

## 20世纪40年代初以来中国大陆沿海 主要海湾形态变化

侯西勇<sup>1,3</sup>, 侯婉<sup>1,2,3</sup>, 毋亭<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 烟台 264003)

**摘要:** 受气候变化和人类活动的影响, 中国海岸带正在经历各种剧烈的变化, 海湾形态变化是其中的一个重要方面。基于地形图资料与遥感影像提取20世纪40年代初至2014年7个时相的中国大陆沿海主要海湾的空间信息, 进而分析海湾岸线类型结构、开发利用程度和空间位置的变化特征, 以及海湾面积、形状和重心分布的变化特征。结果表明, 20世纪40年代初以来, 中国大陆沿海主要海湾的形态变化显著且复杂, 主要体现为: 海湾岸线的结构变化显著, 自然岸线的长度和比例急剧减少; 海湾岸线的开发利用程度持续增强; 海湾岸线普遍背陆向海运动; 海湾面积普遍大幅萎缩; 海湾形状总体趋向复杂但个体间的差异在缩小; 海湾重心分布位置普遍背陆向海迁移; 海湾变化具有显著的时空差异性等。总的来说, 以围填海为主的人类活动是导致海湾发生上述变化特征的主要原因。通过研究, 指出应该对中国的海湾进行功能定位划分和分类管理, 通过强化以海湾为基本单元的管理, 促进中国海岸带综合管理能力的提高和管理目标的实现。

**关键词:** 海湾; 岸线结构; 岸线变化; 海湾面积; 形状指数; 海湾重心; 围填海

DOI: 10.11821/dlxb201601009

海湾是深入陆地形成明显水曲的海域<sup>[1]</sup>, 按照成因可分为构造湾、河口湾、潟湖湾、火山口湾、基岩侵蚀湾—堆积湾、连岛坝湾、三角洲湾等<sup>[2]</sup>; 海湾地处海陆结合部, 常年经受海洋和陆地的双重影响, 同时, 海湾蕴藏大量的资源, 具有独特的自然环境和明显的区位优势, 是海洋最容易受人类活动影响的部分, 并形成了特有的自然和人文景观<sup>[2]</sup>。监测和研究海湾变化对于发展海洋科学、保护海洋环境、确保国家安全等具有重大意义。海湾变化是一个动态的、连续的过程, 反映自然、经济和社会等因素的综合作用, 其中, 形态变化是海湾变化最基本、最重要的一个方面, 其对海湾及其周边的水动力与水环境以及海岸带湿地生态系统的影响具有迅速、直接、显著、长期且不可逆转等特征, 而且, 海湾形态变化也是宏观尺度陆海格局和陆海相互作用变化的重要体现。国际上对海湾变化的研究具有起步早、多学科交叉、综合性强等特点, 其中大量研究基于地球信息科学的技术方法监测和分析海湾形态的变化, 例如, 针对印度马纳尔湾海岸线和珊瑚礁变化特征的研究<sup>[3]</sup>, 针对芬兰东部海湾岸线长期及短期变化特征的研究<sup>[4]</sup>, 针对印

收稿日期: 2015-08-15; 修订日期: 2015-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(31461143032); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-TZ-15, KZZD-EW-14); 中国科学院战略性先导科技专项子课题(XDA05130703) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.31461143032; Key Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.KZZD-EW-TZ-15, No.KZZD-EW-14; Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences, No.XDA05130703]

作者简介: 侯西勇(1975-), 男, 山东泰安人, 博士, 研究员, 博士生导师, 中国地理学会会员(S110006477M), 主要从事海岸带土地利用变化与海岸线变化遥感监测、脆弱性评价及综合管理等方面的研究。

E-mail: xyhou@yic.ac.cn

度古吉拉特邦海岸带土地利用变化和岸线变化对海湾影响特征的研究<sup>[5]</sup>;美国地质调查局(U.S. Geological Survey, USGS)针对美国的众多海湾开展了大量综合性的调查研究,例如,分析佛罗里达海湾不同时间周期的岸线变化<sup>[6]</sup>,评估海平面上升和海岸变化对墨西哥湾脆弱性的影响特征<sup>[7]</sup>等。新中国成立以来,沿海地区经济社会快速发展,人类活动对海湾的影响作用已远远超过历史时期,并与自然因素相叠加,使得海湾以前所未有的速率发生着各种各样的变化。为此,中国开展了大量综合性及专业性的海湾调查与研究<sup>[2]</sup>,但是,对较长时期海湾形态变化特征报道并不多见。林桂兰等以厦门海湾为例研究了海湾资源开发的累积生态效应<sup>[8]</sup>;宫立新等研究了1986-2004年烟台典型区域海湾岸线长度和海湾面积的变化特征<sup>[9]</sup>;张丹丹等基于PVS(压力—脆弱性—状态)概念框架对大亚湾等海湾的开发利用情况进行了评价<sup>[10]</sup>;刘勇等利用多时期的遥感解译数据分析了广东省海湾的变化情况<sup>[11]</sup>;朱高儒等研究了渤海湾西北岸1974-2010年间逐年填海造陆的过程特征<sup>[12]</sup>。这些研究都凸显了对海湾变化进行长时间监测和研究的重要性,因此,本文针对中国大陆沿海的主要海湾,基于地形图与遥感影像建立20世纪40年代初以来多时相的海湾分布数据,并从海湾岸线的类型结构、开发利用程度、位置摆动以及海湾的面积、形状、重心变化等角度出发,分析和揭示过去70年中国沿海主要海湾在形态方面的时空动态特征。通过研究,旨在从海湾变化的角度出发为中国海岸带的综合管理决策提供依据。

