

doi: 10.6046/zrzyyg.2022101

引用格式: 赵连杰,吴孟泉,郑龙啸,等. 胶东半岛北部海岸线时空变迁及驱动分析[J]. 自然资源遥感,2022,34(4):87-96.
(Zhao L J, Wu M Q, Zheng L X, et al. Temporal-spatial changes and driving analysis of the northern shorelines of Jiaodong Peninsula [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(4): 87-96.)

胶东半岛北部海岸线时空变迁及驱动分析

赵连杰¹, 吴孟泉¹, 郑龙啸¹, 栾绍鹏², 赵贤峰³, 薛明月¹, 刘佳燕¹, 刘晨曦⁴
(1. 鲁东大学资源与环境工程学院, 烟台 264039; 2. 烟台市地理信息中心, 烟台 264000; 3. 烟台市土地储备和利用中心, 烟台 264000; 4. 长江大学地球科学学院, 武汉 430100)

摘要: 海岸线动态监测对于海岸带科学管理和海洋资源合理利用具有重要意义。选用 1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年共 4 期 Landsat 遥感影像数据, 对比并采用了面向对象法提取了胶东半岛北部 1990—2020 年的海岸线和近岸 2 km 缓冲区内的海岸带变化, 结合海岸线变迁强度的计算方法, 利用数字岸线分析系统 (digital shoreline analysis system, DSAS) 分析了海岸线的变化速率和时空分布特征, 通过构建人类活动强度指数 (human activity intensity index, HAI) 模型对海岸线的变化进行了驱动分析。结果表明: ①研究区海岸线整体呈增长趋势, 并向海一侧缓慢推进, 海岸线长度总体增加了 183.13 km, 人工岸线增幅最大, 砂质自然岸线减幅最大; ②海岸线变化速率时空分布不均衡, 最大增速出现在胶莱河—界河区段, 为 94.59 m/a, 最大侵蚀速率出现在界河—大沽夹河区段, 为 -49.01 m/a; ③近海人类活动变化是研究区海岸线时空变迁的主要原因, 人类活动主要以围填海、港口建设等形式影响着海岸线的长度和类型变化。

关键词: 面向对象; 支持向量机; 数字岸线分析系统; 时空变迁; 人类活动强度指数
中图法分类号: P 237; P 74; P 737.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)04-0087-10

0 引言

海岸线是多年平均大潮时形成的实际痕迹线^[1], 是海陆交互的分界线, 也是海岸带环境中的重要组成部分。随着全球变暖、海平面上升及各种人类活动的加剧, 海岸线在以不同的速率发生着变化, 海岸线变迁对海岸带的生态环境甚至全球环境变化具有重要意义。随着 2011 年国务院对《山东半岛蓝色经济区发展规划》文件的批复, 标志着山东半岛蓝色经济区建设正式上升为国家战略, 沿海经济带的海岸资源监测显得尤为重要。国内外学者利用遥感手段对海岸线的时空变迁展开了一系列研究^[2-4]。一般来讲, 利用遥感和地理信息系统 GIS 技术提取海岸线往往以遥感图像上的水边线来代替, 提取方法主要分为基于人工判

读的目视解译和基于计算机的自动提取 2 种方法^[5-6]。常见的自动提取方法有基于阈值分割法、边缘检测法、神经网络法、面向对象法和小波变换法等。利用遥感手段来研究海岸线变化的方法也有很多, 常用的有面积法、动态分割法、基线法^[7]以及最小二乘法等。从研究区来看, 海岸线时空变化分析的研究范围小至以区县为边界, 大至以省份、全国大陆为边界。对海岸线变化的分析主要表现在对海岸线整体进行分段, 并针对每一段典型海岸线展开^[8]。大多与海岸带内的土地利用面积变化和基于面积法对海湾面积的统计变化结合并进行分析^[9-11]。对海岸线的研究也有很多典型案例, Mullick 等^[12]使用光谱指数归一化差分水体指数 (normalized difference water index, NDWI) 和目视解译的方法对 Landsat 影像进行了恒河三角洲海岸线的提取研究; Baral 等^[13]利用数字岸

收稿日期: 2022-03-21; 修订日期: 2022-07-09
基金项目: 国家自然科学基金项目“黄海浒苔衰亡过程与浮游微藻生态响应的遥感监测研究”(编号: 42071385)、山东省自然科学基金项目“基于遥感的黄海浒苔与浮游植物竞争关系对营养盐变化的响应研究”(编号: ZR2019MD041)、烟台市科技创新发展计划重点研发类项目“星-机-地”联合监测海洋浒苔的生态效应关键技术与示范(编号: 2022MSGY062)和山东省海上航天装备技术创新中心(鲁东大学)开放课题基金项目“基于‘空天地’一体的浒苔衰亡对黄海海洋生态遥感监测研究”(编号: HHCXZX-2021-12)共同资助。
第一作者: 赵连杰(1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向为海洋环境遥感、土地利用变化、空间分析与 3S 应用研究。Email: gislucas@163.com。
通信作者: 吴孟泉(1975-), 男, 教授, 硕士生导师, 博士, 研究方向为海洋环境遥感、空间分析及 3S 应用研究。Email: ld_wmq@ldu.edu.cn。

线分析系统 (digital shoreline analysis system, DSAS)对奇利卡潟湖海岸线进行了时空变化分析。还有学者对海岸线变迁的驱动因素做了大量研究^[14]。影响海岸线侵蚀衰退的因素主要表现为海浪侵蚀、低冰覆盖和全球气候变化等自然因素。而对海岸线侵蚀和变迁方向起到一定推动作用的因素主要表现在海岸带地区强烈的人类活动等人为因素,特别是多年来大规模流域的土地利用、调水调沙等大型工程的实施,沿海地区的近海养殖、城市化边缘的扩张和港口建设等人类活动和全球气候变化等自然因素的影响。

胶东半岛也称山东半岛,作为环渤海经济圈的重要组成部分之一,胶东半岛海岸线长度占到整个环渤海经济圈海岸线总长的 50% 以上,发展空间巨大。胶东半岛北部地区分布了多个山东半岛蓝色经济区的核心区,经济战略地位显著,但以往学者对中国胶东半岛北部海岸线的研究比较少。当前全球气候变暖所造成的自然灾害和受经济利益驱使下的人类开发活动对海岸线的变迁影响受到了人们的广泛关注。因此,本研究以 4 期 Landsat 影像为数据源,提取了中国胶东半岛北部近 30 a 的海岸线,基于 DSAS 系统对海岸线进行了时空变化分析,并构建了人类活动强度指数 (human activity intensity index, HAII)模型对海岸线变化进行了驱动分析。以期胶为胶东半岛海岸线资源的可持续发展、海岸资源保护以及海岸带地区的经济发展提供科学依据和决策支持。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

