文章编号:2095-6134(2018)06-0761-10

20 世纪 40 年代初以来渤海形态变化特征*

宋 洋[1,2],张 华[1],侯西勇[1†]

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

(2017 年 9 月 1 日收稿; 2017 年 12 月 22 日收修改稿)

Song Y, Zhang H, Hou X Y. Shape changes of Bohai Sea since the early 1940s [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2018, 35(6): 761-770.

摘 要 20 世纪中期以来中国沿海经历了多次围填海热潮,2000 年以来环渤海区域大规模围填海已使其成为近期中国围填海的重点区域。利用地形图、海图和遥感影像等资料获取的渤海多时相的平面重心、立体重心、海岸线、低潮线、等深线、海区面积和海区体积等指标变化信息,系统揭示渤海形态的长期变化特征。结果表明:近 70 年来,渤海面积不断萎缩,岸线普遍向海扩张,导致渤海的平面重心总体向东偏北方向移动,但渤海的平面周长总体呈增加趋势,平面形状趋于复杂;近 50 年来,渤海体积总体呈下降趋势,立体重心的位置趋于变深。自然条件下的河口三角洲发育和人类围填海活动是渤海形态变化的主要原因,但渤海形态变化的驱动力已由早期的以自然因素为主转变为近期的以人类活动因素为主。

关键词 渤海;海岸线;等深线;数字高程模型(DEM);重心;形态特征

中图分类号: K928.44 **文献标志码:** A **doi:** 10.7523/j.issn.2095-6134.2018.06.007

Shape changes of Bohai Sea since the early 1940s

SONG Yang[1,2], ZHANG Hua[1], HOU Xiyong[1]

(1 *Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation of Chinese Academy of Sciences, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai* 264003, *Shandong, China*;
2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract China has experienced several booms in sea reclamation since the mid-20th century. The reclamation in Bohai Rim expanded dramatically in a scale much larger than in other coastal zones in China, especially since 2 000. Therefore, based on topographic maps, nautical charts, and multi-temporal remote sensing imageries, the two-dimensional centroid, three-dimensional centroid, shoreline, low tide line, depth contour, bay area, and water volume of Bohai Sea since the 1940s were extracted and analyzed to reveal the tendencies, characters, and driving factors of long-term shape changes of Bohai Sea. The results indicate that, during the past 70 years, the area of Bohai Sea decreased continuously and that shoreline, low tide line, and 5 m isobaths shifted toward the sea in

* 中国科学院烟台海岸带研究所自主部署项目(YICY755011031)、中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-14)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA11020305)和国家自然科学基金(31461143032)资助

† 通信作者,E-mail: xyhou@yic.ac.cn

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

most coastal areas. Consequently, the two-dimensional centroid of Bohai Sea moved northeastward significantly, while the perimeter increased remarkably and the geometric shape became complicated. During the past 50 years, overall, the volume of Bohai Sea declined and the three-dimensional centroid dived significantly. The development of estuary delta and sea reclamation were the fundamental driving forces of long-term shape changes of Bohai Sea. However, the human forces have gradually exceeded the natural forces.

Keywords Bohai Sea; shoreline; depth contours; DEM(digital elevation model); centroid; shape character

渤海位于亚欧大陆东部,介于37°27′N~41°N、117°35′E~121°10′E之间,由辽东半岛与山东半岛所围绕,属于半封闭内陆边缘海,以平原性淤泥与砂砾质岸线为主,岸坡平缓,潮间带广阔[1]。社会经济快速发展使得环渤海地区的工业化、城镇化进程明显加快[2],河口三角洲发育和大规模围填海活动导致渤海面积逐年萎缩[3-4],从1940年代至2014年,渤海面积大约萎缩0.57万km^2,萎缩速率超过82 $km^2 \cdot a^{-1}$[5],尤其是进入21世纪以来,萎缩速度加快,许多地区岸线向海扩张明显,导致渤海形态发生较为显著的变化[6]。近年来,随着辽宁沿海经济带、天津滨海新区、河北沿海地区、黄河三角洲高效生态经济区、山东半岛蓝色经济区均已上升为国家战略[7],环渤海的围填海活动将更趋白热化[8-10]。作为中国唯一的内海,渤海的形态变化具有其独特性,在全球范围亦有其典型性和代表性,但是,目前,对渤海形态变化的研究多集中于渤海的局部区域,以揭示河口三角洲演变、填海造陆对环境和生态的影响等为主要目的[11-12],而对渤海整体较长时期的形态变化所进行的研究则较为少见,尤其是从点、线、面、体不同维度出发的系统性研究尚属空白[13-14]。因此,本文基于地形图、海图与遥感影像等资料,对1940年代初期以来整个渤海的形态变化特征及其原因进行系统的研究,以期引起学术界和管理部门的重视,为"拯救渤海"提供新的思路。

1 信息来源与研究方法

1.1 信息来源

提取不同时期岸线数据的信息源[5]:美国陆军制图局编绘的中国沿海1∶25万地形图13幅,测绘于20世纪40年代初;环渤海区域1∶5万和1∶10万地形图,测绘于20世纪50年代至60年代初;Landsat MSS/TM/ETM+/OLI系列传感器卫星影像数据,数据时相包括1970s初、1990年、2000年和2014年,由美国地质调查局(http://glovis.usgs.gov)提供下载。针对Landsat卫星影像进行必要的预处理工作,以便提高海岸线目视解译的精度,主要包括几何精校正、波段合成、假彩色合成、色彩拉伸等处理过程。基于以上地形图和遥感影像资料提取1940s初、1960s初、1970s初、1990年、2000年和2014年共6个时相的渤海岸线分布数据。

提取不同时期水深数据的信息源:中国人民解放军海军司令部航海保证部出版的海图28幅,出版年份为1966—1969年(9幅)、1985—1986年(5幅)、1999—2005年(7幅)和2008—2012年(7幅),测量年份分别主要集中在1959年、1970s、1990s和2000s初(2010年之前)4个时期,比例尺以1∶15万和1∶25万为主。基于这些海图提取低潮线、水深点和等深线信息,建立4个时期的DEM(数字高程模型,digital elevation model)数据,为便于研究,将4个时期分别记为1960年、1970s、1990s和2000s。