## 1 数据来源及技术方法

### 1.1 数据来源

(1) 美国陆军制图局编绘的中国沿海1:25万地形图,共48幅,空间覆盖完整,主要反映20世纪40年代初的状况,其信息源包括航空相片、大中比例尺地形图和海图等;这批地图具有规范的图幅编号、图名、拼接图表、比例尺、图例、文字注记、经纬网、公里网、控制点、等高线、等深线、高程点、境界、岸线、信息源分布简图及精度说明信息等,采用通用横轴墨卡托投影,标注多种语言。从制图规范、覆盖范围、比例尺和印刷质量等角度综合评价,在反映20世纪40年代初中国沿海地理状况的地图资料中,这批资料都是极具价值的,而且也是大范围空间区域相关研究目前唯一可以利用的。

(2) 20世纪50年代至60年代初测绘的中国沿海区域地形图,1:5万和1:10万比例尺分别有275幅和39幅,反映1960年前后的状况。

(3) 20世纪70年代、1990年、2000年、2010年和2014年成像的Landsat MSS/TM/ETM+/OLI系列传感器影像数据,由美国地质调查局(USGS, <http://glovis.usgs.gov>)和马里兰大学全球土地覆盖研究部(<http://glcfapp.glc.f.umd.edu/data/>)提供下载服务,各个时相的成像时间均较为集中,分别反映1970s末、1990年、2000年、2010年和2014年的状况。

### 1.2 海湾清单

中国沿海的海湾数量众多、类型多样,有109个被收录至《中国海湾志》<sup>[13]</sup>,结合《中国海湾引论》、《全国海洋功能区划研究》、沿海各省市区的地图资料等,确定大陆沿海的93个海湾作为信息提取的目标,为便于分析,对部分空间上相连的小海湾进行合并处理,最终得到85个研究对象(表1)。

### 1.3 海湾岸线数据提取

海湾岸线采用平均大潮高潮线的定义,岸线分类系统如表2所示<sup>[14]</sup>。为保证岸线数据的精度,研究组开展了覆盖全国海岸带的野外考察,行程超过1.63万km,获取了近600个实测点的坐标和岸线描述信息,在此基础上建立岸线提取的技术、方法和规范<sup>[14]</sup>。

表1 中国大陆沿海主要的海湾  
Tab. 1 Major gulfs along the mainland of China

海区	海湾名称	数量
渤海	营城子湾、金州湾、普兰店湾、董家口湾、葫芦岛湾、复州湾、太平湾、锦州湾、渤海湾、莱州湾	10
黄海	青堆子湾、常江澳、窑湾、大连湾、套子湾、芝罘湾、四十里湾、双岛港、威海湾、朝阳港、荣成湾—俚岛湾、爱连湾、桑沟湾、石岛湾、靖海湾—五垒岛湾、险岛湾、乳山湾、丁字湾、横门湾、北湾(鳌山湾)、崂山湾、沙子口湾、胶州湾、灵山湾、崔家路、琅琊湾、海州湾	27
东海	长江口、杭州湾、象牙港、三门湾、浦坝港、涂茨—爵溪湾、门前涂湾、高湾—昌国湾、台州湾、隘顽湾、漩门湾、乐清湾、温州湾、大渔—鱼寮湾、沿浦湾、沙埕湾、福宁湾、三沙湾、罗源湾、福清湾、兴化湾、湄洲湾、泉州湾、围头湾—厦门港、佛昙湾、旧镇湾、东山湾、诏安湾、官口湾	29
南海	汕头湾、海门湾、碣石湾、红海湾、大亚湾、大鹏湾、珠江口、广海湾、镇海湾、海陵湾—北津港、水东港、湛江港—雷州湾、安铺港、铁山港、廉州湾、大风江口、钦州湾、防城港、珍珠港	19

表2 中国海湾岸线分类  
Tab. 2 Categories of gulf shoreline in China

代码	利用方式分类	说明
1	丁坝与突堤岸线	丁坝：与海岸成一定角度向外伸出，具有保滩和挑流作用的护岸建筑物；突堤：一端与岸连接，一端伸入海中的实体防浪建筑物。
2	港口码头岸线	港池与航运码头形成的岸线
3	围垦(中)岸线	正在建设中的围海堤坝
4	养殖围堤岸线	用于养殖的人工修筑堤坝
5	盐田围堤岸线	用于盐碱晒制而围垦的堤坝
6	交通围堤岸线	用于交通运输的人工修筑堤坝
7	防潮堤岸线	分隔陆域和水域的其他海堤护岸工程(非养殖区、非盐田区，且交通功能不显著的海堤/海塘工程)
8	自然岸线	未利用的岸线

(1) 地形图中岸线的位置及类型清晰明了，利用 ArcGIS 软件将每幅地图资料进行精确定配准，进而提取 1940s 初和 1960s 两个时相的海湾岸线数据。

(2) 基于野外考察实测信息，建立各种岸线遥感信息提取的解译标志，进而在 ArcGIS 中对 1970s、1990 年、2000 年、2010 年和 2014 年的 Landsat 遥感影像进行假彩色合成和岸线信息提取及分类，获得 5 个时相的海湾岸线数据。

(3) 各个时相海湾岸线提取过程中，设定足够大的屏幕比例尺以保证岸线解译的总体精度，同时，控制鼠标采点密度以降低数据源比例尺或分辨率差异所导致的岸线精度差异。

#### 1.4 海湾海部边界的确定

参照《全国海洋功能区划研究》、《中国海湾引论》、《中国海湾志》、沿海各省市地图资料和遥感影像等确定海湾海部即海湾口门的边界。具体原则和依据如下：

(1) 部分海湾具有明确的口门坐标信息或语言描述信息，可直接建立海湾口门线并与海湾岸线相连接，形成封闭的海湾图斑。

(2) 多数海湾具有明显的岬角，而且岬角附近的地貌形态变化不显著，因此，各个时相的口门线基本一致；少数海湾岬角附近地貌形态略有变化，部分时相口门线与海湾岸线的连接处需要进行适当的调整。

(3) 部分海湾由连串的海岛和海岸围成，需要分段确定海湾口门线：如果岛屿的面积很小，可直接将岛屿顺次连接，如果岛屿面积很大或岛屿岸线很长，则根据实际情况选取岛屿向陆或向海一侧的岸线作为局部区域的口门线，进而与海湾岸线相连，形成封

