

基于遥感和 GIS 的烟台芝罘湾 海岸线变迁研究

孙贵芹¹, 徐艳东^{1*}, 林 蕾², 朱金龙¹, 赵景丽¹, 魏 潇¹

(1. 山东省海洋资源与环境研究院 山东省海洋生态修复重点实验室, 山东 烟台 264006;

2. 中国科学院 遥感与数字地球研究所, 北京 100101)

摘 要:利用 RS 和 GIS 技术,提取了 1976—2016 年间 9 个时相的芝罘湾海岸线的时空分布信息,从海岸线和海湾形态两个方面出发,分析了在人类开发活动影响下典型陆连岛地区海岸线的时空变化特征及趋势。结果表明:近 40 a 来,芝罘湾海岸线整体向海推进,海岸线长度整体增加了 15.78 km;岸线结构变化显著,自然岸线比例持续减少,人工岸线逐渐占据主导地位;3 个分岸段变化不均衡,芝罘湾西岸岸线变化最显著,而南岸变化相对较小;海湾面积逐渐向海萎缩,自 1976 年以来海湾面积减少了 7.93 km²。海湾形状指数增加了 1.08,海湾形状整体趋于复杂化;海湾重心总体上表现为不断背离陆地而趋向海洋的特点,近 40 a 来海湾重心整体向海偏移了 606.25 m。岸线分形维数整体增大,说明岸线趋于复杂化。

关键词:遥感;GIS;岸线变迁;芝罘湾

中图分类号:P748

文献标识码:A

文章编号:1617-6647(2020)01-0140-13

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2020.01.015

引用格式:SUN G Q, XU Y D, LIN L, et al. Coastline changes in the Zhifu Bay of Yantai City based on remote sensing and GIS[J]. Advances in Marine Science, 2020, 38(1): 140-152. 孙贵芹, 徐艳东, 林蕾, 等. 基于遥感和 GIS 的烟台芝罘湾海岸线变迁研究[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(1): 140-152.

海岸线是多年平均大潮高潮时形成的实际痕迹线^[1],具有复杂、敏感和多变的特征,它的变化直接影响着潮间带滩涂资源量、海岸带的环境以及沿海地区人民的生存和发展^[2]。国内外对于岸线变化的研究取得了丰硕的成果。在岸线提取方法方面,岸线类型的识别主要靠目视解译,而岸线位置的提取根据是否需要人为修改分为自动、半自动和目视解译三种方法,如:利用高分辨率 SPOT 遥感影像和精细 DEM 数据可实现岸线自动提取^[3];基于多源遥感数据,利用改进的水边线方法,结合部分实测潮位、坡度数据可提取多时相海岸线^[4];利用密度分割法、面向对象分类方法提取水边线,并结合目视解译可获取研究区海岸线^[5];基于 SPOT 影像,结合实地踏勘资料和经验,建立各类型岸线的遥感解译标志,可人工提取较为准确的岸线位置^[6]。在岸线的分析研究方面,岸线变化的研究方法经历了简单视觉定性分析、简单统计量分析、简单线性模型拟合分析、复杂非线性模型拟合分析等阶段,而岸线变化的研究内容从特征的简单描述发展为对引起岸线变化的内在机理与机制的探讨^[7],如:国外学者综合多源数据,采用地图叠加的方式,对牙买加里约米尼奥河(the Rio Minho River, Jamaica)至米尔河(the Milk River)入海口间岸线的变化进行定性分析^[8];基于航片从海陆面积变化方面对土耳其黑海中部萨姆松市(Samsun, Turkey)的海岸线变化特征进行简单定量分析^[9];综合运用 RS 和 DSAS(数字岸线分析系统)对印度^[10]、越南湄公河三角洲^[11]等地区的海岸线进行简单

收稿日期:2018-05-22

资助项目:国家海洋局海域管理技术重点实验室基金项目——典型半封闭海湾大规模围填海对水动力和海洋环境变化的影响研究-以烟台芝罘湾为例(201608);山东省海洋与渔业科技创新计划项目——莱州湾围填海时空格局变化及其管控对策研究(2017HY07)

作者简介:孙贵芹(1990-),女,研究实习员,硕士,主要从事海洋遥感和 GIS 方面研究. E-mail: sungq0507@163.com

*** 通讯作者:**徐艳东(1980-),男,副研究员,博士,主要从事海洋遥感和 GIS 方面研究. E-mail: xuyandong@163.com

(王 燕 编辑)

模型量化分析,并利用卫星影像和统计方法对孟加拉湾^[12]海岸线进行了时空变化分析和预测;基于复杂模型的 IC-bin^[13]和 T-bin^[14]局部模拟方法对夏威夷毛伊岛岸线变化速率及岸线位置进行分析和预测;而国内学者针对岸线变化的研究多集中于对岸线基本特征的分析,例如对我国大陆沿海主要海湾形态变化^[15]的研究;对我国大陆海岸线^[16-18]、北方海岸线^[2]、渤海^[19-21]、江苏^[22]、浙江^[23]、大连^[24]、长岛南五岛^[25]的海岸线时空变迁^[22-23, 25]、岸线分形特征的时空变化^[17-18, 26]及原因^[16, 20]分析等。

芝罘湾位于山东烟台市市区北部,其西侧和北侧为我国最大的陆连岛——芝罘岛。湾口向东敞开,为“U”字形半封闭式海湾,湾顶为砂质海岸,两侧是基岩海岸,湾内水深一般在 10 m 以内。该湾水域开阔,湾口东侧的崆峒岛群形成天然屏障,使得湾内浪小流稳,由此成为山东半岛北部的天然良港^[27]。随着快速城市化进程,芝罘湾受到人类活动的强烈影响,海岸线不断向海推进,大量自然岸线被占用,人工岸线比例逐渐占据主导地位,围填海面积持续增加,海湾面积不断萎缩,生态环境遭到严重破坏,这受到了一些学者的关注,随之,学者们主要开展了一些研究,包括:基于遥感和GIS技术分析了烟台典型海湾 1986—2004 年 4 个时期的海岸线长度和海湾面积的变化^[28]、烟台市海岸地区 1990—2009 年土地利用空间格局变化^[29]、1973—2014 年烟台市岸线及近岸土地利用变化^[30]、1979—2007 年芝罘区土地利用变化及芝罘连岛沙坝岸线变化^[31]以及烟台市 1990—2015 年 5 个时期的围填海动态变化及驱动力^[32]等。然而,这些研究的对象主要是整个烟台地区,截至目前尚未有系统研究芝罘湾长时段岸线变迁的报道。本文正是以芝罘湾为研究对象,开展 1976—2016 年近 40 a 长时间序列岸线时空变迁的研究,掌握 9 个不同时期的岸线时空分布特征和变化过程及海湾形态变化,以期对芝罘湾岸线的合理利用及海岸带经济的可持续发展提供重要的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

