

# 围填海影响下东海区主要海湾形态时空演变

李加林<sup>1,2,3</sup>, 王丽佳<sup>1</sup>

(1. 宁波大学地理与空间信息技术系, 宁波 315211; 2. 宁波大学东海研究院, 宁波 315211;  
3. 宁波陆海国土空间利用与治理协同创新中心, 宁波 315211)

**摘要:** 围填海影响下海湾形态变化能够深刻反映人类活动对海湾自然环境的影响程度, 分析海湾形态变化对合理高效地利用与保护海湾资源具有重要意义。研究以东海区12个主要海湾(包括陆域与水域)为研究区, 基于20世纪90年代以来6个时期的Landsat TM/OLI遥感影像数据, 通过海湾岸线与湾面形态分析东海区主要海湾的变化特征, 探讨围填海强度与海湾形态变化之间的相关性。主要结论为: ① 1990—2015年, 东海区主要海湾岸线总长度共波动增长66.65 km, 2005—2010年间海湾开发最活跃, 阶段内岸线增长量达38 km。岸线长度三沙湾最大(439 km), 泉州湾最小(105 km); 兴化湾增长最多(54.53 km), 罗源湾缩短最多(25.75 km)。自然岸线与人工岸线长度此消彼长, 岸线人工化程度不断加强, 东海北部海湾岸线总长度大于南部海湾。② 1990—2015年, 东海区海湾岸线共向海推进26.93 km, 合1.08 km/a, 在1995—2000年及2005—2010年间推进最多, 分别达7.10 km和6.00 km, 在1990—1995年间推进量最小, 为2.97 km。杭州湾(4.93 km)和兴化湾(4.15 km)岸线向海推进距离最长, 厦门湾推进(0.55 km)最短; 东海南部海湾岸线迁移量平缓, 北部海湾则更为剧烈, 是东海区岸线迁移变化的主体。③ 1990—2015年间东海区主要海湾水域总面积由初期的13.85 km<sup>2</sup>减少至12.29 km<sup>2</sup>, 累积减少11.23%, 海湾形状不断向复杂化演变。其中杭州湾海湾水域面积减少量最多, 达到0.726 km<sup>2</sup>, 占研究区的46.69%。空间上, 北部海湾水域面积减少量更大, 而南部海湾水域面积减小速率更快。④ 1990年以来, 东海区主要海湾人工化指数平均值和岸线开发强度指数均有所上涨, 21世纪以来的开发利用度显著提高。南部(闽)海湾的开发利用程度较北部(浙沪)更为深入, 北部海湾开发强度的年际波动差异更大。海湾开发强度与海湾岸线长度、人工岸线长度、海湾形态指数呈正相关关系, 与自然岸线长度、海湾水域面积呈负相关关系。当海湾开发强度增加时, 同时段内海湾围填海活动的强度也显著增加。

**关键词:** 围填海; 海湾岸线; 海湾形态变化; 海湾开发; 东海区

DOI: 10.11821/dlxb202001010

## 1 引言

现代海洋开发的迅速兴起促使海洋经济蓬勃发展, 海岸带地区也因拥有丰富资源和独特区位优势成为经济生产活动的高密度区, 其开发利用渐成体系<sup>[1-2]</sup>。在众多开发活动中, 围填海作为人类开发利用海岸带资源的重要方式, 普遍存在于世界沿海地区<sup>[3-5]</sup>。由

收稿日期: 2018-12-30; 修订日期: 2019-11-23

基金项目: 国家自然科学基金委—浙江两化融合联合基金(U1609203); 国家自然科学基金项目(41976209); 国家社科基金项目(16ZDA050) [Foundation: National Natural Science Foundation of China-Zhejiang Joint Fund for the Integration of Industrialization and Informatization, No.U1609203, National Natural Science Foundation of China, No.41976209; National Social Science Foundation of China, No.16ZDA050]

作者简介: 李加林(1973-), 男, 浙江台州人, 教授, 博士生导师, 主要从事海岸带开发与保护研究。

E-mail: nbj2001@163.com

于这一用海方式将彻底改变海湾自然属性<sup>[6]</sup>, 在产生巨大社会效益的同时也对海湾地区造成显著影响, 如人为加速海湾地区景观格局演变<sup>[7-8]</sup>、促使岸线变化<sup>[9-10]</sup>、改变海湾近岸海域水动力条件<sup>[11-12]</sup>、引发围填海附近海域生物多样性降低、优势种演替和群落结构变化<sup>[6, 13-14]</sup>以及水质恶化<sup>[15-16]</sup>等, 影响海湾正常的生态系统服务功能<sup>[17-18]</sup>, 并对海湾水环境及其海陆两种生态系统产生直接、显著、长期且不可逆转的影响<sup>[4]</sup>。目前, 学者们多研究海湾向海一侧岸线变化<sup>[19-20]</sup>, 少有对海湾岸线和湾面形态的综合评价。对围填海导致的海湾形态及与人类活动强度关系的探讨也尚较少见, 且主要围绕围填海开发利用强度大、岸线变化明显的海湾<sup>[21-23]</sup>开展, 仍缺乏对大区域海域主要海湾的系统性研究。

东海区岸线绵长, 沿岸优良海湾众多, 经济发达, 是中国进行海洋科学开发的重要基地, 也是中国守卫国防安全的重要战略空间, 具有较强的研究典型性。在经济与科技的推动下, 其沿岸众海湾围填海活动曾频繁涌现, 人工海岸建设强度持续加大。但随着国内对海洋海岸带资源关注保护力度的加强, 严峻的海湾资源与生态环境现状迫切需要科学理论支撑。国际上对海湾变化的现象和机理分析已相对成熟, 研究重点逐渐转向海湾变化的环境效应<sup>[24-26]</sup>, 但中国在相关领域起步较晚, 各项围填海开发的限制政策制定、海洋生态保护、海湾生态环境修复等工作尚处在初期阶段, 仍需进行长期探索。基于此, 本文以东海区12个主要海湾为研究对象, 从宏观与微观结合的角度探讨1990年以来围填海活动影响下的海湾形态变化, 剖析海湾形态变化与人类活动间内在联系, 以丰富海湾形态变化研究的区域案例, 同时为中国沿海地区实施海洋强国战略、优化海岸带资源开发利用、开展“蓝色海湾”生态整治修复等提供理论参考。

## 2 数据来源与处理

### 2.1 研究区选择及概况

东海区(23°00'N~33°10'N, 117°11'E~131°00'E)即东中国海海域, 位于中国大陆以东, 北以长江口北角和济州岛西南端的连线与黄海分界; 西临上海、浙江、福建; 南以福建省、广东省陆地交界处至台湾岛南端猫鼻头连线与南海毗连, 东临琉球群岛以及中国台湾省, 与太平洋相通。以亚热带季风气候为主, 海域生产力水平高, 海洋资源及海湾类型丰富, 在中国四大海域中海湾数量最多, 且地区经济水平较高, 近年来人类活动尤其是围填海活动对该区域的干扰远超过自然营力, 海湾形态变化深刻。

考虑整个研究区域南北跨度及其实际拥有独立海湾数量等因素, 以浙闽行政边界为依据, 将东海区分为北部海湾和南部海湾区域。依据《中国海湾志》收录名目<sup>[27]</sup>, 选取面积大于100 km<sup>2</sup>的12个主要海湾(图1)。北部海湾包括隶属上海市和浙江省的杭州湾、象山港、三门湾、台州湾、乐清湾和温州湾, 多淤泥质岸线, 滩涂面积广大, 尤以杭州湾南岸岸段滩涂淤涨最为明显。隘顽湾(面积大于100 km<sup>2</sup>)为完全开敞型海湾, 其形态变化不具有常规性, 未被纳为研究对象。南部海湾主要包括隶属福建省的三沙湾、罗源湾、兴化湾、湄洲湾、泉州湾和厦门湾(围头—厦门港), 陆域森林覆盖率高, 岸线绵延曲折, 多基岩岸线。其中厦门湾合并了与厦门港空间上相连的小海湾。

### 2.2 数据来源及处理

本文主要使用美国地质调查局(USGS)网站<sup>①</sup>和地理空间数据云平台<sup>②</sup>提供的东海区沿岸1990年、1995年、2000年、2005年、2010年和2015年6个时期的30 m分辨率的

① 美国地质调查局官方网站. 影像数据下载[EB/OL]. <http://glovis.usgs.gov/>

② 地理空间数据云官方网站. 影像数据下载[EB/OL]. <http://datamirror.csdb.cn/>

Landsat TM/OLI 遥感影像数据, 所选海湾影像行列号如表 1 所示。利用 ENVI 5.2 软件经波段合成、几何校正与配准、假彩色合成、影像镶嵌和裁剪等步骤得到可用于解译的图像。结合东海区沿岸 2015 年的 30 m 分辨率的 DEM 高程数据及 1:50000 地形图, 以及《东海北部海湾海洋环境资源基本现状(上下册)》、《上海市海洋环境资源基本现状》、《福建省海洋环境与资源基本现状》等进行海湾信息分析。主要海湾流域边界矢量数据提取采用 ArcGIS 10.2 软件中的 Arc hydro tool 插件。