闭海湾。

(4) 部分海湾是河口湾, 需要在两个方向分别确定口门线, 为保证7个时相之间的可比性, 上游河道部位一般采用位置和走向完全一致的直线型封口线, 而入海口处的封口线则参照上述原则和标准来确定。

### 1.5 海湾特征指数

从海湾岸线和湾面形态两个方面出发, 选取岸线结构、岸线开发利用程度、岸线位置摆动、海湾面积、海湾形状指数、海湾重心变化6个指标描述海湾特征及其变化。其中, 岸线结构通过人工岸线或自然岸线的比例来反映; 岸线位置摆动主要判断岸线是否背离陆地向海移动, 或相反; 海湾面积直接在 ArcGIS 软件中获得。其他指标的定义及计算方法如下:

(1) 岸线开发利用程度指数: 按照人类活动对岸线的影响程度, 对各类岸线赋予不同的人力作用强度指数(表3), 并按照公式(1)进行计算; 该指数的值域为100~400, 值越小, 岸线开发利用程度越小, 越接近于自然状态, 值越大, 岸线开发利用程度越高, 人类活动对海湾岸线的影响越强烈<sup>[15]</sup>。

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

式中:  $I$  为海湾岸线开发利用程度指数;  $A_i$  为第  $i$  类海湾岸线的人力作用强度指数;  $C_i$  为第  $i$  类海湾岸线的长度百分比;  $n$  为海湾岸线的类型数。

表3 各类型海湾岸线的人力作用强度指数

Tab. 3 Indices of human force on various kinds of shoreline

利用方式 指数	丁坝突堤	港口码头	围垦中岸线	养殖围堤	盐田围堤	交通围堤	防潮堤	自然岸线
	4	4	4	3	3	4	2	1

(2) 海湾形状指数: 海湾周长与等面积圆周长之比, 反映海湾形状与圆形的相似程度; 值越小, 海湾越趋近于圆形, 形状越简单, 反之, 则越复杂<sup>[16]</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 (m);  $A$  为海湾面积 ( $m^2$ )。

(3) 海湾重心及其变化: 在二维平面空间计算海湾几何重心, 其空间位移的方向、路径及距离能够反映海湾形态变化的基本特征。计算公式如下<sup>[17]</sup>:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (3)$$

$$L = \sqrt{(x_j - x_k)^2 + (y_j - y_k)^2} \quad (4)$$

式中:  $(x, y)$  为海湾重心坐标;  $(x_i, y_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 为海湾平面离散点的坐标;  $L$  为重心位移距离;  $(x_j, y_j)$  是  $j$  时相的重心坐标;  $(x_k, y_k)$  是  $k$  时相的重心坐标。

## 2 数据结果

### 2.1 海湾岸线结构时空动态特征

针对海湾自然岸线的长度比例, 统计各个时期不同比例区间海湾的个数(图1a), 同时, 统计各个时期所有海湾岸线的总长度和自然岸线总长度, 计算自然岸线的整体比例(图1b)。总的来说, 近70年间中国沿海海湾岸线的结构变化较为显著, 多数海湾自然岸

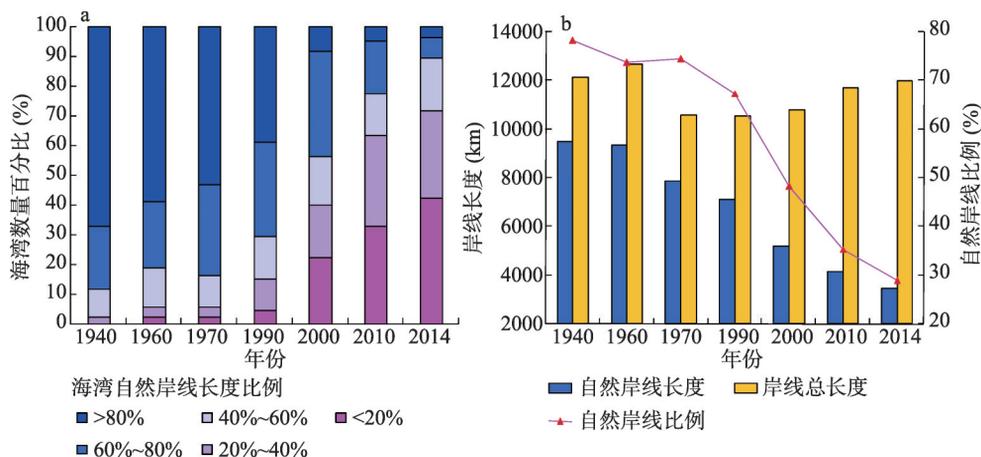


图1 近70年中国大陆沿海主要海湾自然岸线比例的变化

Fig. 1 Changes of natural shoreline ratio of major gulfs in China during the past 70 years

线的比例急剧下降，具体特征包括：

(1) 1940s-1960s，自然岸线比例不足60%的海湾相对较少，主要是有大中城市分布的中小型海湾，例如，大连湾、胶州湾、长江口、杭州湾、象牙港、台州湾、温州湾、廉州湾、珠江口、乐清湾；58%以上的海湾，其自然岸线的比例在1960s时期仍然大于80%。

(2) 1970s-1990年间，海湾岸线开发开始加速，1990年仍有70%的海湾自然岸线长度的比例超过60%，但自然岸线长度比例超过80%的海湾已经不足40%；新的开发热点主要是渤海和黄海的海湾，例如，青堆子湾、普兰店湾、董家口湾、渤海湾、莱州湾、芝罘湾、乳山湾、双岛港、威海湾、朝阳港、险岛湾、石岛湾、靖海湾—五垒岛湾、丁字湾、沙子口湾、横门湾、琅琊湾等都逐渐成为新的开发热点。

