

孔德旋, 张存勇, 侯建康. 海州湾岸线蚀淤演变及预测[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(2): 28-36.

KONG Dexuan, ZHANG Cunyong, HOU Jiankang. Evolution and prediction of shoreline erosion and siltation in Haizhou Bay[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(2): 28-36.

海州湾岸线蚀淤演变及预测

孔德旋, 张存勇*, 侯建康

(江苏海洋大学海洋技术与测绘学院, 连云港 222005)

摘要: 基于 2013—2021 年间海州湾 18 期 Landsat 8 遥感影像, 利用海岸线类型多样性指数、岸线变化率 (EPR) 和净海岸移动量 (NSM) 对海州湾各类型岸线蚀淤演变情况进行分析, 并基于 Prophet 时间序列预测模型对 2025 年岸线进行定量预测。结果表明, 9 年间基岩岸线整体较稳定; 琴岛栈桥到临洪河口淤泥质岸线不稳定, 岸线明显向海淤积; 砂质岸线整体较稳定, 无明显蚀淤倾向。预测 2025 年海州湾淤泥质岸线呈向海延伸趋势, 临洪河口附近岸线呈向海延伸趋势, 其余岸线均无明显淤蚀变化, 较为稳定。

关键词: 海州湾; 遥感; 海岸线; 岸线变化率; 净海岸移动量; Prophet 时间序列预测模型

中图分类号: P736 文献标识码: A DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.241

0 引言

海州湾位于连云港东北部, 是一个开敞式弧形海岸, 岸线曲折, 主要由砂质海岸、淤泥质海岸和基岩海岸组成, 海陆作用活跃^[1]。由于淤泥质海滩物质组成较细, 结构较为松散, 受水动力作用影响较大, 海岸变化较大, 是诸多学者较为关注的问题之一。

遥感 (RS) 拥有全天候、大范围、高精度、高性价比和高频观测的优点, 一直是研究岸线变迁监测的关键手段之一。国内外许多学者利用遥感技术对海岸线的淤蚀演变进行了大量研究。SHEIK 等^[2]利用 6 期 IRS 和 Landsat 数据提取了印度南部的科摩林角及杜蒂戈林间约 160 km 的海岸线, 并利用数字岸线分析系统计算岸线变化率, 分析岸线的淤蚀情况; 巢子豪等^[3]用数字岸线分析系统中的终点变化速率模型对 1984—2012 年海州湾岸线进行时空

演变分析, 发现海州湾岸线整体呈现淤积的趋势; 沈昆明等^[4]以 1985—2018 年的 6 期 Landsat 遥感影像数据为基础, 运用数字海岸线分析系统, 利用面积法和基线法分析海州湾岸线时空演变, 并对岸线进行分类和驱动力分析。目前对海州湾整体岸线变迁的研究较多, 但对不同类型岸线的研究较为欠缺, 随着人工岸线的增加和不同类型岸线的占比变化, 尤其是 2012 年后, 研究区内围垦养殖、连云港新城和赣榆新城建设, 不同类型岸会产生不同的淤蚀演变, 而开展海岸线整体时空演变预测会出现不同程度偏差, 导致结果不准确。

前人对于海岸线预测进行了深入全面的研究和分析。王奎峰等^[5]预测未来黄河流域大概率不会进行大幅度摆动, 向海推进速率会随着水路来沙减少而降低; 常军等^[6]预测黄河三角洲河口沙嘴将不断被侵蚀。以上对海岸线的预测大多基于多期岸线数据的定性预测, 对海岸线变迁的定量预测较少。本文利用 2013—2021 年每年 2 期共 18 期 Landsat 8 影像, 从海岸类型多样性指数、岸线变化速率、净海岸迁移量 3 方面分别对海州湾各类型岸线 9 年间淤蚀演变情况进行分类分析, 利用 Prophet 时间序列模型结合基线法对海岸线进行定量预测。海州湾不同类型岸线演变的分类研究及定量预测对海岸线的变化分析具有理论意义, 对海州湾合理利用海岸资源以及可持续发展具有一定实践意义。

收稿日期: 2022-09-01

资助项目: 江苏省重点研发计划项目 (BE2018676); 江苏省研究生实践创新计划项目 (CX116410859)

第一作者: 孔德旋 (1997—), 男, 在读硕士, 主要从事海洋信息技术方面的研究工作。E-mail: 1035328211@qq.com

* 通讯作者: 张存勇 (1971—), 男, 博士, 副教授, 主要从事海洋信息技术方面的研究工作。E-mail: 450800334@qq.com

1 研究区域

研究区北起江苏连云港绣针河口(35°01'44"N、119°13'19"E),南达连云港西大堤西部岸段(34°46'09"N、119°23'15"E)(图1)。岸线类型包

括自然岸线和人工岸线,其中,绣针河口至兴庄河口岸线为砂质岸线;兴庄河口至临洪河口岸线归为淤泥质岸线;临洪河口至连云港西大堤西部岸线为基岩岸线。由于人工岸线基本不变,因此,本文重点研究自然岸线的时空演变和定量预测。