侯西勇等<sup>[28]</sup>指出, 海陆边界具有瞬时性和动态性特征, 仅依靠遥感影像或地图资料提取的海岸线结果与实际存在偏差, 而无论是在野外现场还是在遥感影像、航空像片中, 高潮线在诸多类型的指示海岸线中都更容易被辨识<sup>[13]</sup>, 而且从制图目的来讲, 高潮线与平均高潮线之间差距较小, 因而国际上在制图及研究应用中更多地使用平均高潮线指示海陆边界。本研究中, 为尽量减少潮位对影像信息的干扰, 在海湾向海一侧岸线信息提取时, 首先挑选高潮位时的 Landsat TM/OLI 影像, 利用阈值法<sup>[10]</sup>, 参考前人对岸线提取解译标志的研究方法<sup>[28-30]</sup>, 识别不同类型岸线在影像上的色调、纹理及形态分布特征等确定解译标志(表 2), 并根据《中国海湾志》对海湾向海边界的定义<sup>③</sup>、研究区实际情况及地形图、潮汐(主要是平均高潮位信息)数据等资料进行修正。对于海湾的陆域分界线, 本文将海湾周围陆域部分所在流域的分水岭作为海湾的陆域分界线。具体操作步骤如下: 基于地形地势的影响下海湾陆域部分会出现同海湾半封闭形态走向基本吻合的流域水系原理, 经 DEM 数据的空间分析得到河流栅格图并建立河段上下游拓扑关系。借助 Catchment Grid Delineation、Catchment Polygon Processing 工具生成各海湾流域整体边界矢量数据, 结合所得分水岭及高程数据跟踪描绘海湾陆地流域边界。然后进一步叠加交通专题图, 在人类活动强度剧烈、地势低平的沿海地区选取国道、省道、高速公路等信息修正海湾向海边界。将两类边界闭合

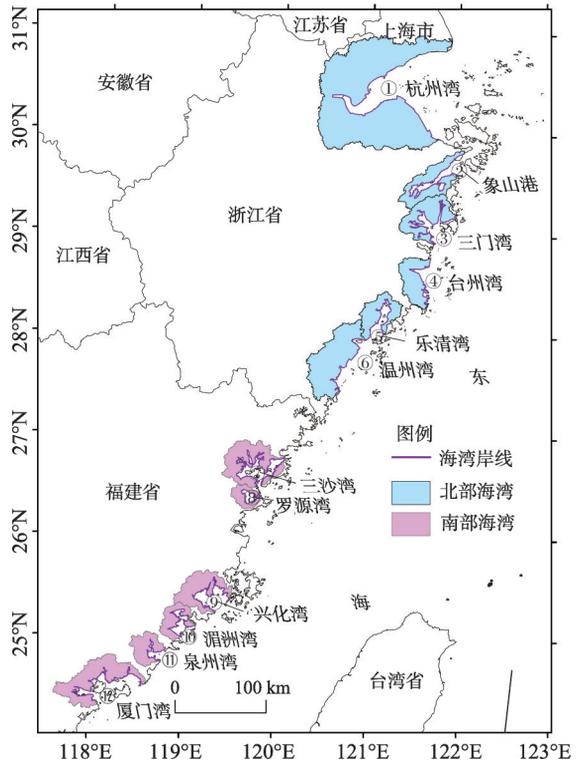


图 1 东海区 12 个主要海湾区位

Fig. 1 Location of the 12 major bays in the ECS

表 1 东海区主要海湾影像行列号

Tab. 1 The image row number of main bays in the ECS

流域名称	轨道号	流域名称	轨道号
杭州湾	118-39	三沙湾	119-41
象山港	118-39、118-40	罗源湾	119-42
三门湾	118-40	兴化湾	119-42
台州湾	118-40	湄洲湾	119-42、119-43
乐清湾	118-40、118-41	泉州湾	119-43
温州湾	118-41	厦门湾	119-43

③《中国海湾志》指出, 海湾向海一侧的边界, 应为湾口两个对应岬角的连线。考虑到部分海湾海域面积较大, 海岛数量较多, 海岛可能会出现两岬角之间, 这种情况下, 本研究将海岛向海一侧的岸线与两岬角之间的连线相接, 以此作为整个海湾向海一侧的边界。

后则获得符合研究需要的东海区 12 个海湾范围。根据《全国海洋功能区划(2011—2020 年)》<sup>[1]</sup>, 以及《海岛海岸带航空遥感调查技术规程》, 海岸线可分为自然岸线和人工岸线两大类。综合东海区 12 个海湾的实际情况, 将自然岸线进一步划分为基岩岸线、砂砾质岸线、河口岸线、淤泥质岸线和生物岸线; 人工岸线分为养殖岸线、港口码头岸线、建设岸线和防护岸线(表 2)。

表 2 海岸线分类体系及解译标志

Tab. 2 Coastline classifications and symbol for interpretation

分类标准	岸线类型	说明	解译标志	范例
自然岸线	基岩岸线	由基岩组成的海岸线	基岩岸线凹凸感强, 植被呈绿色, 植被覆盖度较高的山体呈鲜绿色, 覆盖度较低的山体则呈现浅褐色。基岩与水体分界线则为基岩岸线。	
	砂砾质岸线	由砂砾堆积而成的海岸线	此类岸段多呈条带状, 亮度不高, 纹理均匀, 呈土黄色或白色, 潮水淹没区颜色较暗, 岸线位置可取亮度或纹理变化之处。	
	河口岸线	入海河口与海洋的分界线	海岸线在河流入海处被径流切断, 可以最靠近河口的道路桥梁或防潮闸作为分界线; 也可以河口突然展宽处的突出点连线作为分界线。	
	淤泥质岸线	包括主要由粉砂和黏土组成的淤泥光滩以及生长有芦苇、红树林等生物的淤泥滩	该岸段植被覆盖度较高, 呈鲜绿色或墨绿色, 植被与海水之间多裸露潮滩, 呈暗褐色, 两种颜色交界处即为淤泥质岸线所在处。在人工围垦区外围重新发育的淤泥滩边若没有植被覆盖, 则将人工垦区外边界视为淤泥岸线。	
人工岸线	养殖岸线	用于养殖的人工建筑物	养殖岸线主要是人工修筑的堤坝, 在遥感影像上呈亮白色, 内部为形状规则的田字形养殖池或耕地, 颜色呈蓝黑色或绿色, 堤坝所在处即为岸线。	
	港口码头岸线	港口与码头形成的岸线	港口码头在影像上呈亮白色的规则条带状, 并向海一侧延伸, 原则上应以其外部形状为岸线。但受影响分辨率限制, 本研究中以其与陆域部分相接的处的连线为海岸线。	
	建设岸线	内部为工业或住宅等建筑用地的堤坝	此类岸线是工业或住宅等建筑用地外围的堤坝, 在影像上呈紫红或淡粉色, 形状较不规则, 但与海水界限明显, 其边界即为海岸线。	
	防护岸线	用于防潮护岸形成的岸线	此类岸线是防潮护岸的海堤, 一类是在影像上呈亮白色的条带状, 向海一侧多发育有暗褐色的滩涂, 一类是围填区域向海一侧的海堤已经闭合, 但内部仍为海水(或围垦面积有限), 则将海堤视为岸线。	

### 3 研究方法

#### 3.1 海湾岸线平均变化距离

本文引入海湾岸线平均变化距离, 用于定量估算各海湾在各时段内的大陆岸线向海推进的平均距离, 以定量研究岸线位置摆动的空间变化特征<sup>[32]</sup>。

$$\bar{D} = \sum_{i=1}^n S_i / \sum_{i=1}^n l_i \quad (1)$$

式中:  $\bar{D}$  表示某海湾岸线平均向海推进距离;  $S_i$  表示该海湾第  $i$  年开始的某一时期内因岸

线变化而增加的图斑面积； $l_i$ 表示该海湾第*i*年开始的某一时期内发生变迁的岸线长度； $n$ 表示发生变迁的岸线段数。

### 3.2 海湾形状指数

海湾形状指数是定量描述海湾形态变化的有效指标，它利用海湾形状与圆的相似程度来判断海湾形状的复杂程度，用海湾周长与等面积的圆周长之比来表示，且海湾形状的复杂程度随计算结果的增大而增大（计算结果越小则表明海湾与圆的相似程度越高，形状越简单），计算公式如下<sup>[33]</sup>：

$$SIB = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (2)$$

式中： $SIB$ 为海湾形状指数； $P$ 为海湾周长； $A$ 为海湾面积。

### 3.3 海湾岸线人工化指数

岸线人工化指数是指人工岸线占一定区域岸线总长度的比例，可以反映人类活动对自然岸线干涉程度的强弱。海湾岸线人工化强度表示自然岸线向人工岸线转化的程度，用岸线人工化指数表征，即某海湾人工岸线占岸线总量的比例，比例越大，则海湾岸线人工化强度越大。计算公式如下<sup>[34]</sup>：

$$H = T/L \quad (3)$$

式中： $H$ 表示海湾岸线人工化指数； $T$ 表示某海湾人工岸线长度； $L$ 则表示某海湾岸线总长度。

### 3.4 海湾岸线开发利用强度

海湾岸线开发利用强度是人类对海湾岸线利用强度的定量表征，用以分析在以围填海为主的人类活动影响下形成的不同类型人工岸线对海湾自然环境的影响程度，各海湾岸线类型对资源环境的影响程度不同。计算公式如下<sup>[34]</sup>：

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n l_i \times r_i}{L} \quad (4)$$

式中： $D$ 表示某海湾岸线开发利用强度； $l_i$ 表示某海湾第*i*种岸线的长度； $r_i$ 表示第*i*种海岸的资源环境影响因子<sup>[2]</sup>（ $0 < r_i \leq 1$ ）； $L$ 表示某海湾岸线总长度。