胶东半岛 (N35°35′~38°23′, E119°30′~122°42′)位于中国华北平原东北部地区,北临渤海和黄海,东临黄海,与朝鲜半岛和日本列岛隔海相望。胶东半岛主要包括青岛、烟台、威海 3 个城市,有 28 个县及县级市。以胶东半岛北部沿海区域为研究区,该地区有很多河流水系,包括胶莱河、界河和大沽夹河等,具有非常丰富的海岸资源。该研究区海岸线范围从胶莱河东起直至双岛湾小岛西处。海岸线向陆延伸 2 km 的空间范围作为海岸带调查区,以 1990 年海岸线为基准向内陆一侧 2 km 的缓冲区作为研究区(图 1)。



图 1 研究区范围示意图

Fig.1 Scope of study area

1.2 数据来源及预处理

本研究选取了 1990 年、2000 年、2010 年、2020 年共 4 个时期的多幅云量较少的 Landsat TM/ETM +/OLI 遥感影像作为主要数据源,数据来源于美国地质调查局网站 (<https://www.usgs.gov/>) 和地理空间数据云网站 (<http://www.gsccloud.cn/>)。数据应用前,首先在 ENVI5.3 平台对遥感影像数据进行预处理,包括图像配准、辐射定标和大气校正。在预处理的基础上,采用矢量边界裁剪得到研究区的遥感影像数据。本文的遥感数据信息如表 1 所示。

表 1 遥感卫星影像数据参数信息

Tab.1 Parameter information of remote sensing satellite image data

序号	卫星	传感器类型	轨道号/行号	日期	空间分辨率/m
1	Landsat5	TM	120/34	1990 年	30
2	Landsat5	TM	120/34	2000 年	30
3	Landsat5/7	TM/ETM +	120/34	2010 年	30
4	Landsat8	OLI	120/34	2020 年	30

2 研究方法

2.1 分类体系构建

海岸线是海洋与陆地的分界线,海岸带是海陆间相互作用形成的独特生态过渡带。本研究通过分析不同海岸地物类型在影像上的差异^[15],结合胶东半岛北部地区的实际地貌特征,将研究区海岸线类型划分为砂质岸线、淤泥质岸线、基岩岸线和人工岸线 4 类,其中砂质岸线、淤泥质岸线和基岩岸线统称为自然岸线;将海岸带景观类型划分为农田、居住地、道路、林草、水域、裸地、建设用地 7 类。具体的分类体系如表 2 所示。

表 2 海岸线、海岸带分类类别构建

Tab. 2 Construction of coastline and coastal zone classification

分类对象	分类类别	类别特征	影像解译标志
海岸线	砂质岸线	主要在海风、海浪、潮汐、洋流的共同作用下堆积而成的海岸线	海岸线较为平直,退潮后露出的沙滩在影像上的亮度较低,没有被海水淹没过的沙滩亮度较高,主要表现为高低亮度沙砾间的分界线
	淤泥质岸线	位于淤泥质或粉砂质泥滩的海岸线	滩面坡度平缓,向陆一侧通常有植物呈条带状生长
	基岩岸线	通常由海岬和海湾组成,底部会长期受到海浪、潮汐的影响而不断侵蚀	光谱反射率偏低,影像上较为平直,干湿线表现较为明显
	人工岸线	主要由混凝土、石头修筑而成,包括港口码头、近海养殖、构筑物、堤坝等建设用地的海岸线	在影像上具有较高的反射率,与具有较低反射率的海水形成鲜明的对比,地物形状规则,多为线状或块状
海岸带	农田	以种植作物为主的土地	具有规则的几何形状,整体分布较为集中
	居住地	用于居住和商业区等的土地	分布较为密集,多呈块状聚集分布
	道路	用来供各种车辆和行人通行的基础设施用地	整体呈网状分布,交错分布,多邻近建筑区
	林草	主要包括林地、草地等植被类型覆盖的土地	颜色较深,呈不规则的块状或条带状分布
	水域	指江河、湖泊、运河、渠道、水库、水塘及其管理范围和水工设施	反射率较低,在影像上颜色较深,表现明显
	裸地	主要包括空闲地、荒地和未利用的裸地	基本无植物覆盖,反射率低于沙漠,颜色呈灰色
	建设用地	主要包括临海港口建设、盐田建设、人工堆掘地等临海建设用地	反射率较高,建筑物色调呈白色,地物构成多样化,码头处凸出的构筑物多呈白色,细长突出

2.2 海岸线提取与分析

以胶东半岛北部为研究区,基于阈值分割法和面向对象法进行海岸线的自动提取并开展精度对比分析。阈值分割法是目前应用比较广泛的图像分割方法^[16]。常用的有直方图阈值分割法和最大类间距离法等。本文利用直方图阈值分割法来确定阈值,通过对影像进行分割,将得到的二值化栅格数据转化为矢量数据。阈值分割法的原理如下:

$$h(x,y) = \begin{cases} 1, f(x,y) \geq T \\ 0, f(x,y) < T \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $f(x,y)$ 为原图像; $h(x,y)$ 为经过分割后的二值化图像; T 为分割阈值。

面向对象法的基本原理是通过将图像分割成同类特征像元组成的多尺度对象,根据对象的光谱、形状、纹理等特征对影像进行分类和信息提取^[17],借助 eCognition 软件操作平台,本文采用多尺度分割算法进行影像分割,对目标地物分类采用的是隶属度函数分类法。在分离水边线时主要依据水体在中红外波段具有强吸收性,用到了改进的归一化水体指数(modified normalized difference water index, MNDWI)进行海岸线的提取^[18-19]。MNDWI 的计算公式为:

$$MNDWI = \frac{G - MIR}{G + MIR}, \quad (2)$$

式中: G 为绿光波段反射率; MIR 为中红外波段反射率。

通过目视解译的方式得到研究区 1990 年的海岸线,并以此作为基线来评价各类型海岸线的精度,

从提取的海岸线上以随机选取足够多的验证点,计算各点到基线的欧氏距离,通过均方根误差(root mean square error, RMSE)来进行精度分析。RMSE 的计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{D_1^2 + D_2^2 + D_3^2 + \cdots + D_n^2}{n}}, \quad (3)$$