芝罘湾口门北起芝罘岛东南角($121^{\circ}25'54''\text{E}$, $37^{\circ}35'48''\text{N}$),南至东炮台山($121^{\circ}25'47''\text{E}$, $37^{\circ}37'07''\text{N}$)^[33]。根据实际研究需要,将芝罘湾口门的起止点调整为 A($121^{\circ}25'57.11''\text{E}$, $37^{\circ}35'43.67''\text{N}$)和 D($121^{\circ}25'49.73''\text{E}$, $37^{\circ}32'6.86''\text{N}$)。为进一步研究不同岸段的分异特征,将研究区岸线划分为 3 个岸段进行研究,其中芝罘岛东南角(A)至大疃岛码头西侧(B)为北岸,大疃岛码头西侧(B)至一突堤东侧(C)为西岸,一突堤东侧(C)至东炮台山(D)为南岸,研究区位置和岸段划分见图 1。

1.2 数据来源

选用芝罘湾 1976—2016 年每 5 a 为一个时期(共 9 期)Landsat 遥感影像,作为海岸线提取的数据源,数据来源于美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)网站^①和地理空间数据云网站^②。在保证影像质量的前提下,尽量选择大潮高潮

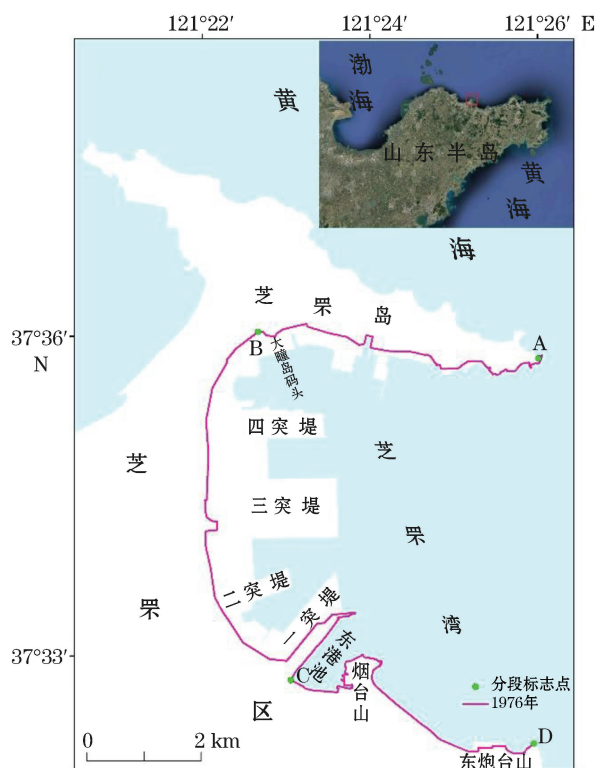


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

① <http://glovis.usgs.gov>

② <http://www.gscloud.cn>

时期的影像数据。为提高解译精度,借助谷歌地图、天地图、2004-11 的烟台市 SPOT5 融合正射校正图像进行辅助解译。本文所采用的遥感影像数据源情况见表 1。

表 1 遥感影像数据

Table 1 List of remote sensing images

遥感影像日期	卫 星	传感器	波段/个	空间分辨率/m	轨道号
1976-09-17	Landsat-2	MSS	4	60	129/34
1981-10-15	Landsat-2	MSS	4	60	129/34
1986-09-18	Landsat-5	TM	7	30	120/34
1991-04-09	Landsat-5	TM	7	30	120/34
1996-02-18	Landsat-5	TM	7	30	120/34
2001-10-29	Landsat-5	TM	7	30	120/34
2006-10-27	Landsat-5	TM	7	30	120/34
2011-09-23	Landsat-5	TM	7	30	120/34
2016-08-22	GF-1	PMS2	4	2	597/92

1.3 研究方法

1.3.1 影像处理及岸线提取

为保证遥感影像的几何精度,首先在 ENVI 5.1 中对遥感影像进行预处理,然后以一幅经过正射校正的 2016 年高分影像为基准,对 1996 年遥感影像进行几何精校正,以校正好的 1996 年影像对其他几期遥感影像分别进行配准。采用二次多项式模型,双线性内插法进行重采样,校正配准误差控制在 0.5 个像元以内。并将 9 期影像统一为高斯——克吕格投影、CGCS2000 坐标系,采用近红外、红、绿波段生成标准假彩色影像,通过线性拉伸对图像进行增强处理,综合孙伟富等^[6]、毋亭等^[7]、赵建华等^[34]的遥感监测分类方法建立各类岸线的解译标志和判绘原则,采用目视解译法获取岸线。为提高岸线解译精度和准确性,先利用 2016 年的高分遥感影像提取 2016 年芝罘湾海岸线,在此基础上,向前逐期提取各个时相下的海岸线,着重对变化的岸段进行矢量编辑。

1.3.2 岸线提取误差分析

遥感影像获取的岸线只能代表某一特定时间的海陆分界线,且岸线的提取受人为因素影响较大,导致提取结果与实际岸线存在一定差异。因此,对提取岸线进行误差分析以满足特定研究的需要是十分必要的。在缺乏足够数量的高精度实测控制点的情况下,根据 Fletcher 等^[35]、闫秋双等^[36]、毋亭等^[7]的研究,最终的岸线数据提取误差可以采用多误差综合法^[35],将岸线提取过程中的数据源误差、影像处理误差等一系列潜在的误差项计入最终的误差 E 计算中,公式为

$$E = \sqrt{e_s^2 + e_{td}^2 + e_p^2 + e_d^2 + e_r^2}, \quad (1)$$

式中, e_s 为季节误差, e_{td} 为潮差误差, e_p 为像元误差, e_d 为数字化误差, e_r 为校正误差。本文选取的遥感影像均处于春秋两个季节,且研究区自然岸线以基岩和砂质岸线为主,基本不受植被的影响,因此,季节误差(e_s)可以忽略不计;研究区大部分为人工岸线和基岩岸线,因此,受潮汐影响(e_{td})也可忽略不计;本文的岸线提取方法能达到亚像元精度,所以像元误差(e_p)也不考虑;为减小数字化误差(e_d),本文的岸线解译工作均由一人完成。因此,根据式(1),仅考虑数字化误差(e_d)和校正误差(e_r),计算的岸线提取总误差见表 2。

高山^[37]、侯西勇等^[38]研究表明,60,30 和 2 m 分辨率遥感影像线要素提取的最大允许误差分别为 56.57,28.28 和 1.89 m。本文的岸线提取误差均小于一个像元,明显小于理论最大允许误差,表明岸线提取的方案是可行的。为了进一步验证本文误差分析方法的有效性,利用 2005 年的“我国近海海洋综合调查与评价专项”(简称“908 专项”)修测岸线对提取的 2006 年岸线进行精度验证,结果表明,提取的 2006 年岸线

到“908 专项”修测岸线的标准偏差为 13.81 m,与本文所采用的误差分析方法得到的岸线总误差(11.37 m)较为接近。因此,本文的岸线提取方法是可行的,能够满足岸线遥感解译的精度要求。

表 2 研究区岸线提取总误差

Table 2 Uncertain of coastline extraction in the study area

年 份	空间分辨率/m	总误差/m	理论最大允许误差/m	年 份	空间分辨率/m	总误差/m	理论最大允许误差/m
1976	60	30.01	56.57	2001	30	10.83	28.28
1981	60	27.56	56.57	2006	30	11.37	28.28
1986	30	14.13	28.28	2011	30	10.61	28.28
1991	30	12.27	28.28	2016	2	1.08	1.89
1996	30	10.36	28.28				