1.2 渤海分区

整个渤海由渤海湾、辽东湾、莱州湾和中部海区组成[15],根据海湾的定义及相关文献资料[16],参照环渤海区域的地图和遥感影像,确定各个海区的范围和边界。具体如下:辽东湾具有明确的口门,为长兴岛(E121.225°,N39.517°)与秦皇岛(E119.528°,N39.813°),可直接建立口门线并与海湾岸线连接,形成封闭的海湾图斑;渤海湾位于E117.583°~118.850°和N38°~39.233°之间,湾口北部为冀东沿海的大清河口,南至老黄河口,建立各个时期的口门线,形成不同时期渤海湾封闭的海湾图斑;莱州湾西起黄河口,东至龙口的屺姆角,建立各个时期的口门线,形成不同时期封闭的海湾图斑;中部海区,各个时期3个海湾的范围和边界确定之后,剩余区域即为中部海区。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.3　海岸线提取与验证

海岸线采用平均高潮线的定义[5,17],对每幅地形图与卫星遥感资料进行精确的几何校正,结合野外考察工作,采取目视解译方式提取 1940s、1960s、1970s、1990、2000、2014 年 6 个时期的渤海岸线数据;各个时相渤海岸线提取过程中,严格控制采样点的密度,以降低因为数据源和分辨率等差异所导致的岸线精度差异[18],将岸线提取结果与野外测量数据进行对比,表明 6 个时相岸线提取结果的误差较低,均小于对应数据源(地图或 Landsat 影像)线要素信息提取的理论最大允许误差[5,17]。

1.4　水下地形信息建立

不同时期海图资料的高程基准面有黄海 56 基准面和黄海 85 基准面,按照广泛使用的基面换算公式(1985 国家高程基准 = 1956 黄海高程 − 0.029 m)将多源、多时相海图的高程基准统一换算到 1985 国家高程基准[19-20]。水深数据采集和处理过程中将海图资料统一转换成 WGS84 坐标系,采集获得的水深点、等深线均以浮点型数据记录水深信息;在 ArcGIS 中通过空间分析技术生成 100 m 分辨率的浮点型 DEM 数据,由此得到 1960 年、1970s、1990s 和 2000s 这 4 个时期的渤海水下地形 DEM 数据。

1.5　海洋形态特征参数

针对渤海及其分区,点、线、面、体相结合计算多种形态参数。平面周长与面积、三维体积可直接在 ArcGIS 软件中统计或计算;海岸线、低潮线和等深线的位置变化是利用美国地质调查局开发的数字海岸分析系统(DSAS)计算变化速率[21-22]。其他参数的计算公式如下:

1) 平面形状指数:海湾周长与等面积圆的周长之比,反映海湾平面形状与圆形的相似度[23];值越小,说明越趋近于圆形,形状越简单,反之,则越复杂。

$$\mathrm{SIB} = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}, \tag{1}$$

式中:SIB 为形状指数;P 为周长(km);A 为面积(km^2)。

2) 平面重心及其位移: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[24]如下:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}, y = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n}, \tag{2}$$

$$L = \sqrt{(x_j - x_k)^2 + (y_j - y_k)^2}. \tag{3}$$

式中:(x, y) 为平面重心坐标;(x_i, y_i) $(i = 1, 2, \cdots, n)$ 为平面离散点的坐标;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。

3) 三维空间的重心及其位移:采用薄板法[25]进行计算,将渤海抽象为等深线三维立体化后形成的一层层"薄板"搭建起的组合体,在求取二维"薄板"重心的基础上计算整体的三维重心。各薄板(等深线)重心的平面坐标 x、y 通过平面重心的方法计算,而 z 坐标为

$$z_i = (i - 1) + h, \tag{4}$$

式中:i 为薄板(等深线)所在的层数;h 为"薄板"厚度(等深线间隔)。各薄板(等深线之间水体)的组合体的三维重心坐标为

$$\tilde{x} = \frac{\sum x_i v_i}{\sum v_i}, \tilde{y} = \frac{\sum y_i v_i}{\sum v_i}, \tilde{z} = \frac{\sum z_i v_i}{\sum v_i}. \tag{5}$$

式中:$\tilde{x}$、$\tilde{y}$、$\tilde{z}$ 为三维重心的坐标;x_i、y_i、z_i 为第 i 个"薄板"的三维重心的坐标;v_i 为第 i 个"薄板"的体积,等于"薄板"面积与厚度 h 的乘积。

2　结果与分析

2.1　重心时空动态特征

1) 平面重心位移特征。渤海及各海区平面重心的移动特征如图 1、表 1 所示。1940s—2014 年,整个渤海的平面重心整体向东北方向移动,移动距离为 5.72 km,移动速度为 0.08 km/a;1940s—1960s 期间移动最快,移动距离为 4.16 km,移动速度为 0.21 km/a。渤海湾的平面重心整体向东移动,移动距离为 6.31 km,移动速度为 0.09 km/a;不同时段的移动方向和速率有所差异,以 1940s—1960s 期间移动最快,移动距离为 4.51 km,移动速度达 0.23 km/a。莱州湾的平面重心呈现为南北跳跃并整体向东移动的特征,移动距离相对较小,仅为 2.60 km,移动速度为 0.04 km/a;1990 年之后移动明显加快,移动距离达 5.4 km,移动速度则超过 0.20 km/a。辽东湾的平面重心整体向东北方向移动,但 2000 年之后变为快速逆向折返,因而近 70 年总体的移动距离被大幅减小,仅为 2.10 km,移动速度仅为

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

0.03 km/a。中部海区的平面重心整体向东北方向移动，与渤海整体的移动方向一致，移动距离约为 5.56 km，移动速度为 0.08 km/a；1940s—1960s 期间移动最快，移动距离为 5.80 km，移动速度达到 0.29 km/a，在 1990 年之后变为逆向折返趋势，但速率相对较低。