(3) 20世纪90年代以来，海湾岸线的开发速度开始攀升，但是，除了少量海湾成为新的开发热点，主要特征表现为众多已开发海湾的岸线开发程度进一步提高；与此相应，至2000年自然岸线比例超过60%的海湾已降至不足45%，超过80%的海湾已降至不足9%。

(4) 2000年以来，海湾岸线的开发进一步加剧，整个渤海、南方众多海湾都进入快速开发和变化的时期；2010年，自然岸线比例超过60%的海湾已不足25%，超过80%的已不足5%；而至2014年，更有71%（89%）以上的海湾自然岸线的比例已经小于40%（60%）。

(5) 整体层面，所有海湾的岸线总长度存在先降低后增长的态势，但自然岸线的总长度则是一直减少，这一差异在1990年之后变得尤为突出；与此相应，海湾自然岸线的比例由1940s的78.21%降至2014年的28.87%，且以近30年来下降尤为显著。

## 2.2 海湾岸线开发利用程度时空动态特征

针对海湾岸线开发利用程度指数，统计不同时期不同指数区间的海湾个数（图2a），并计算近70年每个海湾该指数的变化量，进而绘制其频率直方图（图2b）。总的来说，近70年中国沿海海湾岸线开发利用程度处于不断提高的过程中，具体特征包括：

(1) 1940s初，绝大多数海湾的岸线开发利用程度指数都低于200，属于轻度开发利用状态。其中，19个海湾为100（理论最低值），79个海湾小于或等于150；仅有3个海湾大于200，分别是大连湾、芝罘湾和胶州湾。

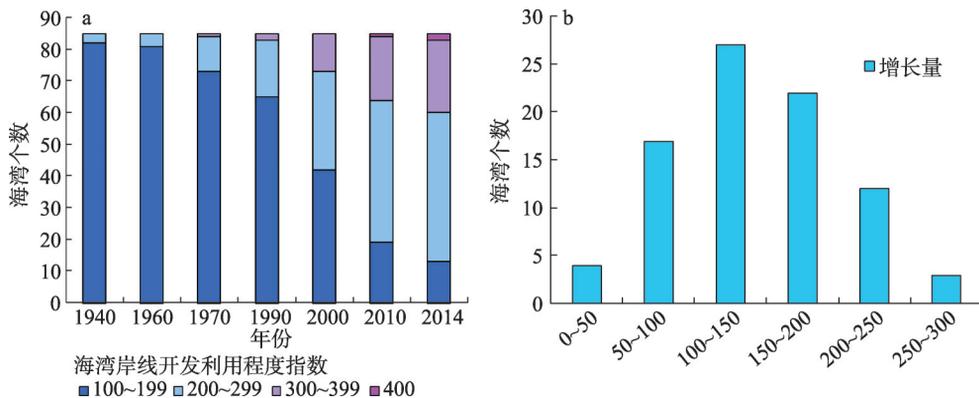


图2 近70年中国大陆沿海主要海湾的岸线开发利用程度变化

Fig. 2 Changes of shoreline utilization degree of major gulfs in China during the past 70 years

(2) 1940s初-1960s, 岸线开发利用仅在少量海湾有所发展, 有36个海湾为负增长或零增长, 有33个海湾增幅不足20% (低速增长), 仅有5个海湾的增幅超过50% (高速增长); 比较突出的海湾有大连湾、芝罘湾、威海湾和杭州湾等, 胶州湾由于盐田废弃等原因呈现下降的态势; 直至1960s, 海湾岸线开发利用程度指数的最大值始终未超过300。

(3) 1960s-1970s, 海湾岸线开发利用仍然处于较低的状态, 有32个海湾为负增长或零增长, 有23个海湾增幅不足20% (低速增长)。但是, 已有多达12个海湾的增幅超过了50% (高速增长), 开发利用程度较高的海湾仍然主要分布于黄海和渤海; 至1970s, 海湾岸线开发利用程度指数的最大值已超过300, 达到了381, 出现在芝罘湾。

(4) 1970s-1990年, 海湾岸线开发利用有了较明显的发展, 负增长或零增长的海湾已降至27个, 其他的近60个海湾表现为不同程度的增长, 这表明海湾开发开始普遍化; 与此相应, 至1990年, 已经有近1/4的海湾的岸线开发利用程度指数达到或超过200; 超过300的海湾已有2个, 分别是芝罘湾和大连湾。

(5) 1990年以来, 海湾岸线开发利用开始进入较快的发展阶段, 且更趋普遍化; 1990-2014年间, 仅有6个海湾增幅不足20% (低速增长), 有多达50个海湾的增幅超过了50% (高速增长); 至2000年, 已有超过50% (14%) 的海湾的岸线开发利用程度指数大于200 (300), 形成了大连湾—董家口、渤海湾及其毗邻、芝罘湾—海州湾、长江口、温州湾及其毗邻、福清湾—旧镇湾、珠江口及其毗邻等海湾岸线开发利用程度较高的区域; 最大值已高达397, 仍出现在芝罘湾; 至2010年, 分别有超过77% (24%) 的海湾的岸线开发利用程度指数大于200 (300), 其中, 威海湾已经达到400 (理论最大值); 至2014年, 分别有超过84% (29%) 的海湾的岸线开发利用程度指数大于200 (300), 而且, 太平湾也已达到400 (不断围填, 实际上已经消失)。

(6) 近70年间, 大多数海湾的岸线开发利用程度指数的增长量介于50~200之间, 据此推断, 未来时期如果海湾岸线进一步被开发利用, 则直方图的峰区将向高值区移动, 即, 增长量超过200的海湾将会越来越多。

### 2.3 海湾岸线位置空间摆动特征

观察各个时相的海湾岸线, 定性判断各个海湾近70年的岸线位置空间摆动特征, 可以归纳为“持续向海移动型”、“稳定少动型”、“往复摆动型”与“复杂变化型”4种:

(1) 持续向海移动型, 海湾岸线整体或局部持续趋向海水一侧移动, 一般是海湾岸线局部区域有持续向海移动的趋势, 或者在不同的时段分别有不同的区域向海移动, 从

而使得近70年间海湾岸线表现出整体或局部向海移动的特征。分析表明,约有76%的海湾,其岸线变化基本符合持续向海移动型的特点。典型案例如太平洋湾、胶州湾、莱州湾等。

