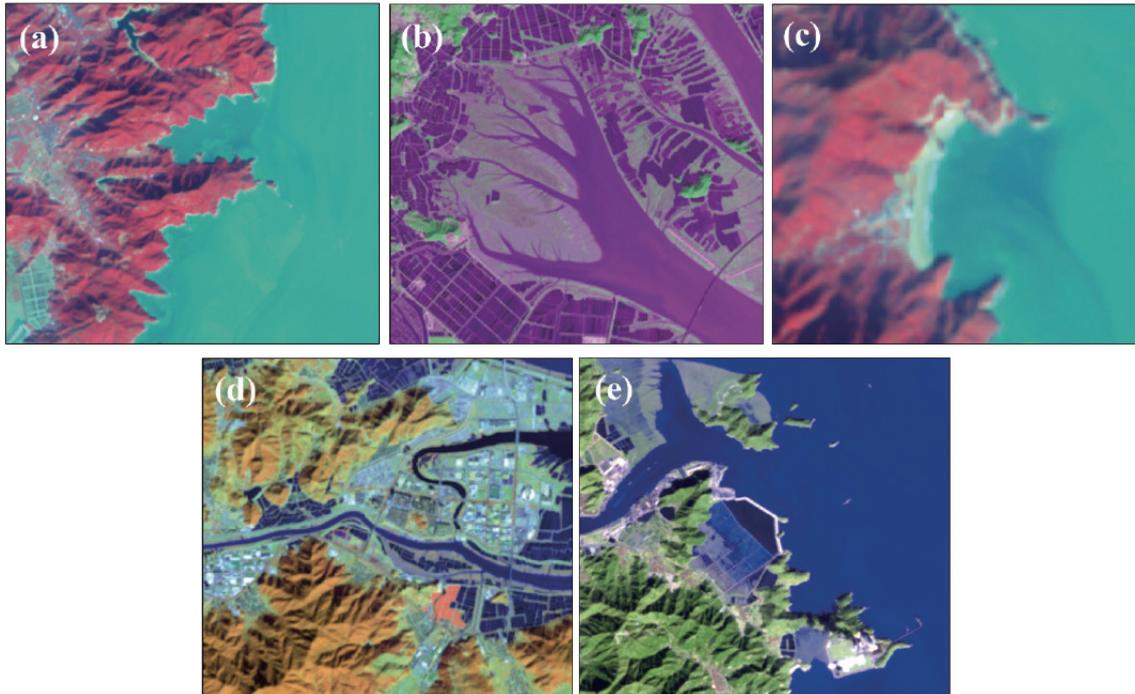
式中: $\text{LCI}_{mn}$ 为 $m-n$ 年中不同类型海岸线的平均变化率;

$L_m$ 为第 $m$ 年的海岸线长度;

$L_n$ 为第 $n$ 年的海岸线长度;

$L_m - L_n$ 表示确定周期内的变化长度。

分形维数能够在一定程度上表征岸线的不规



(a)基岩岸线;(b)淤泥质岸线;(c)砂质岸线;(d)河口岸线;(e)人工岸线

图1 岸线解译样例

Fig.1 Example of coastline interpretation

表2 海岸线解译标志

Table 2 Interpretation marks of the coastline

| 岸线类型  | 波段组合(R、G、B)     | 解译标志                                    |
|-------|-----------------|---|
| 基岩岸线  | NIR、Red、Green   | 具有明显的凹凸感和山脉纹理特征,分布散乱,近岸植被多呈浅红色或暗红色      |
| 淤泥质岸线 | Red、NIR、Green   | 在红光波段下反射率较低,多呈现为棕灰色,可结合岸线后方植被、养殖池塘等识别   |
| 砂质岸线  | NIR、Red、Green   | 岸线平直,向陆侧砂砾含水量低、光谱反射率高,为亮白色              |
| 河口岸线  | NIR、SWIR1、Red   | 主要为河流入海口的河道断面及其延伸部分分辨率较低的自然岸线           |
| 人工岸线  | SWIR2、SWIR1、Red | 几何形状较为规则,主要为海堤、水工建筑物(防潮闸、水坝等)与港口码头等岸线形式 |