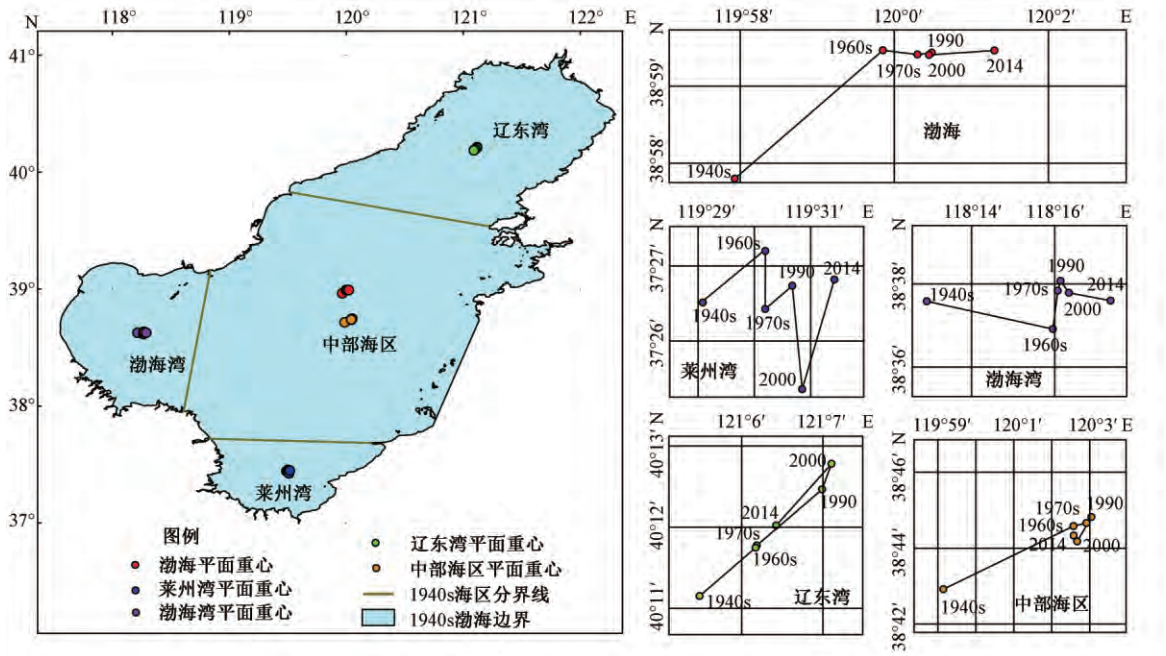


图 1 渤海及各海区平面重心移动轨迹

Fig. 1 Spatial-temporal movement of two-dimensional centroid in Bohai Sea and its sub-regions

2) 立体重心位移特征：渤海及各海区不同时期的立体重心坐标如表 2 所示。立体重心的平面位移方面，40 余年间，整个渤海的立体重心整体向东北方向移动，平面移动距离为 0.87 km；各时段重心移动表现出西南、东北方向的交替与转折特征，1970s—1990s 移动速度最快，向东北方向移动距离为 1.31 km。渤海湾的重心整体向北偏西方向移动，平面移动距离为 2.22 km，各时段重心移动表现为西北—东北的摆动变化趋势，1970s—1990s 移动速度最快，向西北方向移动距离为 1.57 km。莱州湾的重心持续向东南方向移动，是渤海立体重心平面移动速度最快的海湾，平面移动距离为 4.96 km，2000s 以来重心移动速度最快，平面移动距离为 3.51 km。辽东湾的重心较为稳定，整体呈现为向南偏西方向的小幅移动，平面移动距离为 0.45 km；各时段重心移动表现为西南—东北—西南的交替变化趋势，各时段平面移动距离普遍不足 0.5 km。中部海区重心移动的速度最缓慢，整体上向东移动 0.34 km；各时段重心移动表现为西南—东北—西南的交替变化趋势，1970s—1990s 移动速度最快，向东北方向移动距离为 0.70 km。从立体重心深度的变化来看，40 余年间，整个渤海的重心深度总体呈下降趋势（下降 0.04 m），渤海湾立体重心深度呈持续下降趋势（下降 0.21 m），而莱州湾的立体重心深度则呈持续上升的趋势（上升 0.29 m）；辽东湾和中部海区的立体重心深度呈现为波动变化的特征，辽东湾的立体重心总体上升 0.10 m，而中部海区立体重心经历一定的升降变化之后又回归为 -13.25 m。

2.2 海岸线、低潮线、等深线的位置变化

自 1940s 以来，渤海的岸线整体表现为持续向海推移，2000 年以后岸线向海推移现象尤其明显；渤海湾、莱州湾、黄河三角洲和辽东湾北部的岸线、低潮线及 5 m 等深线的位置变化均较为显著，因此，利用岸线变化速率方法分析这些热点区域岸线、低潮线和 5 m 等深线的位置变化特征。具体如下：

1) 岸线变化特征：如图 2、图 3 所示，自 1940s 以来，得益于黄河携带的大量泥沙的沉积，黄河三角洲区域新生陆地面积持续扩张，而人类的围填海活动和海岸工程建设则加速了土地利用/覆盖的变化，因此，其岸线向海扩张距离达 25 km 以上，局部区域甚至超过 30 km。大量的港口码

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　渤海及各海区平面重心位移特征

Table 1　Characters of two-dimensional centroid movement in Bohai Sea and its sub-regions

海区	时段	移动距离/km	移动速度/(km/a)	移动方向
渤海	1940s—1960s	4.16	0.21	↗
	1960s—1970s	0.65	0.06	→
	1970s—1990	0.27	0.01	→
	1990—2000	0.08	0.01	↙
	2000—2014	1.21	0.09	→
	1940s—2014	5.72	0.08	↗
渤海湾	1940s—1960s	4.51	0.23	↘
	1960s—1970s	1.75	0.17	↗
	1970s—1990	0.46	0.02	↗
	1990—2000	0.62	0.06	↘
	2000—2014	1.47	0.11	↘
	1940s—2014	6.31	0.09	→
莱州湾	1940s—1960s	1.77	0.09	↗
	1960s—1970s	1.46	0.15	↓
	1970s—1990	0.78	0.04	↗
	1990—2000	2.61	0.26	↘
	2000—2014	2.82	0.20	↗
	1940s—2014	2.60	0.04	→
辽东湾	1940s—1960s	1.72	0.09	↗
	1960s—1970s	0.61	0.06	↙
	1970s—1990	1.72	0.09	↗
	1990—2000	0.05	0.01	↗
	2000—2014	1.48	0.11	↙
	1940s—2014	2.10	0.03	↗
中部海区	1940s—1960s	5.80	0.29	↗
	1960s—1970s	0.51	0.05	↗
	1970s—1990	0.35	0.02	↗
	1990—2000	1.32	0.13	↙
	2000—2014	0.32	0.02	↖
	1940s—2014	5.56	0.08	↗

