

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.

ZHU Lin, CHU Zhongxin, SHEN Kunming, et al. Recent changes and forecast of the coastline of the Huanghe River deltaic regions[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(8): 20-27.

黄河三角洲近期海岸线演变与预测

祝琳, 褚忠信*, 沈昆明, 崔恩苹, 马晓歌

(中国海洋大学海洋地球科学学院 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 选择 1976—2020 年 9 期 Landsat 卫星遥感影像提取海岸线, 从海岸线类型多样性指数、海岸线粗糙度、岸线变迁速率对黄河三角洲地区岸线近期演变进行定量分析, 并对 2030 年海岸线形态进行预测, 结果表明: 44 年来, 海岸线类型多样性指数变大, 海岸线类型趋向多样化; 海岸线形态粗糙, 海岸线粗糙度曲线由相对平滑变为相对粗糙, 形成众多“锯齿”状波动, 后逐渐变平滑; 河口地区岸线快速向海推进, 河口两侧地区岸线则以退蚀为主; 部分人工岸线向海快速推进后基本保持不变; 经预测, 2030 年黄河三角洲河口地区, 清 8 汊流路附近及宋春荣沟至虎头崖段岸线向海延伸, 东风港至孤东油田段海岸线以侵蚀后退为主。

关键词: 黄河三角洲; 海岸线; 卫星遥感; 河口地区

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.080

0 引言

海岸线形态是海陆生态体系中多要素共同作用的结果, 受自然和人为要素影响, 在不同时期具有显著差异^[1-3]。黄河三角洲作为中国三大河口三角洲之一, 海岸线演变监测预测对生态经济化和经济生态化高质量发展具有重要科学指导作用, 也为中国应对气候变化、制定科学措施提供参考。

遥感有分辨率高、实时性、负载信息量大、综合性与可比性强等特点, 拓宽了数据资料的时空尺度, 同时可以利用所负载的数据信息多维度分析岸线演变特征, 使研究更具科学性和全面性。CHU 等^[3]提取 1976—2010 年遥感影像中一般高潮线数据, 对三峡工程启用前后长江三角洲的岸线进积与侵蚀情况进行研究; VIVEK 等^[4]采用数字海岸分析系统 DSAS(Digital Shoreline Analysis System), 进行端点变化速率 EPR(End Point Rate)计算, 得到

Chilika 海岸 30 多年来侵蚀速率和进积速率。

对于黄河三角洲海岸预测, 前人也进行了较为深刻与全面的分析, 多是基于多期海岸线数据变化规律来对海岸线进行的定性预测。韩志聪等^[5]将依靠开源 QGIS 平台搭载元细胞自动机模型, 建立冲淤预测系统, 经过对 2013 年岸线验证, 模型精度达到 87.352%; 王奎峰等^[6]预测未来黄河流域进行大幅度摆动可能性较小, 会在清 8 断面顶点东北方向发展新三角洲且面积不会很大, 向海推进速率随来水来沙量减少而减小; 常军等^[7]通过对未来水沙条件预估, 预测未来河口沙嘴将不断被侵蚀。此前考虑每期岸线之间联系的预测模型较少, 卡尔曼滤波器则是基于相邻时期海岸线数据, 获得海岸线变迁的线性回归速率关系, 以其为基础对未来海岸线可进行定量预测; 同时, 通过定义海岸线粗糙度对黄河三角洲海岸线形态变化进行研究。

1 研究区概况

黄河三角洲属于北半球暖温带大陆性半湿润季风气候区。由于受到 M2 分潮无潮点的影响, 神仙沟至五号桩为无潮区, 两侧地区则为不规则的半日潮^[1,7]。同时, 受到气候与入海径流的影响, 浅海表层平均水温为 13.1~18.7℃, 每年存在 3 个月的

收稿日期: 2021-04-07

资助项目: 国家自然科学基金青年项目(41376052)

作者简介: 祝琳(1996—), 女, 硕士, 主要从事海岸带地质方面的研究工作。E-mail: shizhuliny@163.com

* 通讯作者: 褚忠信(1976—), 男, 博士, 教授, 主要从事海洋地质与第四纪地质方面的研究工作。E-mail: zhongxinchu@ouc.edu.cn

结冰期, 盐度约为 30‰, 入海口附近存在低温、低盐水舌。黄河三角洲及其以南地区在地质构造上处于济阳拗陷, 地势上由 SW 向 NE 逐渐降低, 由黄河沿岸向两侧降低, 研究区以平原和浅海地区为主, 上覆全新世沉积, 主要是冲积物与海积物^[8]。40 多年来, 黄河入海泥沙通量急剧减少, 造陆所需泥沙供应减少导致海岸进积速率减慢, 部分地区出现明显的侵蚀, 加之人类活动对海岸带改造, 造成地面下陷、相对海平面上升、岸线向陆退蚀等现象, 使岸线的开发与保护逐渐成为黄河三角洲地区经济与生态高质量发展急需解决的重要课题。