式中: D_n 为第 n 个点到已有基线的欧氏距离; n 为样本个数。

基线法可以较好地反映海岸线的时空变化速率差异^[7]。本文主要利用 DSAS 中的终点变化速率(end point rate, EPR)和净海岸线移动(net shoreline movement, NSM)2 个变量进行海岸线空间变化速率的分析。EPR 计算公式为:

$$E_{(i,j)} = \frac{d_j - d_i}{\Delta Y_{(j,i)}}, \quad (4)$$

式中: $E_{(i,j)}$ 为 i 年到 j 年的海岸线的 EPR; i 为起始年份的海岸线时间; j 为末端年份的海岸线时间; $\Delta Y_{(j,i)}$ 为 i 年和 j 年的时间间隔; d_i 和 d_j 分别为时间为 i 和 j 时海岸线沿垂线方向到基线的距离。

NSM 计算公式为:

$$NSM = d_{i_2} - d_{i_1}, \quad (5)$$

式中: d_{i_1} 为每个断面上最新海岸线的距离; d_{i_2} 为每个断面上的最早海岸线距离。

为了更好地对比各个时期海岸线的变化差异,本研究采用某一时段内海岸线长度的平均变化百分比来表示海岸线的变迁强度(length change intensity, LCI),计算公式为:

$$LCI_{ij} = \frac{L_j - L_i}{L_i(j - i)} \times 100\% \quad , \quad (6)$$

式中： LCI_{ij} 为某一研究单元的第 i 年至第 j 年海岸线的变迁强度； L_i 和 L_j 分别表示第 i 年与第 j 年的海岸线长度。变化强度的绝对值越大，海岸线变迁程度越明显。

2.3 海岸带提取

海岸带的范围至今尚无统一的界定，本研究规定的海岸带提取范围为：由海岸线向陆地方向延伸 2 km。由于海岸带土地利用类型复杂，单一的分割尺度无法满足不同地物类型的分割要求，本研究采用多尺度分割算法进行影像分割。多尺度分割后采用支持向量机 (support vector machine, SVM)、K 近邻方法 (K - nearest neighbor, KNN) 作为分类器分别进行海岸带土地利用类型的提取，并对提取结果进行比较分析。

海岸带遥感信息识别的 SVM 学习模型 E 计算公式为：

$$E = \frac{w \ln q + I}{b^m} \quad , \quad (7)$$

式中： I 为光学遥感地物影像的最大融合特征集； m 为像素个数； q 为高分辨率光学遥感地物影像融合模块的像素边缘尺度； w 为高斯混合模型的相关系数； b 为相似度特征分量。

KNN 的基本原理是：如果一个样本附近的 K 个最近 (即特征空间中最邻近) 样本的大多数属于某一个类别，则该样本属于这个类别，待分类地物与已选定的样本之间的距离可以通过函数斜率与最小隶属度阈值来计算。样本对象和待分类样本的距离 d 的计算公式为：

$$d = \sqrt{\sum_f \left[\frac{v_f(s) - v_f(o)}{\sigma_f} \right]^2} \quad , \quad (8)$$

式中： d 为样本对象和待分类样本的距离； $v_f(s)$ 为样本对象特征 f 的数值； $v_f(o)$ 为待分类样本的特征 f 数值； σ_f 为特征 f 中各特征值之间的标准差。根据求得的距离 d ，可以构建多维指数的隶属度函数进一步计算出待分类样本与已知样本的隶属关系，关系式为：

$$Z(d) = e^{-kd^2} \quad , \quad (9)$$

$$k = \ln\left(\frac{1}{c}\right) \quad , \quad (10)$$

式中： $Z(d)$ 为多维指数的隶属度函数； c 为函数斜率。

2.4 HAI 模型

土地利用类型变化是人类经济社会活动的综合反映，也是人类活动最为明显的表现^[20]。HAI 是指某一区域土地利用类型因子受该地域人类活动干扰程度的指标^[21-22]。本文综合徐勇等^[23]和陈浮等^[21]提出的 HAI 模型，采用 HAI 模型来计算研究区内人类活动的强弱程度，其计算公式为：

$$HAI = \sum_{l=1}^L \left(\frac{A_l}{S} p_l \right) \quad , \quad (11)$$

式中： L 为海岸带土地利用景观类型的数量； A_l 为第 l 种海岸带土地利用类型的面积； S 为该区域内各土地利用类型总面积； p_l 为第 l 种土地利用类型因子的干扰强度系数。

干扰强度系数的确定方法主要有清单 (Lohani) 法、利奥波德相关矩阵 (Leopold) 法和德尔菲 (Delphi) 法等。Lohani 清单法和 Leopold 矩阵法采用一系列指标的数据集来反映，Delphi 法可以充分利用专家的知识经验，对实际情况有更好的了解。为了减少误差，本文结合其他学者^[23-24]以及研究区的实际情况，参照表 2 中海岸带的分类类别作为指标选取的依据，最终采用 Delphi 法来确定各土地利用类型因子的人为干扰强度系数，计算结果见表 3。

表 3 各土地利用类型因子的干扰强度系数

Tab.3 Interference intensity coefficient of each land use type factor

土地利用类型	农田	居住地	道路	林草	水域	裸地	建设用地
干扰强度系数	0.52	0.92	0.86	0.10	0.13	0.06	0.91

3 结果与分析

3.1 海岸线长度类型变化

3.1.1 海岸线提取精度分析

不同方法提取的水边线与基线的误差分析结果如表 4 所示。由表 4 可知，基于阈值分割法和面向对象法对各类型海岸线的总体提取效果比较好。对于砂质岸线的提取，阈值分割法的提取精度更优，其 RMSE 为 6.84 m；对于淤泥质岸线、基岩岸线和人工岸线的提取，面向对象法的提取精度明显高于阈值分割法，因此本研究采用基于面向对象的方法来提取胶东半岛北部各类型海岸线的变化。

表 4 不同方法提取的水边线与基线的误差分析结果

Tab.4 Error analysis results of water edge line and baseline extracted by different methods (m)

分类方法	海岸线类型			
	砂质岸线	淤泥质岸线	基岩岸线	人工岸线
基于阈值分割	6.84	28.56	18.47	14.56
基于面向对象	9.65	24.31	15.35	12.39