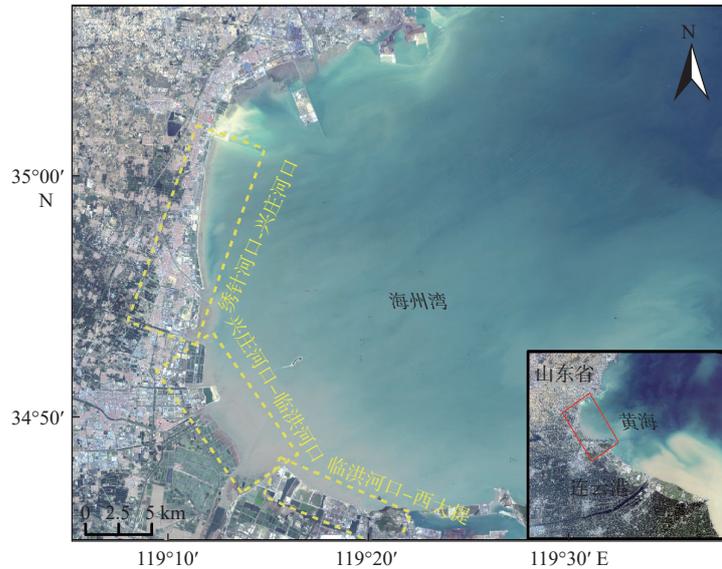


图1 海州湾及研究区地理位置

Fig.1 The geographical location of Haizhou Bay and the study area

2 数据来源及方法

2.1 数据源及预处理

本文综合考虑遥感影像数据的成像日期及遮挡云量因素,从Landsat 8 OLI卫星遥感影像中选取成像较为清晰、云量覆盖 $\leq 1\%$ 、具有较大研究意义的2013—2021年共18期(每年2期)遥感图像,对影像数据进行辐射校正、大气校正和图像裁剪等预处理后,选取影像的1~7波段组合,获得研究需要的数据集。

2.2 岸线数据解译与提取

利用经过预处理后的遥感影像数据,采用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)进行影像水体提取,并用自动阈值分割法中的天津算法(Otsu)进行二值化处理,将处理后的影像转换为evf格式后,再转换为ArcGIS可以识别的shp文件,在ArcGIS中将影像shp面要素去除零碎面后转换为线,根据《我国近海海洋综合调查和评价专项海岸线修测技术规程》^[7]中的自然岸线分类标准,在ArcGIS中进

行人机交互解译,建立各类型岸线的矢量化文件,提取水边线。

2.2.1 岸线提取原则

在对遥感影像进行水边线提取前,需要对不同类型岸线制定解译标志,以便后续研究工作。

(1) 砂质岸线解译标志

砂质岸线在本研究区域主要表现出2种属性特征,一种是海洋与陆地缓冲地带的砂质岸线,其次是悬崖边的砂质暗带,在影像上通常表现为灰色或灰白色。

(2) 淤泥质岸线解译标志

研究区内淤泥质岸线主要由在潮水不断冲刷下累积的淤泥堆积形成。由于浸泡在海水中的淤泥质和裸露在外的淤泥质对红外波段的反射率不同,通过近红外波段区分。

(3) 基岩岸线解译标志

基岩岸线一般为悬崖区域,岸线一般呈现不规则形状,在遥感影像上表现出来的颜色较深,波带有亮白色特征,近岸礁石为灰白色,分布散乱。

(4) 人工岸线解译标志

人工岸线指自然海岸形态改变为人工海岸形

态的人造海岸线^[8]。该类岸线在遥感影像上呈现亮度高、颜色分布狭长、纹理均匀、分布规律等特点。

2.2.2 改进的归一化差异水体指数

采用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)作为提取海岸线的主要方法。水体指数法用于岸线提取的常用方法,而其中改进的归一化差异水体指数是目前应用较多、提取精度较高的水体指数方法。改进的归一化差异水体指数拥有能够扩大水体与易混淆“建筑物”影像差异^[9-11]的优点,在一定程度上能够减小地形差异造成的影响,增加水体亮度,抑制其他背景地物,从而加强海岸线的识别精度。MNDWI指数是在归一化差异水体指数方法(NDWI)的基础上改进后得到的,指数计算公式为:

$$\text{MNDWI} = (\text{B}_{\text{Green}} - \text{B}_{\text{MIR}}) / (\text{B}_{\text{Green}} + \text{B}_{\text{MIR}}) \quad (1)$$

式中: B_{Green} 为绿光波段, B_{MIR} 为中红外波段,各自

对应于Lansat 8影像中的第3和第6波段。

2.3 水边线潮位校正

由于自然岸线中的砂质岸线和淤泥质岸线较易受到海潮影响而使具体岸线的界定变得模糊,因此,利用遥感影像提取瞬时水边线后,需要进行潮位校正才能获得自然岸线的真实形状。本文潮汐校正根据实测站1年内每个回归月的大潮(最大潮差)期间连续3日的高潮位数据统计平均值^[12]。

潮位数据源于国家海洋数据中心的历史潮汐数据。利用每个回归月最大潮差前后3日共6日的每日2次大潮平均值计算每月大潮平均值,然后计算12个回归月的平均大潮高潮位数据,结果如表1所示。2020年研究区平均大潮高潮位约为5.35 m。