表 2　渤海及各海区立体重心的坐标

Table 2　The three-dimensional centroid coordinates of Bohai Sea and its sub-regions

海区	时期	经度/(°)	纬度/(°)	深度/m
渤海	1960	120.173 3	39.015 1	-12.15
	1970s	120.170 4	39.010 2	-12.04
	1990s	120.179 6	39.019 5	-12.17
	2000s	120.180 8	39.020 4	-12.19
渤海湾	1960	118.426 4	38.647 1	-8.20
	1970s	118.423 4	38.652 0	-8.25
	1990s	118.417 8	38.665 2	-8.32
	2000s	118.423 1	38.666 6	-8.41
莱州湾	1960	119.615 2	37.522 7	-5.40
	1970s	119.618 1	37.519 4	-5.36
	1990s	119.626 6	37.513 2	-5.30
	2000s	119.657 4	37.493 1	-5.11
辽东湾	1960	120.984 6	40.054 1	-11.33
	1970s	120.979 9	40.050 9	-11.21
	1990s	120.983 4	40.052 8	-11.27
	2000s	120.982 9	40.050 3	-11.23
中部海区	1960	120.127 1	38.763 9	-13.25
	1970s	120.126 2	38.762 5	-13.15
	1990s	120.131 9	38.766 9	-13.31
	2000s	120.131 0	38.764 5	-13.25

头区域,例如,辽东湾北岸的锦州港,岸线向海扩张距离超过 9 km,渤海湾的曹妃甸、天津港、黄骅港等港区的岸线向海扩张距离超过 20 km。辽东湾的大辽河下游河口、莱州湾南岸等区域,岸线向海扩张距离超过 10 km。除上述热点区域,其他区域的岸线也多以向海扩张为基本特征,但扩张的距离和速度相对较小。

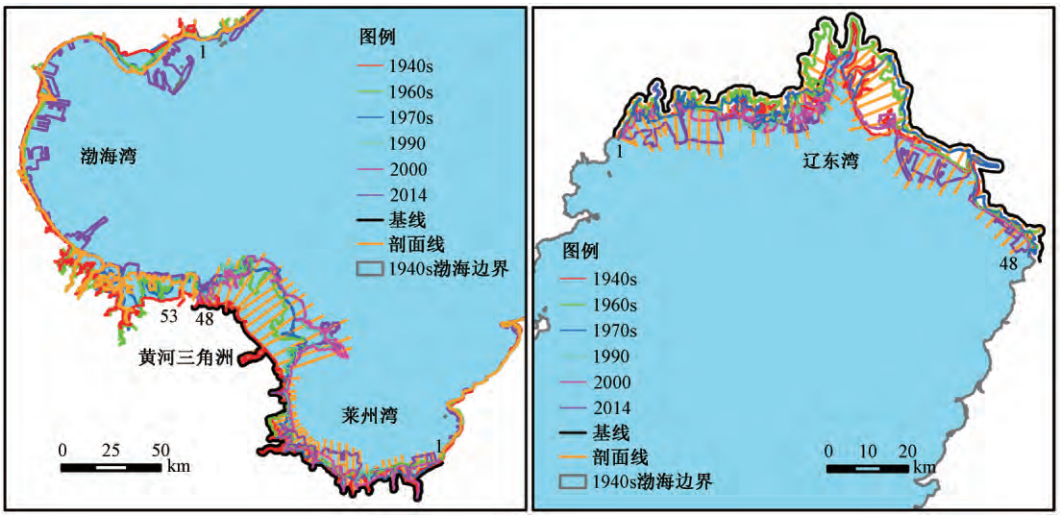


图 2　热点区域岸线时空变化特征

Fig. 2　Spatial-temporal dynamic characters of shoreline in hot zones

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

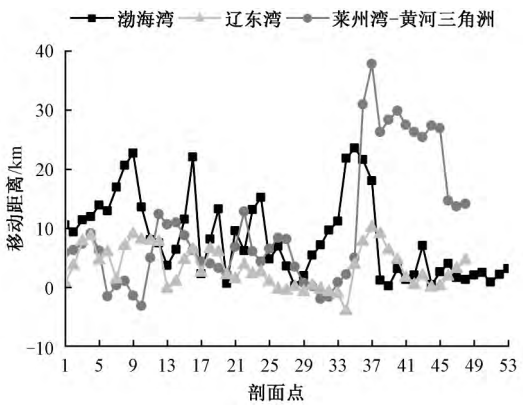
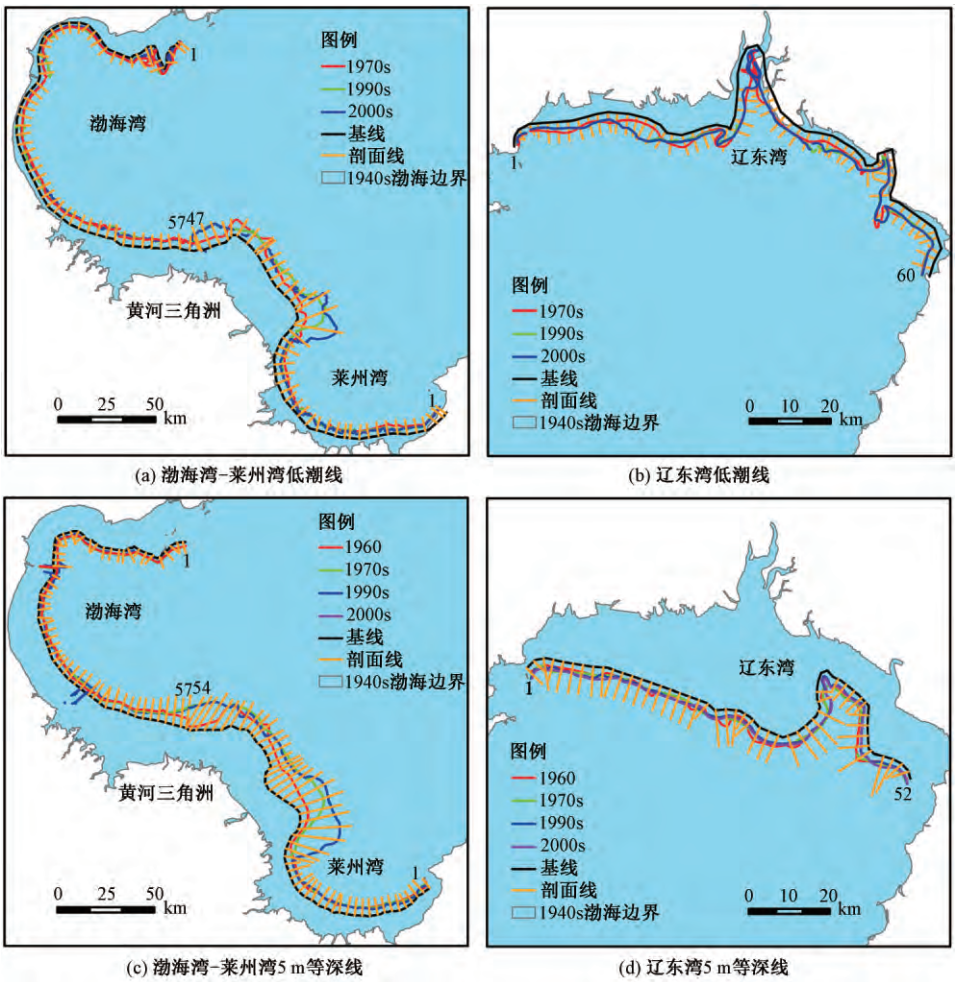