3.1.2 海岸线长度类型变化结果分析

1990—2020 年胶东半岛北部海岸线的空间分布如图 2 所示,各类型海岸线长度统计如表 5 所示。由图 2 可知,近 30 a 来研究区海岸线长度呈递增趋势,整体趋势为向海一侧推进。由表 5 可知,1990—2020 年海岸线长度约增加 183.13 km,年均变化速率为 6.10 km/a。其中变化最大的阶段为 2010—2020 年,海岸线长度增加了 112.74 km。而 1990—2000 年和 2000—2010 年分别增加了 26.38 km 和 44.01 km,可见各时间段海岸线的增加长度差异比较大。随着时间的推移,海岸线类型的变化也各不相同。1990—2020 年,自然岸线长度和比例显著减少,而人工岸线迅速增加。其中 1990—2000 年,自然岸线减少最为显著,共减少了 51.52 km,砂质岸线、淤泥质岸线和基岩岸线均表现为减少趋势。人工岸线长度共增加了 77.90 km。而 2010—2020 年,自然岸线出现小幅度增加趋势,共增加 20.79 km。主要表现为砂质岸线的增加,共增加了 19.93 km。人工岸线长度增幅最大,共增加了 91.95 km,人工岸线的百分比增长至 63.45%。

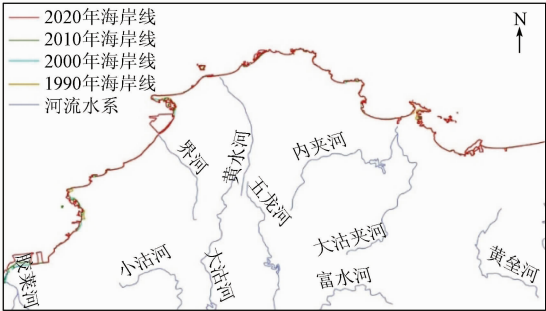


图 2 1990—2020 年胶东半岛北部海岸线的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of the northern coastline of Jiaodong Peninsula from 1990 to 2020

表 5 1990—2020 年胶东半岛北部各类型海岸线长度统计

Tab.5 Statistics on the length of various types of coastlines in the north of Jiaodong Peninsula from 1990 to 2020 (km)

年份	自然岸线			人工岸线	研究区总岸线
	砂质岸线	淤泥质岸线	基岩岸线		
1990 年	213.44	6.36	48.12	139.24	407.16
2000 年	173.18	5.91	37.31	217.14	433.54
2010 年	150.15	5.48	39.35	282.57	477.55
2020 年	170.08	5.08	40.61	374.52	590.29

30 a 来,胶东半岛北部海岸线的整体变化比较大,其变迁强度值为 0.45%; 从不同时间段看,1990—2000 年海岸线变迁强度最小,其变迁强度值为 0.06%; 2000—2010 年,海岸线的变迁强度进一步增加,相比 1990—2000 年,胶东半岛北部海岸线的变迁强度由 0.06% 持续增加到 0.10%; 2010—2020 年期间海岸线的变迁强度值由 0.10% 增加到 0.24%, 由此可知 1990—2020 年间,研究区海岸线的变迁强度一直呈现出快速增长趋势。

3.2 海岸线时空变迁特征分析

为了更好地描述胶东半岛北部海岸线的时空变迁特征,在生成的 201 个断面的基础上,本文将研究区划分为 A 区段、B 区段和 C 区段 3 个分区: 胶莱河—界河段(A 区段)为断面 1—57,界河—大沽夹河段(B 区段)为断面 57—121,大沽夹河—双岛湾小岛西段(C 区段)为断面 121—201。按照海岸线侵蚀堆积程度,根据 EPR 值将海岸线分为 5 类: 强侵蚀岸线 < -10 m/a,弱侵蚀岸线[-10, -3) m/a,均衡岸线[-3, 3) m/a,弱增长岸线[3, 10) m/a, 强增长岸线 ≥ 10 m/a,其中负值表示侵蚀,正值表示增长。

1990—2020 年胶东半岛北部海岸线的空间变迁趋势如表 6 所示,EPR 的空间分布及不同断面的侵蚀变化如图 3—4 所示。由表 6、图 3—4 可知,1990—2000 年,胶东半岛北部海岸线总体呈增长趋势,从分区段看,其中 A 区段海岸线变化最为剧烈,长度总体以减少为主,共减少了 0.90 km,平均变化速率为 -1.58 m/a。其中在断面 17—41 海岸线为快速增长状态,最大增速为 90.00 m/a,海岸线侵蚀

表 6 1990—2020 年胶东半岛北部海岸线的空间变迁趋势

Tab.6 Spatial change trend of the northern coastline of Jiaodong Peninsula from 1990 to 2020

时间段	海岸线区段	变化长度/km	断面分布	断面个数	平均变化速率	最大增长速率	最大侵蚀速率	平均增长或侵蚀
					$EPR/(m \cdot a^{-1})$	$EPR/(m \cdot a^{-1})$	$EPR/(m \cdot a^{-1})$	NSM/m
1990—2000 年	A 区段	-0.90	1—57	57	-1.58	90.00	-10.69	-15.78
	B 区段	20.10	57—137	81	0.53	40.76	-21.04	5.34
	C 区段	7.18	137—121	65	0.24	5.50	-9.32	2.35
2000—2010 年	A 区段	14.21	1—57	57	10.91	181.07	-6.05	109.11
	B 区段	18.88	57—137	81	4.05	58.61	-62.77	58.73
	C 区段	10.92	137—121	65	4.44	8.33	-18.03	44.32

(续表)

时间段	海岸线区段	变化长度 /km	断面分布	断面个数	平均变化速率 $EPR/(m \cdot a^{-1})$	最大增长速率 $EPR/(m \cdot a^{-1})$	最大侵蚀速率 $EPR/(m \cdot a^{-1})$	平均增长或侵蚀 NSM/m
2010—2020 年	A 区段	42.92	1—57	57	19.03	360.62	-4.12	171.24
	B 区段	82.39	57—137	81	13.57	204.49	-45.16	54.85
	C 区段	-12.57	137—121	65	-6.41	4.79	-36.93	-17.51
1990—2020 年	A 区段	56.23	1—57	57	6.12	94.59	-9.13	177.56
	B 区段	121.37	57—137	81	4.76	62.67	-49.01	138.20
	C 区段	5.53	137—121	65	-10.75	4.22	-21.96	-14.59