表1 2020年研究区平均大潮高潮位统计

Table 1 Statistics of average spring tide level in the study area in 2020

回归月	大潮平均值1	大潮平均值2	大潮平均值3	大潮平均值4	大潮平均值5	大潮平均值6	大潮平均值7	大潮平均值8	大潮平均值9	大潮平均值10	大潮平均值11	大潮平均值12	每月总平均值
1	5.20	5.07	5.16	4.98	5.18	4.99	5.06	4.80	5.10	4.84	4.92	4.59	4.99
2	5.38	5.27	5.34	5.22	5.35	5.14	5.22	5.03	5.23	4.92	5.02	4.78	5.16
3	5.54	5.47	5.47	5.41	5.51	5.32	5.32	5.21	5.39	5.06	5.07	4.94	5.31
4	5.59	5.46	5.59	5.62	5.50	5.21	5.50	5.51	5.32	4.86	5.31	5.32	5.40
5	5.51	5.63	5.41	5.54	5.53	5.52	5.23	5.38	5.48	5.30	5.00	5.18	5.39
6	5.35	5.58	5.28	5.53	5.37	5.49	5.17	5.42	5.35	5.31	5.01	5.27	5.34
7	5.60	5.36	5.59	5.37	5.56	5.24	5.54	5.26	5.48	5.09	5.44	5.11	5.39
8	5.77	5.61	5.74	5.63	5.73	5.46	5.65	5.49	5.62	5.24	5.48	5.29	5.56
9	5.82	5.78	5.77	5.76	5.79	5.61	5.62	5.59	5.68	5.34	5.38	5.33	5.62
10	5.72	5.76	5.65	5.71	5.71	5.60	5.47	5.52	5.61	5.32	5.21	5.26	5.55
11	5.47	5.57	5.40	5.52	5.46	5.41	5.25	5.35	5.37	5.15	5.02	5.13	5.34
12	5.13	5.27	5.12	5.29	5.10	5.12	5.05	5.19	5.02	4.89	4.92	5.03	5.09

提取砂质岸线和淤泥质岸线需要利用潮位数据对瞬时水边线进行潮位校正。潮位校正的原理如图2所示。

C1、C2分别为同一年份下2个不同时间点遥感影像提取的瞬时水边线, h_1 和 h_2 分别为2个不同时间点下瞬时水边线的潮位高度, H 为真实岸线所在的潮位高度即平均大潮位的潮位高度。水平距离 L 的计算公式为:

$$L = \frac{H - h_2}{h_2 - h_1} \times \Delta L \quad (2)$$

以2020年2月4日02:36:54和2020年4月24日

02:36:22的2幅影像为例,当日的潮位数据如表2所示,2个时间点的瞬时潮位 h_1 、 h_2 分别为3.77和1.13 m。假定在研究范围内,砂质岸线的坡度角均为 θ_1 ,淤泥质岸线的坡度角均为 θ_2 。2020年2月4日的遥感影像中选取控制点共30个,其中,砂质岸线选取20个,淤泥质岸线选取10个,利用ArcGIS软件获得2幅影像瞬时水边线的最短距离。经计算,砂质岸线和淤泥质岸线的平均距离 ΔL_1 和 ΔL_2 分别为6.44 m和13.44 m。将所得的 H 、 ΔL_1 、 ΔL_2 和 h_1 、 h_2 代入公式(2)中,计算所得的砂质岸线和淤泥质岸线的潮位校正水平距离 L_1 和 L_2 分别为

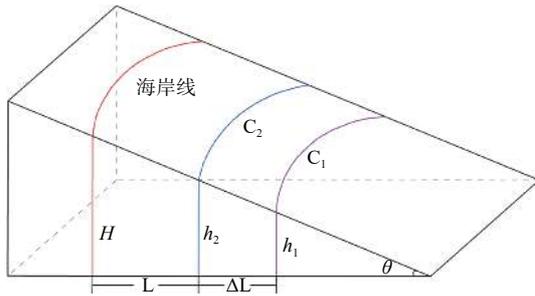


图 2 潮位校正原理

Fig.2 Principle of the tide level correction

10.29 m 和 21.48 m。利用 L 的值对砂质岸线和淤泥质岸线进行相应的潮位校正, 获取真实海岸线形状。

表 2 2020 年潮位数据
Table 2 The tide level data of 2020

连云港潮位站	2020年2月4日	2020年4月24日
潮时	02:36:54	02:36:22
潮高/m	3.77	1.13

2.4 海岸线多样性指数

在对海州湾岸线分类的基础上, 建立海岸线类型多样性指数 (ICTD)^[13], 对 2013—2021 年的海岸线类型多样性变化进行定量分析, 计算公式为:

$$ICTD = 1 - \sum_i^n L_i^2 / \left(\sum_i^n L_i \right)^2 \quad ICTD \in (0, 1) \quad (3)$$

式中: n 为海岸线划分类别的总数量;

L_i 为第 i 种类型的岸线长度, m 。

ICTD 的值域介于 0~1, 指数值越小, 岸线类型越单一, 指数越大, 各类型岸线长度均衡, 岸线类型越多样。

2.5 端点变化速率及净海岸移动量

利用 ArcGIS 软件的 DSAS 模块计算海州湾岸线变迁速率 (EPR) 和净海岸移动量 (NSM) 对岸线进行定量化分析。历年平均变化率用 m/a 的正负值表示, 正值代表淤积, 负值代表侵蚀^[14]。净海岸移动量用 m 的正负值表示。