本文研究区西起滨州市无棣县东风港(118°2'50"E, 38°13'37"N)南, 包含整个东营沿海地区至烟台莱州市虎头崖村(119°46'21"E, 37°9'22"N), 此海岸带地区是自然地理要素和社会经济发展受黄河影响较大的区域(图 1)。

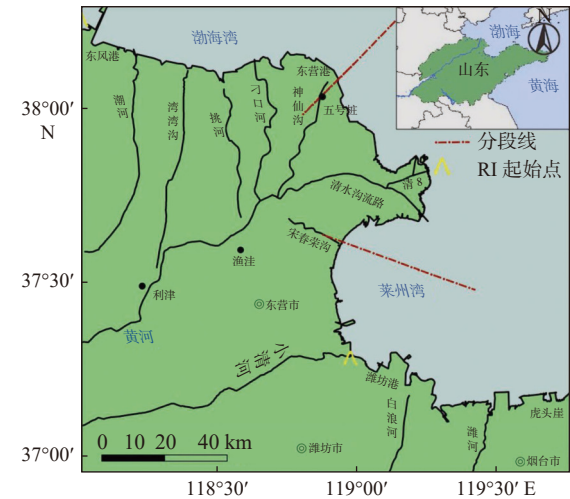


图 1 研究区位置图
Fig.1 Location of the Huanghe River Delta

2 数据来源与处理

本文选择 1976、1986、1996、2000、2004、2008、2012、2016 和 2020 年 9 期云量<5% 的 Landsat 卫星遥感影像作为主要研究数据。数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)、美国地质调查局(<http://www.usgs.gov>), 影像数据信息详见表 1。

2.1 图像预处理

①去条带: 由于 Landsat-7 ETM+ 机载行扫描器故障, 对于 2003 年以后部分影像进行去条带修补。②假彩色合成与图像融合: 利用 ENVI 软件对影像进行标准假彩色合成, 对所研究的地物进行视觉效果增强。③将 ETM+、OLI_TIRS 影像中包含 15 m 高分辨率单波段低分辨率多光谱影像进行图像融合, 生成多光谱特征和高分辨率兼具的图像。④配准: 以 2012 年影像为基准对其余 8 幅影像进行配准, 选取 35 对不随时间变化且具有的明显定位特征的地标标志物作为控制点, 误差控制在 0.5 个像元点, 并对配准后的影像用三次卷积内插法进行重采样, 最大程度保留高频信息。⑤镶嵌: 对 1976 年同期的 2 幅影像进行拼接, 使影像数据可以覆盖整个研究区。

2.2 岸线解译

将预处理之后获得的影像导入 ArcGIS10.4 软件, 参考《我国近海海洋综合考察与评价专项海岸线修测技术规程》^[9] 和山东省《海岸线调查技术规范》(2019)^[10], 进行目视解译, 提取瞬时水边线, 获得海岸线矢量文件。

表 1 遥感影像信息
Table 1 Specifications of the remote sensing imaging

序号	卫星	传感器名称	条代号/行编号	获取日期	云量	分辨率/m
1-I	Landsat2	MSS	121/034	1976-12-18	—	80
1-II	Landsat2	MSS	131/034	1976-12-18	—	80
2	Landsat5	TM	121/034	1986-01-28	4.94%	30
3	Landsat5	TM	121/034	1996-07-02	—	30
4	Landsat5	TM	121/034	2000-10-17	0.42%	30
5	Landsat7	ETM+	121/034	2004-09-18	0.01%	30
6	Landsat7	ETM+	121/034	2008-09-13	0.10%	30
7	Landsat7	ETM+	121/034	2012-08-23	0	30
8	Landsat8	OLI_TIRS	121/034	2016-08-26	0.36%	30
9	Landsat8	OLI_TIRS	121/034	2020-07-20	3.80%	30

注: “—” 为遥感数据云量信息的缺失

3 研究方法

3.1 海岸线多样性指数

海岸线分类研究的基础上,通过建立海岸线类型多样性指数 $ICTD$ (Index of Coastline Type Diversity)^[11],对黄河三角洲 44 年来海岸线类型多样性变化进行定量分析,计算公式如下:

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

式中: n 为海岸线划分类型的总数量;

L_i 为第 i 种类型的海岸线长度;