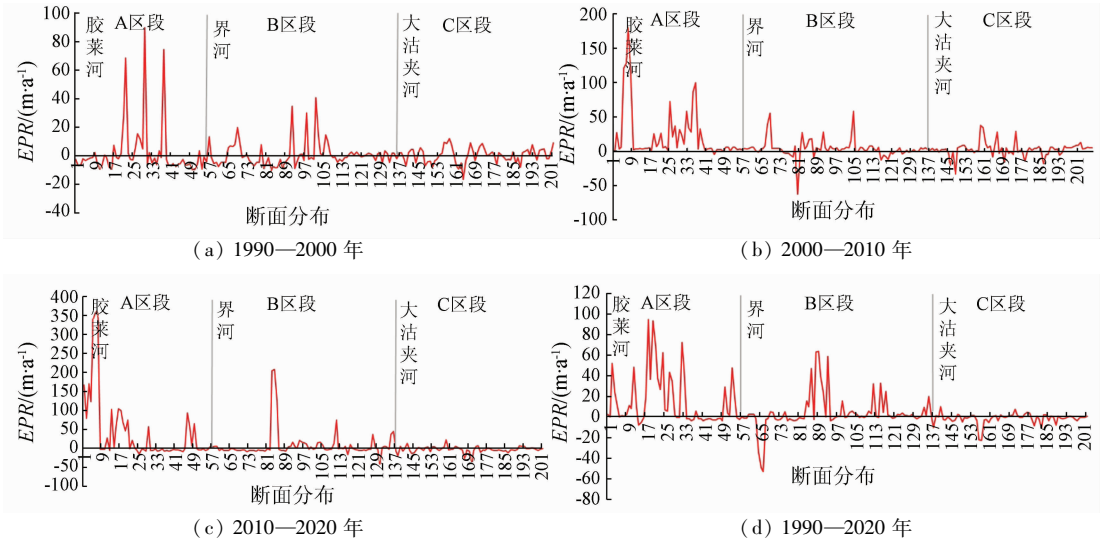


图3 1990—2020 年胶东半岛北部海岸线 EPR 的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of EPR of northern coastline of Jiaodong Peninsula from 1990 to 2020

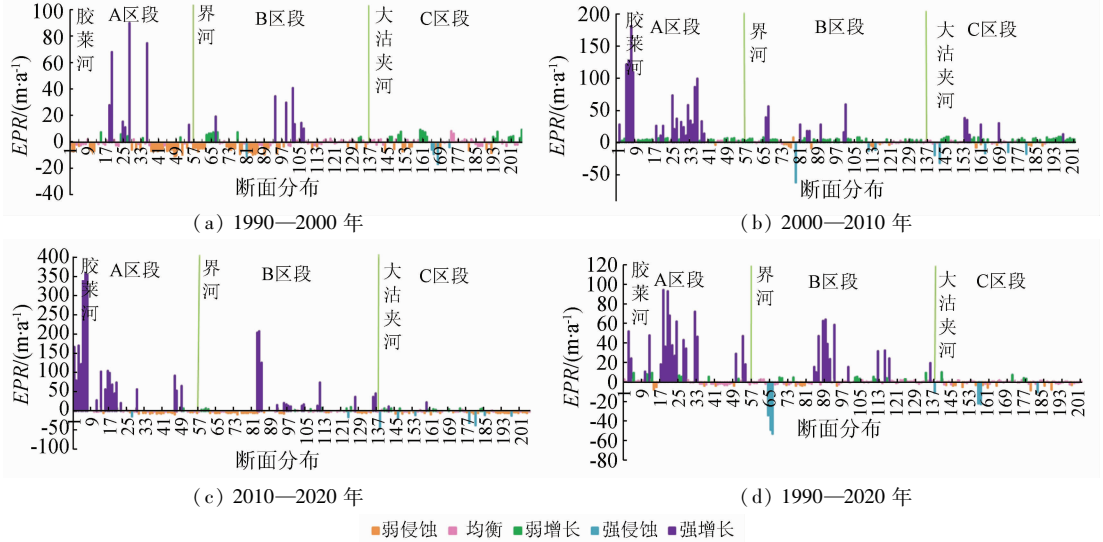


图4 1990—2020 年胶东半岛北部海岸线不同断面的侵蚀类型

Fig.4 Erosion types of different sections of the northern coastline of Jiaodong Peninsula from 1990 to 2020

类型主要表现为强增长类型。该段侵蚀海岸线长度平均减少了 15.78 m；B 区段海岸线总体以增长为主,共增加了 20.10 km,平均变化速率为 0.53 m/a。而该段最大增速出现在断面 137 处,最大增速为 40.76 m/a。其他断面处海岸线变化相对平缓,该段增长海岸线长度平均增加了 5.34 m；C 区段海岸线变化不明显,但总体仍以增长为主,共增加了 7.18 km,平均变化速率为 0.24 m/a,该段增长海岸线长度平均增加了 2.35 m。

2000—2010 年,研究区海岸线总体呈现出显著增长趋势。从分区段看,A 区段海岸线变化最为明显,总体呈增长趋势,共增加了 14.21 km,平均变化速率为 10.91 m/a。其中在断面 6 处出现最大变化速率,最大增速为 181.07 m/a,该段增长海岸线长度平均增加了 109.11 m。B 区段海岸线总体主要表现为弱增长状态,共增加了 18.88 km,平均变化速率为 4.05 m/a。其中在断面 100 处海岸线增长速率最大,最大的增速为 58.61 m/a,在断面 80 处

海岸线侵蚀速率最大,最大侵蚀速率为 -62.77 m/a ,该段增长海岸线长度平均增加了 58.73 m 。C 区段变化比较平缓,增加了 10.92 km ,海岸线的平均变化速率为 4.44 m/a ,海岸线侵蚀主要表现为弱增长类型,该段增长海岸线长度平均增加了 44.32 m 。

2010—2020 年,研究区海岸线总体呈快速增长的趋势。从分区段看,A 区段海岸线总体以增长为主,增加了 42.92 km ,平均变化速率为 19.03 m/a 。在断面 6 处海岸线增长速率最大,最大的增长速率为 360.62 m/a ,该段增长海岸线长度平均增加了 171.24 m ;B 区段海岸线总体以增长为主,增加了 82.39 km ,平均变化速率为 13.57 m/a 。断面 82—86 之间海岸线表现为强增长类型,最大增速为 204.49 m/a ,海岸线侵蚀速率比较平缓,最大侵蚀速率为 -45.16 m/a ,该段增长海岸线长度平均增加了 54.85 m ;C 区段海岸线变化不大,海岸线长度总体减少 12.57 km ,平均变化速率为 -6.41 m/a 。海岸线主要表现为弱侵蚀与强侵蚀类型,最大侵蚀速率为 -36.93 m/a ,该段侵蚀海岸线长度平均减少了 17.51 m 。