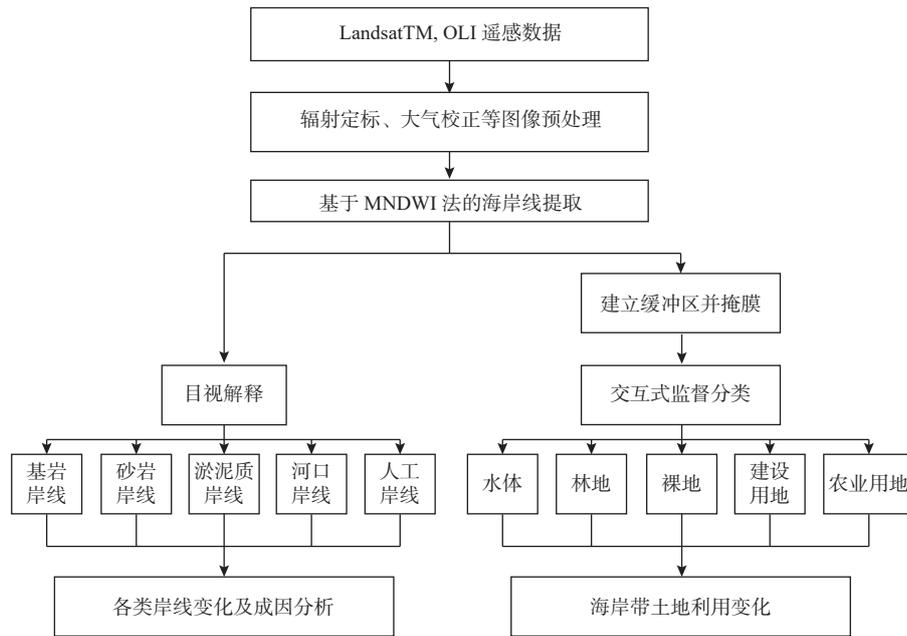


图 2 岸线提取及土地利用分类技术路线图

Fig.2 Technology route of coastline extraction and landuse change detection

则性, 描述岸线局部与整体的相似度, 分形维数越大, 岸线形状越曲折复杂<sup>[15]</sup>。由于岸线人工化通常导致岸线趋于平直, 因此, 海岸线分形维数也反映出了海岸线人工化的程度。本文采用网格法获取三门湾海岸线的分形维数。网格法指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。当正方形格网长度  $\epsilon_k$  出现变化, 则被覆盖海岸线的格网数目  $N_k(\epsilon_k)$  也会相应变化。根据分形理论:

$$N_k(\epsilon_k) \propto \epsilon_k^{-D} \quad (4)$$

对公式(4)两边同时取对数可得:

$$\lg N_k(\epsilon_k) = -D \lg \epsilon_k + A \quad (5)$$

式中:  $A$  为待定常数;

$D$  为被测海岸线的分维。

本研究分别采用测量标度 200、500、1 000、1 500、2 000 m 的 5 组格网对各特征年岸线进行覆盖。

### 1.6 精度分析

本研究对 2020 年三门湾遥感提取岸线间隔 150 m 取验证点, 与浙江省 2018 年实测岸线计算相邻最短距离。由于 2018—2020 年间岸线变化对精度验证的影响, 验证点样本数据分别取自蛇蟠涂(图 3b)、下洋涂(图 3c)、花岙岛(图 3d)等 3 段岸线变化较小的区域, 验证岸线包含本研究全部岸线类别, 验证点共 443 个, 验证结果具有代表性。经

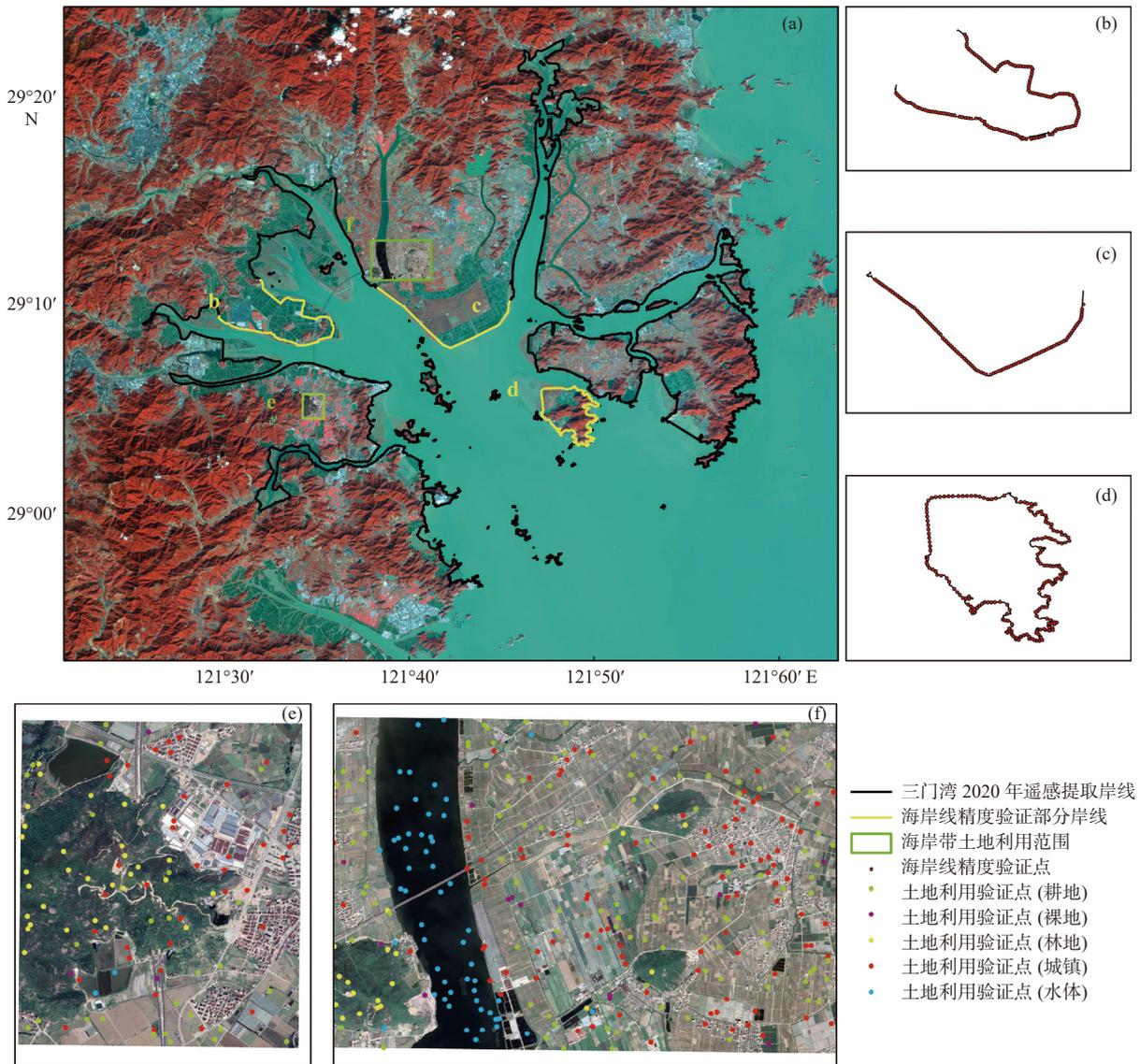
计算分析, 验证点与实测岸线平均距离为 9.55 m, 均方根误差为 18.22 m, 误差小于 1 个像元, 提取精度满足本文后续研究内容的精度要求。研究采用 2020 年 2 m 级遥感影像对监督分类结果进行验证, 验证区位于三门县(图 3e)和象山县(图 3f), 包含全部土地利用类型。通过 2 m 级精度影像对验证区内生成的 400 个随机点对应的土地利用类型进行目视判别, 其中, 监督分类结果与高精度目视判别结果相符的点位共 380 个, 分类总体精度为 0.95, kappa 系数为 0.92, 分类精度达到要求。