$ICTD$ 值域为 0~1,当指数值越接近于 0,表示研究区内海岸线类型越单一,反之,指数值越接近于 1,则表示研究区内各类型海岸线长度较为接近,海岸线类型多样性较大。

3.2 海岸线粗糙度

海岸线粗糙度 RI (Roughness Index)定义为表征河口地区的海岸线粗糙程度的无量纲参数,用公式表示如下:

$$RI = \frac{b}{a} \quad (2)$$

式中: a 为以基准点 o 为圆心画扇形 OI 的半径;

b 为海岸线与河道上某基准点 o 之间的距离。

当 $b=a$, $RI=1$,对应圆形,规定此时的值 1 为海岸线粗糙度参考值 $\delta=1$ 。根据海岸线不同位置的 b/a 比值,可反映出岸线上各点的凹凸变化这一局部特征,进而可说明岸线的演变是向海推进还是向陆后退(图 2)。

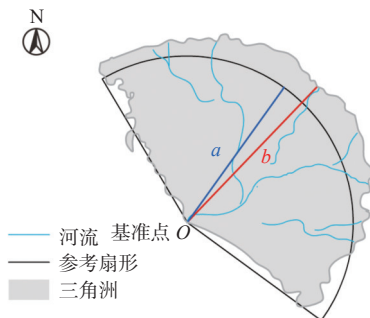


图 2 海岸线粗糙度示意图

Fig.2 Sketch map of the roughness index

3.3 端点变化速率

端点变化速率 EPR (End Point Rate)是指 2 个

时期岸线移动的距离与两期岸线对应历史时间跨度之比,其数学表达式为:

$$EPR = \frac{D_j - D_i}{Y_j - Y_i} \quad (3)$$

式中: D_j 为第 j 期海岸线与基线 b 的垂直距离;

D_i 为第 i 期海岸线与基线 b 的垂直距离;

Y_j 为第 j 期海岸线所在年份;

Y_i 为第 i 期海岸线所在年份^[12]。

3.4 卡尔曼滤波原理

卡尔曼滤波器是 KALMAN R E 提出的基于状态空间模型解决离散系统参数估计问题的滤波方法,其最佳估计准则采用最小均方差,工作过程包括预估和校正,预估过程是根据时间更新方程计算出误差协方差估计值和当前状态变量,得到对当前状态的先验估计,后以此为依据,建立下一时间状态先验预估值;校正过程则以反馈为主,将当前测量变量和预估过程得到的先验估计值带入测量更新方程,获得改进后的当前状态的后验估计^[13](图 3)。

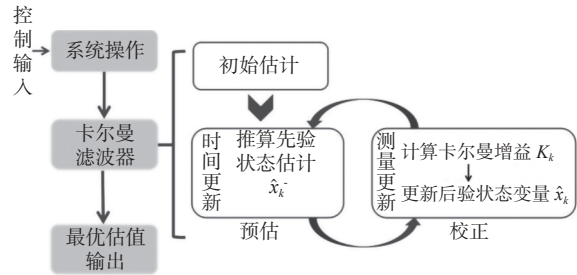


图 3 卡尔曼滤波器工作原理及流程^[13]

Fig.3 The working principle and process of the Kalman filter^[13]

在海岸线预测分析中,模型会对遇到的实际海岸线位置与模型预测位置进行分析,最小化误差后,对岸线变化速率和不确定区域进行更新^[14],根据计算获得未来 10 a 或 20 a 的海岸线预测位置数据,并生成海岸线预测点类和具有多边形特征的海岸线不确定区域。

4 结果与讨论

4.1 海岸线多样性指数变化

借助 ArcGIS 测量和分类工具,对各期海岸线进行分类并计算长度,将海岸线分为人工岸线和自然岸线,根据岸线用途进一步将人工岸线进行 2 级分类,分为港口码头岸线、工程建设岸线以及以盐

田、养殖为主的渔业岸线(图 4)。根据式(2)计算可知,自 1976 年开始,研究区海岸线类型多样性指数保持增长态势(图 5),由 1976 年的 0.04 增长至 2020 年的 0.72,自然岸线保有率逐渐降低,人工岸线的类型不断增多,长度占比增大,港口码头、渔业养殖、海岸工程等建设齐头并进,二级类型岸线长度占比相当,海岸线类型发展多样化。