注:空白处无数据

1.3.3 海湾形状指数

海湾形状指数是指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度;值越小,海湾形状越规则、简单;反之,则越复杂。海湾形状指数(SIB)计算式^[15]为

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

式中, P 为海湾周长(m); A 为海湾面积(m²)。

1.3.4 海湾重心

在二维平面空间中,计算得到海湾几何重心,其空间位移的方向、路径和距离可以反映出海湾形态变化的基本特征^[15]。海湾重心坐标(x, y)、重心位移距离 L 计算式^[39]为

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

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

式中, $x_i, y_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为海湾平面离散点的坐标; x_j, y_j 为 j 时相重心坐标; x_k, y_k 为 k 时相重心坐标。

1.3.5 岸线分形维数

Mandelbrot 于 20 世纪 60 年代创立了分形理论^[40],之后,该理论得到了广泛应用。由于分形维数不随尺度的变化而变化,因此它能较精确地反映岸线形态的弯曲与复杂程度。分形维数越高,岸线的弯曲度与复杂度就越高。岸线分形维数的计算通常采用 2 种方法:网格法和量规法。

1) 网格法

网格法的计算式^[26]为

$$\lg N(r) = -D \lg r + A, \quad (5)$$

式中, r 为网格长度, $N(r)$ 为网格数目, A 为常数, D 为岸线分形维数。

参照航空摄影测量内业规范中的规定^[41],本文采用的比例尺分母(Q)为 10 000, 15 000, 25 000, 30 000, 35 000, 50 000, 60 000, 75 000, 90 000 和 100 000,依据网格的边长转换模型($r=0.3 \times Q/1\ 000$)^[42],计算获得比例尺对应的网格边长分别为 3.0, 4.5, 7.5, 9.0, 10.5, 15.0, 18.0, 22.5, 27.0 和 30.0 m。

2) 量规法

前人^[17,43]应用量规法测量海岸线分维没有实现自动化,均采用传统的手工作业进行量算。尽管精度较高,但工作量大,费时费力。本文利用 Matlab 中的编程模块实现了输入不同的尺子 r 值,能输出相应的线段数 N 以及岸线长度 L 的功能,极大地提高了工作效率。基于此,采用与网格法相同的尺子长度和计算式来计算岸线的量规维。

2 结果与讨论

2.1 海岸线变迁分析

2.1.1 海岸线总体变迁情况

1976—2016 年 9 个时期的芝罘湾海岸线长度和海湾面积变化情况见图 2 和表 3,统计结果表明:1)近 40 a 来芝罘湾海岸线长度总体呈不断增长的趋势,其中岸线长度自 1976—2011 年持续增加,仅在 2011—2016 年略有缩短。1976—2016 年海岸线长度整体增加了 15.78 km,较 1976 年,2016 年岸线长度增加了 66.17%,年均增加 0.39 km,说明芝罘湾海岸线受到人为开发活动的强烈影响。1976—1981 年、1981—1986 年、1991—1996 年和 2006—2011 年四个时段岸线长度增长较快,变化百分比介于 7.24%~16.24%,其中以 1976—1981 年长度增加最快,变化百分比为 16.24%;1986—1991 年、1996—2001 年、2001—2006 年、2011—2016 年四个时段岸线变化较慢,其中 1996—2001 年仅增加了 0.48 km,变化百分比仅为 1.35%,2011—2016 年间海岸线长度减少了 0.49 km,变化百分比为-1.21%,海岸线长度变化速率呈现不均衡性的特点。2)近 40 a 来,芝罘湾海湾面积由 1976 年的 34.16 km² 减少至 2016 年的 26.23 km²,面积减少了 23.21%,年均面积减少了 0.20 km²,总体上呈不断减小趋势。芝罘湾海岸整体保持向海前进的趋势,向陆后退的区域较少,只有南岸烟台山至东炮台岸段的砂质岸线因侵蚀作用有相对明显的向陆后退现象。1981—1986 年和 1996—2001 年海湾面积变化较大,其面积分别减少了 1.72 和 1.70 km²,变化率均为-0.34 km²/a;而 2001—2006 年和 2011—2016 年海湾面积变化较小,分别减少了 0.21 和 0.26 km²,变化率分别为-0.04 和-0.05 km²/a,所以,海湾面积变化呈现时间和空间变化不均衡性。

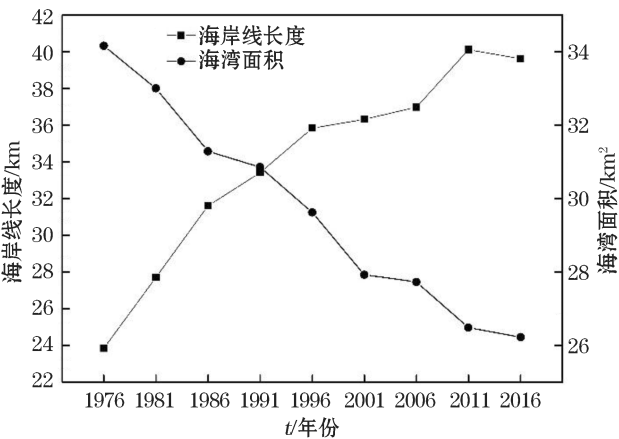


图 2 芝罘湾 1976—2016 年海岸线长度及海湾面积
Fig.2 Changes of the coastline length and bay area of the Zhifu Bay from 1976 to 2016

表 3 芝罘湾 1976—2016 年海岸线长度、面积变化情况

Table3 The changes of coastline length and bay area of the Zhifu Bay from 1976 to 2016

时 段	海岸线长度		海湾面积	
	变化率/(km·a ⁻¹)	变化百分比/%	变化率/(km ² ·a ⁻¹)	变化百分比/%
1976—1981 年	0.77	16.24	-0.23	-3.40
1981—1986 年	0.78	14.06	-0.34	-5.20
1986—1991 年	0.36	5.70	-0.09	-1.37
1991—1996 年	0.48	7.24	-0.24	-3.97
1996—2001 年	0.10	1.35	-0.34	-5.75
2001—2006 年	0.13	1.81	-0.04	-0.74
2006—2011 年	0.63	8.47	-0.25	-4.46
2011—2016 年	-0.10	-1.21	-0.05	-0.96
1976—2016 年	0.39	66.17	-0.20	-23.21

注:负值表示后一期相对前一期数值减少

整体上,芝罘湾自然岸线长度和比例显著减少,而人工岸线迅速增加(图 3a)。1976—2016 年,自然岸线长度由 13.58 km 减少至 5.10 km,比例由 56.93%减少至 12.88%,人工岸线长度由 10.27 km 增长至 34.52 km,比例由 43.07%增加至 87.12%。40 a 间自然岸线长度减少了 8.48 km,年均减少接近 200 m;人工岸线长度增加了 25.25 km,年均增加约 600 m。其中,以 1976—1981 年岸线长度变化最为显著,自然岸线长度减少 3.68 km 的同时,人工岸线长度增加了 7.55 km;其次为 1981—1986 年和 1991—1996 年两个时段岸线(自然岸线长度分别减少了 1.94 和 1.68 km,其人工岸线长度分别增加了 5.84 和 4.09 km)。