## 2 结果与讨论

### 2.1 三门湾海岸线演变

本文基于遥感影像数据提取了三门湾 1985、1995、2005、2013 与 2020 年 5 个特征年份海岸线数据(图 4)。5 个特征年的海岸线长度分别为 719.98、713.98、705.23、720.04 和 717.03 km。三门湾海岸线长度仅在 2005—2013 年明显增加, 增加约 14.8 km, 年岸线变化率为 0.26%; 1995—2005 年, 岸线长度减小最多, 减少 8.75 km, 年岸线变化率为 -0.124%; 1985—1995 年和 2013—2020 年岸线长度分别减少 6 和 3 km, 年岸线变化率分别为 -0.08% 和 -0.01%(表 3)。

三门湾不同类型岸线的长度及空间分布在 40



(a) 三门湾; (b) 蛇蟠涂; (c) 下洋涂; (d) 花岙岛; (e) 土地利用精度验证(三门县); (f) 土地利用精度验证(象山县)

图3 岸线提取及土地利用分类精度验证图

Fig.3 Accuracy verification map of coastline extraction and land use classification

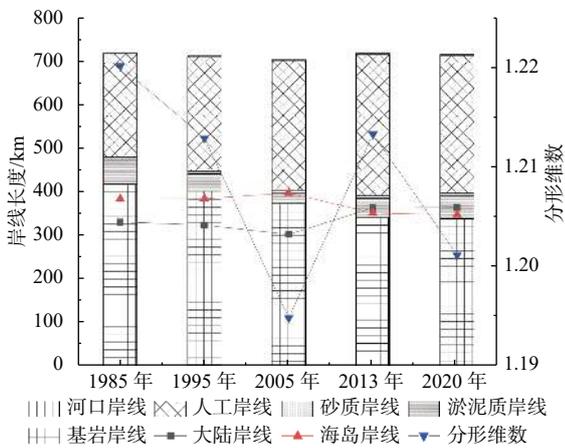


图4 三门湾各研究时段岸线长度示意图

Fig.4 Coastline length in the Sanmen Bay at different periods

年间存在较大变化。基岩岸线近 40 年持续减少，其中，1995—2013 年变化最为剧烈，长度减少近 60 km；人工岸线长度增长最多，1985—2013 年，人工岸线变化率年均 > 1%，近 40 年累计增长 80 km。砂质岸线与淤泥质岸线长度呈现先减后增的特征，尤其是淤泥质岸线多年岸线变化率绝对值均维持在 2% 以上。近 40 年三门湾岸线人工化程度不断增强，其中，三门湾大陆岸线人工化程度最为显著，全湾人工岸线比例由 20 世纪 80 年代的 32% 上升至 2020 年的 45%，其中，三门湾的大陆人工岸线比例由 37% 上升至 60%。全湾和大陆人工岸线比例均在 2013 年达到峰值，分别为 45.2% 和 61.3%。2013 年后，人工岸线占比略有下降。

表 3 三门湾各特征时段岸线变化

Table 3 Variation of coastline change in the Sanmen Bay in different characteristic years

| 年份        | 基岩岸线    |        | 砂质岸线    |        | 淤泥质岸线   |        | 人工岸线    |        | 河口岸线    |        | 时段内变化   |        | 总变化     |        |
|-----------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
|           | 变化长度/km | 年变化率/% |
| 1985—1995 | -16.5   | -0.41  | -1.7    | -2.97  | -15.4   | -3.88  | 27.4    | 1.04   | 0.23    | 1.97   | -6      | -0.08  |         |        |
| 1995—2005 | -28.6   | -0.76  | -0.23   | -0.41  | -14.2   | -5.56  | 34.3    | 1.15   | 0.02    | 0.13   | -8.75   | -0.12  | 2.95    | -0.01  |
| 2005—2013 | -30.4   | -1.1   | -0.32   | -0.77  | 17.6    | 5.10   | 27.6    | 1.06   | 0.35    | 2.88   | 14.8    | 0.26   |         |        |
| 2013—2020 | -3.82   | -0.16  | 0.64    | 1.57   | 9.03    | 2.48   | -8.9    | -0.4   | 0.03    | 0.28   | -3.01   | -0.06  |         |        |