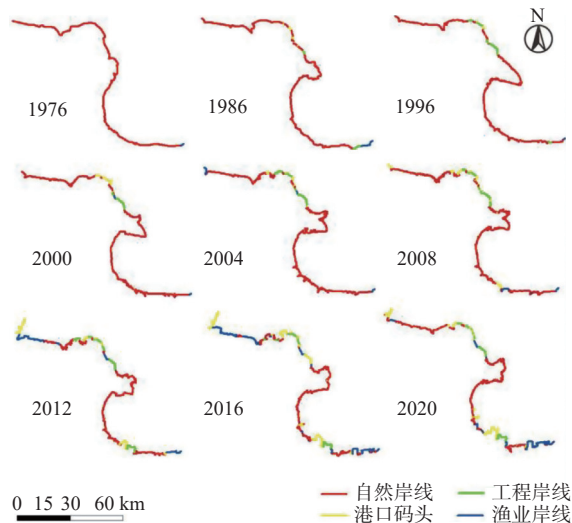


图 4 1976—2020 年海岸线类型时空变化

Fig.4 Temporal and spatial variation of coastline types from 1976 to 2020

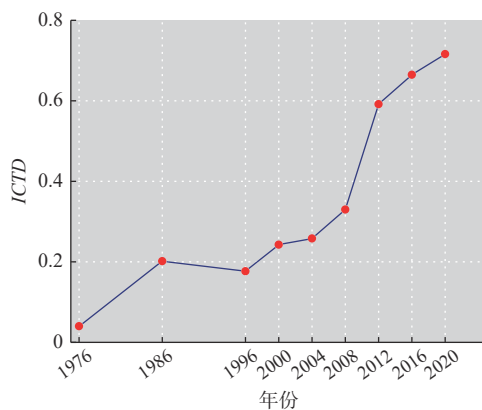


图 5 1976—2020 年海岸线类型多样性指数变化

Fig.5 Changes of ICTD in the Huanghe River Delta from 1976 to 2020

4.2 海岸线粗糙度演变特征

本文以三角洲顶点渔洼为点 o(118°36'E, 37°35'N), 岸线研究范围为东风港至小清河河口(图 1 黄色星标为起始点), 规定海岸线粗糙度固定参考值 $a=50.4$ km, 得到黄河三角洲海岸线粗糙度参考扇形 A; 设 1 000 m 为间隔对岸线依次取点 p_1 、 p_2 、 $p_3 \cdots p_n$, 依次测量海岸线上各点至点 o 渔洼的距离

b, 计算得到各期海岸线粗糙度变化情况(表 2、图 6)。

表 2 1976—2020 年海岸线粗糙度统计
Table 2 Statistics of coastline roughness index from 1976 to 2020

年份	点位数	$RI > 1$ / %	Max RI	Min RI
1976年	209	65.55	1.655 2	0.646 9
1986年	263	72.62	1.651 7	0.782 3
1996年	278	71.94	1.657 8	0.617 1
2000年	285	77.54	1.651 5	0.622 5
2004年	393	76.08	1.649 1	0.633 9
2008年	416	77.88	1.659 4	0.595 0
2012年	400	81.25	1.778 5	0.629 9
2016年	439	74.94	1.780 4	0.599 2
2020年	376	70.21	1.786 7	0.579 5

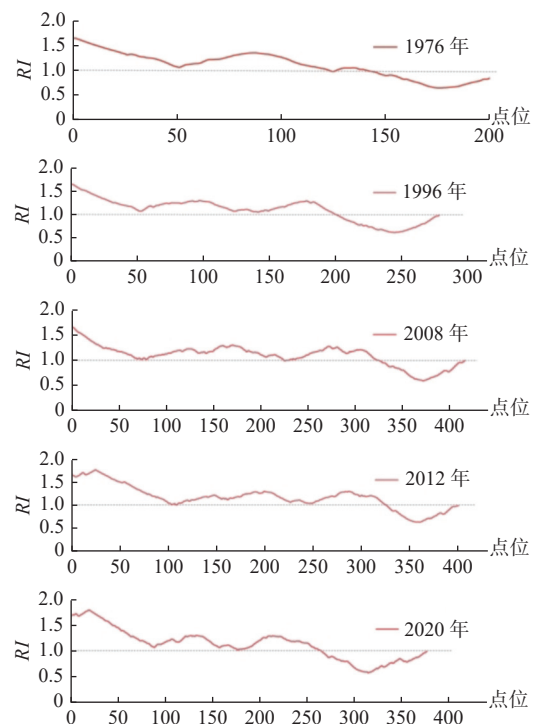


图 6 1976、1996、2008、2012、2020 年海岸线粗糙度曲线

Fig.6 Coastline roughness curves of 1976, 1996, 2008, 2012, and 2020

由图可知,40 年来黄河三角洲海岸线粗糙度表明海岸线形态演变更加曲折蜿蜒,从曲线形态上看岸线从平滑变得曲折粗糙,伴有众多的“锯齿”状波动,形态逐渐饱满;海岸线粗糙度数值最大值逐渐变大,最小值逐渐变小,极差变大,大于参考值 $\delta=1$ 的点位数占比总体表现为增大。曲线中大波峰波谷形态演变主要受到 1976 年(由刁口河流路改道至清水沟流路)、1996 年(经过人工改道至清水沟流路的清 8 断面)2 次改道影响,改变水沙供给条件,