2.1.2 海岸线变迁分段研究

芝罘湾北岸主要岸线类型变化见图 3b,岸线长度整体呈现增加趋势,由 1976 年的 6.51 km 增加到 2016 年的 11.21 km,年均增长 0.12 km。其中 1991—1996 年岸线缩短,1996—2006 年岸线基本稳定,其他时段岸线呈现增加趋势,但增速缓慢。

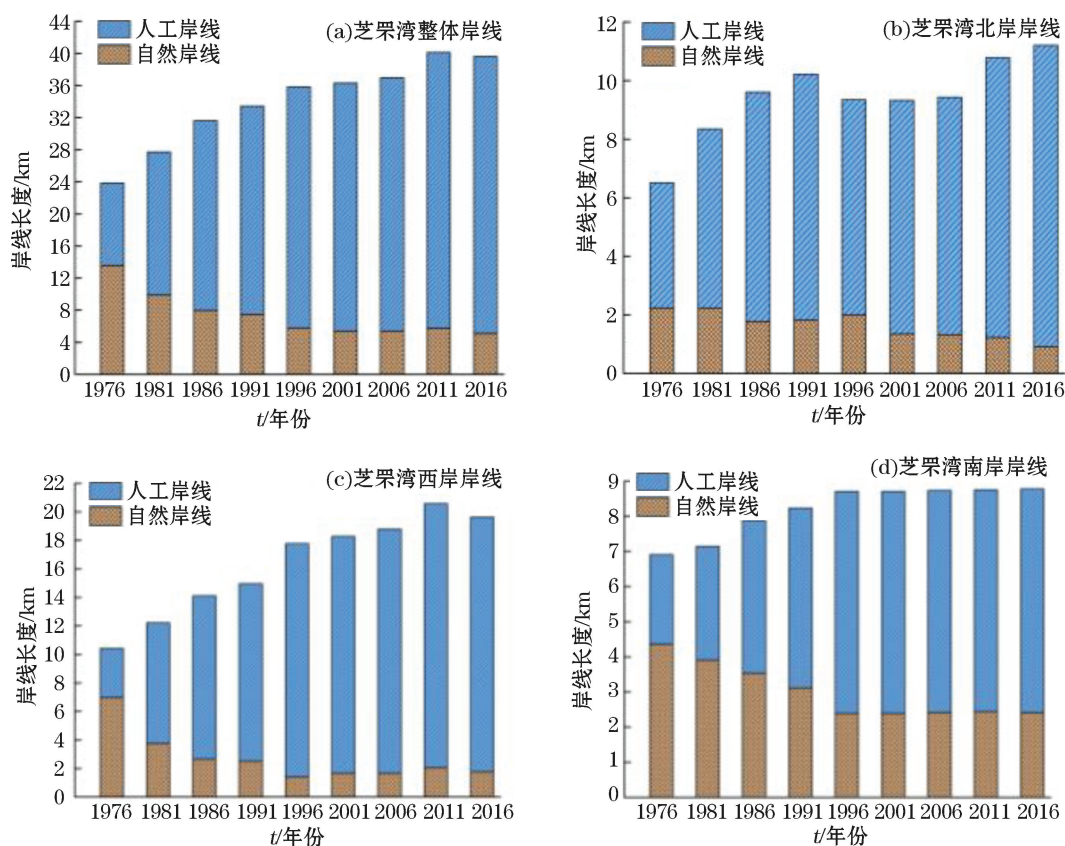


图 3 1976—2016 年芝罘湾岸线分类变化

Fig.3 Changes of the coastline types in the Zhifu Bay from 1976 to 2016

自然岸线的长度和比例逐渐降低,由 1976 年的 2.24 km(34.42%)下降至 2016 年的 0.92 km(8.21%),岸线长度减少了近 60%,而人工岸线的长度和比例却增长较快,由 1976 年的 4.27 km(65.58%)上升至 2016 年的 10.29 km(91.79%),岸线长度增加了近 1.4 倍。近 40 a 来,自然岸线长度减少了 1.32 km,年均减少约 35 m;人工岸线长度增加了 6.02 km,年均增加约 150 m。

芝罘湾西岸主要岸类型变化见图 3c,岸线长度整体增加,由 1976 年的 10.43 km 增加到 2016 年的 19.64 km,年均增长 0.23 km。其中 1976—2011 年岸线长度整体增加,仅有 2011—2016 年波动减少,岸线变化显著,与芝罘湾整体岸线长度的变化趋势基本一致;1991—1996 年岸线长度增速最快,年均增长 0.56 km,1996—2001 年岸线长度增速最慢,年均增长 0.10 km,2011—2016 年岸线缩短,年均减少 0.19 km,减小趋势

不均衡。自然岸线的长度和比例迅速降低,由 1976 年的 6.98 km(66.91%)下降至 2016 年的 1.78 km(9.05%),岸线长度减少了近 75%,而人工岸线的长度和比例却增长较快,由 1976 年的 3.45 km(33.09%)上升至 2016 年的 17.86 km(90.95%),岸线长度增加了近 4.2 倍。近 40 a 来,自然岸线长度减少了 5.20 km,年均减少 130 m;人工岸线长度增加了 14.41 km,年均增加 360 m。

芝罘湾南岸主要岸线类型变化见图 3d,岸线长度变化相对较小(图 3d),由 1976 年的 6.91 km 增加到 2016 年的 8.78 km,年均增长 0.05 km。其中岸线长度自 1976—1996 年整体持续增加,且 1981—1986 年岸线长度增速最快,年均增长 0.15 km,至 1996 年以后岸线基本保持稳定。自然岸线的长度和比例逐渐降低,由 1976 年的 4.36 km(63.06%)下降至 2016 年的 2.41 km(27.42%),岸线长度减少了近 45%,而人工岸线的长度和比例却增长较快,由 1976 年的 2.55 km(36.94%)上升至 2016 年的 6.37 km(72.58%),岸线长度增加了近 1.5 倍。近 40 a 来,自然岸线长度减少了 1.95 km,年均减少约 50 m;人工岸线长度增加了 3.82 km,年均增加约 100 m。

2.2 海湾形状指数时空动态分析

由各个时相的海湾形状指数(图 4)可知,2016 年芝罘湾海湾形状指数较 1976 年增加了 1.08,整体表现为逐年增加的态势,仅 2011—2016 年略微减小,这表明海湾的形状总体上趋于复杂化。分时段统计结果表明,1976—1986 年和 2006—2011 年海湾形状指数增长较快,年均增长了 0.05;而 2011—2016 年海湾形状指数略微减小,减少了 0.01。海湾形状指数的增大主要是由于以围填海为主要特征的岸线变化提高了海湾形状的复杂性。

2.3 海湾重心位移特征

芝罘湾不同时段重心的位移距离计算结果表明(表 4 和图 5),近 40 a 来,芝罘湾海湾重心整体向海移动了 606.25 m,偏移速率为 15.16 m/a,海湾重心处于较为活跃的状态。不同时段海湾重心的位移特征呈显著差异,1996—2001 年海湾重心向海移动距离最大为 167.57 m,偏移速率为 33.51 m/a;其次是 1981—1986 年,偏移速率为 27.30 m/a;1991—1996 年偏移速率为 20.33 m/a;2011—2016 年海湾重心位移最小,向海移动了 15.99 m,偏移速率为 3.20 m/a。但是海湾重心的位移总体上表现为不断背离陆地而趋向海洋的特点,与围填海所导致的海湾面积的萎缩方向和岸线空间位置的整体移动方向一致。