EPR 是以岸线迁移距离除以最旧和最新海岸线之间的相差时间, 计算公式为:

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

式中: $E_{i,j}$ 为从基线延伸的切线 H 在相邻年份间岸线终点变化速率, m/a ;

d_j 为第 j 期海岸线沿切线 H 到基线的距离, m ;
 d_i 为第 i 期海岸线沿切线 H 到基线的距离, m ;
 $\Delta Y_{j,i}$ 为第 j 期与第 i 期海岸线年份数的差值。

NSM 为距离最远与最近岸线之间的净海岸距离, 仅与 2 条岸线有关。

2.6 Prophet 时间序列预测模型

本文利用 Prophet 时间序列预测模型结合基线法对海州湾海岸线进行预测。Prophet 模型是 Facebook 开源的可分解的时间序列预测模型^[15-17]。Prophet 相比常用的机器学习方法具有更快的拟合速度, 相比传统统计学模型具有更强的灵活性, 并且可以对缺失数据进行自动拟合。Prophet 模型公式为:

$$y(t) = g(t) + s(t) + h(t) + \varepsilon_t \quad (5)$$

式中: $g(t)$ 为趋势函数, 代表时间序列中的非周期变化趋势;

$s(t)$ 为周期函数, 表述时间序列中的周期变化;

$h(t)$ 为假期函数, 表示时间序列中的节假日影响 (在本次研究中不需要);

ε_t 为噪声项, 代表残差波动, 即模型未预测到的趋势。

此外, Prophet 模型可以将加法变为乘法, 组成乘法模型, 该模型常用于非线性的复杂预测中。

趋势函数 $g(t)$ 分为 2 种, 一种是 Linear Regression 分段线性函数模型, 通常 Prophet 会默认使用线性模型进行趋势预测; 另外一种 Logistic Regression 饱和增长函数模型。基于 Linear Regression 分段函数模型的公式为:

$$g(t) = (k + \alpha(t)\delta) \times t + (m + \alpha(t)^T \gamma) \quad (6)$$

式中: k 为分段线性函数的增长速率;

δ 为增长速率 k 的变化量;

m 为偏移量;

t 为时间戳;

$\alpha(t)$ 为指示函数;

$\alpha(t)^T$ 为指示函数 $\alpha(t)$ 的转置向量;

γ 为平滑处理的偏移量, 能够使函数分段连续。

Prophet 时间序列预测模型可以设置变点来改变模型增长率, 从而向模型中加入趋势变化信息。假设对于时间戳 t 有 n 个变点, $\alpha(t) = (\alpha_1(t), \dots, \alpha_n(t))^T$, $\gamma = (\gamma_1, \dots, \gamma_n)^T$; 对于时刻 s_j , 其偏移量为 $\gamma_j, \gamma_j = -s_j \delta_j$, 当时间戳 $t \geq s_j$, $\alpha_j(t) = 1$, 否则 $\alpha_j(t) = 0$ 。

基于 Logistic Regression 饱和增长模型, 公式

如下:

$$g(t) = \frac{C(t)}{1 + \exp(-k(t-m))} \quad (7)$$

式中: $C(t)$ 为模型最大容量, 其值的大小会跟随时间的变化而出现变化, 需要进行人为提前设置;

k 值和 m 值与分段函数模型相同。

但是在公式(7)中, 此时的最大容量 $C(t)$ 和增长速率 k 均为固定值, 然而在研究海岸线形状预测时 $C(t)$ 和 k 的值均不是处于恒定状态, 因此, 将趋势上限值变化和增长速率变化点归纳进增长模型中, 最终得到分段式的 Logistic Regression 增长模型, 公式为:

$$g(t) = \frac{C(t)}{1 + \exp(-(k + \alpha(t)^T \delta) \cdot (t - (m + \alpha(t)^T \gamma)))} \quad (8)$$

Prophet 模型的季节性因子 $s(t)$ 用傅里叶级数拟合周期模型, 公式为:

$$s(t) = \sum_{n=1}^N \left(\alpha_n \cos \frac{2\pi nt}{P} + b_n \sin \frac{2\pi nt}{P} \right) \quad (9)$$

式中: P 为时间序列具有的周期, 当 $P=7$ 时, 表示以周为周期, $P=365.25$ 时, 表示以年为周期;

α_n 和 b_n 分别为进行拟合的待估参数;

N 值的大小可以拟合模型周期季节性的变化速率, 但过高的 N 值则会导致过度拟合的风险。默认使用 $N=10$ 来表示以年为单位的周期变化, $N=3$ 表示以周为单位的周期变化。在本研究中由于历年岸线的具体月份值存在差异, 所处的季节也不同, 因此, 将邻近 2 年的岸线迁移量以周为基本单位进行迁移量平均化处理, 并以周为周期建立岸线形状预测模型, 模型工作原理如图 3 所示。

3 结果与讨论

3.1 海岸线多样性指数变化

借助 ArcGIS 软件对研究区内海岸线类型进行划分并测量岸线长度, 对自然岸线进行二级分类, 分别为砂质岸线、淤泥质岸线和基岩岸线。根据式(3)计算可知, 2014—2020 年, 海州湾岸线 ICTD 值约为 0.76, 2013 和 2021 年 ICTD 值较低, 约 0.746 (图 4), 因此, 海州湾地区的岸线类型较为丰富, 各类型岸线长度始终均衡。2013—2018 年, 海州湾围海造陆、围垦养殖和港口建设等人为活动使人工岸