引起部分区域海岸线较大幅度向海淤积或向陆后退^[15]; 1996 年之后曲线中小的“波浪”状和“锯齿”状波动逐渐增多, 表明局部地区小范围岸线位置发生了较大变化。整段岸线中大于参考线 $\delta=1$ 的点位占比表现为: 1976—2012 年稳定增长, 2012 年后占比逐渐降低且新增 $RI>\delta$ 值均出现在清水沟流路段以西, 表明入海河流携带大量泥沙在此处淤积, 而 1996 年以后清水沟流路以东因泥沙量供给减少, 岸线有退蚀后移趋势。曲线中大波形改变主要受到黄河改道引起水沙条件变化影响, 而较小的“锯齿”状和“波浪”状波形变动原因是人类活动对局

部地区小范围岸线的海岸开发建设。

4.3 海岸线变迁速率

借助 ArcGIS 平台的数字海岸线分析系统, 将相邻年份之间的海岸线数据两两合并, 进行端点变化数据计算, 设置横截面长度为 20 000 m, 采样间距为 800 m, 生成 387 个等间距剖面线, 得到 8 个时间段的海岸线端点变化速率数据。现将研究区岸线划分为东风港-神仙沟段、神仙沟-宋春荣沟段、宋春荣沟-莱州市虎头崖段 3 段(图 1), 分别进行结果分析(图 7)。

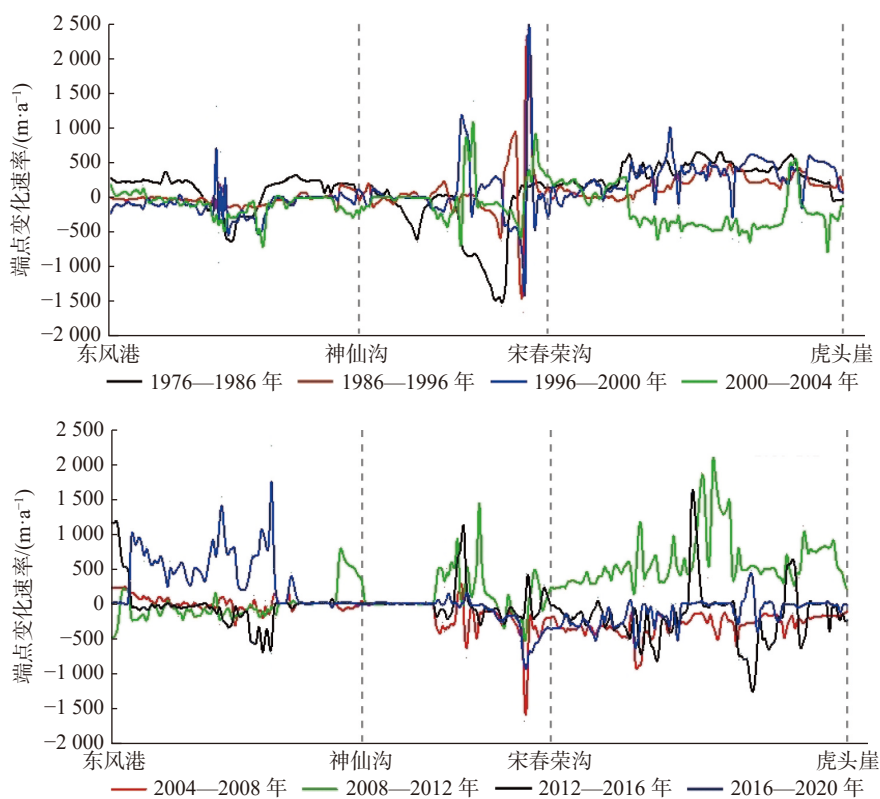


图 7 1976—2020 年端点变迁速率分布

Fig.7 The distribution of end points in the DSAS (digital shoreline analysis system) from 1976 to 2020