(2) 稳定少动型,海湾岸线较稳定,不存在显著变化的空间区域和时间阶段,近70年总体而言,岸线变化也并不明显。分析表明,约有9%的海湾,其岸线变化符合稳定少动型的特点。这些海湾在空间分布上一般远离大中城市,较少受到人类活动的影响或者影响较为轻微,而且,一般以基岩海岸为主,岸线两侧高程差异较为显著,属隆起海岸或断层海岸,向陆一侧为悬崖地貌等。典型案例如荣成湾、碣石湾等。

(3) 往复摆动型,海湾岸线的变化具有多次(至少2次)往复过程,即,方向逆反的过程,而且,具有这种方向逆反过程的岸段在海湾发生变化的岸段中所占的比例较高,使得海湾岸线整体或局部表现出向海与向陆“往复”或“交替”变化的特征。分析表明,横门湾、窑湾、北湾(鳌山湾)、珍珠港4个海湾总体上符合此类变化特征。

(4) 复杂变化型,海湾岸线变化明显有别于上述3个类型,格局与过程较复杂,规律不明显。分析表明,约有9%的海湾其岸线变化表现出较为复杂的格局与过程特征,这些海湾一般都具有较为复杂的几何形状或者岸线变化的驱动力具有显著的、复杂的时空变异性。典型案例如海门湾、朝阳湾等。

## 2.4 海湾面积时空动态特征

统计各个时相所有海湾的总面积以及不同海区海湾的总面积(图3)。计算每个海湾近70年的面积变化率,并统计不同变化率区间的海湾个数(图4)。

(1) 近70年间,绝大多数海湾的面积都呈现显著减少的态势:除了碣石湾、珍珠湾、套子湾和崔家路4个海湾面积未曾减少,其他海湾的面积都为减少趋势,其中,太平洋湾已经消亡,双岛湾趋近消亡,而漩门湾和汕头湾的缩减率也都超过了80%。

(2) 近70年间,全部海湾总面积的缩减率高达18.19%,渤海、黄海、东海、南海4个海区海湾总面积的缩减率也分别高达17.76%、20.32%、21.01%和13.28%;对图3中的5条曲线进行线性拟合,方程的 $R^2$ 介于0.93~0.97之间,其中,渤海、黄海、东海、南海4个海区拟合方程的斜率分别为-0.5537、-0.1287、-0.6977和-0.2579,全部海湾的拟合方程斜率为-1.6379,也表明了海湾面积缩减的剧烈程度及其海区差异特征。

(3) 图4表明,单个海湾层面,绝大多数海湾的面积萎缩率在10%~60%之间,萎缩率超过10%、20%、40%、60%、80%的海湾比例分别高达76.47%、55.29%、29.41%、10.59%和4.71%。据此推断,未来时期如果海湾开发和围填的态势进一步发展,海湾面积将进一步萎缩,直方图的峰区将逐渐“左移”,面积萎缩率达到或超过40%的海湾将会越来越多。

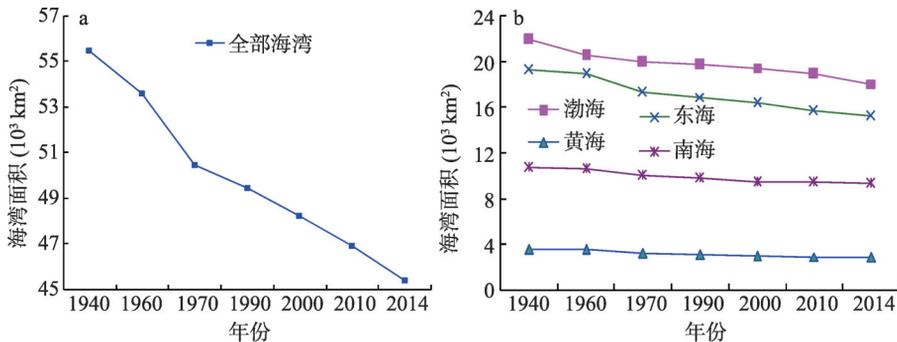


图3 近70年中国大陆沿海主要海湾面积变化

Fig. 3 Area changes of major gulfs in China during the past 70 years

### 2.5 海湾形状指数时空动态特征

海湾形状指数深受海岸带地貌的影响,同时,海湾信息提取所用地图资料的比例尺或遥感影像的空间分辨率也对形状指数的计算结果有显著的影响。因此,针对每个海湾,计算各个时相的形状指数以及1940s-2014年和1990-2014年该指数的变化量,进而,对该指数及其变化量进行分级统计(图5);进一步分海区统计各个年份海湾形状指数及其在2个时段内变化量的最大值、最小值和平均值(表4)。结果表明:

(1) 海湾形状指数具有显著的南北差异,北低南高的特征十分明显,表明北方海域的海湾形状总体较为简单,而南方海域的海湾形状则较为复杂,这种宏观差异根源于中国海岸带地质环境和地貌格局的差异性。具体而言,以杭州湾南侧为界,北方海岸带兼有2大沉降带和2大隆起带,地貌类型为丘陵山地与辽阔平原,而南方海岸带则主要是隆起带,地貌类型多为山地丘陵,岬湾众多,因此,南方海域海湾的形状更为复杂。

(2) 不管是近70年还是最近24年,大多数海湾的形状指数表现出显著增大的态势,表明海湾的形状总体上正趋于复杂化。具体而言,1940s-2014年和1990-2014年形状指数增大的海湾分别为60个和69个,其中,增量大于0.5的海湾分别为17个和16个,大于0.75的则分别为11个和8个;尤其是1990年以来,属于较高等级的海湾的数量处于持续增长的过程中,至2014年,海湾形状指数大于2.0(3.0)的海湾数量已达60(21)个,比例高达70.59%(24.71%)。