1990—2020 年这 30 a 来,研究区海岸线长度总体为持续增长,海岸线变化速率时空分布不均衡。从分区段看,A 区段海岸线总体呈增长趋势,增加了 56.23 km ,平均变化速率为 6.12 m/a 。海岸线侵蚀主要表现为强增长类型,最大增速为 94.59 m/a ,最大侵蚀速率为 -9.13 m/a ,该段增长海岸线长度平均增加了 177.56 m ;B 区段海岸线总体也呈增长趋势,增加了 121.37 km ,平均变化速率为 4.76 m/a 。海岸线侵蚀类型复杂多样,局部侵蚀和增长程度明显,最大增速为 62.67 m/a ,最大侵蚀速率为 -49.01 m/a ,该段增长海岸线长度平均增加了 138.20 m ;C 区段海岸线总体变化起伏不大。以增长为主,海岸线长度增加了 5.53 km ,平均变化速率为 -10.75 m/a ,最大增速为 4.42 m/a 。海岸线主要表现为均衡侵

蚀类型,最大侵蚀速率为 -21.96 m/a ,该段侵蚀海岸线长度平均减少了 14.59 m 。

3.3 海岸线时空变迁驱动分析

3.3.1 海岸带提取精度分析

以 1990 年的遥感影像数据为例,本文分别采用 SVM 与 KNN 作为分类器,对海岸带土地利用类型进行了提取,基于不同分类提取方法的精度比较结果如表 7 所示。

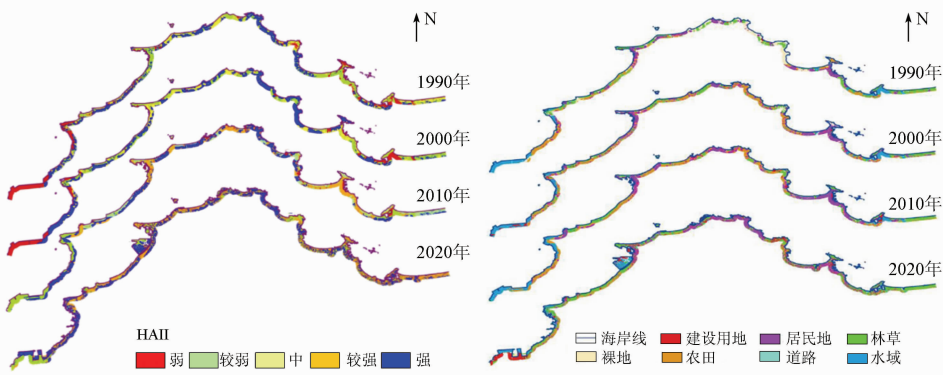
表 7 不同分类提取方法的精度比较
Tab. 7 Comparison of accuracy of different classification extraction methods

方法	错分精度/%	漏分精度/%	Kappa 系数	总体精度/%
SVM	3.24	34.68	0.824	87.96
KNN	7.51	36.12	0.795	84.91

由表 4 可以看出,基于 SVM 方法与基于 KNN 方法总体的分类提取结果都较好。但基于 SVM 方法的提取精度略高,Kappa 系数为 0.824,总体精度达到 87.96%。因此,本研究采用基于面向对象结合 SVM 分类的方法来提取胶东半岛北部海岸带类型的变化信息。

3.3.2 基于 HAI 模型的海岸线变迁驱动分析

随着社会经济发展和生产力水平的提高,近海人类活动的干扰度对海岸带地区的生态系统格局产生了重要影响,城市化的快速发展导致了沿海地区建设用地的大量增长,也间接影响了海岸线的长度变化。因此本研究构建了 HAI 模型进行海岸线变迁的驱动分析,借助 ArcGIS 平台,利用式(11)分别计算每个像元处的 HAI,得到该研究区 1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年 HAI 的空间化分布。HAI 的值域为 $[0,1]$,采用手动分类法将 HAI 值共分为 5 类:弱 $[0,0.2)$ 、较弱 $[0.2,0.4)$ 、中 $[0.4,0.6)$ 、较强 $[0.6,0.8)$ 、强 $[0.8,1]$,来衡量人类活动干扰度。胶东半岛北部海岸带 HAI 空间模拟结果及各土地利用类型变化情况如图 5 所示。



(a) HAI 空间分布 (b) 各土地利用类型变化
图 5 1990—2020 年胶东半岛北部海岸带 HAI 空间分布及各土地利用类型变化
Fig. 5 Spatial distribution of HAI and changes of land use types in the northern coastal zone of Jiaodong Peninsula from 1990 to 2020

结合图 5 可知,从整体看,1990—2020 年近 30 a 来研究区内 HAI 总体呈增加趋势,但内陆一侧的人类活动强度明显高于向海一侧且逐渐向沿海一侧扩张。这主要是因为内陆受城镇建设和农田开垦活动的影响^[25],HAI 较高的地区往往多集中在居住地和建设用地类型区域,农田和林草等土地利用类型的区域 HAI 适中,而水域和裸地区域的 HAI 普遍较低,其中胶莱河以东附近区域表现则比较明显。其次不同土地利用类型交错区域受到人类活动影响的叠加作用,也会导致该区域人类活动的干扰度比较强。随着经济发展和城市化进程的不断加快,沿海地区建设用地类型不断增加,主要表现在环海公路建设、港口码头的修建以及各种围填海活动的建设上,导致海岸线不断向海推进,人工岸线长度迅速增加。

从各时段看,1990—2000 年研究区的人类活动分布差异明显,胶口湾附近、界河周围以及芝罘岛西侧都是 HAI 指数分布较高的区域,人类活动干扰度强和较强的地区比重增加到 47.3%,1990 年之后,该时段受人类活动的影响比较大,经济快速发展和城镇化建设进程加快,导致自然岸线被大量开发成人工岸线,人工岸线增长至 217.14 km,百分比增加了 15.89%。由于沿海养殖业的大兴发展致使当地海岸带资源人为开发迅速。

2000—2010 年人类活动呈现大面积增强的趋势,人类活动干扰度不断由内陆向靠海一侧推进增强。2005 年中国山东省“十一五”计划之后,研究区内贯彻海洋经济发展规划的要求,着力进行港口及滨海旅游业等海洋产业的发展,使得围填海规模进一步扩大^[26]。围海造陆、围海养殖热潮以及沿岸生态公园项目的开发影响着海岸线的长度和类型变化,由人工构筑物、近海养殖和旅游岸线开发等功能的人工岸线持续增加,而自然岸线总体持续减少^[11]。