(1) 东风港至神仙沟段

1976—2020 年, 东风港至神仙沟段岸线年变化速率经历了快速淤积-侵蚀-快速淤积 3 个阶段。1976—1986 年岸线平均变化速率为 $99.98 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 74.14% 的岸线为淤积状态, 主要为湾湾沟至挑河部分的淤积; 1986—2016 年, 此段海岸主要受到侵蚀作用, 1986—1996 年岸线平均变化速率为 $-32.23 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 东营港以西至神仙沟附近岸线主要以侵蚀为主; 2000—2004 年海岸线端点变化速率值为 $-108.61 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 此段岸线中 76.72% 的岸线处于侵蚀状态, 挑河以东至刁口河附近受到海水侵蚀作用; 2012—2016 年,

岸线平均变化速率为 $-35.3 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 挑河与刁口河附近表现为海岸线向岸退蚀, 岸线变得曲折; 2016—2020 年, 海岸线平均变化速率为 $398.23 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 85.34% 的岸线处于淤积状态, 东风港至刁口河段岸线淤积最为明显。

(2) 神仙沟至宋春荣沟段

1976—2020 年, 神仙沟至宋春荣沟段岸线端点变迁速率变化复杂, 岸线表现出明显的空间差异性, 即清水沟流路的快速淤积造陆和以神仙沟以南、孤东油田附近的冲淤平衡。1976—1986 年, 岸线向海扩张主要在现今的孤东油田与清水沟流路附近, 黄

河自清水沟入海, 携带大量泥沙在此淤积造陆, 42.53% 的岸线处于淤积状态; 1996—2000 年, 岸线平均变迁速率为 $41.36 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 清 8 汊流路区岸线向海延伸明显, 原清水沟流路受到侵蚀; 2008—2012 年, 岸线平均变化速率为 $113.62 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 五号桩附近因工程岸线建设, 岸线增长速率较大; 2012—2016 年, 岸线平均变化速率为 $-1.64 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 河口向 NNE 方向堆积, 沙坝形成, 清水沟附近海岸继续被侵蚀, 其规模和形态均小于清 8 汊地区; 2016—2020 年, 岸线平均变化速率为 $-123.34 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 河口天然堤向海淤积速率显著减小, 64.38% 的岸线处于侵蚀状态。

(3) 宋春荣沟至虎头崖村

1976—2020 年, 宋春荣沟至虎头崖村岸线年平均变化速率反映了海岸带经历了淤积-侵蚀-淤积-侵蚀 4 个阶段。重点表现在 2008—2012 年期间, 潍烟地区海岸带围垦养殖及海岸工程建设, 岸线变迁速率变大, 平均变化速率为 $607.29 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$; 2012—2016 年, 岸线平均变化速率为 $-196.88 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 其中东营、潍坊和烟台沿海部分城市工程建设和盐田渔业养殖向海扩张, 而堤河与潍河之间岸线变迁速率

为负, 此段中, 77.37% 的岸线处于侵蚀状态, 16.79% 的岸线处于淤积状态; 2016—2020 年, 岸线平均变化速率为 $-120.17 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 莱州湾南部持续开发建设, 平衡状态岸线达到历史最大, 占比为 22.63%。

4.4 海岸线预测

4.4.1 海岸线预测模型验证

将 1976—2008 年海岸线数据导入卡尔曼滤波器, 对 2018 年东风港-孤东油田和宋春荣沟-虎头崖段海岸线进行预测, 将所得结果与 2018 年实际海岸线位置进行邻域分析(图 8), 得出模型预测的预测精度。以 500 m 为间隔等距离选取验证点 256 个, 规定 1976—2008 年海岸线平均位移量的 15% 为误差参考范围, 即验证点间最短距离小于相邻两期海岸线净位移量的 15%, 预测结果有效, 可以作为准确参考值, 反之, 则不具备预测参考价值。经统计, 共有 156 个点可以作为参考值点, 海岸线预测模拟精度为 60.93%, 模型可用来进行岸线预测。由于河口三角洲段岸线较为活跃, 年平均位移较大, 卡尔曼模型分析结果精度有限, 仅作为趋势性指标进行分析。