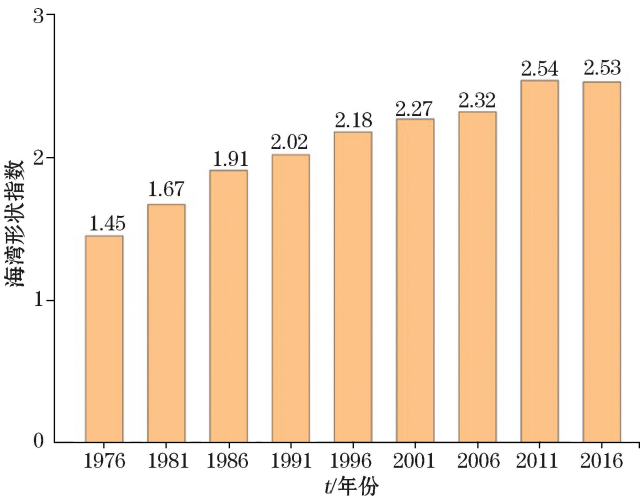


图 4 芝罘湾 1976—2016 年海湾形状指数变化情况

Fig.4 Changes of gulf shape index in the Zhifu Bay from 1976 to 2016

表 4 芝罘湾 1976—2016 年海湾重心偏移情况

Table 4 Gulf-centroid shifting in the Zhifu Bay from 1976 to 2016

时 段	重心偏移量/m	偏移速率/(m · a ⁻¹)	时 段	重心偏移量/m	偏移速率/(m · a ⁻¹)
1976—1981 年	91.00	18.20	2001—2006 年	19.04	3.81
1981—1986 年	136.52	27.30	2006—2011 年	94.73	18.95
1986—1991 年	22.15	4.43	2011—2016 年	15.99	3.20
1991—1996 年	101.65	20.33	1976—2016 年	606.25	15.16
1996—2001 年	167.57	33.51			

注:空白处无数据

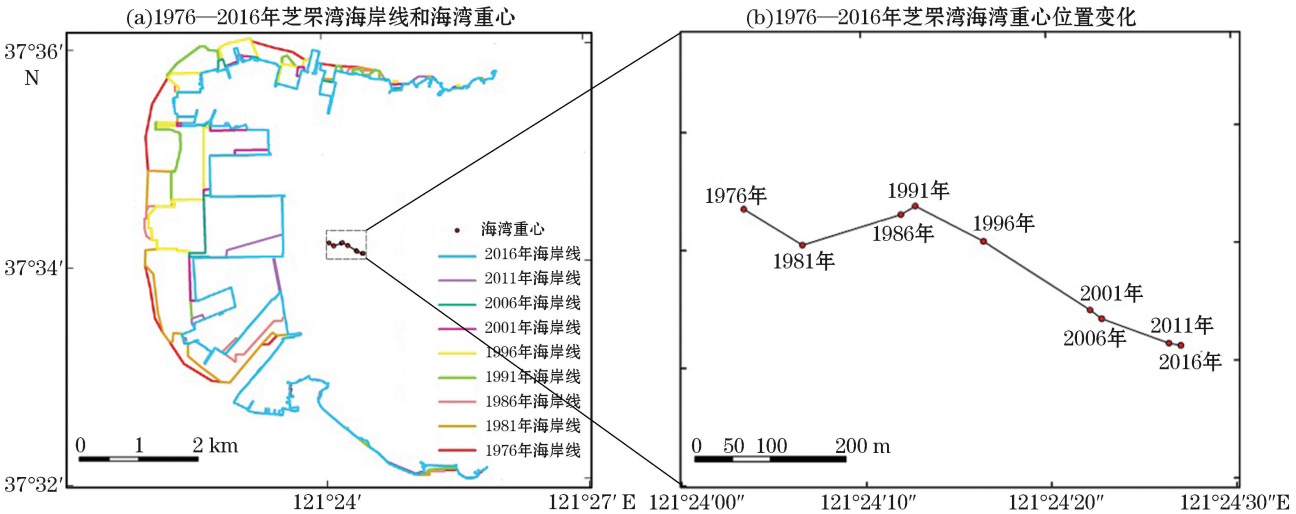


图 5 芝罘湾 1976—2016 年海湾重心偏移情况
Fig.5 Gulf-centroid shifting in the Zhifu Bay from 1976 to 2016

2.4 岸线分维数时空变化特征

2.4.1 网格法

根据各尺度(r)所对应的网格数目(N),基于 ArcGIS 中的 ArcToolbox 转栅格功能模块,计算获得芝罘湾各时期岸线的分形维数,结果如表 5 所示。

本文获取的拟合系数(R^2)均大于 0.999 8,表明拟合获取的分形维数值均精确可用。分维数变化整体呈现增加的趋势,由 1976 年的 1.007 8 增加到 2016 年的 1.033 2,增加了 2.52%。其中 1976—2006 年分维数持续增加,2006—2011 年略有减小,至 2011—2016 年保持稳定。这与海岸线长度的变化趋势基本一致,表明随着我国海域使用方式的不断优化和海域使用管理的加强,海岸线的分形维数不断增大,海岸线变得越来越复杂。1981—1986 年分维数增幅最大,增长了 0.013 7,而 2006—2011 年分维数则减少了 0.002 6。海岸线分维数不同时段出现波动,表明受人为因素影响较大。

表 5 网格法网格数和分形维数
Table 5 The fractal dimension of the box-counting method

年 份	网格边长										R^2	分形维数
	3.0 m	4.5 m	7.5 m	9.0 m	10.5 m	15.0 m	18.0 m	22.5 m	27.0 m	30.0 m		
1976	9 836	6 558	3 931	3 261	2 794	1 954	1 629	1 299	1 077	962	1.000 0	1.007 8
1981	11 282	7 529	4 501	3 737	3 190	2 234	1 866	1 482	1 234	1 101	1.000 0	1.009 2
1986	12 859	8 577	5 107	4 246	3 619	2 529	2 085	1 655	1 371	1 214	0.999 9	1.022 9
1991	13 574	9 044	5 411	4 475	3 828	2 658	2 198	1 735	1 438	1 263	0.999 8	1.027 7
1996	14 403	9 595	5 742	4 745	4 060	2 817	2 328	1 837	1 523	1 345	0.999 9	1.027 8
2001	14 533	9 678	5 782	4 819	4 103	2 832	2 322	1 832	1 522	1 351	0.999 8	1.032 8
2006	14 853	9 886	5 885	4 914	4 175	2 879	2 372	1 860	1 548	1367	0.999 8	1.035 8
2011	16 101	10 711	6 390	5 289	4 537	3 144	2 570	2 020	1 677	1 498	0.999 8	1.033 2
2016	15 845	10 541	6 290	5 224	4 465	3 073	2 537	1 999	1 655	1 467	0.999 8	1.033 2

2.4.2 量规法

量规法的思路是使用不同长度的尺子去度量同一段海岸线,海岸线的长度 $L(r)$ 由尺子长度 r 和尺子测量的次数 $N(r)$ 来决定。尺子的长度越小,测得的海岸线长度越接近被测量海岸线长度的实际值^[44]。基于自编的 Matlab 程序,采用 10 个量测尺度(r)计算获得芝罘湾各时期岸线的量规维(表 6)。