图 3 热点区域岸线移动距离

Fig. 3 Movement distances of shoreline in hot zones

2) 低潮线和 5 m 等深线变化特征: 如图 4、图 5 所示,黄河三角洲岸线持续向海扩张,低潮线和 5 m 等深线也都随之向海移动,自 1960 年以来,多数区域向海移动距离超过 10 km,某些区域甚至高达 20 km。渤海湾区域由于港口建设发展迅速,人工岸线替代自然岸线并导致岸线向深水区移动,因此,许多区域的低潮线和 5 m 等深线都已消失; 但渤海湾港口之外的其他区域低潮线未有明显变化,某些区域存在明显的海岸侵蚀现象,但是低潮线向陆移动距离普遍不足 1 km。莱州湾南岸部分区域的潮间带侵蚀较为明显,低潮线向陆移动,但移动距离普遍不足 2 km,仅在局部区域达到 4 km 以上,而 5 m 等深线并没有较为明显的变化。辽东湾北岸的低潮线向海移动趋势较为显著,多数区域位移约 4 km,但 5 m 等深线相对稳定,呈现为陆海之间小幅度的摆动特征。



(a) 渤海湾-莱州湾低潮线
(b) 辽东湾低潮线
(c) 渤海湾-莱州湾5 m等深线
(d) 辽东湾5 m等深线

图 4 热点区域低潮线与 5 m 等深线时空变化特征

Fig. 4 Spatial-temporal dynamic characters of low tide line and 5 m depth contour in hot zones

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

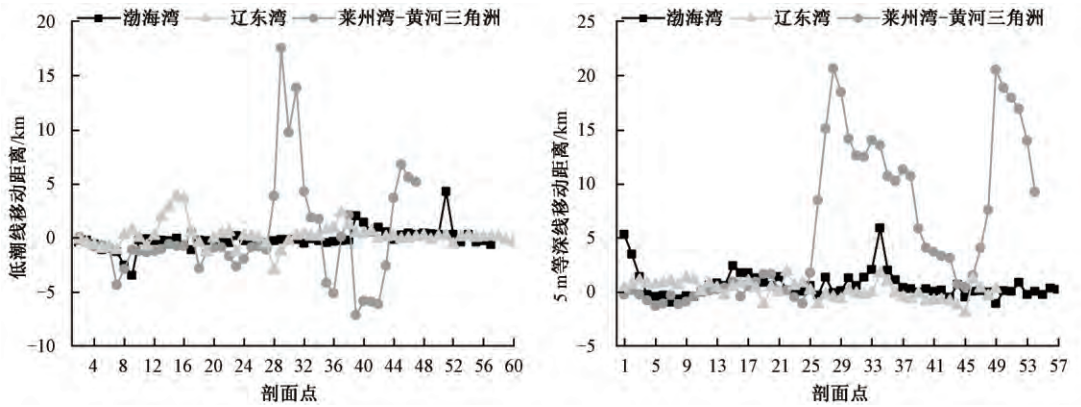


图 5　热点区域低潮线与 5 m 等深线移动距离

Fig. 5　Movement distances of low tide line and 5 m depth contour in hot zones

2.3　面状形态变化特征

计算不同时期渤海及各海区的周长、面积和形状指数,得到渤海长时间的面状形态变化特征。具体如下:

1) 1940s 以来渤海的岸线长度和周长均呈现为总体增加的变化趋势,具体情况如图 6 所示,但各海区之间存在显著的差异性,个别海区表现为波动变化但总体增长的态势。1960s 时相受大比例尺数据源的影响而使得岸线长度和海区周长数值偏高,可比性不足,因而不予讨论。1940s—2014 年间,渤海湾、莱州湾、辽东湾和中部海区的岸线长度分别增加 459.86、66.94、317.19 和 293.14 km,整个渤海合计则增加 1 137.13 km。莱州湾和辽东湾 2 个海区的岸线长度及海区周长早期均呈现为显著的降低趋势,分别在 1970s 和 1990 年降至低谷,在此之后则开始增长,以“裁弯取直”为特征的大规模围海发展盐田和养殖区是导致早期阶段 2 个海区岸线及周长降低的主要原