三门湾岸线分形维数总体呈减小趋势,在 5 个特征年份中,1985 年分形维数最大,为 1.22;2005 年最低,为 1.195。2005—2013 年三门湾大规模围填海活动增加了三门湾岸线总长,进而导致了该时段内三门湾岸线分形维数上升至 1.213。2013 年后,随着湾内岸线进一步趋于平直,岸线分形维数降低至 1.201。以 2005 年为界,三门湾岸线分形维数在 1985—2005 年与 2013—2020 年 2 个特征时段内均不断下降,反映出岸线人工化程度的不断提升。

空间分布来看,2005—2013 年间,由于多处填海连岛工程的实施,湾内部分岛屿与大陆相连使得大陆岸线长度超过海海岸线,这与林明祥等<sup>[16]</sup>的结论一致。人工岸线早期主要分布在北部的象山县、宁海县以及湾内几个主要岛屿;基岩岸线与淤泥质岸线是主要的自然岸线,多分布于三门县与湾内其他岛屿;砂质岸线则主要分布在花岙岛、南田岛等部分岛屿(图 5)。

1985—1995 年,自然岸线开始向人工岸线转化,变化集中在三门县蛇蟠岛围垦岸线、蛇蟠水道南岸和健跳水道南岸,以上 3 部分人工岸线增加近 20 km,占该时段人工岸线增加总长的 72%。1995—2005 年,岸线人工化持续加强,其中,典型的岸线变化体现在蛇蟠水道末端与白溪河口地区,蛇蟠水道岸线已经基本人工化;南田岛西南部的滩涂围垦也是该时期主要的岸线变化地区。

2005—2013 年是三门湾海域围填海活动最为剧烈的时段,期间完成了蛇蟠岛、晏站涂、下洋涂、高塘岛等围垦工程,年均围填海面积 $>7\text{ km}^2$ <sup>[16]</sup>,填海工程的进行也进一步增加了三门湾人工岸线长度。WANG<sup>[17]</sup>对三门湾宁波段岸线的分析认为,2001—2015 年间人类活动对海岸线变化产生了显著影响,上述数据则是对其结论的良好印证。2013—2020 年,三门湾围填海活动趋缓,随着人工岸线修复工程的推进,部分人工岸线转变为淤泥质岸线与砂质岸线,自然岸线比例略有提升。目前,三门湾大陆岸线以人工岸线为主,分布于大陆的基

岩岸线主要集中在白礁水道末端与湾口南部的牛尾塘;海岛岸线以基岩岸线为主,花岙岛与南田岛间隔分布有部分砂质岸线,海岛人工岸线主要分布在高塘岛、南田岛北部和花岙岛西北部。

## 2.2 三门湾海岸带演变

2020 年三门湾海岸带面积为  $1971.13\text{ km}^2$ ,近 40 年来三门湾海岸带面积始终呈增长趋势,累计增长约  $134\text{ km}^2$ 。1985—2005 年间三门湾海岸带面积增长较为缓慢,累计增长  $26\text{ km}^2$ ,年均增长  $1.3\text{ km}^2$ ;2005—2013 年间三门湾海岸带面积增长逾  $80\text{ km}^2$ ,是近 40 年增长最为剧烈的时段,占期间面积增长总量的 60%;2013—2020 年,海岸带面积增速放缓,累计增长  $24\text{ km}^2$ ,年均增长约  $3\text{ km}^2$ 。

海岸带面积变化的同时,三门湾海岸带土地利用也发生着显著的变化(图 6)。具体来看,1985—1995 年三门湾海岸带水体面积变化不大;1995—2020 年水体面积不断增长,年均增长约  $4\text{ km}^2$ 。林地是三门湾海岸带中最主要的土地利用类型,占海岸带总面积的 45%~55%,但自 1995 年以来,林地面积持续减少约  $84\text{ km}^2$ 。农业用地面积早期呈增长趋势,2005 年后减少并趋于稳定,其在三门湾海岸带面积中占比约 10%~15%。三门湾海岸带建设用地面积增幅最大,1995 年后增长明显,年均增长  $18.2\text{ km}^2$ 。裸地面积近 40 年呈减少趋势,累计减少  $353\text{ km}^2$ 。

根据三门湾 1985 年和 2020 年的土地利用转移矩阵(表 4),三门湾近 40 年转入面积最多的土地利用类型是建设用地,为  $503.37\text{ km}^2$ ;其次是农业用地与水体,而裸地与林地转入面积均不足  $100\text{ km}^2$ 。裸地是农业用地、林地、建设用地等 3 种土地利用类型的主要转入来源,分别占上述 3 种土地利用类型转入土地的 67.2%、46.1% 和 45.3%;而裸地的主要转入来源为围填海新增用地与农业用地,二者转入面积占裸地总转入面积的 64.5%。水体的转入面积中,围填海新增用地和裸地是主要转入类型,二