量规法获取的拟合系数(R^2)均不低于 0.999 9,表明拟合获取的分形维数值均精确可用。分维数变化整体呈现增加的趋势,由 1976 年的 1.016 1 增加到 2016 年的 1.034 2,增加了 1.78%,仅有 2006—2011 年分维数变化出现短暂的小幅逆转,由 2006 年的 1.033 9 减少到 2011 年的 1.033 0;分维数增幅最大的时段出现在 1981—1986 年,增长了 0.007 6,分维数变化规律与网格法所得结果基本一致,表明海岸线在人为影响下变得越来越复杂。

表 6 量规法分形维数
Table 6 The fractal dimension of the divider method

年 份	网格边长										R^2	分形维数
	3.0 m	4.5 m	7.5 m	9.0 m	10.5 m	15.0 m	18.0 m	22.5 m	27.0 m	30.0 m		
1976	7 888	5 246	3 129	2 604	2 227	1 546	1 282	1 023	846	763	1.000 0	1.016 1
1981	9 155	6 081	3 627	3 013	2 576	1 783	1 479	1 174	972	873	1.000 0	1.021 9
1986	10 421	6 914	4 117	3 414	2 919	2 017	1 666	1 321	1 091	974	0.999 9	1.029 5
1991	11 015	7 307	4 349	3 608	3 080	2 127	1 760	1 393	1 155	1 029	0.999 9	1.029 6
1996	11 800	7 831	4 661	3 868	3 297	2 278	1 884	1 490	1 233	1 100	0.999 9	1.031 0
2001	11 951	7 927	4 714	3 910	3 334	2 303	1 902	1 504	1 243	1 111	0.999 9	1.032 6
2006	12 164	8 064	4 794	3 977	3 388	2 337	1 937	1 531	1 261	1 125	0.999 9	1.033 9
2011	13 200	8 754	5 201	4 322	3 686	2 540	2 101	1 660	1 373	1 225	0.999 9	1.033 0
2016	13 221	8 770	5 203	4 322	3 676	2 539	2 104	1 662	1 369	1 223	0.999 9	1.034 2

2.4.3 网格法和量规法分维数对比分析

无论是网格法还是量规法,分形维数的变化规律基本一致,即整体上呈现增大的趋势,其中 1981—1986 年分维数增幅最大,2006—2011 年分维数略有减小,这表明海岸线在这 2 个时段受人类活动影响比较剧烈。另外,本文只是计算了海岸线整体的分维,没有再分岸段分别计算岸线分维数,实际上每一段岸线内部的不规则程度还存在差异,特别是芝罘湾西部的岸线差异更为明显。如果再细分不同岸段进行分维和长度计算,将更加符合客观实际。

根据前人的研究成果,不同比例尺下,网格法测量的岸线分维数值普遍小于量规法,而量规法比网格法更能准确地表征海岸线的不规则程度^[46]。本文中就分形维数而言,2001—2011 年网格法的计算结果大于量规法,其他时段均小于量规法(表 7,图 6),这与前人的研究结果存在一些差异,可能是由于不同比例尺下岸线的曲折程度存在差异以及量规法自动计算程序的误差共同导致的。

表 7 量规法与基于 GIS 的岸线实际长度对比

Table 7 Coastline lengths derived from the divider method and GIS

年 份	量规法岸线长度/m	岸线实际长度/m
1976	23 664	23 845
1981	27 465	27 717
1986	31 263	31 613
1991	33 045	33 417
1996	35 400	35 837
2001	35 853	36 320
2006	36 492	36 977
2011	39 600	40 110
2016	39 663	39 624

注:量规法中 $r=3.0$ m

当尺度 r 取值为 3.0 m 时,量规法计算的岸线长度整体小于用 ArcGIS 统计得出的实际岸线长度(表 7),可能受岸线矢量数据离散点的数目影响,也可能是由于 Matlab 中量规法的实现程序存在一定的误差,程序中只计算了不同标尺 r 所对应的线段的整数部分,剩余的不足一个标尺 r 的岸线没有计入最终岸线长度的计算结果,但是作为一种量度方法,Matlab 编程算法实现量规法的自动计算,基本满足研究需求,且极大地提高了工作效率。

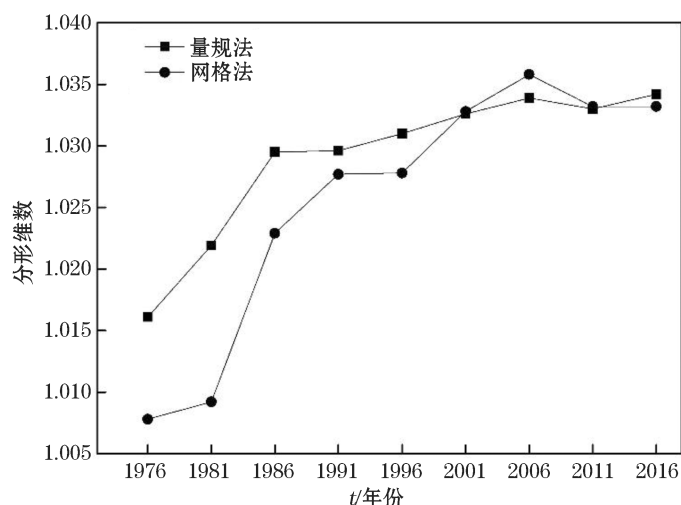


图 6 量规法和网格法分维数

Fig.6 The fractal dimension by the divider and box-counting method

2.5 岸线变迁原因分析

近 40 a 来,芝罘湾岸线的时空变化是自然因素和人类活动共同作用的结果,但是从岸线主要类型变化以及海湾面积的变化特征可以看出,以围填海为主的人类活动是导致岸线变迁的主要因素。

整体来讲,1976—1986 年、1991—2001 年、2006—2011 年芝罘湾岸线变化较为显著。这主要是经济和社会因素共同作用的结果。自 1978 年改革开放以来,随着近海水生生物养殖业的迅速发展,海水养殖区的面积不断扩大,从而使得海湾面积大幅减少,人工岸线比例也随之增大。1990 年以后,海湾岸线开发进程逐渐加快,芝罘连岛沙坝东侧港口及城镇建设等,导致围填海面积日益增加。至 2004 年,国家修订了《中华人民共和国土地管理法》,开始实行国有土地有偿使用制度,围填海造地因成本低廉、经济收益大而成为沿海地区解决土地瓶颈的便捷方式。“十一五”计划以来,烟台市贯彻海洋发展规划的要求,着力发展港口及滨海旅游业等海洋产业,使得围填海规模进一步扩大,至 2009 年出现围填海面积的激增。因此,2010 年国家海洋局开始对围填海实行指标化,此后围填海的热潮开始消退。

分岸段研究结果表明,芝罘湾西岸岸线变化最显著,北岸变化次之,南岸变化最小。西岸岸线的变化主要是烟台港等港口码头堤坝的建设活动造成的;北岸岸线的变化主要源于填海造陆以及围海修建养殖堤坝;而南岸,由于烟台山至东炮台岸段存在较为稳定的自然岸线,变化相对较小,引起变化的原因主要是建设海水浴场和其他旅游设施。