(3) 1990年以来的数据信息源较为接近,形状指数计算结果的可比性强,因此,分海区统计1990-2014年不同变化趋势的海湾数量。结果表明,北方海域(渤海与黄海)增长和下降趋势的海湾分别为33个和4个,而南方海域(东海与南海)则分别为36个和12个;海区之间海湾个体变化趋势的对比进一步表明:北方海域以形状简单的海湾为主,

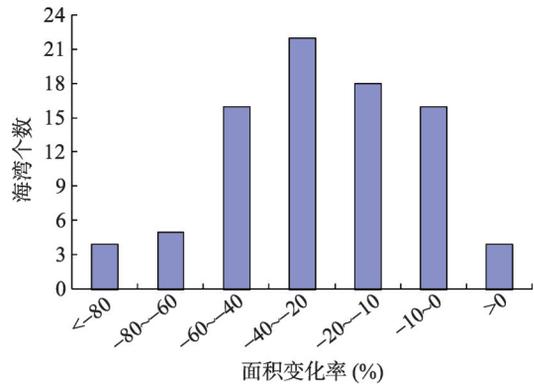


图4 近70年中国大陆沿海主要海湾的面积变化率分级统计

Fig. 4 Frequencies of gulf with different area change rates in China during the past 70 years

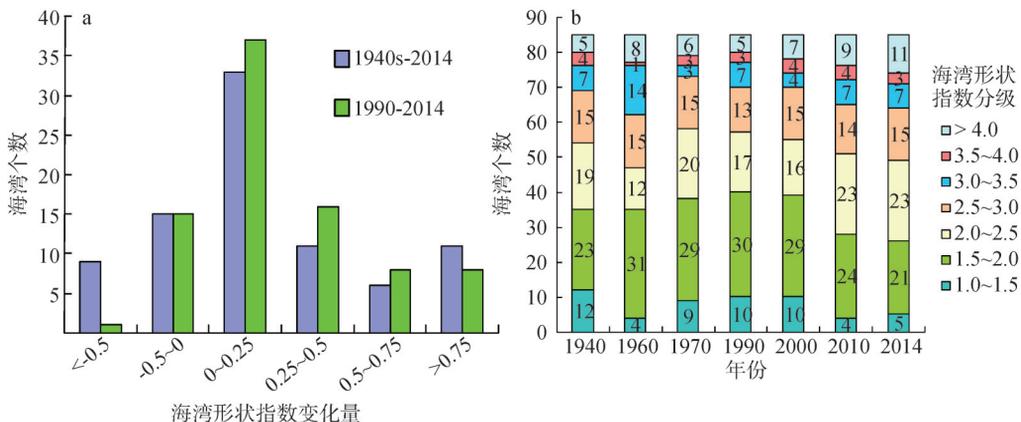


图5 近70年中国大陆沿海主要海湾形状指数的统计特征

Fig. 5 Statistical characters of gulf shape index in China during the past 70 years

表4 近70年中国大陆沿海主要海湾形状指数的变化  
Tab. 4 Changes of gulf shape index in China during the past 70 years

海区	1940s	1960s	1970s	1990	2000	2010	2014	1940s-2014年变化	1990-2014年变化	
平均值	黄海	1.94	2.15	1.87	1.89	1.93	2.12	2.19	0.26	0.30
	渤海	2.01	2.03	1.85	1.91	2.01	2.49	2.51	0.51	0.60
	东海	2.62	2.72	2.52	2.55	2.56	2.71	2.78	0.16	0.24
	南海	3.09	3.35	2.90	2.91	2.96	2.96	3.01	-0.08	0.11
	所有	2.44	2.60	2.32	2.35	2.38	2.55	2.62	0.18	0.27
最大值	黄海	2.95	3.40	2.98	3.13	3.13	3.37	4.24	1.84	1.77
	渤海	2.97	3.06	2.62	2.70	3.01	4.24	4.00	1.21	1.30
	东海	5.27	5.65	<b>5.50</b>	<b>5.46</b>	<b>5.63</b>	<b>5.76</b>	<b>5.75</b>	<b>3.14</b>	<b>2.58</b>
	南海	<b>6.31</b>	<b>7.24</b>	4.81	4.84	4.89	4.89	4.90	0.82	0.89
	所有	<b>6.31</b>	<b>7.24</b>	4.81	4.84	4.89	4.89	4.90	0.82	0.89
最小值	黄海	<b>1.18</b>	1.40	<b>1.06</b>	<b>1.07</b>	<b>1.07</b>	<b>1.40</b>	<b>1.34</b>	-0.89	-0.12
	渤海	1.37	<b>1.38</b>	1.38	1.46	1.49	1.53	1.40	-0.03	-0.26
	东海	1.59	1.72	1.66	1.64	1.61	1.65	1.63	-0.81	-0.11
	南海	1.49	1.64	1.55	1.51	1.55	1.55	1.53	<b>-1.48</b>	<b>-1.61</b>
	所有	<b>1.18</b>	1.40	<b>1.06</b>	<b>1.07</b>	<b>1.07</b>	<b>1.40</b>	<b>1.34</b>	-0.89	-0.12

注：加黑的数字同时也是所有海湾的最大值或最小值。

以围填海为主要特征的岸线变化提高了这些海湾形状的复杂性（89%以上的海湾形状变得复杂）；南方海域形状复杂的海湾为数众多，以围填海为主要特征的岸线变化降低了相当一部分海湾形状的复杂性（高达25%的海湾形状变得简单）。

（4）综上所述，1990年以来，围填海等过程所导致的海湾岸线变化一方面促进了海湾形状指数总体水平的提升（多数海湾的形状趋向复杂）；另一方面又通过“削峰填谷”式的作用缩小了海湾个体之间形状指数的差异程度。

## 2.6 海湾重心位移特征

计算各个时相每个海湾的重心坐标，并计算不同时段重心的位移距离，分析重心位置的变化特征（表5）。可见，大多数海湾的重心处于较为活跃的状态，具有显著的动态变化特征，而且海湾重心的运动表现出较强的时空差异性。具体特征如下：