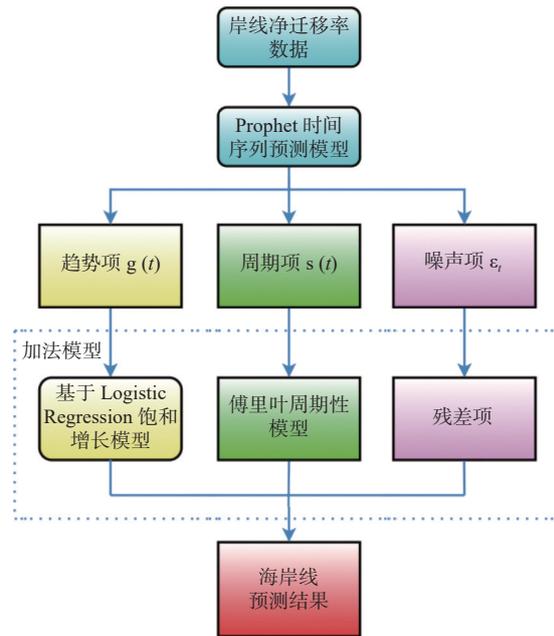


图 3 Prophet 岸线形状预测模型工作原理

Fig.3 The working principle of the Prophet shoreline shape prediction model

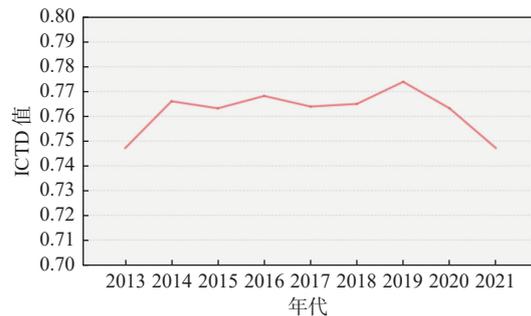


图 4 2013—2021 年海岸线类型多样性指数变化

Fig.4 The change of coastline type diversity index from 2013 to 2021

线的占比快速增加, 导致 2018 年之后海州湾岸线 ICTD 值的陆续降低, 到 2021 年 ICTD 值降到最低。

3.2 海岸演变分析

利用 ArcGIS 软件 DSAS 模块计算 9 年间的海岸线变迁速率 (EPR)、净海岸迁移量 (NSM)。将基线设定为各时期的岸线向陆侧, 以横截面长度 2 000 m、采样间距 20 m, 自南向北沿基线方向生成多条垂线来计算岸线变迁速率和净海岸迁移量。

3.2.1 基岩岸线

利用 ArcGIS 模块的 DSAS 系统自东向西沿基线方向生成 772 条垂线计算岸线变迁速率和净海岸迁移量。由于基岩岸线较为稳定, 短期内岸线不会出现明显变化, 因此, 在研究基岩岸线的变迁情

况时, 将连云港西大堤西侧—临洪河口的人工岸线连同考虑。如图 5 所示, 基岩岸线的蚀淤变化整体较为稳定, 平均变迁速率为 3 m/a, 平均净迁移量为 21 m, 岸线变迁速率较低, 岸线净迁移量较小。最大变化区域为 445 号垂线附近, 最大变迁速率为 29 m/a, 最大净迁移量为 221 m。部分区域变化较大是因为 2009 年之后该区域连云港新城建设和港口用地的大量扩建。此外, 人工设施扩建时, 岸线由原来的不规则自然岸线转变为规则分布的岸线, 部分区域显示为蚀退趋势。

3.2.2 淤泥质岸线

沿基线方向自东向西生成 1 624 条垂线计算岸线变迁速率和净海岸变化量(图 6), 淤泥质岸线区域整体呈现向海淤积的趋势, 平均变化率为 22 m/a, 平均净迁移量为 167 m, 岸线变迁速率较高, 净迁移量较大。淤泥质岸线变化的区域主要发生在 1—1050 号垂线, 即临洪河口至琴岛栈桥的淤泥质岸段。最大变化区域发生在 753 号垂线附近, 最大变迁速率为 125 m/a, 最大净迁移量为 951 m。琴岛栈桥至兴庄河口岸段由于赣榆新城的建设和围垦养殖的扩张使本岸段的淤泥质岸线大部分变为人工岸线,

因此, 2013—2021 年本岸段的时空演变情况较为稳定, 与临洪河口至琴岛栈桥部分差异较大。

3.2.3 砂质岸线

沿基线方向生成 1 024 条垂线计算岸线变迁速率和净海岸迁移量(图 7), 该区域砂质岸线较为稳定, 无明显蚀淤倾向。平均岸线变化率为 0.6 m/a, 平均净迁移量为 5 m, 岸线变迁速率低, 岸线净迁移量小, 岸线稳定。最大变化区域为 428 号垂线附近, 最值点的出现是由于河口位置岸线的形状变化导致生成的垂线与相邻年岸线对应点位置变动而出现的误差。由于 2013—2021 年研究区内人工岸线较少, 岸线演变主要受自然因素的影响, 整体较为稳定。