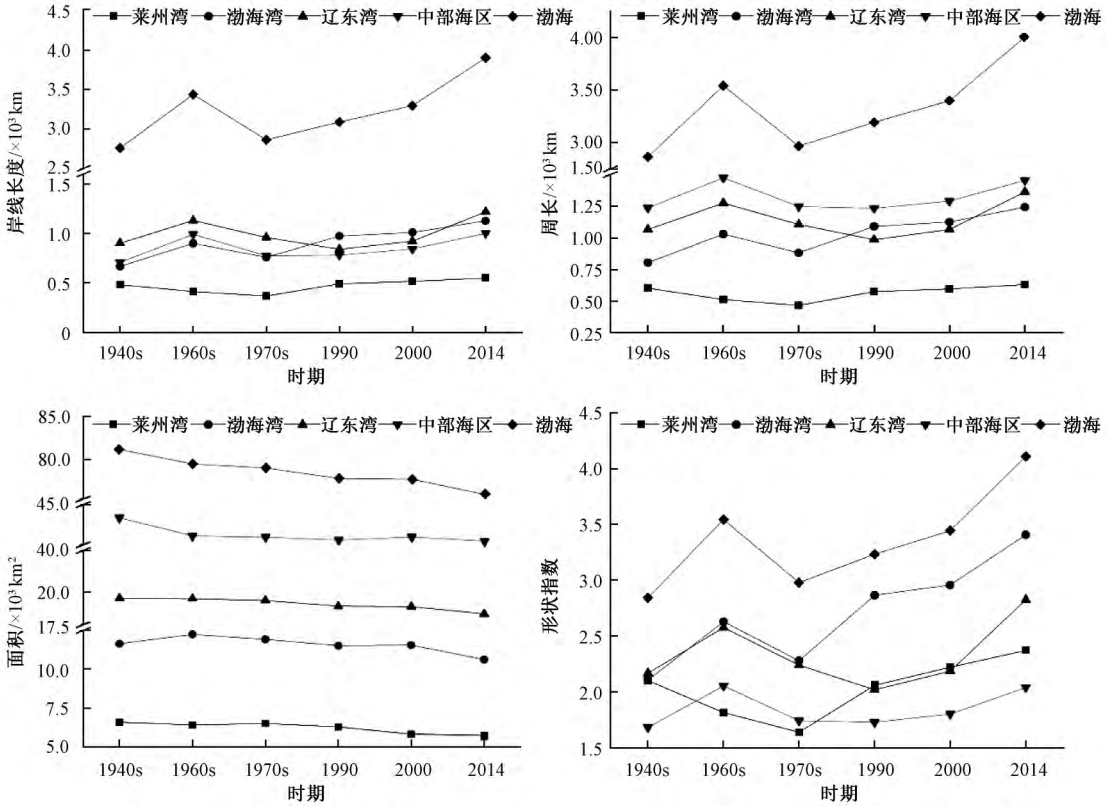


图 6　近 70 年渤海及各海区形态特征变化

Fig. 6　Changes in shape characters of Bohai Sea and its sub-regions during the past 70 years

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

因。2000年之后渤海及其各个海区的岸线进入一个快速增长的阶段，近15年间的增长速率远远超出2000年以前近60年间平均的增长速率；围填海的目的由发展盐田和养殖为主转向发展港口、工业区和城镇用地为主，以及围填海方式由岸线裁弯取直、大面积整体式围填海转向多突堤式、人工岛式、多区块组团式等新型围填海，这是导致2000年以来岸线快速增长的主要原因。

2) 1940s以来渤海面积呈持续下降趋势，总面积减少5 743.92 km^2，其中，渤海湾、莱州湾、辽东湾和中部海区的面积总体分别减少1 031.64、861.35、1 025.30和2 825.64 km^2。但渤海面积变化具有一定的时空复杂性：渤海湾的面积属于波动下降趋势（有多次反弹），莱州湾和中部海区的面积属于总体下降（有单次反弹），辽东湾的面积则属于持续下降趋势；与岸线长度的变化趋势类似，渤海面积也是在2000年之后进入一个快速减少的阶段，近15年间面积减少的速率大约是2000年之前近60年间的2倍以上，渤海湾和辽东湾近15年间的面积减少速率尤为突出，是2000年之后渤海围填海、海域面积减小的热点区域，但莱州湾因受黄河入海口河道多次改道以及泥沙沉积速率大幅下降的影响，其面积减少的趋势有所放缓，近15年面积减少的速率已经不足2000年之前近60年间的50%。

3) 1940s以来渤海及其各海区的形状总体上趋于复杂化。岸线长度和海区周长大幅增长，而海区面积却大幅减少，形状必然趋于复杂。由于不同时相数据源类型和空间精度（地图比例尺与影像分辨率）的差异对形状指数计算结果有较大的影响，因而重点分析1990年以来均以30 m分辨率Landsat卫星影像为数据源的时段，结果表明，1990—2014年渤海及各海区的形状指数都呈持续增加的趋势，整个渤海、渤海湾、莱州湾、辽东湾和中部海区的形状指数分别增加0.88、0.54、0.30、0.81和0.31，表明渤海及其各个海区的形状在不断地趋于复杂化。

2.4 立体形态变化特征

利用渤海多时相水深数据计算渤海及各个海区的体积，分析水下地形的侵蚀—淤积格局。

1) 渤海海岸带河口三角洲发育典型，尤其是黄河三角洲和辽河三角洲，造成河口区域水深变浅和岸线向海推移；另一方面，渤海沿岸的围填海活动比较剧烈，盐田、养殖和港口建设等人类活动在导致渤海面积不断萎缩的同时，也对水下地形产生深刻的影响，因此整个渤海及各海区的体积变化显著，具体变化如表3所示，自1960年以来，整个渤海、渤海湾、莱州湾、辽东湾和中部海区的体积分别减少24.08、4.69、8.48、7.47和3.45 km^3；将各个海区体积变化量平均到其在1960年的面积，得到“平均的变化幅度”，则整个渤海、渤海湾、莱州湾、辽东湾和中部海区的数值分别达到0.30、0.38、1.33、0.38和0.08 m，由此可见，中部海区地形相对较为稳定，而3个海湾的变化幅度均显著高于整个渤海，尤其是莱州湾的变化幅度最为惊人，高达1.33 m。

表3 渤海及各海区水体的体积统计

Table 3 Statistics of water volume in Bohai Sea and its sub-regions

海区	不同时期体积/km^3				1960—2000s变化量/km^3	1960—2000s平均变化幅度/m
	1960	1970s	1990s	2000s		
整个渤海	1 408.89	1 388.36	1 397.00	1 384.81	-24.08	-0.30
渤海湾	114.81	111.41	110.76	110.12	-4.69	-0.38
莱州湾	47.91	47.08	46.00	39.43	-8.48	-1.33
辽东湾	325.00	316.22	322.35	317.53	-7.47	-0.38
中部海区	921.18	913.64	917.89	917.73	-3.45	-0.08