直至 2020 年研究区的人类活动达到了最强,人类活动干扰度强和较强的地区已基本覆盖整个研究区,总占比达到了 90.54%,人类活动变化明显的地区表现为建设用地的持续增加,人工岸线的快速增长。界河—大沽夹河段蓬莱区人工岛建设项目的开发不仅大幅度增加了建设用地的面积,也进一步促进了人工岸线的增长。随着在中国山东省“十二五”海洋经济发展规划背景下,陆海统筹,联动发展的理念加强了海域与陆域的联系,人类活动对海陆域的干扰度持续增加,人类活动达到饱和发展状态。2010—2020 年以来,研究区海岸线持续增加,年变化速率达到最大。以上分析表明,研究区内人类活

动变化是胶东半岛北部海岸线时空变迁的主要原因,而人类活动变化又通过沿海地区海岸带的土地利用类型变化直接表现。

4 结论

本文基于多时相卫星遥感数据,利用面向对象分割方法和 DSAS 工具,分析了胶东半岛北部海岸线的时空变迁及驱动因素,主要结论如下:

1) 1990—2020 年间海岸线长度整体变化剧烈,海岸线迁移方向为向海一侧缓慢推进,各类型海岸线呈现出快速增长趋势,自然岸线比重逐渐向人工岸线转移。

2) 近 30 a 来海岸线变化速率时空分布不均衡。1990—2020 年,各分区海岸线整体以不同的速率保持增长趋势,而大沽夹河—双岛湾小岛西段海岸线发生轻微侵蚀,平均侵蚀速率为 -10.75 m/a 。不同时间段下,各区段海岸线主要表现为增长趋势,而发生侵蚀的海岸线主要表现为:1990—2000 年间胶莱河—界河区段发生轻微侵蚀,平均侵蚀速率为 -1.58 m/a ,海岸线平均减少了 15.87 m;2010—2020 年间大沽夹河—双岛湾小岛西段海岸线也发生轻微侵蚀,平均侵蚀速率为 -6.41 m/a ,海岸线平均减少了 17.51 m。

3) 1990 年以来,近海人类活动的变化是胶东半岛北部海岸线时空变迁的主要原因。胶东半岛北部受到围海养殖、围海造陆等经济利益驱使下人工建设的持续影响,导致近 30 a 来海岸线人工岸线快速增长。为了沿海旅游业的发展,沿海生态园和观海大道等临海建设的修建,致使大量自然岸线向人工岸线转变,自然岸线比重严重下降。近海人类活动强度的变化不仅导致了海岸线长度和类型的变化,还影响着海岸带土地利用类型的变化。

未来应加强对人工岸线的生态建设和自然岸线的合理保护,积极为中国胶东半岛北部沿海地区打造一个绿色、和谐、可持续的海岸带发展空间。

参考文献(References):

- [1] 马小峰,赵冬至,张丰收,等.海岸线卫星遥感提取方法研究进展[J].遥感技术与应用,2007,22(4):575-580.
Ma X F, Zhao D Z, Zhang F S, et al. Means of withdrawing coastline by remote sensing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2007, 22(4): 575-580.
- [2] 吴一全,刘忠林.遥感影像的海岸线自动提取方法研究进展[J].遥感学报,2019,23(4):582-602.
Wu Y Q, Liu Z L. Research progress on methods of automatic coastline extraction based on remote sensing images[J]. Journal of

- Remote Sensing, 2019, 23(4): 582–602.
- [3] 李加林, 田鹏, 邵妹遥, 等. 中国东海区大陆岸线变迁及其开发利用强度分析[J]. 自然资源学报, 2019, 34(9): 1886–1901.
- Li J L, Tian P, Shao S Y, et al. The change of continental coastline and its development and utilization intensity in the East China Sea[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(9): 1886–1901.
- [4] Zhou M, Wu M Q, Zhang G Z, et al. Analysis of voastal zone data of northern Yantai collected by remote sensing from 1990 to 2018[J]. Applied Sciences, 2019, 9(20): 4466.
- [5] 孙晓林, 吴孟泉, 田佳慧, 等. 近30年威海市海岸线时空变化及其驱动力[J]. 应用海洋学学报, 2019, 38(2): 206–213.
- Sun X L, Wu M Q, Tian J H, et al. Driving forces and spatio-temporal variation of Weihai coastline in recent 30 years[J]. Journal of Applied Oceanography, 2019, 38(2): 206–213.
- [6] Dai C, Howat I M, Larour E, et al. Coastline extraction from repeat high resolution satellite imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 229: 260–270.
- [7] 姚晓静, 高义, 杜云艳, 等. 基于遥感技术的近30 a 海南岛海岸线时空变化[J]. 自然资源学报, 2013, 28(1): 114–125.
- Yao X J, Gao Y, Du Y Y, et al. Spatial and temporal changes of Hainan coastline in the past 30 years based on RS[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(1): 114–125.
- [8] 刘百桥, 孟伟庆, 赵建华, 等. 中国大陆1990—2013年海岸线资源开发利用特征变化[J]. 自然资源学报, 2015, 30(12): 2033–2044.
- Liu B Q, Meng W Q, Zhao J H, et al. Variation of coastline resources utilization in China from 1990 to 2013[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(12): 2033–2044.
- [9] 王志成, 高志强, 尚伟涛, 等. 1987—2017年莱州湾沿岸土地利用变化及其对海岸线变化的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 309–316, 336.
- Wang Z C, Gao Z Q, Shang W T, et al. Land use change and it's influence on coastline change along Laizhou Bay during 1987—2017[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 309–316, 336.
- [10] 柏叶辉, 李洪忠, 李向新, 等. 1990年以来4个时期深圳市海岸线与海岸带景观格局及其对人类活动强度的响应[J]. 湿地科学, 2019, 17(3): 335–343.
- Bo Y H, Li H Z, Li X X, et al. Landscape patterns of coastline and coastal zone in Shenzhen City and their responses to intensity of human activities for 4 periods since 1990[J]. Wetland Science, 2019, 17(3): 335–343.
- [11] 苗苗, 谢小平. 基于GIS和RS的山东日照海岸带1988—2018年间演化分析[J]. 国土资源遥感, 2021, 33(2): 237–247. doi: 10.6046/gtzyyg.2020229.
- Miao M, Xie X P. Spatial-temporal evolution analysis of Rizhao coastal zone during 1988—2018 based on GIS and RS[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2021, 33(2): 237–247. doi: 10.6046/gtzyyg.2020229.
- [12] Mullick M R A, Islam K M A, Tanim A H. Shoreline change assessment using geospatial tools: A study on the Ganges deltaic coast of Bangladesh[J]. Earth Science Informatics, 2020, 13(2): 99–316.
- [13] Baral R, Pradhan S, Samal R N, et al. Shoreline change analysis at Chilika Lagoon Coast, India using digital shoreline analysis system[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2018, 46(10): 1637–1644.
- [14] 杨磊, 李加林, 袁麒麟, 等. 中国南方大陆海岸线时空变迁[J]. 海洋学研究, 2014, 32(3): 42–49.
- Yang L, Li J L, Yuan Q X, et al. Spatial-temporal changes of continental coastline in southern China[J]. Journal of Marine Sciences, 2014, 32(3): 42–49.
- [15] 张旭凯, 张霞, 杨邦会, 等. 结合海岸类型和潮位校正的海岸线遥感提取[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(4): 91–97. doi: 10.6046/gtzyyg.2013.04.15.
- Zhang X K, Zhang X, Yang B H, et al. Coastline extraction using remote sensing based on coastal type and tidal correction[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2013, 25(4): 91–97. doi: 10.6046/gtzyyg.2013.04.15.
- [16] 段秋亚, 孟令奎, 樊志伟, 等. GF-1卫星影像水体信息提取方法的适用性研究[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(4): 79–84. doi: 10.6046/gtzyyg.2015.04.13.
- Duan Q Y, Meng L K, Fan Z W, et al. Applicability of the water information extraction method based on GF-1 image[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2015, 27(4): 79–84. doi: 10.6046/gtzyyg.2015.04.13.
- [17] 王彩艳, 王瓊玲, 王介勇, 等. 基于面向对象的海岸带土地利用信息提取研究[J]. 自然资源学报, 2014, 29(9): 1589–1597.
- Wang C Y, Wang A L, Wang J Y, et al. Coastal zone land use information extraction based on object-oriented classification method[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(9): 1589–1597.
- [18] 原晓慧, 王萍, 张英, 等. 基于边缘检测的海岸线自动提取研究[J]. 北京测绘, 2019, 33(2): 148–152.
- Yuan X H, Wang P, Zhang Y, et al. Research on edge detection and object-oriented for automatic extraction of coastline[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2019, 33(2): 148–152.
- [19] 张翔, 王霄鹏, 黄安齐, 等. 基于遥感影像提取山东半岛复杂海岸线及海岸线多年变迁研究[J]. 海洋湖沼通报, 2021, 43(2): 171–181.
- Zhang X, Wang X P, Huang A Q, et al. Extraction of complex coastline feature and it's multi-year changes in Shandong Peninsula based on remote sensing image[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2021, 43(2): 171–181.
- [20] 吴琳娜, 杨胜天, 刘晓燕, 等. 1976年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 54–63.
- Wu L N, Yang S T, Liu X Y, et al. Response analysis of land use change to the degree of human activities in Beiluo River basin since 1976[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 69(1): 54–63.
- [21] 陈浮, 陈刚, 包浩生, 等. 城市边缘区土地利用变化及人文驱动力机制研究[J]. 自然资源学报, 2001, 16(3): 204–210.
- Chen F, Chen G, Bao H S, et al. Analysis on land use change and human driving force in urban fringe[J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(3): 204–210.
- [22] 梁发超, 刘黎明. 景观格局的人类干扰度定量分析与生态功能区优化初探: 以福建省闽清县为例[J]. 资源科学, 2011, 33(6): 1138–1144.
- Liang F C, Liu L M. Quantitative analysis of human disturbance in-