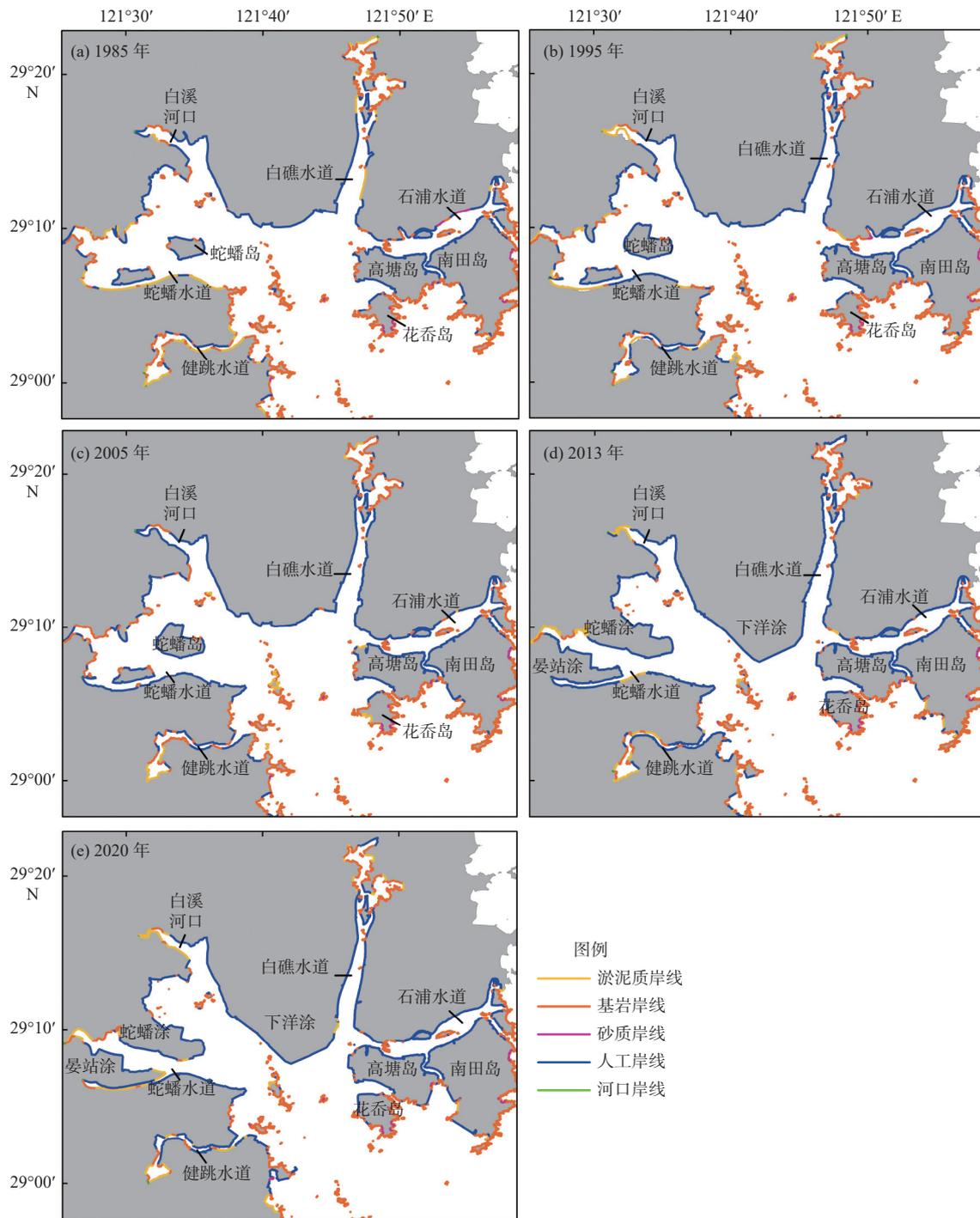


图5 三门湾 1985—2020 年岸线分布

Fig.5 Distribution of different types of coastlines in the Sanmen Bay during 1985 to 2020

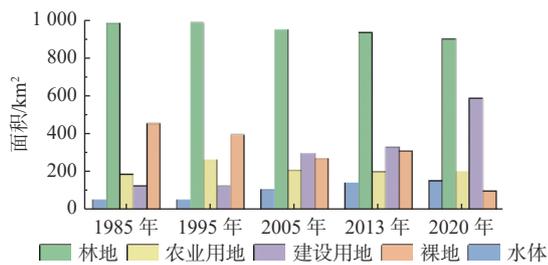


图6 三门湾 1985—2020 年土地利用面积变化

Fig.6 Changes in landuse area in Sanmen Bay from 1980 to 2020

者均占水体总转入面积的约 39%。

从转出面积来看,裸地是转出面积最大的土地利用类型,总转出面积达 417.87 km<sup>2</sup>,其主要转出类型为建设用地,占其全部转出面积的 54.6%;建设用地同样是农业用地、林地、水体与围填海新增用地等 4 种土地利用的主要转出类型,分别占上述 4 种类型总转出量的 68.6%、61.6%、87.4% 和 44.4%。

表 4 三门湾 1985 和 2020 年土地利用转移矩阵

Table 4 Cross-tabulation of landuse classes area in the Sanmen Bay between 1985 and 2020

| 特征年份    | 2020年  |        |       |        |        |        | 合计     |
|---------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
|         | 土地利用类别 | 农业用地   | 裸地    | 林地     | 建设用地   | 水体     |        |
| 1985年   | 农业用地   | —      | 18.98 | 18.18  | 105.85 | 11.26  | 154.26 |
|         | 裸地     | 115.32 | —     | 24.56  | 228.35 | 49.64  | 417.87 |
|         | 林地     | 35.47  | 13.12 | —      | 83.12  | 4.44   | 136.14 |
|         | 建设用地   | 17.74  | 8.42  | 10.03  | —      | 12.54  | 48.74  |
|         | 水体     | 1.64   | 1.72  | 0.47   | 26.65  | —      | 30.48  |
| 围填海新增用地 | 1.48   | 23.22  | 0     | 59.40  | 49.82  | 133.92 |        |
| 合计      | 171.65 | 65.46  | 53.25 | 503.37 | 127.69 |        |        |