（1）1940s初以来，沿海海湾重心位移的轨迹及距离各不相同，但如与海湾岸线位置空间摆动特征相联系，从重心是否“背陆向海”运动的角度来判断，则能够发现，绝大多数海湾的重心位移具有总体上不断背离陆地而趋向海洋的特点；海湾重心在不同时段的位移方向和距离有所差异，但是，总体上与围填海所导致的海湾面积萎缩方向以及岸线空间位置的移动方向相一致。

（2）不同时段海湾重心的位移特征差异较大。在近70年的时间尺度上，所有海湾平均的位移距离为1.70 km，平均的位移速度达24.27 m/a，其中，位移距离不超过5 km、3 km、1 km的海湾的比例分别达到95.29%、84.71%和48.24%；1940s-1990年，所有海湾平均的位移距离为1.20 km，平

表5 近70年中国大陆沿海主要海湾的重心位移特征  
Tab. 5 Characters of gulf-centroid movement in China during the past 70 years

位移距离(km)	1940s-1990年	1990s-2014年	1940s-2014年
< 0.5	29	53	19
0.5~1	21	10	22
1~2	17	17	21
2~3	7	1	10
3~4	9	1	5
4~5	2	2	4
> 5	0	1	4
最大值(km)	4.57	13.14	14.30
最小值(km)	0.00	0.00	0.06
平均值(km)	1.20	0.77	1.70
位移速度(m/a)	26.68	31.98	24.27

均位移速度达 26.68 m/a, 其中, 58.82% (87.06%) 的海湾重心位移距离不超过 1 km (3 km), 不存在超过 5 km 的海湾 (最大值为 4.57 km); 1990-2014 年, 所有海湾平均的位移距离为 0.77 km, 平均位移速度达 31.98 m/a, 其中, 超过 62.35% (94.11%) 的海湾位移距离不足 0.5 km (2 km)。

(3) 海湾重心位移距离存在较为显著的海区差异, 以 70 年时间尺度的位移距离为例, 渤海、黄海、东海和南海 4 个海区海湾重心位移距离的平均值分别为 2.44 km、0.96 km、2.04 km 和 1.84 km, 表明渤海的海湾变化较为突出, 其次是东海。

(4) 部分海湾的重心较为活跃, 在不同时段的位移距离均较为突出, 如, 杭州湾、葫芦山湾、门前涂湾、汕头湾等。

### 3 结论与展望

#### 3.1 结论

基于地形图资料与遥感影像提取 20 世纪 40 年代初以来 7 个时相的中国大陆沿海海湾分布数据, 并从 6 个方面分析海湾的时空动态特征, 主要结论如下:

(1) 20 世纪 40 年代初到 2014 年, 中国大陆沿海主要海湾的岸线在结构组成、开发利用程度和空间位置等方面发生了剧烈的变化, 主要体现为自然岸线的长度和比例不断下降、岸线的开发利用程度持续增强、岸线位置不断背陆向海运动; 而且, 海湾岸线空间位置的剧烈变化导致了湾面形态的显著变化, 主要体现在 3 个方面: 大多数海湾的面积不断萎缩、海湾形状总体趋向复杂但个体间的差异在缩小、大多数海湾的重心不断背陆向海运动。

(2) 海湾岸线及湾面形态的变化存在较为显著的时空差异性: 早期阶段, 与大中城市毗邻的中小型海湾、河口湾因其优越的地理区位而最早得到开发, 海湾形态变化的宏观分布呈现为离散的点状格局, 还不存在较大的南北差异, 而且, 早期阶段海湾周边的土地资源相对丰富, 海湾水域开发以及海湾形态变化的幅度也并非特别显著。但是, 最近几十年, 尤其是 1990 年以来, 随着中国沿海区域经济社会普遍进入较为迅速的发展阶段, 海岸带土地资源供应日趋紧张, 围填海造地面积日益增加, 海湾形态变化因而变得更加普遍和更为迅速, 例如, 海湾自然岸线的减少速度不断加剧、海湾岸线开发利用整体进入较快的发展阶段、海湾重心位移速度显著提高、海区层面海湾变化的差异性及特征规律更趋显著等; 在渤海和黄海海域, 由于海岸带开发工程难度小、经济成本低而收益高等原因, 其海湾开发的范围更广、进程更为迅速, 海湾形态变化的速度和幅度都已经远远超出南方沿海区域的海湾, 使得海湾形态变化的南北差异有所显现。

(3) 近 70 年中国海湾的各方面变化是自然因素和人类活动因素共同影响的结果, 但海湾岸线结构和开发利用程度的变化特征表明, 以围填海为主的人类活动无疑是主导的影响因素, 而且其影响作用逐渐增强, 尤其是最近的几十年, 其作用已经远远超过了自然因素。

#### 3.2 展望

综上所述, 本文揭示了 20 世纪 40 年代初以来中国大陆沿海主要海湾的变化特征, 并指出围填海等人类活动是导致变化的主要原因。截至 2012 年 10 月, 国务院批复沿海 11 省市海洋功能区划, 获批的至 2020 年建设用围填海指标合计达 2469.03 km<sup>2</sup>, 因此, 未来时期中国沿海的围填海过程仍将持续乃至加剧, 大量海湾将继续承受巨大的开发建设压力, 海湾岸线的结构组成、空间位置及开发强度以及海湾的面积、形状及重心位置等

将会发生更为剧烈的变化。海湾岸线占中国大陆岸线的2/3以上,中国沿海的潮间带湿地也主要分布在海湾之中,因此,海湾的保护、开发与管理应该成为当前和未来时期中国海岸带综合管理必须严肃对待的重要任务,并需尽快提上重要议事日程,建议以海湾为基本单元,对中国沿海的主要海湾进行功能定位划分并实施分类管理,例如,以生态保育为主要功能定位的海湾,应严控海湾岸线的开发、尝试恢复海湾的自然岸线、保持海湾的面积和形态特征;以港口和航运为主要功能定位的海湾,应该优化和提高岸线资源的利用效率,同时实施严格的水污染监控与治理等。