2) 自1960年以来，渤海的水下地形侵蚀-淤积格局如图7、表4所示，渤海海岸带主要由于围填海、河口三角洲发育两方面原因，在黄河三角洲、渤海湾和辽河口区域有大量的浅海水域变成陆地。近50年来一直保持为海水的区域中，显著淤积、中度淤积、轻微淤积、基本稳定、轻微侵蚀、中度侵蚀和显著侵蚀的区域分别占2.19%、3.00%、30.91%、36.46%、25.88%、1.08%和0.49%，淤积区域面积的合计占比（36.09%）大大超过侵蚀区域面积的合计占比（27.45%），可见，渤海大部分区域水下地形发生了较为显著的变化。但是，水下地形的侵蚀-淤积格局存在显著的海区差异：渤海湾、莱州湾和辽东湾均是淤积区域远远超过侵蚀区域，而中部海区则相反，是侵

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

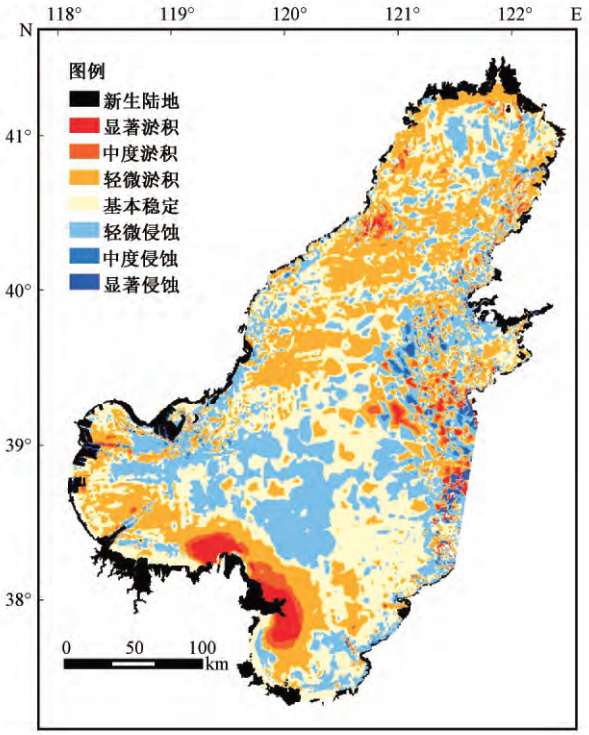


图 7　1960—2000s 渤海及其各海区水深变化图

Fig. 7　Depth changes in Bohai Sea and its sub-regions from 1960 to 2000s

蚀区域略大于淤积区域;而且,即便是 3 个海湾之间,侵蚀 - 淤积分布格局的面积比例差异也较为显著,主要受 1990s 以来黄河水沙通量大幅减少、黄河三角洲侵蚀 - 淤积动态发生变化的影响,渤海湾和莱州湾水下地形的淤积区域面积占比(分别为 38.59% 和 37.39%)已经远远低于辽东湾(48.58%)。

3　结论与讨论

本文利用地形图、海图和遥感影像等数据资料提取 1940s 以来 6 个时相的岸线数据和 1960 年以来 4 个时期的水下地形数据,进而,计算点、线、面、体的多个参数并分析其变化特征,综合揭示渤海及各海区形态的长期变化特征。主要结论如下:

1) 整个渤海的平面重心和立体重心均表现出向东北方向运动的趋势,立体中心同时呈现持续下降的态势,但重心的运动呈现出显著的时空差异性和复杂性:平面重心的运动规律较为明显,渤海湾、莱州湾、中部海区以及整个渤海均为整体向东北方向运动,而辽东湾则是整体向西南方向运动;立体重心的运动特征较为复杂,其在平面视角整体的运动方向在 4 个海区各不相同,在垂向视角渤海湾、莱州湾、辽东湾和中部海区则分别呈现持续下降、持续上升、波动上升和平稳波动的特征;平面重心在 1960s 以前以及 2000 年以来 2 个时段的运动较为剧烈,而立体重心则是在 1970s—1990s 期间运动较为剧烈。

表 4　1960—2000s 渤海及各海区水深变化

Table 4　Depth changes in Bohai Sea and its sub-regions from 1960 to 2000s　　km^2

变化趋势	变化等级	水深变化 d/m	渤海	渤海湾	莱州湾	辽东湾	中部海区
淤积	显著淤积	$d \leqslant -5.00$	1 643.78	408.09	412.89	96.22	726.58
	中度淤积	$-5.00 < d \leqslant -2.50$	2 253.46	284.78	252.03	481.05	1 235.6
	轻微淤积	$-2.50 < d \leqslant -0.25$	23 239.27	3 354.13	1 527.32	8 427.85	9 929.97
基本稳定		$-0.25 < d \leqslant 0.25$	27 410.95	3 636.36	2 451.98	6 159.44	15 163.17
侵蚀	轻微侵蚀	$0.25 < d \leqslant 2.50$	19 457.57	2 645.62	1 189.47	3 262.14	12 360.34
	中度侵蚀	$2.50 < d \leqslant 5.00$	810.54	101.65	26.73	89.31	592.85
	显著侵蚀	$d > 5.00$	366.91	56.82	2.74	19.40	287.95
新生陆地(围填海、河口三角洲沉积造陆)			4 134.35	1 698.92	509.78	1 021.58	904.07

2) 渤海的海岸线、低潮线和 5 m 等深线均表现为整体持续向海推进的态势,黄河三角洲、辽河口、莱州湾南岸、曹妃甸、天津港等是陆进海退的热点区域;在相对以自然过程为主导的变化热点区域(如,黄河三角洲),其海岸线、低潮线和 5 m 等深线呈现出较为有序的向海推进的格局 - 过程特征,规律性较强,而以人类活动为主导的变化热点区域(如曹妃甸、天津港等),人工岸线代替自然岸线并导致岸线向深水区移动,低潮线、5 m 等深线局部消失和被打断的特征较为突出;局部区域,如老黄河口、莱州湾南岸,有清晰可辨的海岸侵蚀过程,但对海岸线、低潮线和 5 m 等深线的影响程度相对轻微很多。