不同土地利用类型的时空分布变化显著,本研究进一步绘制了三门湾近 40 年 5 个特征年份的土地利用情况(图 7)。三门湾三面环山,林地多存在于山区,与山脉走向一致,尽管近 40 年林地面积不断减少,但林地依然是三门湾海岸带面积占比最大的土地利用类型。三门湾在 20 世纪 50 年代和 70 年代进行了大规模的“堵港蓄淡”工程,北岸的胡陈港、车岙港和大塘港先后由河口转变为平原型水库,上述 3 个水库构成了早期三门湾海岸带水体的主要来源。20 世纪 90 年代以来,得益于适宜养殖的自然环境条件,三门湾水产养殖业不断发展<sup>[18]</sup>,水体面积也进一步增长,新增水体主要分布于沿海地区与围填海新增土地,如蛇蟠岛、南田岛、晏站涂与下洋涂等。三门湾农业用地面积 40 年来略有减少,主要分布在上述“堵港蓄淡”形成的水库周边,随着下洋涂、蛇蟠涂、双盘涂等区块陆续发展成为农牧渔产业基地,可以预见,三门湾海岸带农业用地面积也将得到进一步发展。

三门湾的围填海强度在 2005—2013 年间达到最大,该时段内新增围填海土地占近 40 年总围垦面积的 54.7%,2013 年后实施有少量岸线裁弯取直工程。早期建设用地主要分布在石浦水道北岸;1995—2005 年,健跳水道两岸也得以发展;21 世纪以来,随着工业化和城镇化的不断发展,建设用地面积显著增加<sup>[19]</sup>。如今三门湾建设用地主要分布在入湾河流、健跳水道和石浦水道的两岸以及部分围填海区域。

### 2.3 三门湾海岸线及海岸带演变规律分析

三门湾近 40 年海岸线变化特征体现在岸线长度减小与岸线人工化增强两方面。除 2005—2013 年由于大规模围填海工程的实施造成三门湾岸线

长度大幅增加外,1985—2005 年和 2013—2020 年 2 个特征时段内岸线总长均不断减少,岸线变化率为负。岸线分形维数同样在 1985—2005 年和 2013—2020 年 2 个时段内不断减小,至 2020 年降至 1.20。人工岸线比例则不断上升,并在 2013 年后逐渐稳定在 45%。

相较于岸线的减小,近 40 年来三门湾海岸带面积呈上升趋势,累计增加 130 km<sup>2</sup>。2005—2013 年海岸带面积增长最为显著,2013 年后增长幅度趋缓。海岸带建设用地面积占比不断增长,由 1985 年的 7.33% 升至 2020 年的 29.9%,林地、裸地面积不断减少,水体面积在 1995—2005 年间增长显著,之后趋于稳定。根据三门湾海岸带土地利用转移矩阵,建设用地是转入面积最多的土地利用类型,裸地是转出面积最多的土地利用类型。近 40 年来主要的土地转移形式集中在裸地向建设用地、农业用地的转变和林地转为建设用地。而在新增的围填海土地中,建设用地和水体是其主要利用方式。

### 3 三门湾海岸线及海岸带演变成因

三门湾海岸带与海岸线变化主要由人类活动引起,这包括海湾围垦、城市建设、港口和码头建设以及国家政策等。21 世纪以来,三门湾经济迅猛增长,城镇建设、临港工业、围海养殖等产业的用海用地需求不断增加<sup>[16]</sup>。图 8 所示为三门湾沿岸主要经济社会指标与岸线人工化、城镇化对比。不难发现,在人口、经济等因素的推动下,三门湾土地开发利用不断增强。而由于沿岸可利用土地资源的匮乏,向海扩张也成为该时期的土地利用特点。滩涂围垦和岸线裁弯取直是三门湾主要的围填海形