3.3 海岸线预测

3.3.1 岸线预测模型验证

首先利用基线法选取靠岸侧基线, 并以 10 m 为距离对海州湾岸线数据进行处理, 获得基线到各年份海岸线共计 1 080 条垂线段, 将 2013—2019 年的岸线数据导入 Prophet 时间序列预测模型进行 2021 年岸线预测, 并将所得结果与 2021 年实际岸线进行

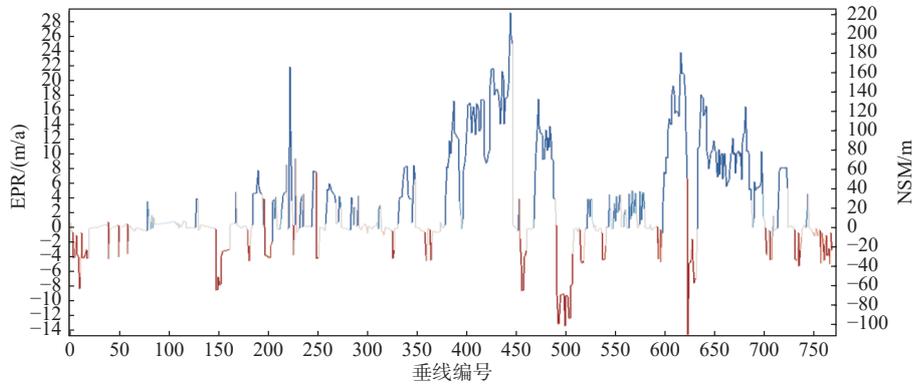


图 5 基岩岸线岸线变迁速率和净海岸迁移量
Fig.5 The EPR and NSM of rocky coast

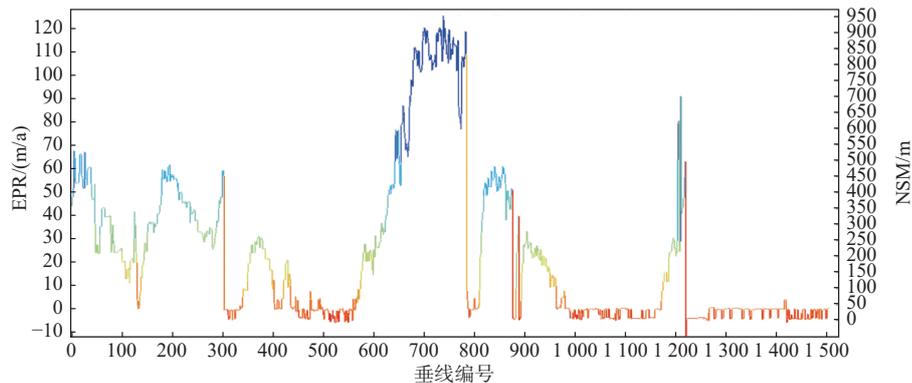


图 6 淤泥质岸线岸线变迁速率和净海岸迁移量
Fig.6 The EPR and NSM of muddy coast

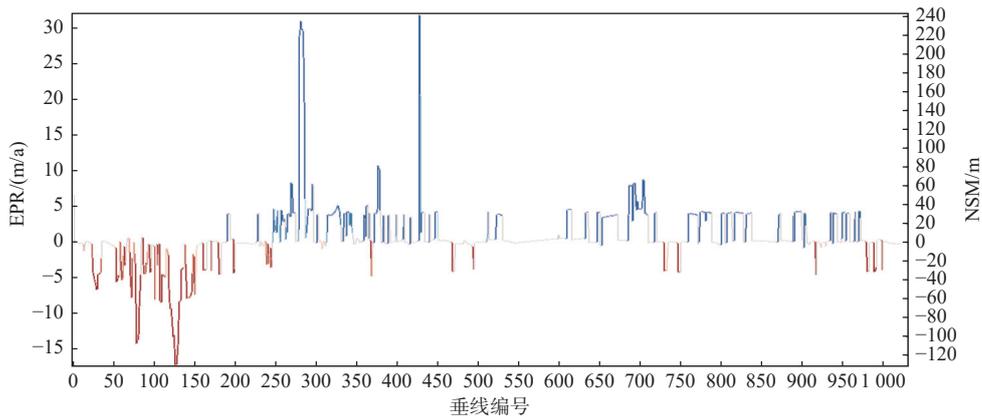


图7 砂质岸线岸线变迁速率和净海岸迁移量

Fig.7 The EPR and NSM of sandy coast

邻域分析(图8),得出模型预测精度。以300m为间隔等距离选取281个验证点,计算各类型岸线、总岸线的平面位置精度及岸线长度误差。规定以海岸线平均位移量的15%作为误差参考值,即验证点间最短距离小于相邻2期岸线净位移量的15%,预测结果有效,可以作为参考值,反之则不作为参考值^[13]。经验证,总岸线的平面位置精度为32.51m,长度误差为1.36%,模型的预测精度为63.86%(表3)。从表中可以看出,预测不准确部分主要发生在淤泥质岸线覆盖的河口地区(临洪河口)以及部分基岩岸线。临洪河口区域由于受到河流影响较大,岸线较为活跃,预测精度较低;基岩岸线较为