### 3.5 海湾形态变化与海湾开发强度关联分析

引进统计学中的相关性分析法，利用Pearson简单相关系数来计算海湾开发强度与海湾形态变化个指标之间的相关系数，公式如下<sup>[35]</sup>：

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中： $x$ 为海湾开发利用强度； $y$ 为海湾形状指数； $r_{xy}$ 是海湾开发强度与海湾形态评价指标的相关系数； $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 分别是 $x$ 、 $y$ 的均值； $x_i$ 、 $y_i$ 分别是 $x$ 、 $y$ 的第*i*个值； $n$ 为样本数量。当 $r_{xy}$ 值的计算结果越接近与1，则说明两个变量之间的相关性越强。

## 4 结果与讨论

### 4.1 海湾形态变化时空分析

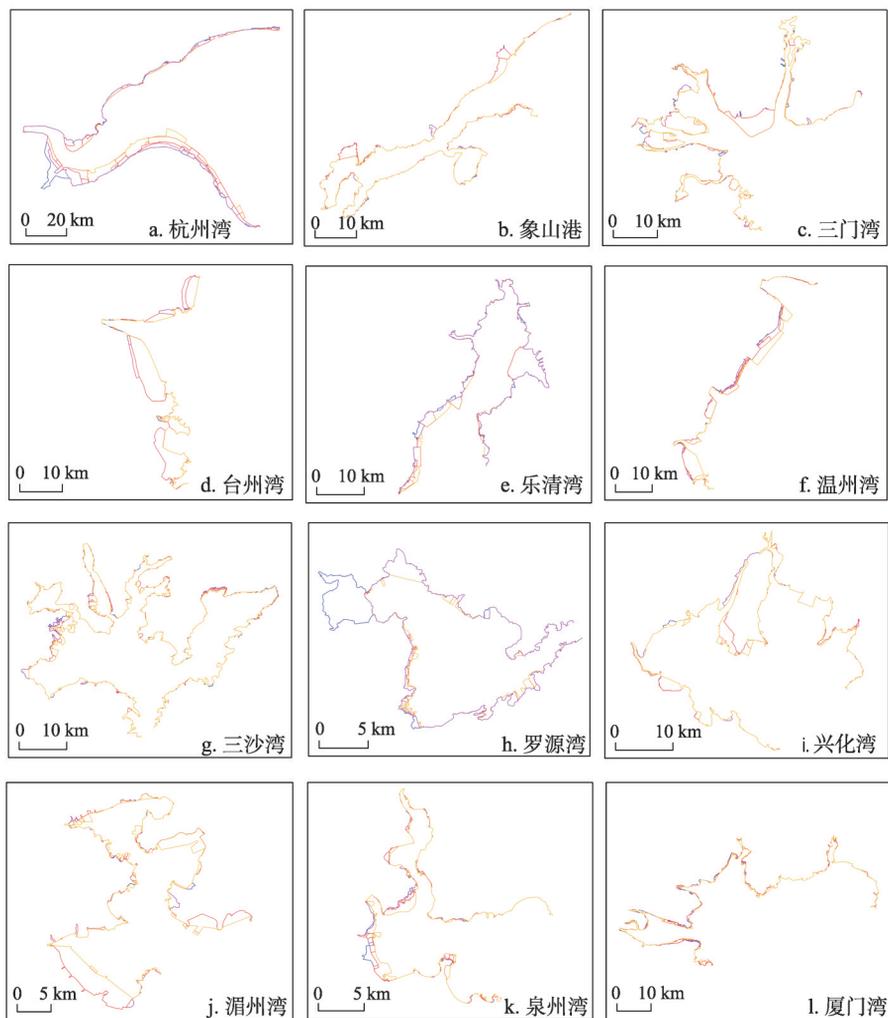
1990—2015年间东海区12个主要海湾大陆岸线长度累积增长66.65 km，除在研究初期负增长外，整体增长趋势明显（表3）。2005—2010年间岸线增长量最高，达38.00

km, 同期岸线年均变化量也处于最高水平, 可见该时段是海湾岸线开发利用相对活跃期。研究区海湾岸线长度及变化量演化也各具特征(图2)。从岸线总长度看, 岸线长度大于300 km的海湾有杭州湾、三门湾和三沙湾, 其中三沙湾岸线总长度最大, 多年岸线拥有量水平保持在439 km上下; 岸线长度在150~300 km的海湾有象山港、乐清湾、兴化湾、湄洲湾和厦门湾; 岸线长度小于150 km的海湾有台州湾(2015年稍大于150 km)、

表3 1990—2015年东海区海岸线长度

Tab. 3 Changes of the coastline length in the ECS in 1990-2015

时间	1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年
海岸线总长度(km)	2782.14	2754.37	2782.32	2785.87	2823.87	2848.79
时期	1990—1995年	1995—2000年	2000—2005年	2005—2010年	2010—2015年	总计
海岸线总长度变化量(km)	-27.77	27.95	3.55	38.00	24.93	66.65



海湾线 ———— 1990年 ———— 1995年 ———— 2000年 ———— 2005年 ———— 2010年 ———— 2015年

图2 1990—2015年东海区主要海湾岸线时空分布

Fig. 2 Temporal-spatial features of the major bay coastlines along the ECS in 1990-2015

温州湾、罗源湾和泉州湾,其中泉州湾的岸线总长度最小,多年平均约为105 km。从岸线增减情况看,25年间杭州湾、象山港、乐清湾和罗源湾4个海湾岸线总长度负增长显著,人工“裁弯取直”活动影响突出。象山港和罗源湾岸线总量持续缩减,象山港岸线缩减量为11.93 km,其他3个海湾岸线的减少量均大于20 km,且以罗源湾岸线减少最为剧烈(25.75 km)。其余8个海湾岸线长度则呈增长趋势,温州湾和兴化湾岸线增长的持续性十分明显,其他海湾岸线则波动增长,兴化湾岸线增长最显著(54.53 km),湄洲湾岸线增量最少(0.61 km)。

研究区各海湾的自然岸线与人工岸线变化呈现出此消彼长的趋势,且自然岸线持续缩减、人工岸线持续增加,并最终超过自然岸线(图3)。其中,自然岸线总长度由1990年占总量79.29%的2205.92 km减少到2015年占总量46.3%的1319.08 km,末期自然岸线长度是研究初期的60%。与之相反,人工岸线急剧增长,从1990年的576.22 km上升至2015年的1529.72 km,增长率约165%,且岸线增速有显著的“先增后降”特征。从岸线的具体类型来看,淤泥岸线在东海沿岸海湾岸线类型中占绝对优势,河口岸线在总量中占比最少。自然岸线中,河口岸线变动最小,受自然和人为因素(以填湾为主)双重影响,海湾泥沙淤积引致的自然河口岸线缩减量与人工河口岸线的增加量相对抵消;淤泥岸线、砂砾质岸线与基岩岸线长度数值均逐年下降,且淤泥岸线衰减程度最为剧烈,主要向养殖岸线转变。基岩岸线25年间累计减少191.52 km,被大量开发用作港口码头、城市住宅、工业与交通用地。与之对应,人工岸线中,港口码头岸线与建设岸线的长度逐年增加,随着海洋经济受重视程度的日益提高,港口码头岸线以年均23.5%的速率急速增长,其增长趋势在进入21世纪后越发明显;养殖岸线呈现出先增后减再增的趋势,说明人类对围垦区的利用方式逐渐由农业向工商业和城市建设转移。

由表4可知,20世纪90年代以来,研究区海湾岸线平均向海推进约26.93 km,合1.08 km/a,在1995—2000年和2005—2010年间产生两个峰值,分别达7.10 km和6.00 km;最低值出现在1990—1995年期间,平均向海推进了2.97 km。从区域来看,东海南部海湾岸线迁移量变化较为平缓(不包括福建省在1995—2000年期间连岛成陆形成江阴半岛引起的数值激增情况);相较而言,东海北部海湾的波动更为剧烈,前20年持续上升,在2005—2010期间达到峰值5.92 km,随后下降至3.14 km。总体而言,2000年前,东海南部岸线迁移总量占

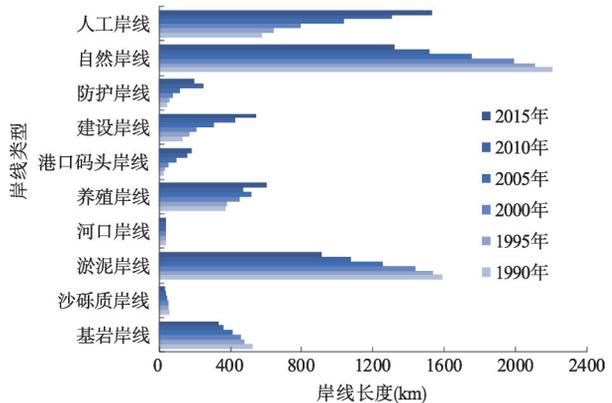


图3 1990—2015年各类型海湾岸线长度变化  
Fig. 3 Length changes of different coastline patterns in 1990-2015

表4 1990—2015年东海区岸线平均推进距离及占比

Tab. 4 Average expansion and proportion of each bay coastline in the ECS in 1990-2015

	1990—1995年		1995—2000年		2000—2005年		2005—2010年		2010—2015年		总计
	距离(km <sup>2</sup> )	占比(%)									
北部海湾	1.41	47.51	2.22	31.29	3.65	82.72	5.92	73.97	3.14	70.71	16.35
南部海湾	1.56	52.49	4.88	68.71	0.76	17.28	0.08	26.03	1.30	29.29	10.58
总计	2.97	100	7.10	100	4.41	100	6.00	100	4.44	100	26.93