### 参考文献(References)

- [1] Editorial Board of China Bay Survey. Survey of China Bays (Vol. 2). Beijing: China Ocean Press, 1997. [中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志(第二分册). 北京: 海洋出版社. 1997.]
- [2] Chen Zeshi, Wang Wenhai, Wu Sangyun. An Introduction to Gulfs in China. Beijing: China Ocean Press, 2007. [陈则实, 王文海, 吴桑云. 中国海湾引论. 北京: 海洋出版社. 2007.]
- [3] Thanikachalam M, Ramachandran S. Shoreline and coral reef ecosystem changes in gulf of Mannar, southeast coast of India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2003, 31(3): 157-173.
- [4] 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: 233-242. doi: 10.1007/s11852-010-0105-4.
- [5] Misra A, Balaji R. Decadal changes in the land use/land cover and shoreline along the coastal districts of southern Gujarat, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187: 461. doi: 10.1007/s10661-015-4684-2.
- [6] Hapke C J, Christiano M. Long-term and storm-related shoreline change trends in the Florida Gulf islands national seashore: U.S. Geological Survey Open-file Report, 2007-1392. (<http://pubs.usgs.gov/of/2007/1392/pdf/ofr2007-1392.pdf>)
- [7] 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. (<http://pubs.usgs.gov/of/2010/1146/pdf/ofr2010-1146.pdf>)
- [8] Lin Guilin, Zuo Yuhui. Cumulative ecological effects assessment on resource exploitation and utilization in bay. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(3): 432-440. [林桂兰, 左玉辉. 海湾资源开发的累积生态效应研究. 自然资源学报, 2006, 21(3): 432-440.]
- [9] Gong Lixin, Jin Bingfu, Li Jianying. The changing of typical bay coastline in Yantai in recent 20 years. *Marine Sciences*, 2008, 32(11): 64-68. [宫立新, 金秉福, 李健英. 近20年来烟台典型地区海湾海岸线的变化. 海洋科学, 2008, 32(11): 64-68.]
- [10] Zhang Dandan, Yang Xiaomei, Su Fenzhen, et al. Explorative degree evaluation of bay based on PVS framework: A case study of Daya Bay. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(8): 1440-1449. [张丹丹, 杨晓梅, 苏奋振, 等. 基于PVS的海湾开发利用程度评价: 以大亚湾为例. 自然资源学报, 2009, 24(8): 1440-1449.]
- [11] Liu Yong, Yang Xiaomei, Zhang Dandan, et al. Classification and change analysis of the exploitation oriented bays in Guangdong province. *Progress in Geography*, 2009, 28(2): 216-222. [刘勇, 杨晓梅, 张丹丹, 等. 面向开发利用的广东省海湾分类及变化分析. 地理科学进展, 2009, 28(2): 216-222.]
- [12] 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.]
- [13] Guan Daoming, A Dong. National marine function zoning study: National Marine Functional Zoning (2011-2020) General Report. 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.]
- [14] 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.]
- [15] Wu Ting, Hou Xiyong, Xu Xinliang. Spatio-temporal characteristics of the mainland coastline utilization degree over the last 70 years in China. *Ocean & Coastal Management*, 2014, 98: 150-157.

- [16] Liu Xuelu. Shape index and its ecological significance in salinized meadow landscape. *Pratacultural Science*, 2000, 17 (2): 50-52, 56. [刘学录. 盐化草地景观中的斑块形状指数及其生态学意义. *草业科学*, 2000, 17(2): 50-52, 56.]
- [17] Li Yubing, Hao Yongjie, Liu Enhai. Calculation method of the center of polygon. *Journal of Computer Application*, 2005, 25(S1): 391-393. [李玉冰, 郝永杰, 刘恩海. 多边形重心的计算方法. *计算机应用*, 2005, 25(S1): 391-393.]

## Shape changes of major gulfs along the mainland of China since the early 1940s

HOU Xiyong<sup>1,2</sup>, HOU Wan<sup>1,2,3</sup>, WU Ting<sup>1,2,3</sup>

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, CAS, Yantai 264003, Shandong, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of

Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, CAS, Yantai 264003, Shandong, China)

**Abstract:** Impacted by climate changes and human activities, the coastal zone of China has undergone various dramatic changes, among which, shape change of major gulfs (including bays and estuaries) is one of the most important aspects. In this paper, spatial dataset of gulf shoreline and gulf shape in seven phases since the early 1940s was delineated based on topographic maps and remote sensing imageries, and a group of indices including the ratio of natural shoreline, the shoreline utilization degree, shoreline swing direction, gulf area, gulf shape index and gulf centroid were used to analyze the spatial-temporal characteristics of gulfs in detail. It turned out that: in general, shape changes of major gulfs in the mainland of China were significant and complicated during the past 70 years, specifically, visible changes of shoreline structure, especially the decreases in both length and ratio of natural shoreline took place; the shoreline utilization degree increased remarkably because more and more natural shoreline had been artificialized; the fact that shoreline seaward shift caused by sea reclamation occurred in the majority of gulfs; spatial size (area) decreased in most of gulfs due to the fast and extensive sea reclamation; the geometric shape of most gulfs had become more complicated while the discrepancies among all the gulfs were narrowed; the centroid of most gulfs moved toward the sea; gulf-shape variations exhibited remarkable spatio-temporal differences. It is obvious that human activities, especially sea reclamation, have become the key driving force of gulf shape change since 1990. Based on the above-mentioned findings, classification management strategy based on dominant-function oriented gulf classification is strongly recommended, and gulf-based management should be strengthened in order to improve the abilities of Integrated Coastal Zone Management (ICZM) practices in China.

**Keywords:** gulf; shoreline structure; shoreline change; gulf area; gulf shape index; gulf centroid; sea reclamation; China