稳定,岸线不会出现过大变化,岸线提取的偶然误差会导致精度的降低。由于本文的岸线预测结果是利用预测模型结合基线法进行岸线各位置点的移动量预测,集合计算所有的位移量从而获得最后的岸线形状,不同类型岸线之间的预测结果并不互相影响,预测不准确区域虽然会降低整体岸线的预测精度数值,但不会影响其他地区岸线的预测结果。由于海州湾地区岸线类型组成丰富,年平均位移较复杂,且原始数据量较少,预测精度有待进一步提高,进行岸线淤蚀演变预测可作为趋势性指标分析,对于海州湾海岸资源的管理利用和开发具有一定参考价值。

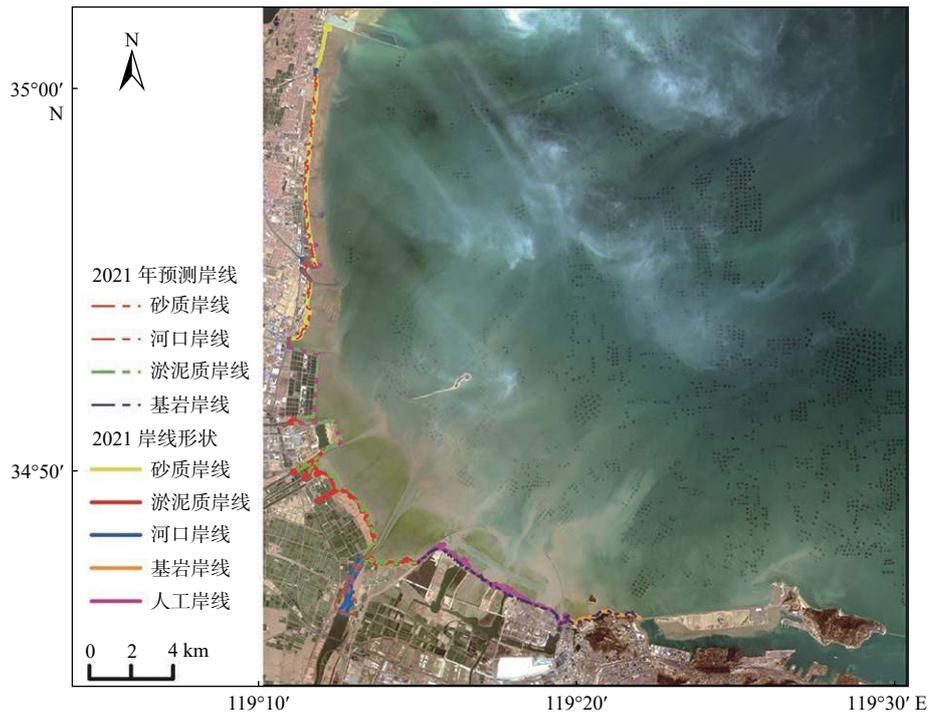


图8 2021年预测岸线与实际岸线位置

Fig.8 The predicted and actual shoreline positions in 2021

表 3 模型预测精度评价

Table 3 The evaluation on the model prediction accuracy

	砂质岸线	河口岸线	淤泥质岸线	临洪河河口岸线	基岩岸线	总岸线
平面位置精度/m	45.26	30.50	50.05	151.67	59.12	32.51
长度误差/%	7.38	4.32	21.45	12.58	18.80	1.36
模型预测精度/%	68.63	54.55	60.19	50.00	48.21	63.86

3.3.2 2025 年海岸线预测

根据 2013—2021 年海岸线数据对 2025 年海州湾岸线进行预测分析(图 9)。结果显示, 2025 年砂质岸线、基岩岸线及大部分河口岸线较为稳定, 较 2021 年岸线位置不会出现大幅度蚀淤变化。淤泥质岸线出现向海淤积演变, 总迁移量为 42 m。临洪河口地区的淤泥质岸线出现向海淤积, 总迁移量为 28 m。根据沈昆明等^[18]2020 年相关研究结果显示, 2014—2018 年绣针河口—拓汪河段海岸线年变化率达到 9.20 m/a, 拓汪河—新沐河段海岸线年变化率为 5.81 m/a, 因此认为本研究预测结果具有较高合理性。