比大于北部, 但在这之后, 北部海湾岸线成为东海区海湾岸线迁移变化量的主体, 2005年后变化量占比高于70%。

从各海湾岸线向海推进距离看(图4), 25年间海湾岸线向海迁移平均距离特征明显。大于3 km的海湾有杭州湾、兴化湾和台州湾, 迁移量最大的海湾是杭州湾, 达4.93 km; 其次是兴化湾, 迁移总量达4.15 km。杭州湾是开敞性海域, 湾内海陆相互作用复杂, 长三角经济群落生产和生活活跃, 加之围海造地历史悠久, 且南岸淤涨型滩涂海岸淤涨速率快, 致使向海推进规模及速率远高于北岸及其他海湾; 而1995—2000年间的福建江阴镇的连岛成陆是兴化湾岸线形态向海急剧推进的主要原因。平均向海推移距离在2~3 km之间的有三门湾、乐清湾和温州湾。迁移量在1~2 km之间的有象山港、三沙湾、罗源湾、湄洲湾和泉州湾, 厦门湾迁移量最小, 仅0.55 km, 且多个时段的变动只有 $0.1\pm 0.01$  km, 这与厦门市自然条件优越、海洋开发时间早、滨海旅游业及港口海运业已颇具规模等条件密不可分。

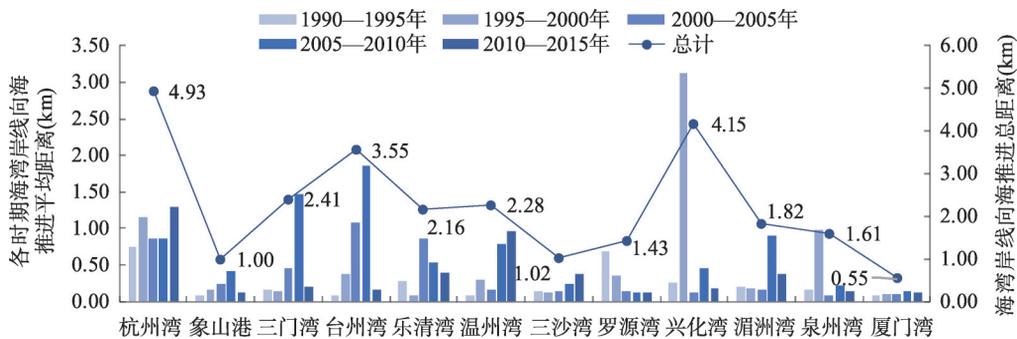


图4 各海湾岸线向海推进平均距离

Fig. 4 The average distance seaward expansion of the coastlines

由表5, 东海区南北两地海湾水域面积差值较大但缩减率差距偏小, 南部海湾水域面积及其面积缩减总量小于北部。海湾的水域面积与其类型有关, 东海北部海湾中开敞型海湾占比高, 水域面积相对较大, 同等面积减少量下面积减少率小; 而东海南部海湾中封闭或半封闭型的海湾占比高, 海湾的水域面积相对较小, 同等面积减少量下面积减少率大。研究期间, 东海沿岸主要海湾水域总面积呈萎缩趋势, 从初期的 $13.85 \text{ km}^2$ 减少至末期的 $12.29 \text{ km}^2$ , 共累积减少11.23%。另据海湾水域总面积与北部、南部海湾水域面积的线性拟合结果(拟合度依次为0.97、0.96和0.98, 斜率依次为 $-0.3295$ 、 $-0.0678$ 和

表5 1990—2015年东海沿岸海湾水域面积变化

Tab. 5 Change of bay water areas along the ECS in 1990-2015

年份	1990年	1990—1995年	1995年	1995—2000年	2000年	2000—2005年
指标	$S(\text{km}^2)$	$\Delta(\text{km}^2)$ 减少率(%)	$S(\text{km}^2)$	$\Delta(\text{km}^2)$ 减少率(%)	$S(\text{km}^2)$	$\Delta(\text{km}^2)$ 减少率(%)
北部海湾	10.389	-0.102 -0.98	10.288	-0.192 -0.0186	10.096	-0.272 -2.70
南部海湾	3.460	-0.036 -1.05	3.423	-0.111 -0.0324	3.312	-0.026 -0.78
总计	13.849	-0.138 -1.00	13.711	-0.303 -0.0221	13.408	-0.298 -2.22
年份	2005年	2005—2010年	2010年	2010—2015年	2015年	总计
指标	$S(\text{km}^2)$	$\Delta(\text{km}^2)$ 减少率(%)	$S(\text{km}^2)$	$\Delta(\text{km}^2)$ 减少率(%)	$S(\text{km}^2)$	$\Delta(\text{km}^2)$ 减少率(%)
北部海湾	9.824	-0.451 -4.59	9.373	-0.212 -0.023	9.161	-1.228 -11.82
南部海湾	3.286	-0.102 -3.09	3.185	-0.052 -0.016	3.133	-0.326 -9.43
总计	13.110	-0.552 -4.21	12.558	-0.264 -0.021	12.294	-1.555 -11.23

注:  $S$ 表示面积,  $\Delta$ 表示面积减少量。

-0.2616), 再次印证了东海区海湾水域面积演化的缩减性和空间差异性特征, 且北部海湾缩减程度更为剧烈, 主导了东海区海湾水域面积变动。

研究区内海湾多年面积变化结果表明(图5), 各海湾水域面积均呈不断萎缩的趋势, 但不同海湾间水域面积的衰减幅度和速率不同。从减少总量来看, 25年间研究区约41.7%的海湾水域面积减少超过 $0.1 \text{ km}^2$ , 其中属于东海北部海湾的海湾占了80%。这些海湾中水域面积减少最大的是杭州湾( $0.726 \text{ km}^2$ ), 占整个研究区水域面积减少总量的46.69%; 其次为台州湾、三门湾、兴化湾和温州湾, 水域面积减少量均在 $0.1 \sim 0.16 \text{ km}^2$ 之间; 乐清湾( $0.082 \text{ km}^2$ )和湄洲湾( $0.078 \text{ km}^2$ )水域面积减少量与 $0.1 \text{ km}^2$ 较为接近; 三沙湾、象山港、厦门湾、罗源湾和泉州湾的水域面积减少量均低于 $0.05 \text{ km}^2$ , 其中泉州湾水域面积缩减量最小( $0.017 \text{ km}^2$ )。与前文所述情况相似, 水域面积基数较大的海湾其面积减少率相对更小, 研究区各海湾水域面积减少率均小于20%, 其中大于15%的

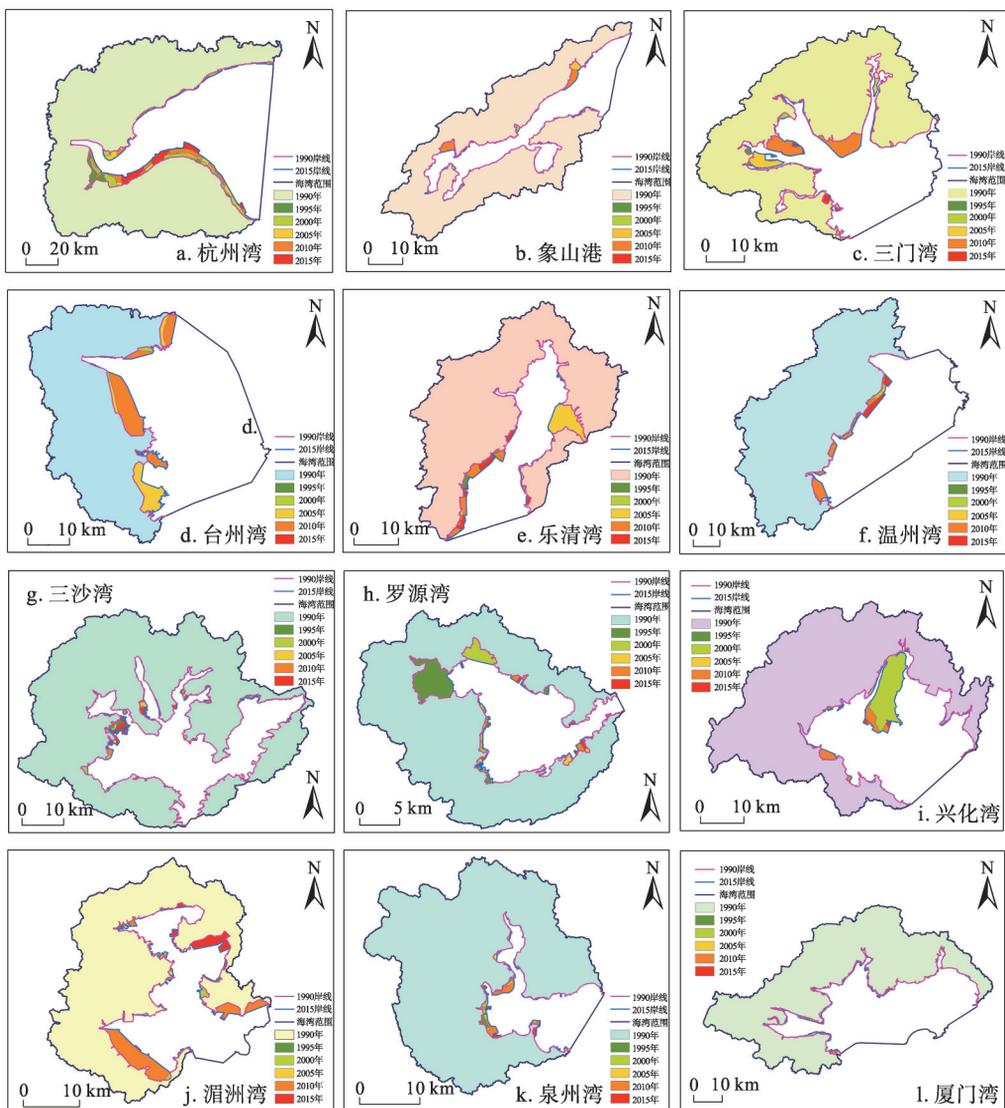


图5 1990—2015年东海区主要海湾面积变化

Fig. 5 The area changes of each bay in the ECS in 1990-2015

海湾有罗源湾(19.34%)、湄洲湾(18.49%)、乐清湾(17.27%)和兴化湾(15.27%),属于东海南部的海湾占75%。水域面积减少率最小的海湾是厦门湾,为3.15%。按这一趋势,未来东海区各海湾中水域面积缩减比例较大的海湾,其数量或将进一步增加。