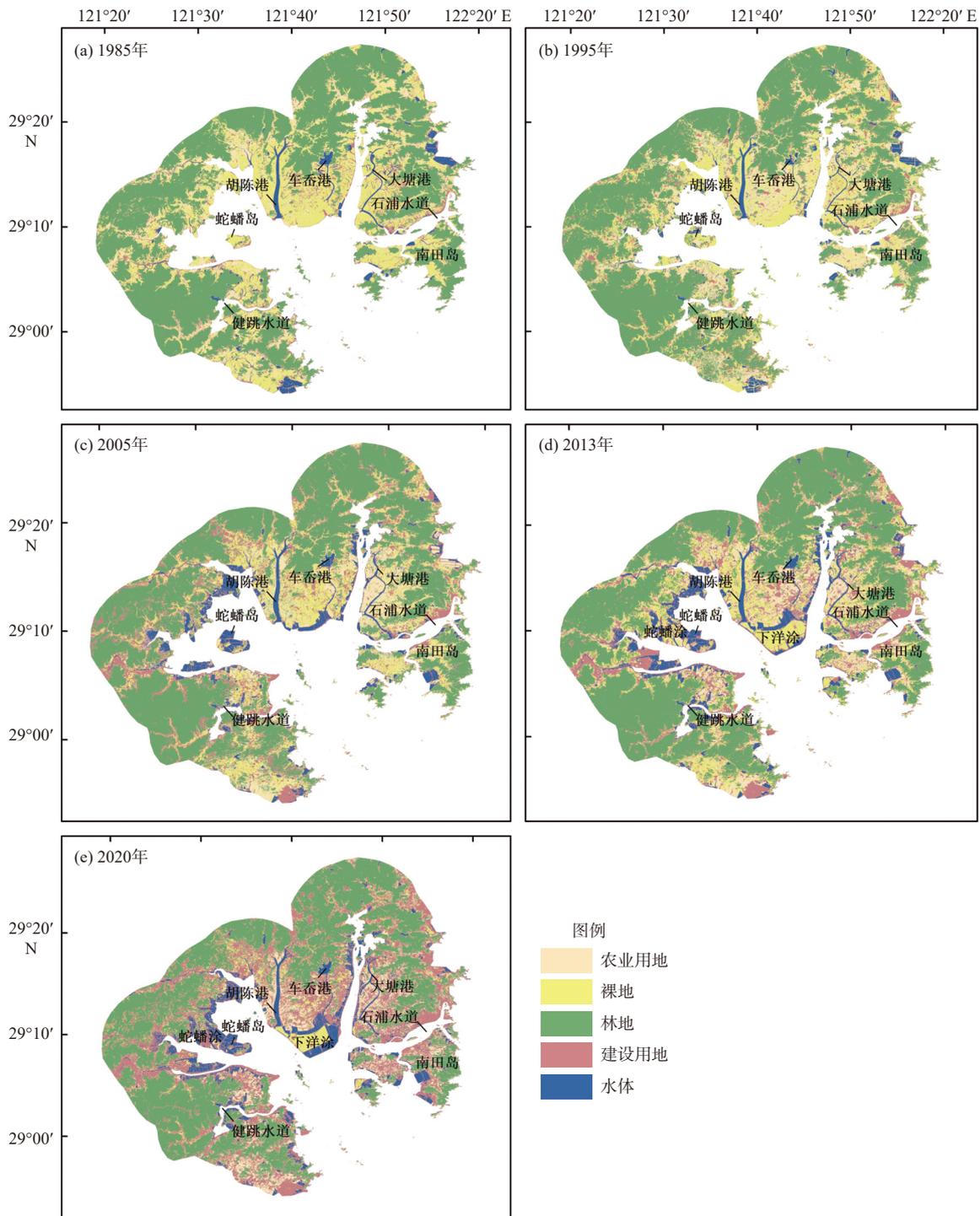


图7 三门湾1985—2020年土地利用变化分布

Fig.7 The landuse mappings of the coastal zone of Sanmen Bay in different characteristic years from 1985 to 2020

式<sup>[11]</sup>。向海的滩涂围垦使得岸线与海岸带面积均有增长,但由此新增的岸线多以人工岸线为主;而岸线裁弯取直缩短了海岸线长度的同时也提高了人工岸线比例。

2015年以来,中国不断加强海岸带生态保护和修复工作,出台了系列指导海岸带整治修复保护的政策,有效加强了海岸带的保护与利用管理。《浙

江省海洋功能区划》也明确三门湾属于以旅游和生态港口为中心的产业相结合的区域,要控制填海造地,探索建立跨行政区域协调管理机制。近年来,三门湾不断推进海岸线整治修复工程,岸线人工化趋稳的同时,自然岸线比例略有回升。可以预见的是,随着国家政策的贯彻落实,三门湾海岸带开发利用将呈现整体稳定向好的态势。

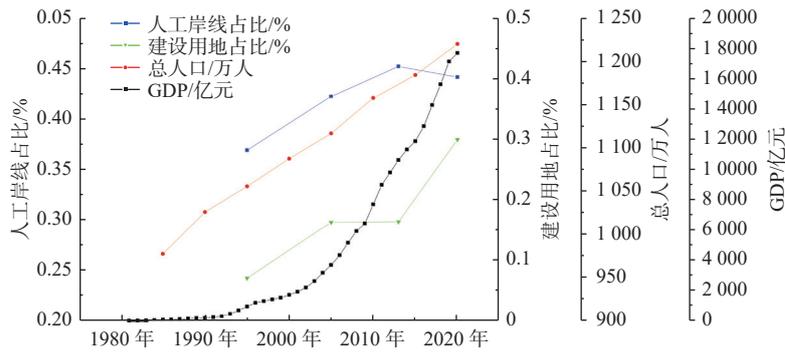


图 8 三门湾主要经济社会指标与岸线人工化、城镇化对比

Fig.8 Comparison of main economic and social indicators with coastline artificial and urbanization in Sanmen Bay

## 4 结论

本文利用地理信息系统,以陆地卫星多周期遥感影像为基础,提取分析了近 40 年三门湾海岸线和海岸带土地利用变化特征。近 40 年三门湾海岸线呈长度减少、人工化增强的趋势,海岸线趋于平直,岸线分形维数减小。40 年来,三门湾海岸带面积不断增加,主要的土地转移类型为裸地转为建设用地和农业用地、以及林地转为建设用地,新增围填海土地中,建设用地和水体是其主要利用方式。三门湾海岸带的开发利用自 2005 年后进入高峰,人类活动是驱动三门湾岸线与海岸带土地利用变化的主要原因。近年来,随着海岸线保护与围填海管控政策的引导,三门湾海岸带的开发利用逐渐趋于稳定。