3 结 论

利用遥感和 GIS 技术提取了芝罘湾 1976—2016 年 9 个时相的海岸线信息,并从 5 个方面分析了芝罘湾岸线的时空动态特征,得到主要结论:

1) 海岸线长度整体增加,而海湾面积却整体减少。1976—2016 年的 40 a 间芝罘湾海岸线在人为和自然

因素的综合作用下整体向海推进,海岸线长度整体增加了 15.78 km。各时段、各岸段海岸线年均变化不均衡,波动较大,其中西岸变化最大,南岸变化最小。岸线结构变化显著,自然岸线比例持续减少,人工岸线逐渐占据主导地位。分形维数整体增大,表明岸线趋于复杂化。而海湾面积逐渐向海萎缩,自 1976 年到 2016 年海湾面积减少了 7.93 km²,海湾面积的减少主要受近岸养殖以及港口建设等因素的影响。

2)1976—2016 年芝罘湾海湾形状指数增加了 1.08,海湾形状整体趋于复杂化,海湾重心总体上表现为不断背离陆地而趋向海洋的特点,与围填海所导致的海湾面积的萎缩方向和岸线空间位置的整体移动方向一致。近 40 a 来海湾重心整体向海偏移了 606.25 m,各时段海湾重心偏移速率波动较大。

参考文献(References):

- [1] 908 Special Office of the State Oceanic Administration. Coastal survey technical regulations[M]. Beijing: China Ocean Press, 2005. 国家海洋局 908 专项办公室. 海岸带调查技术规程[M]. 北京: 海洋出版社, 2005.
- [2] XU J Y, ZHANG Z X, ZHAO X L, et al. Spatial and temporal variations of coastlines in northern China (2000—2012)[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(1): 18-32.
- [3] LIU S W, ZHANG J, MA Y, et al. Coastline extraction method based on remote sensing and DEM[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(5): 613-618. 刘善伟, 张杰, 马毅, 等. 遥感与 DEM 相结合的海岸线高精度提取方法[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(5): 613-618.
- [4] CHEN W T, ZHANG D, CUI D D, et al. Monitoring spatial and temporal changes in the continental coastline and the intertidal zone in Jiangsu province, China[J]. 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[J]. 地理学报, 2018, 73(7): 1365-1380.
- [5] LI M M, ZHANG C Y, LIN R. Analysis of shoreline and tidal flat based on remote sensing in Dadeng Island of Xiamen[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2018(1): 85-91. 李萌萌, 张彩云, 林锐. 基于遥感技术的厦门大嶝岛海岸线与潮滩变迁分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2018(1): 85-91.
- [6] SUN W F, MA Y, ZHANG J, et al. Study of remote sensing interpretation keys and extraction technique of different types of shoreline [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2011(3): 41-44. 孙伟富, 马毅, 张杰, 等. 不同类型海岸线遥感解译标志建立和提取方法研究 [J]. 测绘通报, 2011(3): 41-44.
- [7] WU T, HOU X Y. Review of research on coastline changes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(4): 1170-1182. 毋亭, 侯西勇. 海岸线变化研究综述[J]. 生态学报, 2016, 36(4): 1170-1182.
- [8] ROBINSON E. Coastal changes along the coast of Vere, Jamaica over the past two hundred years: data from maps and air photographs [J]. Quaternary International, 2004, 120(1): 153-161.
- [9] SESLI F A. Mapping and monitoring temporal changes for coastline and coastal area by using aerial data images and digital photogrammetry; a case study from Samsun, Turkey[J]. International Journal of the Physical Sciences, 2010, 5(10): 1567-1575.
- [10] SHEIK M, CHANDRASEKAR. A shoreline change analysis along the coast between Kanyakumari and Tuticorin, India, using digital shoreline analysis system[J]. Geo-spatial Information Science, 2011, 14(4): 282-293.
- [11] LAM-DAO N, PHAM-BACH V, NGUYEN-THANH M, et al. Change detection of land use and riverbank in Mekong Delta, Vietnam using time series remotely sensed data[J]. Journal of Resources and Ecology, 2011, 2(4): 370-374.
- [12] MAITI S, BHATTACHARYA A K. Shoreline change analysis and its application to prediction: a remote sensing and statistics based approach[J]. Marine Geology, 2009, 257(1): 11-23.
- [13] FRAZER L N, GENZ A S, FLETCHER C H. Toward parsimony in shoreline change prediction (I): basis function methods[J]. Journal of Coastal Research, 2009, 25(2): 366-379.
- [14] GENZ A S, FRAZER L N, FLETCHER C H. Toward parsimony in shoreline change prediction (II): applying basis function methods to real and synthetic data[J]. Journal of Coastal Research, 2009, 25(2): 380-392.
- [15] HOU X Y, HOU W, WU T. Shape changes of major gulfs along the mainland of China since the early 1940s[J]. 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[J]. 地理学报, 2016, 71(1): 118-129.
- [16] GAO Z Q, LIU X Y, NING J C, et al. Analysis on changes in coastline and reclamation area and its causes based on 30-year satellite data in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(12): 140-147. 高志强, 刘向阳, 宁吉才, 等. 基于遥感的近 30 a 中国海岸线和围填海面积变化及成因分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(12): 140-147.