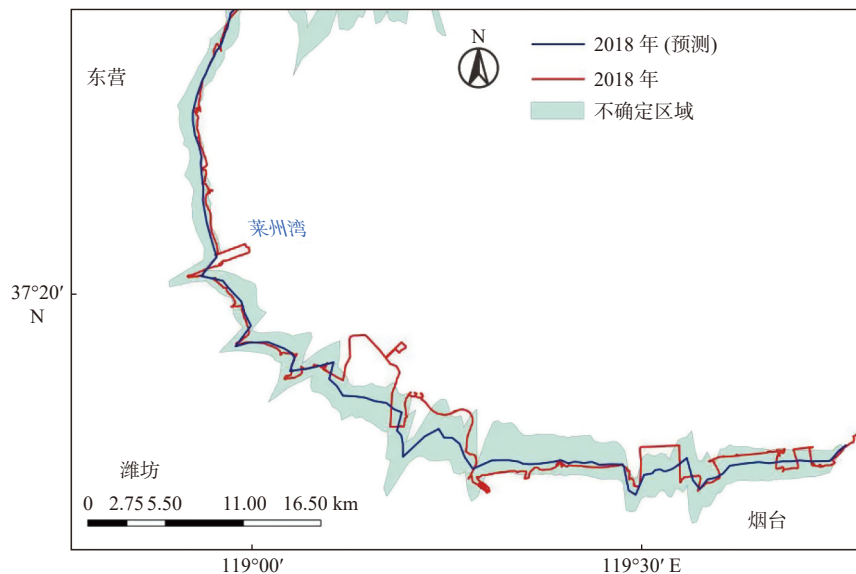


图 8 2018 年预测海岸线与实际海岸线位置

Fig.8 Predicted and real coastline of 2018

4.4.2 2030 年海岸线预测

将 1976—2020 年海岸线线性回归速率作为卡尔曼滤波器初始依据, 对 2030 年海岸线进行预测分析(图 9)。结果表明, 河口地区主要以清 8 汊流路岸线向海延伸为主, 入海口南侧淤积明显; 东风港至孤东油田段未来海岸线整体是以侵蚀为主, 挑

河河口以西至刁口河河口附近侵蚀较为严重, 岸线向后侵蚀约 2 160 m, 挑河口以西海岸线退蚀大约 1 350 m; 孤东油田地区海岸线呈向海扩张趋势, 岸线向海淤积, 平均前进距离约 1 000 m, 但孤东北部水下海域一直遭受侵蚀, 可能受到模型精度影响, 部分地方存在一定差异, 具体原因有待进一步研究。

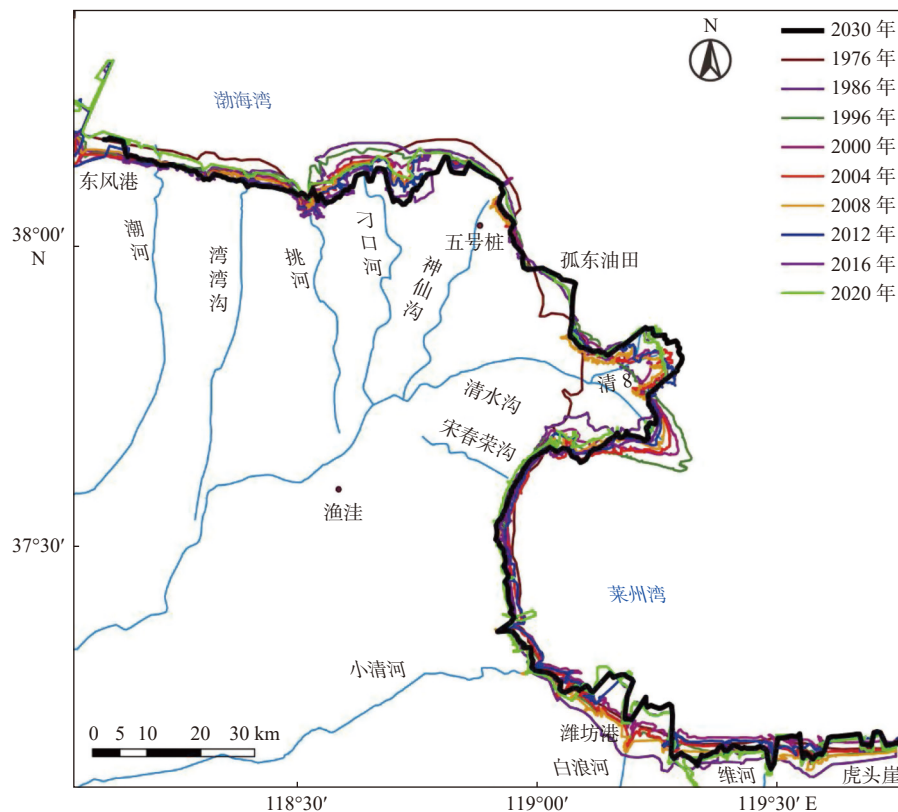


图 9 1976—2030 年海岸线位置

Fig.9 Coastlines from 1976 to 2030

宋春荣沟至虎头崖段海岸线演变预测主要趋势为向海扩张(图 9),主要扩张岸段为宋春荣沟至小清河河口段以及潍坊港至烟台市虎头崖段,推测主要是建港码头、渔业养殖、盐田发展等人类海岸带活动继续向海延伸引起的。其中,宋春荣沟至小清河河口海岸线平均向海推进约 310 m,潍河口以西地区海岸线向海推进明显,平均向海推进约 430 m,其中最远推进距离约 960 m。