tensity of landscape pttterns and preliminary optimization of ecological function regions:A case of Minqing County in Fujian Province [J]. Resources Science,2011,33(6):1138-1144.

[23] 徐 勇,孙晓一,汤 青. 陆地表层人类活动强度:概念、方法及应用[J]. 地理学报,2015,70(7):1068-1079.

Xu Y,Sun X Y,Tang Q. Human activity intensity of land surface: Concept,method and application in China [J]. Journal of Geographical Sciences,2015,70(7):1068-1079.

[24] 李振鹏,刘黎明,谢花林. 乡村景观分类的方法探析:以北京市海淀区白家疃村为例[J]. 资源科学,2005,27(2):167-173.

Li Z P,Liu L M,Xie H L. Methodology of rural landscape classification:A case study in Baijiatuan Village Haidian District,Beijing [J]. Resources Science,2005,27(2):167-173.

[25] 贾艳艳,唐晓岚,张卓然. 长江中下游流域自然保护区空间分布及其与人类活动强度关系研究[J]. 世界地理研究,2020,29(4):845-855.

Jia Y Y,Tang X L,Zhang Z R. Distribution of nature protected areas and its relationship with human activity intensity in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin[J]. World Regional Studies,2020,29(4):845-855.

[26] 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.

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.

Temporal – spatial changes and driving analysis
of the northern shorelines of Jiaodong Peninsula

ZHAO Lianjie¹, WU Mengquan¹, ZHENG Longxiao¹, LUAN Shaopeng², ZHAO Xianfeng³,
XUE Mingyue¹, LIU Jiayan¹, LIU Chenxi⁴

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264039, China; 2. Yantai Geographic Information Center, Yantai 264000, China; 3. Yantai Land Reserve and Use Centre, Yantai 264000, China; 4. School of Earth Sciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China)

Abstract: Dynamic shoreline monitoring is greatly significant for the scientific management of coastal zones and the rational utilization of marine resources. Based on the Landsat remote sensing images of four periods i. e. , 1990, 2000, 2010, and 2020, this study extracted the changes in the shorelines and the coastal zones within the 2 km of the buffer zone in the north of Jiaodong Peninsula from 1990 to 2020 by making comparison and using an object – oriented method. By combining the calculation method for shoreline change intensity, this study analyzed the changing rate and temporal – spatial distribution characteristics of the shorelines using the digital shoreline analysis system (DSAS). Then, this study conducted a driving analysis of changes in the shoreline by constructing a human activity intensity index (HAII) model. The results are as follows. The shorelines of the study area generally showed an upward trend and advanced slowly to the seaside. The overall length of the shorelines increased by 183.13 km. The highest increased and decreased amplitude occurred in artificial shorelines and sandy natural shorelines, respectively. The shoreline changing rates showed uneven temporal – spatial distribution. The maximum growth rate of 94.59 m/a occurred in the Jiaolai River – Jiehe River section, while the maximum erosion rate of –49.01 m/a occurred in the Jiehe River – Dagujia River section. The changes in offshore human activities were the main contributor to the temporal – spatial changes of coastlines in the study area. The lengths and types of shorelines were mainly affected by human activities through sea reclamation and port construction.

Keywords: object oriented; SVM; DSAS; temporal and spatial changes; human activity intensity index
(责任编辑: 陈 理)