- [17] MA J H, LIU D X, CEHN Y Q, et al. Random prefractal dimension and length uncertainty of the continental coastline of china[J]. Geographical Research, 2015, 34(2): 319-327. 马建华, 刘德新, 陈衍球, 等. 中国大陆海岸线随机前分形分维及其长度不确定性探讨[J]. 地理研究, 2015, 34(2): 319-327.
- [18] 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, 46(8): 1065-1075. 侯西勇, 毋亭, 侯婉, 等. 20 世纪 40 年代初以来中国大陆海岸线变化特征[J]. 中国科学: 地球科学, 2016, 46(8): 1065-1075.
- [19] ZHU L H, WU J Z, XU Z Q, et al. Coastline movement and change along the Bohai Sea from 1987 to 2012[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2014, 8(1): 5230-5237.
- [20] XU N, GAO Z Q, NING J C. Analysis of the characteristics and causes of coastline variation in the Bohai Rim (1980—2010)[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(8): 719-4-719-11.
- [21] WU P Q, ZHANG J, MA Y, et al. Coastline dynamics monitoring and analysis around the Bohai Sea using remote sensing images during 2010 and 2015[J]. Advances in Marine Science, 2018, 36(1): 128-138. 吴培强, 张杰, 马毅, 等. 2010—2015 年环渤海海岸线时空变迁监测与分析[J]. 海洋科学进展, 2018, 36(1): 128-138.
- [22] LI X, ZHANG L P, JI C C, et al. Spatiotemporal changes of Jiangsu coastline: a remote sensing and GIS approach[J]. Geographical Research, 2014, 33(3): 414-426. 李行, 张连蓬, 姬长晨, 等. 基于遥感和 GIS 的江苏省海岸线时空变化[J]. 地理研究, 2014, 33(3): 414-426.
- [23] YE M Y, LI J L, SHI X L, et al. Spatial pattern change of the coastline development and utilization in Zhejiang from 1990 to 2015[J]. 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[J]. 地理研究, 2017, 36(6): 1159-1170.
- [24] WANG X G, LI X Y, JIA M M, et al. Analysis on changes in coastline and reclamation in Dalian from 1975 to 2015[J]. 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[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(1): 87-93.
- [25] KANG B, LIN N, XU W B, et al. Spatial-temporal changes of the coastline in Five South Island of Long Island in recent three decades on RS and GIS[J]. Marine Science Bulletin, 2017, 36(5): 585-593. 康波, 林宁, 徐文斌, 等. 基于遥感和 GIS 的长岛南五岛近 30 年海岸线时空变迁分析[J]. 海洋通报, 2017, 36(5): 585-593.
- [26] WU T. Analysis of spatio-temporal characteristics of mainland coastline changes in China in nearly 70 years[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015. 毋亭. 近 70 年中国大陆岸线变化的时空特征分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [27] China Bay Compilation Committee. China bay: the third volume[M]. Beijing: China Ocean Press, 1991. 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志: 第三分册[M]. 北京: 海洋出版社, 1991.
- [28] GONG L X, JIN B F, LI J Y. The changing of typical bay coastline in Yantai in recent 20 years[J]. Marine Science, 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[J]. 海洋科学, 2008, 32(11): 64-68.
- [29] MA J W, ZHOU D, WANG J P, et al. Study on the spatial and temporal variation of land use changes in Yantai coastland[J]. Geospatial Information, 2011, 9(4): 125-130. 马金卫, 周迪, 王静璞, 等. 烟台市海岸地区土地利用变化时空分异研究[J]. 地理空间信息, 2011, 9(4): 125-130.
- [30] DING R N, WANG Y M. Analysis of the change in the land-use of the coastal area and its ecological service value effects in Yantai city over the past 40 years[J]. Research Soil And Water Conservation, 2017, 24(1): 322-327. 丁偌楠, 王玉梅. 近 40 年烟台市海岸线及近岸土地利用变化与生态服务价值效应分析[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 322-327.
- [31] DI X H, WANG Z L, WANG Q, et al. Effects of land use on the development of coastal zone near the Zhifu Island tombolo[J]. Marine Science, 2011, 35(8): 76-82. 邸向红, 王周龙, 王庆, 等. 土地利用变化对芝罘连岛沙坝附近海岸带的影响[J]. 海洋科学, 2011, 35(8): 76-82.
- [32] SHI C X. The Dynamic change of reclamation and its impacts on Marine environment during recent years in Yantai[D]. Yantai: Ludong University, 2017. 时春晓. 近年来烟台市围填海动态变化及其对海洋环境的影响[D]. 烟台: 鲁东大学, 2017.
- [33] ZHENG P Y, WANG J X. Research on the development of harbor in Shandong[M]. Beijing: China Ocean Press, 1993. 郑培迎, 王吉信. 山东港湾开发研究[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- [34] ZHAO J H, SUO A N, XU J P, et al. Remote sensing monitoring technology in the sea area[M]. Beijing: China Ocean Press, 1991. 赵建华, 索安宁, 徐京萍, 等. 海域使用遥感监测技术[M]. 北京: 海洋出版社, 2017.
- [35] FLETCHER C, ROONEY J, BARBEE M, et al. Mapping shoreline change using digital orthophotogrammetry on Maui, Hawaii[J]. Journal of Coastal Research, 2003, 19(38): 106-124.
- [36] YAN Q S, LIU R J, MA Y. Remote sensing analysis of shoreline changes along the coast near the Sheyang River Estuary of Jiangsu Province since 1973[J]. Marine Sciences, 2015, 39(9): 94-100. 闫秋双, 刘荣杰, 马毅. 1973 年以来射阳河口附近海岸侵蚀淤积变化遥感分

- 析[J]. 海洋科学, 2015, 39(9): 94-100.
- [37] GAO S. Analysis on interpretation quality of images in geological remote sensing investigation of railway engineering[J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2010, 36(3): 28-31. 高山. 铁路工程地质遥感调查中的图像解译质量分析[J]. 铁道勘察, 2010, 36(3): 28-31.
- [38] HOU X Y, WU T, WANG Y D, et al. Extraction and accuracy evaluation of multi-temporal coastlines of mainland China since 1940s [J]. *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 [J]. 海洋科学, 2014, 38(11): 66-73.
- [39] LI Y B, HAO Y J, LIU E H. Calculation method of the center of polygon[J]. *Journal of Computer Application*, 2005, 25(b12): 391-393. 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(b12): 391-393.
- [40] MANDELBROT B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension[J]. *Science*, 1967, 156(3775): 636.
- [41] National Technical Committee for Geographical Information. Specifications for aerophotogrammetric office operation of 1:25 000 1:50 000 1:100 000 topographic maps: GB/T 12340—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. 全国地理信息标准化技术委员会. 1:25 000 1:50 000 1:100 000 地形图航空摄影测量内业规范: GB/T 12340—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [42] GAO Y, SU F Z, ZHOU C H, et al. Scale effects of China mainland coastline based on fractal theory[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(3): 331-339. 高义, 苏奋振, 周成虎, 等. 基于分形的中国大陆海岸线尺度效应研究[J]. 地理学报, 2011, 66(3): 331-339.
- [43] FENG Y J, YUAN J Y, SONG L J, et al. Coastline mapping and change detection along Hangzhou Bay using remotely sensed imagery [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2015, 30(2): 345-352. 冯永玖, 袁佳宇, 宋丽君, 等. 杭州湾海岸线信息的遥感提取及其变迁分析[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(2): 345-352.
- [44] ZHU X H. Coastline fractal dimension calculation methods and their comparative study[J]. *Advances in Marine Science*, 2002, 20(2): 31-36. 朱晓华. 海岸线分维数计算方法及其比较研究[J]. 海洋科学进展, 2002, 20(2): 31-36.

Coastline Changes in the Zhifu Bay of Yantai City Based on Remote Sensing and GIS

SUN Gui-qin¹, XU Yan-dong¹, LIN Lei², ZHU Jin-long¹, ZHAO Jing-li¹, WEI Xiao¹

(1. *Shandong Provincial Key Laboratory of Restoration for Marine Ecology, Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Yantai 264006, China;*

2. *Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

Abstract: The temporal and spatial distribution of the coastlines in the Zhifu Bay from 1976 to 2016 was extracted with remote sensing (RS) and Geographic Information System (GIS). The characteristics and trends of the coastline changes were analyzed for the study area characterized by the typical land-tied island under the influence of human development activities. During the past 40 years, the coastline of the Zhifu Bay had moved to the sea as a whole, with the total length increasing by 15.78 km. The coastline types had also experienced significant changes, with the natural coastline decreasing and the artificial one being gradually dominated. The changes in different parts of the study area are different, with the most (least) significant ones found in the west (south) bank. As a result, the area of the bay shrank by 7.93 km² since 1976. The shape of the bay turned to be more complicated, with the bay shape index increasing by 1.08. The gravity center of the bay was characterized by the consistent shifting from land towards the ocean, with a total of 606.25 m during the past 4 decades. The fractal dimension of the coastline increased as a whole, indicating that the coastline tended to be more complicated.

Key words: remote sensing; GIS; coastline changes; the Zhifu Bay

Received: May 22, 2018