3) 渤海及各个海区的岸线长度、周长均呈现为总体增加的变化趋势,而面积却呈现为持续下降的变化趋势;但渤海岸线长度、周长和面积的变化呈现出较为复杂的格局 - 过程特征,部分海区存在较为显著的波动特征,而且,在岸线长度和周长增加以及面积减少的速率方面,2000 年是一个较为

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

显著的转折点，除莱州湾变化速率显著放缓之外，其他3个海区以及整个渤海均在2000年之后进入一个更加剧烈的、更加迅速的形态变化阶段。

4) 渤海大部分区域水下地形发生了较为显著的变化，受此影响，整个渤海及各个海区海水体积的减少特征较为显著，但水下地形的侵蚀－淤积表现出较为复杂的格局－过程，对各个海区的影响具有显著的复杂性特征：中部海区相对较为稳定，虽然容积总体减少，但是变化幅度远远低于整个渤海，而且侵蚀区域的分布范围略高于淤积区域；而3个海湾则均是淤积区域显著超过侵蚀区域，容积减少的幅度也均是显著高于整个渤海，其中又以莱州湾为最，变化幅度达到整个渤海的3倍以上。

综上所述，渤海及其各个海区自1940s以来经历了剧烈的、复杂的形态变化过程，综合平面重心、立体重心、海岸线位置与长度、低潮线、5 m等深线、平面周长、海域面积、海水体积等多要素的格局－过程特征，可以发现，黄河三角洲、辽河口、莱州湾、曹妃甸、天津港等是导致渤海形态发生变化的热点区域，而以河口三角洲发育和围填海为主的人类活动因素则是导致渤海形态发生变化的主要影响因素，但是，这两方面主导因素的影响力度和贡献水平存在明显的消长关系，即，总体上，以河口三角洲发育为主的自然过程的影响作用在逐渐削弱，而人类的各种围填海活动的影响作用却逐渐高涨，尤其是20世纪90年代以来，人类活动因素的主导性地位越来越显著。

参考文献

[1] 徐晓达，曹志敏，张志珣，等. 渤海地貌类型及分布特征[J]. 海洋地质与第四纪地质，2014，34(6)：171-179.

[2] 盖美，张丽平，田成诗. 环渤海经济区经济增长的区域差异及空间格局演变[J]. 经济地理，2013，33(4)：22-28.

[3] 马万栋，吴传庆，殷守敬，等. 环渤海围填海遥感监测及对策建议[J]. 环境与可持续发展，2015，40(3)：63-65.

[4] 王勇智，吴颢，石洪华，等. 近十年来渤海湾围填海工程对渤海湾水交换的影响[J]. 海洋与湖沼，2015，46(3)：471-480.

[5] Hou X Y，Wu T，Hou W，et al. Characteristics of coastline changes in mainland China since the early 1940s[J]. Science China Earth Sciences，2016，59(9)：1 791-1 802.

[6] 李亚宁，王倩，郭佩芳，等. 近20a来渤海岸线演替及其开发利用策略[J]. 海洋湖沼通报，2015(3)：32-38.

[7] 程钰，刘凯，徐成龙，等. 山东半岛蓝色经济区人地系统可持续性评估及空间类型比较研究[J]. 经济地理，2015，35(5)：118-125.

[8] 高文斌，刘修泽，段有洋，等. 围填海工程对辽宁省近海渔业资源的影响及对策[J]. 大连水产学院学报，2009，24(S1)：163-166.

[9] 胡聪，于定勇，赵博博. 天津滨海新区围填海工程对海洋资源影响评价[J]. 海洋环境科学，2014，33(2)：214-219.

[10] 胡聪，于定勇，赵博博. 围填海工程对海洋资源影响评价：以曹妃甸为例[J]. 城市环境与城市生态，2014，27(1)：42-46.

[11] 叶小敏，丁静，徐莹，等. 渤海湾近30年海岸线变迁与分析[J]. 海洋开发与管理，2016，33(2)：56-62.

[12] 李仕涛，王诺，张源凌，等. 30a来渤海填海造地对海洋生态环境的影响[J]. 海洋环境科学，2013，32(6)：926-929，938.

[13] Jiang L，Wu S H，Yang Q H，et al. Spatial distribution and temporal evolution of sediment transport pathway of deltaic deposits in a rift basin：an example from Liaodong Bay Sub-basin，Bohai Bay，China[J]. Australian Journal of Earth Sciences，2016，63(4)：469-483.

[14] Zhu L，Wu J，Xu Z，et al. Coastline movement and change along the bohai sea from 1987 to 2012[J]. Journal of Applied Remote Sensing，2014，8(1)：083 585.

[15] 王诺，许雪青，吴暖，等. 渤海污染风险与生态系统功能价值评价研究[J]. 海洋湖沼通报，2015，24(1)：167-174.

[16] 夏东兴，刘振夏. 中国海湾的成因类型[J]. 海洋与湖沼，1990，21(2)：185-191.

[17] 侯西勇，毌亭，王远东，等. 20世纪40年代以来多时相中国大陆岩线提取方法及精度评估[J]. 海洋科学，2014，38(11)：66-73.

[18] 侯西勇，侯婉，毌亭. 20世纪40年代初以来中国大陆沿海主要海湾形态变化[J]. 地理学报，2016，71(1)：118-129.

[19] 徐雷诺. 我国各种高程系之间的换算及应用[J]. 治淮，2009(10)：44-45.

[20] 吴家乃，朱梅心. 论我国高程基准面问题[J]. 河海大学学报，1991，19(1)：59-64.

[21] David T I，Mukesh M V，Kumaravel S，et al. Long-and short-term variations in shore morphology of Van Island in gulf of Mannar using remote sensing images and DSAS analysis[J]. Arabian Journal of Geosciences，2016，9(20)：756-763.

[22] Wang Y D，Hou X Y，Jia M M，et al. Remote detection of shoreline changes in eastern bank of Laizhou Bay，North China[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing，2014，42(3)：621-631.

[23] 刘蕾，臧淑英，邵田田，等. 基于遥感与GIS的中国湖泊形态分析[J]. 国土资源遥感，2015，27(3)：92-98.

[24] 李玉冰，郝永杰，刘恩海. 多边形重心的计算方法[J]. 计算机应用，2005，25(S1)：391-393.

[25] 乔伟峰，刘彦随，王亚华，等. 城市三维重心算法与实验分析：以南京市为例[J]. 地理信息科学，2015，17(3)：268-273.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net