1990—2015年间,东海区大多数海湾的形状指数均呈现持续增大的趋势,数值增长明显,区域内海湾的形状不断向复杂化演变(表6)。从海湾形状指数的总变化幅度来看,研究期内形状指数发生下降的有象山港、乐清湾和罗源湾。象山港多年变动稳定,总变化量仅为-0.02;乐清湾指数波动性较强总变量为-0.09;罗源湾总变化量最大为-0.26,且在1990—1995年间有明显波动。在诸多形状指数变量为正的海湾中,总增量大于0.3的海湾有5个,以兴化湾(0.81)和三门湾(0.46)最多;增量小于0.3的海湾有4个,以杭州湾形状指数最小,仅0.06,表明其海湾形状复杂化程度上升幅度极小。从海湾形状指数的平均值来看,数值最大的是三沙湾(4.65)及三门湾(4.01),这是由于三沙湾位于地质隆起带,岬湾相间,海湾形状复杂,而三门湾内淤泥遍布,潮汐汉道众多,增加了海湾形状的复杂程度。海湾形状指数最小的海湾是台州湾,主要是因为台州湾位于地质沉降带,且为开敞型海域,海湾总体复杂程度较小。从南北两个区域来看,东海南部海湾20世纪90年代以来海湾形状指数介于2.9~3.3之间,东海北部海湾则介于2.5~2.8之间,在最大值、最小值、平均值等几个关键数值的对比上,南部海湾均大于北部海湾,可见南部海湾形状复杂程度更甚。这是因为本研究中的北部海湾在沉降带和隆起带中分布较为均匀,而南部海湾主要分布于隆起带。

表7从海湾成因类型的角度解释了各海湾形状指数的变化规律及其产生的原因。研究区内3种不同成因类型的海湾中,基岩侵蚀湾数量最少(16.6%),构造湾数量最多(58.3%)<sup>④</sup>。数值大小上,1995年以前海湾形状指数平均值最高的是构造湾,在2000年(含)以后则转为基岩侵蚀湾;最大值则始终为构造湾,但基岩侵蚀湾的最大值在25年间的增量最大;海湾形状指数的平均值和最小值始终出现在河口湾,但其数值处于持

表6 东海区各海湾形状指数及其平均值

Tab. 6 Value of bay morphological indices for the ECS in 1990-2015

东海区海湾	1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年	平均值
杭州湾	1.79	1.77	1.82	1.86	1.85	1.85	1.82
象山港	3.53	3.52	3.47	3.48	3.46	3.51	3.49
三门湾	3.90	3.80	3.70	3.98	4.33	4.36	4.01
台州湾	1.63	1.63	1.65	1.73	1.99	2.00	1.77
乐清湾	2.68	2.72	2.72	2.53	2.62	2.59	2.65
温州湾	1.83	1.84	1.89	1.89	1.97	1.99	1.90
三沙湾	4.61	4.66	4.57	4.56	4.61	4.90	4.65
罗源湾	2.91	2.64	2.66	2.64	2.65	2.65	2.69
兴化湾	2.07	2.08	2.70	2.70	2.83	2.88	2.54
湄洲湾	2.93	2.95	2.90	2.92	3.04	3.25	3.00
泉州湾	2.40	2.43	2.47	2.60	2.57	2.72	2.53
厦门湾	2.81	2.90	2.93	2.90	2.96	2.96	2.91
北部海湾平均值	2.56	2.54	2.54	2.58	2.70	2.72	2.61
南部海湾平均值	2.95	2.94	3.04	3.05	3.11	3.23	3.05
全部海湾平均值	2.76	2.74	2.79	2.82	2.91	2.97	2.83

④ 通常情况下,各类型海湾的形状指数大小主要受地质构造和地表环境的影响,构造湾与基岩侵蚀湾形状相对复杂,故指数较大,河口湾岸线相对简单,故指数较小。受板块运动影响,中国东部沿海地区的地质构造以杭州湾为界存在明显的南北分异,北部沉降区平原广袤,南部隆起区丘陵遍布。本文中涉及的12个海湾除杭州湾属于苏北—杭州湾沉降带以外,其他海湾全部位于浙东—桂南隆起带及其次级沉降带。

表7 1990—2015年不同成因类型的海湾形状指数变化

Tab. 7 Variation of bay shape index in different types of the ECS in 1990-2015

	海湾类型	1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年	1990—2015年
平均值	河口湾	1.75	1.74	1.79	1.83	1.93	1.95	0.20
	基岩侵蚀湾	2.99	2.94	3.20	3.34	3.58	3.62	0.63
	构造湾	3.12	3.12	3.10	3.09	3.13	3.23	0.10
最大值	河口湾	1.83	1.84	1.89	1.89	1.99	2.00	0.17
	基岩侵蚀湾	3.90	3.80	3.70	3.98	4.33	4.36	0.46
	构造湾	4.61	4.66	4.57	4.56	4.61	4.90	0.29
最小值	河口湾	1.63	1.63	1.65	1.73	1.85	1.85	0.22
	基岩侵蚀湾	2.07	2.08	2.70	2.70	2.83	2.88	0.81
	构造湾	2.40	2.43	2.47	2.60	2.57	2.59	0.20

续增加的趋势。空间分布上, 构造湾主要位于东海南部区域, 海湾形状复杂程度较高, 基岩侵蚀湾均匀分布在东海南北两个区域, 河口湾全部来源于东海北部区域。可见围填海活动发生在形状复杂的海湾, 则倾向于降低海湾形状的复杂程度, 而发生在原有形状相对简单的海湾时, 则多表现为将海湾形状复杂化。1990—2015年间各年份东海区海湾形状指数平均值均介于2.5~3之间, 与侯西勇等<sup>[17]</sup>研究中国大陆岸线后得出的东海区海湾形状指数居全国四大海区第二的结果较为接近, 且12个海湾中仅有3个海湾的形状指数平均值低于但均接近2, 综上所述可以认为东海沿岸各海湾的形状指数在中国各海区总体较高。

#### 4.2 海湾岸线开发强度分析

1990—2015年, 东海沿岸主要海湾岸线人工化指数平均值持续上升, 各时期内南部海湾岸线人工化指数始终大于北部, 且内部差距逐步扩大(图6)。北部海湾岸线人工化指数均值由0.21升至0.54, 南部的则由0.22升至0.58。北部海湾岸线人工化指数总体上升稳定, 三门湾和台州湾存在较大变幅。南部海湾岸线人工化指数均有所增长, 且大部分海湾变化趋势的相似度较高, 以兴化湾和湄洲湾的变动最为突出。而南部岸线人工化指数在2000年后上升幅度明显加大, 表明东海南部海湾在进入21世纪后人类活动显著增强。究其原因, 三门湾沿岸早年社会经济发展水平较低、人才匮乏, 曾长期未受到足够重视, 但随着其他海湾开发成熟度和湾区经济建设的重视程度加深, 其开发建设进程自2000年以来开始加速。台州湾在2000—2005年的跃升是因为此时滩涂养殖规模迅速增大, 呈连片式开发; 加之椒江口岸段基岩岸线丰富, 水深条件好, 向港口岸线转变较快。兴化湾2000年的岸线人工化指数在南部各海湾中最高, 达0.38, 因为20世纪90年

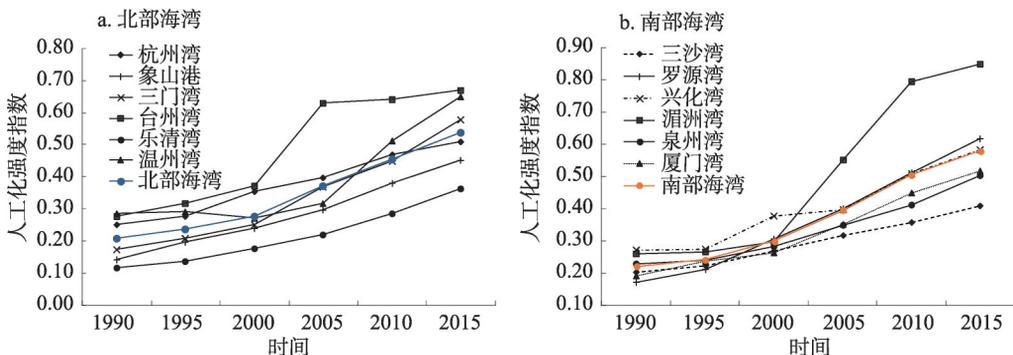


图6 1990—2015年东海区海湾岸线人工化强度

Fig. 6 The artificial strength changes of coastline in the ECS in 1990-2015

代该海湾周边出现大规模的围海养殖, 围填海强度突出。而湄洲湾岸线人工化指数在2000年后激增且始终维持高值状态, 是由于围填海造地规模快速扩大引致了建设岸线和防护岸线占比提升, 从而促使其岸线人工化指数增长。