### 参考文献:

- [1] 丁晟平,崔胜辉,徐礼来,等. 1957—2019 年厦门市马銮湾海岸线和围填海时空演变及互动关系分析[J]. 应用海洋学报, 2021, 40(2): 260-270.
- [2] 张翔,王霄鹏,黄安齐,等. 基于遥感影像提取山东半岛复杂海岸线及海岸线多年变迁研究[J]. 海洋湖沼通报, 2021, 43(2): 171-181.
- [3] ABDULLAH A M, MASRUR A, ADNAN M S G, et al. Spatio-temporal patterns of land use/land cover change in the heterogeneous coastal region of Bangladesh between 1990 and 2017[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(7): 790.
- [4] HUSSEIN K, ALKAABI K, GHEBREYESUS D, et al. Land use/land cover change along the eastern coast of the UAE and its impact on flooding risk[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2020, 11(1): 112-130.
- [5] KAYA I A, GORGUN E K. Land use and land cover change monitoring in Bandirma ( Turkey) using remote sensing and geographic information systems[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(7): 430.
- [6] 范剑超,姜大伟,赵建华,等. GF-3 号 SAR 卫星遥感围填海监测方法研究:以大连金州湾为例[J]. 海洋科学, 2017, 41(12): 60-65.
- [7] 张华玉,秦年秀,汪军能,等. 广西海岸带土地利用时空格局及其驱动因子[J]. 水土保持研究, 2022, 29(3): 367-374.
- [8] 刘永超,李加林,王新新,等. 浙江三门湾湿地遥感时间序列演变分析[J]. 自然资源学报, 2022, 37(4): 1036-1048.
- [9] 刘晓凤,段晓勇,田元,等. 三门湾水体营养盐变化及其对人类活动的响应[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(5): 46-56.
- [10] LIU L, ZHANG X J, CHEN Z Q, et al. Assessment of ecological sustainability for international bays in the context of common prosperity: a case study of Sanmen Bay in Zhejiang Province[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 863.
- [11] CHEN X Y, ZHANG J, MA Y, et al. Monitoring and analysis of coastline changes of the Sanmen Bay with remote sensing during the past 40 years[J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(2): 43-49.
- [12] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.
- [13] HU R R, YAO L J, YU J, et al. Remote sensing of the coastline variation of the Guangdong-Hongkong-Macao Greater Bay Area in the past four decades[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(12): 1318.
- [14] MANDELBROT B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension[J]. *Science ( New York, NY)*, 1967, 156(3775): 636-638.
- [15] 朱晓华,蔡运龙. 中国海岸线分维及其性质研究[J]. 海洋科学进展, 2004, 22(2): 156-162.
- [16] 林明祥,蔡廷禄,王欣凯,等. 近百年来浙江三门湾海岸线时空演变特征[J]. 海洋学研究, 2021, 39(1): 47-55.
- [17] WANG X, LIU Y L, LING F, et al. Spatio-temporal change detection of Ningbo coastline using landsat time-series images during 1976-2015[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2017, 6(3): 68.
- [18] 夏小明,谢钦春. 浙江三门湾海岸发育与持续利用[J]. 海洋通报, 1996, 15(4): 49-57.
- [19] YU Z N, WU C F, TAN Y Z, et al. The dilemma of land expansion and governance in rural China: a comparative study based on three townships in Zhejiang Province[J]. *Land Use Policy*, 2018, 71: 602-611.

## Analysis of spatiotemporal changes of coastline and coastal zone in Sanmen Bay, Zhejiang Province in recent 40 years based on remote sensing

MA Yuanhao<sup>1</sup>, GU Peng<sup>2</sup>, ZHOU Chunyan<sup>1\*</sup>, WANG Qiushun<sup>3</sup>

(1 Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence (Hohai University), Ministry of Education, Nanjing 210098, China; 2 Nanjing Hydraulic Research R and D Tech Group Co., Ltd., Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210009, China; 3 Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China)

**Abstract:** The coastline of Sanmen Bay in Zhejiang Province, East China was classified as rocky coastline, sandy coastline, muddy coastline, artificial coastline, and estuary coastline by human-computer interaction based on the Landsat satellite images of 1985, 1995, 2005, 2013, and 2020. The landuse types in the coastal zone of Sanmen Bay were classified as water bodies, forest, bare land, urban, and agriculture using interactive supervision. The results represent that rocky coastline and artificial coastline in the bay have been changed significantly in the past 40 years. Most prominently, the artificial coastline was increased by 80.3 km while the rocky coastline decreased by 79.3 km. The urban and water bodies were the major landuse of recently reclaimed area, which has extended the coastal zone of Sanmen Bay by 130 km<sup>2</sup> in accumulation in the last 40 years. The conversions from bare land to urban, bare land to agricultural, and forest to urban are the primary land transfer types in the Sanmen Bay coastal zone. In the past 40 years, the fractal dimension of Sanmen Bay coastline has been decreased from 1.22 to 1.201, and the proportion of artificial coastline and urban has been increased by 13% and 22.57% respectively, in general trends of seaward advancement and rising artificiality/urbanization. Human activities are primarily responsible for the changes in the coastline and coastal zone land use of Sanmen Bay. With the implementation of protection and rational use of the coastal zone, the development and exploitation of the Sanmen Bay coastal zone has been gradually improving and stabilizing.

**Key words:** Landsat satellite images; Sanmen Bay; spatial and temporal coastline changes; land use; remote sensing