5 结论

本文通过地理信息系统与数字海岸分析,对 1976—2020 年黄河三角洲海岸线类型多样性、海岸线粗糙度、岸线变迁速率进行定量分析,并对 2030 年海岸线位置进行预测,主要结论如下:

(1)人工岸线长度快速增加,海岸线类型多样性指数变大,海岸线类型趋向多样化。

(2)海岸线形态粗糙,海岸线粗糙度曲线由相对平滑变为相对粗糙,形成众多“锯齿”状波动,后逐渐变平滑。

(3)海岸线变迁具有明显的区域空间差异,河口地区岸线快速向海推进,河口两侧地区岸线则以

退蚀为主;部分人工岸线向海快速推进后基本保持不变。

(4)经预测,2030 年黄河三角洲河口地区,清 8 汊流路附近及宋春荣沟至虎头崖段岸线向海延伸,东风港至孤东油田段海岸线以侵蚀后退为主。

参考文献:

- [1] CHU Z X, SUN X G, ZHAI S K, et al. Changing pattern of accretion/erosion of the modern Yellow River (Huanghe) subaerial delta, China; based on remote sensing images[J]. *Marine Geology*, 2006, 227(1-2): 13-30.
- [2] MUSKANANFOLA M R, SUPRIHARYONO, FEBRIANTO S. Spatio-temporal analysis of shoreline change along the coast of Sayung Demak, Indonesia using Digital Shoreline Analysis System[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2020, 34:101060.
- [3] CHU Z X, YANG X, FENG X, et al. Temporal and spatial changes in coastline movement of the Yangtze Delta during 1974–2010[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 66(8): 166-174.
- [4] VIVEK G, SANTONU G, et al. Monitoring of Chilika Lake mouth dynamics and quantifying rate of shoreline change using 30m multi-temporal Landsat data[J]. *Data in Brief*, 2019, 22: 595-600.
- [5] 韩志聪, 樊彦国, 李祥昌. 基于 QGIS 的黄河三角洲岸线演变预测系统设计与实现[J]. *测绘与空间地理信息*, 2016, 39(6): 102-104.

- [6] 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.
- [7] 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(5): 339-346.
- [8] 陈小英, 刘大海. 黄河三角洲生态环境分析与评估: 海岸演变生态服务发展潜力[M]. 北京: 海洋出版社, 2012.
- [9] 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.
- [10] 山东省质量技术监督局. DB37/T 3588—2019. 海岸线调查技术规范[S]. 山东: 山东省标准化研究院, 2019-05-09.
- [11] 毋亨. 近70年中国大陆岸线变化的时空特征分析[D]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所, 2016.
- [12] 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.
- [13] 彭丁聪. 卡尔曼滤波的基本原理及应用[J]. *软件导刊*, 2009, 8(11): 32-34.
- [14] 何金宝. 近30年海南岛岸线时空变迁与分析预测[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- [15] CHU Z X. The dramatic changes and anthropogenic causes of erosion and deposition in the lower Yellow (Huanghe) River since 1952[J]. *Geomorphology*, 2014, 216(1): 171-179.

Recent changes and forecast of the coastline of the Huanghe River deltaic regions

ZHU Lin, CHU Zhongxin^{*}, SHEN Kunming, CUI Enping, MA Xiaoge

(Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Landsat MSS, TM, ETM+, OLI multi-temporal of 9 remote sensing data form 1976 to 2020 were used to extract the coastline of the Huanghe River deltaic regions. Quantitative analyses of the coastline in terms of the index of coastline type diversity, roughness index, the end point change rate, etc., were performed to understand the temporal and spatial evolution of the coastlines. The shoreline variation was predicted using the Kalman filter useful for the development and protection of the Huanghe River delta. Results show that in the past 44 years, the index of coastline type diversity has been increasing, and the coastline types have been diversified. The coastline was rough, the shape of the coastline roughness curve generally changed from relatively smooth to relatively tortuous, and then to little smoother than before gradually. Generally, the coastlines of the estuary area advanced rapidly seaward, while both sides of the region were eroded. The artificial coastlines remain stable. It was predicted that in 2030, the coastline near Q₈ Promontory and coastal area from Songchunronggou to Hutouya would advance seaward by sedimentary accumulation, whereas the coastline from the Dongfeng Port to Gudong Oilfield would retreat landward by erosion.

Key words: Huanghe River Delta; coastline; remote sensing; river mouth region