研究期间, 东海区各海湾岸线开发强度指数均有所增加, 21世纪以来的开发利用程度显著提高(图7)。南部海湾的开发利用程度较北部而言更为深入, 但受海湾内部社会经济水平差异影响, 北部海湾开发强度的年际波动差异更大。20世纪90年代, 海湾开发处于低速增长期, 海湾开发利用程度总体较轻。10年间, 岸线开发强度指数最高值始终未曾超过0.3, 且强度指数增幅大于10%的海湾仅3个(象山港、厦门湾和台州湾), 近半数海湾强度指数增幅低于5%。2000年后, 海湾岸线开发利用进入快速发展期, 海湾开发利用行为更加普遍, 开发强度总体增强。15年内, 岸线开发强度指数增幅超过80%的海湾高达4个, 其中湄洲湾的增幅最大, 高达117%; 杭州湾开发强度指数增幅最低, 仅为25%。到2015年海湾岸线开发利用指数最大值已达0.65(湄洲湾), 最低值达0.31(乐清湾)。湄洲湾主要为基岩海岸, 水深条件好, 总体开发程度较高, 多用于港口、码头、住宅和城镇工业的人工岸线开发。乐清湾的开发强度最低, 一是因为其绝对值本身较其他海湾更低; 二来其淤泥滩淤长过快, 在很大程度上抵消了人工开发的影响。台州湾的年际开发强度波动最大, 呈“增—减—增”的趋势。第一个增长期内, 台州湾围填海面积显著增加, 新增陆地主要用于滩涂养殖和港口建设等; 2005—2015年开发强度有所下降, 主要因为原有岸线在大规模围填海活动中被平直人工岸线替代, 并通过连岛沙堤将海岛转为陆连岛, 增加了大陆岸线中自然岸线的比例, 从而导致岸线开发强度数值上的降低。

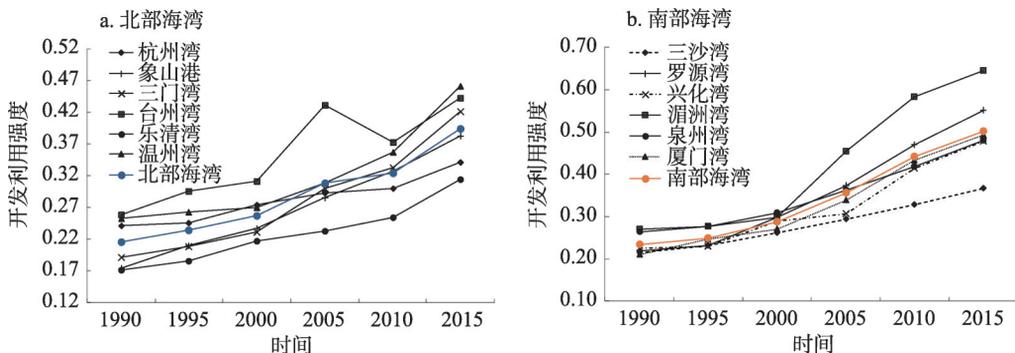


图7 1990—2015年东海区海湾开发利用强度变化

Fig. 7 The bay exploitation and utilization intensity changes in the ECS in 1990-2015

另据东海区主要海湾的海湾形状指数、开发利用强度数量统计结果(图8), 随着时间推移, 海湾形状指数的分布丰度提升(图8a), 但整体仍集中在中低值区间, 人类活动对海湾形状有持续性影响。其中2~2.5及3.5~4两个区间内发生高值海湾数量缩减现象, 表明围填海、“截弯取直”等将导致局部岸线曲折度降低, 促使海湾形状向去复杂化方向转变。此外, 研究期间海湾的开发利用强度指数跨度加大(图8b), 全部海湾从轻度开发利用状态向中、高度开发利用程度转变, 多数海湾处于重度开发利用的临界边缘。如未能及时开展保护措施, 依照此趋势, 未来东海区主要海湾中, 位于低强度区间甚至中强度区间的海湾将全部灭失, 向较高强度和高度开发方向转变。

#### 4.3 海湾形态变化与海湾开发强度关联分析

据海湾人工化强度与岸线长度的拟合结果, 海湾开发强度与岸线长度之间存在显著的正相关关系, 但与不同类型的岸线之间相关性各异(图9), 即海湾开发强度增大, 岸线总长度和人工岸线长度相对增加, 自然岸线总长度减少或不断向人工岸线转化。通常

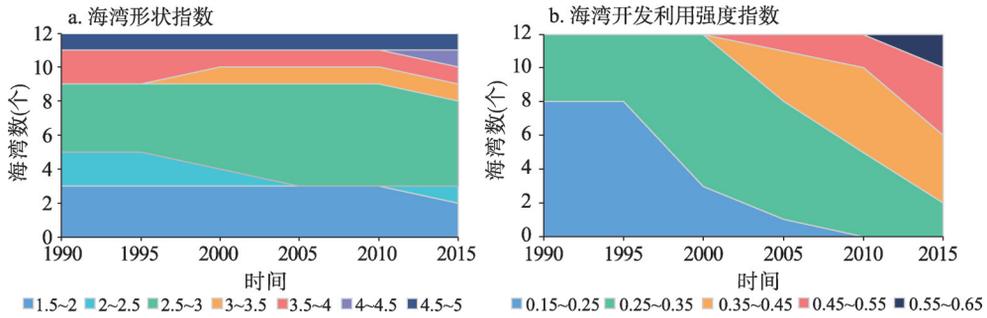


图8. 1990—2015年东海区主要海湾指数分布数量统计

Fig.8 Statistics on the bay shape index of the major bays in the ECS in 1990-2015

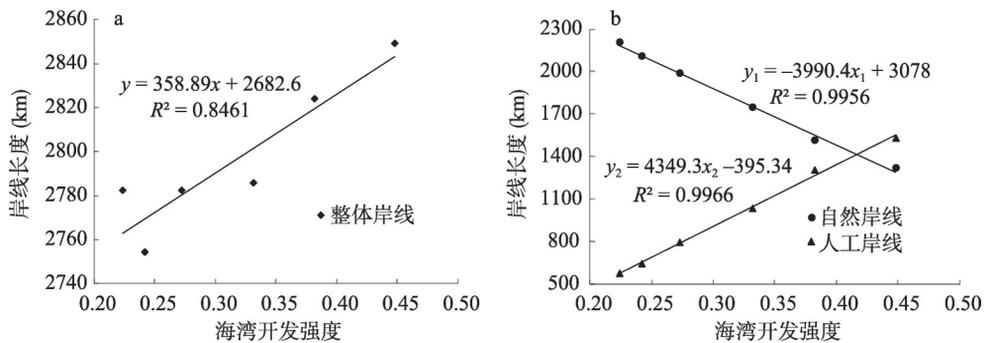


图9 海湾开发强度与岸线长度的关系

Fig. 9 Relationship between the development intensity and the length of the coastlines along the ECS

而言,海湾岸线长度增长包含两种情况:对本身曲折度相对低的海湾岸线进行点状或块状的分散型岸线开发,往往容易增加岸线复杂程度,且开发后形成的人工岸线长度可观。而海湾开发中常见的“连岛成陆”现象也会在客观上增加海湾岸线总长度,即通过填海或连岛等方式扩展陆地面积,将海湾周边的大小岛屿岸线纳入主体海湾岸线,连岛成陆后,原海岛保留下来的自然岸线在一定程度上缓冲了因人工化强度增加带来的岸线损失,从而推动海湾岸线总长度增加。

据海湾开发强度与海湾水域面积的拟合结果,东海区海湾开发强度与海湾水域面积呈显著的负相关关系(图10),即海湾开发强度越大,海湾水域面积越小。与其他只引起海湾岸线结构变化而对海湾水域面积影响较小的一般开发活动不同,围填海是引起海湾水域面积缩减最主要的人为因素。且随着人类对自然环境改造能力的增强,除个别地区外<sup>⑤</sup>,自然营力对海湾岸线变迁的影响程度在大部分海湾地区日益减弱。事实证实,当海湾围填海活动强度加大时<sup>[14]</sup>,同时段内海湾开发强度指数也显著增加。由此,可以认为人类活动中的围填海活动是研究区海湾水域面积变化的主要推动力。

据海湾开发强度与海湾形状指数的拟合结果(图11),东海区各海湾开发强度与海湾形状指数间存在显著的线性正相关,即海湾开发强度增强,海湾形状的复杂程度也逐渐增强。这一结果表明,海湾形状的复杂程度实则受海湾岸线长度和水域面积等因素的综合影响。由公式(2),尽管连片的、规模化人工开发活动会降低海湾滨海岸线曲折度,但随着岸线长度的多渠道增加和海湾水域面积的不断缩小,依然可以引起海湾形状复杂