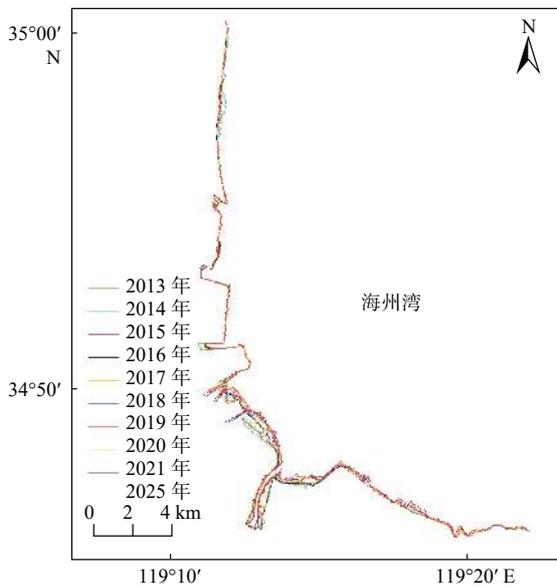


图 9 2013—2025 年岸线位置

Fig.9 The shoreline positions from 2013 to 2025

4 结论

(1)2013—2021 年, 海州湾海岸多样性指数整体始终保持在 0.76 左右, 岸线类型多样, 9 年间各类型岸线长度较为均衡。

(2)基岩岸线整体呈较稳定状态; 淤泥质岸线兴庄河口至琴岛栈桥处于较为稳定状态, 琴岛栈桥至临洪河口的淤泥质岸线不稳定, 岸线呈明显向海

淤积趋势; 砂质岸线较为稳定, 岸线无明显蚀淤变化倾向。

(3)经预测, 2025 年海州湾淤泥质岸线和临洪河口地区两侧岸线会出现向海淤积演变趋势, 其余类型岸线较为稳定, 没有明显淤蚀变化。

参考文献:

- [1] 王颖, 季小梅. 中国海陆过渡带: 海岸海洋环境特征与变化研究[J]. 地理科学, 2011, 31(2): 129-135.
- [2] SHEIK M. A shoreline change analysis along the coast between Kanyakumari and Tuticorin, India, using digital shoreline analysis system[J]. 地球空间信息科学学报(英文), 2011, 14(4): 282-293.
- [3] 巢子豪, 高一博, 谢宏全, 等. 1984—2012 年海州湾海岸线时空演变研究[J]. 海洋科学, 2016, 6: 95-100.
- [4] 沈昆明, 李安龙, 蒋玉波, 等. 基于数字岸线分析系统的海岸线时空变化速率分析: 以海州湾为例[J]. 海洋学报, 2020, 42(5): 5-11.
- [5] 王奎峰, 李念春, 王薇. 黄河三角洲多年海岸线动态变迁特征及演化规律[J]. 应用海洋学学报, 2018, 37(3): 330-338.
- [6] 王厚军, 袁广军, 刘亮, 等. 海岸线分类及划定方法研究[J]. 海洋环境科学, 2021, 40(3): 430-434.
- [7] 国家海洋局 908 专项办公室. 我国近海海洋综合调查与评价专项技术规程[M]. 北京: 海洋出版社, 2006.
- [8] 常军, 刘高焕, 刘庆生. 黄河口海岸线演变时空特征及其与黄河来水来沙关系[J]. 地理研究, 2004, 23(3): 339-346.
- [9] 张林鹏, 于婉, 张子莺, 等. 基于MNDWI/LSMM/K-T变换的淮河流域面状水体提取的比较研究: 以南湾水库为例[J]. 北方环境, 2020, 32(10): 142-144, 146.
- [10] 孙佩, 汪权方, 张梦茹, 等. 基于NDVI-MNDWI特征空间的水体信息增强方法研究[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2018, 40(6): 574-579.
- [11] 李明, 郑小慎. 二次改进归一化差异水体指数(SMNDWI)提取海岸线的研究[J]. 海洋通报(英文版), 2016, 18(2): 15-27.
- [12] 鞠超. 基于面向对象的高分一号遥感图像海岸线自动提取研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017.
- [13] 祝琳, 褚忠信, 沈昆明, 等. 黄河三角洲近期海岸线演变与预测[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(8): 20-27.
- [14] NASSAR K, FATH H, MAHMUD W E, et al. Automatic detection of shoreline change: case of North Sinai coast, Egypt[J]. Journal of Coastal Conservation, 2018, 22: 1057-1083.
- [15] 李帅, 汤振权, 匡亚红. 湖北省近 50 年来的气温和降水变化趋

- 势分析[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(4): 1652-1655.
- [16] TAYLOR J S, LETHAM B. Forecasting at scale[J]. *The American Statistician*, 2018, 72(1): 37-45.
- [17] 许浩然, 陈中举, 杨兆前, 等. 基于Prophet模型的湖北省月降水量预测[J]. *节水灌溉*, 2022, 2: 7-12, 20.
- [18] 沈昆明, 李安龙, 蒋玉波, 等. 基于数字岸线分析系统的海岸线时空变化速率分析: 以海州湾为例[J]. *海洋学报(中文版)*, 2020, 42(5): 117-127.

Evolution and prediction of shoreline erosion and siltation in Haizhou Bay

KONG Dexuan, ZHANG Cunyong^{*}, HOU Jiankang

(School of Marine Technology and Geomatics, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China)

Abstract: The Landsat 8 remote sensing images of Haizhou Bay, Jiangsu, East China, in nine years from 2013 to 2021 were selected to analyze the evolution of erosion and siltation of various types of coastlines in Haizhou Bay in terms of the diversity index of coastline types, shoreline change rate (EPR), and net coastal movement (NSM) of coastline changes in the nine years, and qualitatively predict the coastline of 2025 based on the Prophet model. Results show that the bedrock shoreline was relatively stable as a whole in the past nine years, the muddy shoreline from Qindao pier to Linhong River mouth was unstable with obvious oceanward siltation, and the sandy shoreline was relatively stable as a whole with no obvious erosion and siltation tendency. It is predicted that in 2025, the muddy shoreline of Haizhou Bay and the shoreline in Linhong River mouth will extend seaward, and the remaining shorelines will be relatively stable without obvious siltation and erosion changes.

Key words: Haizhou Bay; remote sensing; coastline; EPR; NSM; Prophet model