⑤ 如杭州湾南岸地区,滩涂淤涨速率较快,早期远超过人类围垦速率,但近年来随着围垦强度的增大,滩涂淤涨速率已逐渐跟不上围垦速率。

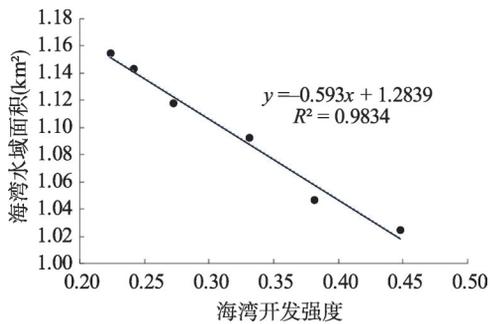


图10 海湾开发强度与海湾水域面积的关系

Fig. 10 The relationship between bay development intensity and surface area

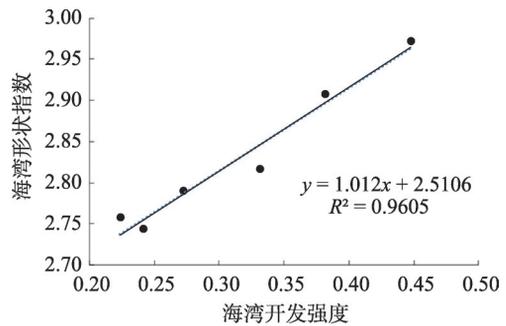


图11 海湾开发强度与海湾形状指数的关系

Fig. 11 The relationship between bay development intensity and bay shape index

程度的上升。可见,有效缩短人工硬质岸线、扩大海湾水域面积,对于海湾生态修复十分有利。海堤开口、退垦还海、退港还海等工程方案值得进一步研究探讨和推广实施。

## 5 结论

本文以中国东海区12个主要海湾为研究对象,基于6个时期的Landsat TM/OLI遥感影像,深入分析了1990—2015年围填海影响下海湾形态变化时空演变特征。结果显示,东海区海湾形态变化主要体现在岸线总长度增加、岸线人工化程度加强、岸线持续向海推进、海湾水域面积减小以及海湾形状的复杂程度上升等四个方面。

(1) 1990—2015年,东海区主要海湾岸线总长度共波动增长66.65 km,在2005—2010年间岸线增长量最大(38 km),阶段内海湾开发较活跃,但各海湾间岸线长度增减情况各异。各海湾间,岸线长度三沙湾最大(439 km),泉州湾最小(105 km);兴化湾增长最多(54.53 km),罗源湾缩短最多(25.75 km)。各岸线类型间,自然岸线与人工岸线变化呈现出此消彼长的趋势,自然岸线持续缩减,人工岸线持续增加并最终超过自然岸线,岸线人工化程度不断加强。空间上,东海北部海湾岸线总长度大于南部海湾。

(2) 1990—2015年,东海区海湾岸线不断向海推进,平均向海推进约26.93 km,合1.08 km/a,在1995—2000年及2005—2010年间推进最多,分别达7.10 km和6.00 km,在1990—1995年间推进量最小,为2.97 km。各海湾中,以杭州湾(4.93 km)、兴化湾(4.15 km)的岸线向海推进距离最长,厦门湾岸线推进(0.55 km)最短;空间上,北部海湾岸线迁移变化量在2000年之前小于南部,2000年之后则反超。总体上,东海南部海湾岸线迁移量较为平缓,北部海湾则更为剧烈,是东海区岸线迁移变化的主体。

(3) 1990—2015年,东海区主要海湾水域总面积成萎缩趋势,由初期的13.85 km<sup>2</sup>减少至末期的12.29 km<sup>2</sup>,共累积减少11.23%。各海湾水域面积均表现出萎缩趋势,但面积的缩减幅度和速率各不相同。杭州湾以海湾水域面积减少量(0.726 km<sup>2</sup>)占研究区46.69%的水平,居于缩减量首位。空间上,东海北部海湾水域面积减少量更大,而南部海湾水域面积减小速率更快。此外,东海区大多数海湾的形状指数均呈现出持续增大的趋势,海湾形状不断向复杂化演变,东海南部海湾多位于隆起带,形状复杂程度明显大于北部海湾。

(4) 1990年以来,东海区主要海湾人工化指数平均值和岸线开发强度指数均有所上涨,21世纪以来的开发利用度显著提高。总体上南部(闽)海湾的开发利用程度较北部(浙沪)更为深入,但受海湾内部社会经济水平差异影响,北部海湾开发强度的年际波动

差异更大。所有海湾均由轻度开发强度状态向中、高强度开发状态转变,多数处于重度开发利用的临界边缘,若未能及时开展适当的保护措施,当前的海湾开发利用程度并不具备可持续性。

(5) 总体上,海湾开发强度与海湾岸线长度、人工岸线长度、海湾形态指数呈正相关关系,与自然岸线长度、海湾水域面积呈负相关关系。随着海湾开发强度增大,海湾岸线总长度及海湾人工岸线均不断增加,海湾形状复杂程度上升,自然岸线长度逐渐变短,海湾水域面积也渐渐萎缩。当海湾开发强度增加时,同时段内海湾围填海活动的强度也显著增加,可以认为人类活动中的围填海活动是研究区海湾水域面积变化的主要推动力。

## 参考文献(References)

- [1] Liu Rongzi. Socio-economic Impact Assessment of Reclamation Planning in the Southern Bay of the East China Sea. Beijing: Science Press, 2008. [刘容子. 东海南部海湾围填海规划社会经济影响评价. 北京: 科学出版社, 2008.]
- [2] Xu Lianghui. Study on coastal types and landscape evolution of Zhejiang province under the influence of shoreline development [D]. Ningbo: Ningbo University, 2015. [徐凉慧. 岸线开发影响下的浙江省海岸类型及景观演化研究 [D]. 宁波: 宁波大学, 2015.]
- [3] Kondo T. Technological advances in Japan coastal development: Land reclamation and artificial islands. Marine Technology Society Journal, 1995, 29(3): 42-49.
- [4] Zhang Minghui, Chen Changping, Suo Anning, et al. International advance of sea areas reclamation impact on marine environment. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(8): 1509-1513. [张明慧, 陈昌平, 索安宁, 等. 围填海的海洋环境影响国内外研究进展. 生态环境学报, 2012, 21(8): 1509-1513.]
- [5] Li Jialin, Liu Yongchao, Pu Ruiliang, et al. Coastline and landscape changes in bay areas caused by human activities: A comparative analysis of Xiangshan Bay, China and Tampa Bay, USA. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(8): 1127-1151.
- [6] Jiang Yimei, Li Jialin, Gong Hongbo, et al. Ecosystem service value assessment of coastal zone caused by reclamation: A case study of Ningbo Hangzhou Bay New Zone. Economic Geography, 2017, 37(11): 181-190. [姜忆涓, 李加林, 龚虹波, 等. 围填海影响下海岸带生态服务价值损益评估: 以宁波杭州湾新区为例. 经济地理, 2017, 37(11): 181-190.]
- [7] Ke Linia, Pang Lin, Wang Quanming, et al. Analysis of changes in landscape patterns and stock resources resulting from sea reclamation: A case study of the waters of Changxing Island. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(15): 5498-5508. [柯丽娜, 庞琳, 王权明, 等. 围填海景观格局演变及存量资源分析: 以大连长兴岛附近海域为例. 生态学报, 2018, 38(15): 5498-5508.]
- [8] Wei Fan, Han Guangxuan, Zhang Jinping, et al. Evolution of coastal wetlands under the influence of sea reclamation in Bohai Rim during 1985-2015. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(5): 1527-1537. [魏帆, 韩广轩, 张金萍, 等. 1985—2015年围填海活动影响下的环渤海滨海湿地演变特征. 生态学杂志, 2018, 37(5): 1527-1537.]
- [9] Ye Mengyao, Li Jialin, Shi Xiaoli, et al. Spatial pattern change of the coastline development and utilization in Zhejiang from 1990 to 2015. Geographical Research, 2017, 36(6): 1159-1170. [叶梦姚, 李加林, 史小丽, 等. 1990—2015年浙江省大陆岸线变迁与开发利用空间格局变化. 地理研究, 2017, 36(6): 1159-1170.]
- [10] Ryabchuk D, Spiridonov M, Zhamoida V, et al. Long term and short term coastal line changes of the Eastern Gulf of Finland. Problems of coastal erosion. Journal of Coastal Conservation, 2012, 16(3): 233-242.
- [11] Liu Ming, Xi Xiaohui, Lei Liyuan, et al. The effects of coastal reclamation on hydrodynamics in Jinzhou Bay. Journal of Dalian Ocean University, 2013, 28(1): 110-114. [刘明, 席小慧, 雷利元, 等. 锦州湾围填海工程对海湾水交换能力的影响. 大连海洋大学学报, 2013, 28(1): 110-114.]
- [12] Li Xibin, Niu Fuxin, Wang Luning, et al. Simulation study on the impact of future large-scale reclamation projects on tidal hydrodynamic environment in the Bohai Bay. Marine Science Bulletin, 2018, 37(3): 320-327. [李希彬, 牛福新, 王鲁宁, 等. 未来大规模海岸工程对渤海湾潮动力环境影响的模拟研究. 海洋通报, 2018, 37(3): 320-327.]
- [13] Hu Zhiyuan, Li Huanhuan, Bao Yixin, et al. Biodiversity comparison of microbenthic communities at tidal flat of Lingkun Island. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1498-1507. [胡知渊, 李欢欢, 鲍毅新, 等. 灵昆岛围垦区内外滩涂大型底栖动物生物多样性. 生态学报, 2008, 28(4): 1498-1507.]
- [14] Cui Baoshan, Xie Tian, Wang Qing, et al. Impact of large-scale reclamation on coastal wetlands and implications for ecological restoration, compensation, and sustainable exploitation framework. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(4): 418-425. [崔保山, 谢澍, 王青, 等. 大规模围填海对滨海湿地的影响与对策. 中国科学院院刊, 2017, 32(4): 418-425.]
- [15] Jin Yudan, Zhang Qiufeng, Li Xibin, et al. Effects of Tianjin reclamation projects on the Bohai Bay water exchange. Marine Science Bulletin, 2017, 36(5): 578-584. [靳玉丹, 张秋丰, 李希彬, 等. 天津海域围填海工程对渤海湾水交换

- 的影响研究. 海洋通报, 2017, 36(5): 578-584.]
- [16] Tu Jing. Influence of reclamation activities on the shoreline and hydrodynamic environment of Bohai Bay [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017. [涂晶. 围填海活动对渤海湾岸线及水动力环境的影响[D]. 天津: 天津大学, 2017.]
- [17] Hou Xiyong, Liu Jing, Song Yang, et al. Environmental-ecological effect of development and utilization of China's coastline and policy recommendations. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(10): 1143-1150. [侯西勇, 刘静, 宋洋, 等. 中国大陆海岸线开发利用的生态环境影响与政策建议. 中国科学院院刊, 2016, 31(10): 1143-1150.]
- [18] Li Jialin, Xu Lianghui, Yang Lei, et al. Study on spatial pattern changes of landscape ecological risk on coastal zone of Zhejiang Province. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1): 293-299, 314. [李加林, 徐凉慧, 杨磊, 等. 浙江省海岸带景观生态风险格局演变研究. 水土保持学报, 2016, 30(1): 293-299, 314.]
- [19] Mu Xuenan. Research on the relationship between the evolution process of reclamation, shoreline and wetland changes of Tianjin Binhai New Area [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. [穆雪男. 天津滨海新区围填海演进过程与岸线、湿地变化关系研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.]
- [20] Chen Weitong, Zhang Dong, Cui Dandan, et al. Monitoring spatial and temporal changes in the continental coastline and the intertidal zone in Jiangsu province, China. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(7): 1365-1380. [陈玮彤, 张东, 崔丹丹, 等. 基于遥感的江苏省大陆岸线岸滩时空演变. 地理学报, 2018, 73(7): 1365-1380.]
- [21] Sun Lie, Ma Yi, Liu Rongjie. Coastline mapping and change detection along Hangzhou Bay using remotely sensed imagery. Hydrographic Surveying and Charting, 2013, 33(2): 38-41. [孙丽娥, 马毅, 刘荣杰. 杭州湾岸线变迁遥感监测与分析. 海洋测绘, 2013, 33(2): 38-41.]
- [22] Zhu Gaoru, Xu Xuegong. Annual processes of land reclamation from the sea along the northwest coast of Bohai Bay during 1974 to 2010. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(8): 1006-1012. [朱高儒, 许学工. 渤海湾西北岸 1974—2010 年逐年填海造陆进程分析. 地理科学, 2012, 32(8): 1006-1012.]
- [23] Wang Xuege, Li Xiaoyan, Jia Mingming, et al. Analysis on changes in coastline and reclamation in Dalian from 1975 to 2015. Marine Environmental Science, 2017, 36(1): 87-93. [王雪鸽, 李晓燕, 贾明明, 等. 1975—2015 年大连市海岸线变迁和围填海变化. 海洋环境科学, 2017, 36(1): 87-93.]
- [24] Pendleton E A, Barras J A, Williams S J, et al. Coastal Vulnerability Assessment of the Northern Gulf of Mexico to Sea-Level Rise and Coastal Change: U.S. Geological Survey Open-File Report, 2010-1146, 2010. <http://pubs.usgs.gov/of/2010/1146/pdf/ofr2010-1146.pdf>.
- [25] Misra A, Balaji R. Decadal changes in the land use/land cover and shoreline along the coastal districts of southern Gujarat, India. Environmental Monitoring & Assessment, 2015, 187(7): 1-13.
- [26] Stefano P, William H. Clinofolds and clinofold systems: Review and dynamic classification scheme for shorelines, subaqueous deltas, shelf edges and continental margins. Earth-Science Reviews, 2018, 185: 202-233.
- [27] Editorial Board of China Bay Survey, Survey of China Bays (Vol. 5). Beijing: China Ocean Press, 1992. [中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志(第五分册). 北京: 海洋出版社, 1992.]
- [28] Hou Xiyong, Wu Ting, Wang Yuandong, et al. Extraction and accuracy evaluation of multi-temporal coastlines of mainland China since 1940s. Marine Sciences, 2014, 38(11): 66-73. [侯西勇, 毋亭, 王远东, 等. 20 世纪 40 年代以来多时相中国大陆岸线提取方法及精度评估. 海洋科学, 2014, 38(11): 66-73.]
- [29] Liang Li, Liu Qingsheng, Liu Gaohuan, et al. Review of coastline extraction methods based on remote sensing image. Journal of Geo-information Science, 2018, 20(12): 1745-1755. [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. 地球信息科学学报, 2018, 20(12): 1745-1755.]
- [30] Su Fenzhen, et al. Assessment of Remote Sensing in Coastal Zones. Beijing: Science Press, 2015. [苏奋振, 等. 海岸带遥感评估. 北京: 科学出版社, 2015.]
- [31] Guan Daoming, A Dong. National Marine Functional Zoning Study: General Report on National Marine Functional Zoning (2011-2020). Beijing: China Ocean Press, 2013. [关道明, 阿东. 全国海洋功能区划研究: 《全国海洋功能区划 (2011—2020 年)》研究总报告. 北京: 海洋出版社, 2013.]
- [32] Yuan Qixiang, Li Jialin, Xu Lianghui, et al. Temporal and spatial variations of shoreline in tidal inlet system of Xiangshangang Bay and its relation to human activities in the past 40a. Journal of Applied Oceanography, 2015, 34(2): 279-290. [袁麒翔, 李加林, 徐凉慧, 等. 近 40a 象山港潮汐汊道岸线的时空变化特征及其与人类活动的关系. 应用海洋学学报, 2015, 34(2): 279-290.]
- [33] Hou Xiyong, Hou Wan, Wu Ting. Shape changes of major gulfs along the main land of China since the early 1940s. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(1): 118-129. [侯西勇, 侯婉, 毋亭. 20 世纪 40 年代初以来中国大陆沿海主要海湾形态变化. 地理学报, 2016, 71(1): 118-129.]
- [34] Li Jialin, Jiang Yimei, Feng Baixiang, et al. Analysis of intensively exploited bay area with cases of Ningbo, Hangzhou Bay, Xiangshan Bay and Ningbo Sanmen Bay. Journal of Applied Oceanography, 2018, 37(4): 541-550. [李加林, 姜忆

涓, 冯佰香, 等. 海湾开发利用强度分析: 以宁波市杭州湾、象山港与宁波市三门湾为例. 应用海洋学学报, 2018, 37 (4): 541-550.]

[35] Xu Jianhua. Quantitative Geography (2nd ed). Beijing: Higher Education Press, 2014. [徐建华. 计量地理学(2版). 北京: 高等教育出版社, 2014.]

## Spatial and temporal evolutions of the major bays in the East China Sea under the influence of reclamation

LI Jialin<sup>1,2,3</sup>, WANG Lijia<sup>1</sup>

(1. Department of Geography & Spatial Information Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 2. Donghai Institute of Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 3. Collaborative Innovation Center for Land and Marine Spatial Utilization and Governance Research at Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China)

**Abstract:** The spatial pattern changes of bays under the influence of reclamation can profoundly reflect how human activities affect the natural environments, which is important to effectively protect and utilize bay resources. Based on 6 Landsat TM/OLI remote sensing images during 1990-2015, this study analyzed the variations of major bays from the coastline and bay surface morphology and explored the correlation between the reclamation intensity and spatial pattern changes for the 12 major bays in the East China Sea (ECS). The main conclusions include that: (1) the length of the main bay coastline in the East China Sea, from 1990 to 2015, increased by 66.65 km. The extensive coastline growth was found during 2005-2010 and the growth reached 38 km. Sansha Bay has the longest coastline (439 km) and the shortest (105 km) was found in Luoyuan Bay; Xinghua Bay experienced the largest coastline growth (54.53 km) in the past decades, and the least was in Luoyuan Bay (25.75 km). In general, the artificial coastline continued to increase and the degree of artificialization had been continuously strengthened. (2) The coastline of the bay continuously moved to the sea, with a distance of 26.93 km (1.08 km/a). The most significant seaward expansions were found in 1995-2000 and 2005-2010, reaching 7.10 km and 6.00 km, respectively. Hangzhou (4.93 km) and Xinghua bays (4.15 km) experienced the largest seaward expansion of coastline, while Xiamen Bay had the shortest (0.55 km). (3) The total area of the major bay waters decreased from 13.85 km<sup>2</sup> in 1990 to 12.29 km<sup>2</sup> in 2015 in the East China Sea, down by 11.23%. Additionally, the morphological indices of the bays showed a continuous rise trend, which indicates that spatial patterns were transformed to be more complicated. The largest reduction with water area was observed in the Hangzhou Bay (0.726 km<sup>2</sup>), accounting for 46.69% of the research area. (4) The indexes of artificiality and development intensity showed a continuous rise trend. The utilization degree in the southern part of the study area is higher than that of the northern part, and the interannual fluctuation of the development intensity in the north is much varied. In addition, the bay development is positively correlated with the length of the coastline, the length of the artificial coastline and the shape index of the bay, and negatively correlated with the length of the natural coastline and the area of the waters. As the development intensity increased, the intensity of reclamation activities increased significantly.

**Keywords:** reclamation; bay coastline; bay morphological changes; bay exploitation; the East China Sea