

曹印, 李瑞, 殷鹏钧, 等. 入海泥沙减少背景下黄河清水沟亚三角洲海岸线的发育与演化[J]. 海洋学报, 2023, 45(10): 87–104, doi:10.12284/hyxb2023135

Cao Yin, Li Rui, Yin Pengjun, et al. The development and evolution of the coastline of the Qingshuigou sub-delta in the Huanghe River under the background of reduced sediment discharge into the sea[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(10): 87–104, doi:10.12284/hyxb2023135

入海泥沙减少背景下黄河清水沟亚三角洲海岸线的发育与演化

曹印¹, 李瑞¹, 殷鹏钧¹, 范镇¹, 左凤娇¹, 战超^{1*}, 王庆¹

(1. 鲁东大学 海岸研究所, 山东 烟台 264025)

摘要: 三角洲岸线的变迁是研究地貌冲淤最直接的要素。黄河三角洲是世界上发育最快的三角洲, 研究其海岸线变化规律和演化趋势对地区生态环境保护、海洋资源开发、基础设施建设等至关重要。本文在前人研究的基础上, 采用修正归一化水体指数 (Modified Normalized Difference Water Index, MNDWI) 与多年水频率指数 (Multi-year Water Frequency Index, MWFI) 相结合的方法对 1976–2021 年期间典型年份的 207 幅遥感影像进行岸线提取, 使获取到的海岸线更具科学性和代表性, 并在此基础上通过定量计算分析了海岸线的时空演变及其稳定性特征, 以此探讨黄河清水沟亚三角洲海岸线自 1976 年以来的演化机制。研究结果表明: (1) 总体上, 清水沟亚三角洲海岸线演化呈现先快速向海淤积后波动稳定的趋势, 以 1996 年和 2002 年为节点划分为“快速发育”“缓慢发育”“动态平衡”3 个阶段; (2) 45 年来, 研究区海岸线稳定性持续增强, 其中孤东海堤段岸线与黄河清水沟亚三角洲南部岸线保持相对稳定, 而清 8 汉河口段岸线与清水沟废弃河口段岸线较为活跃, 其岸线稳定性指数基本低于 0.5; (3) 陆上三角洲淤积、侵蚀中心的迁移同河口位置变动相对应, 尤其是淤积中心的迁移与河口位置变动之间在经度向存在明显的正向关系, $R^2 = 0.6904$; (4) 黄河入海泥沙减少、河口位置迁移以及人类活动对三角洲海岸线的发育演化影响显著。从长远来看, 在黄河入海泥沙持续减少的背景下, 三角洲的未来仍面临侵蚀的威胁。

关键词: 海岸线; 入海泥沙减少; 河口位置迁移; 海岸线稳定性; 多年水频率指数; 黄河清水沟亚三角洲

中图分类号: P737.17

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)10-0087-18

1 引言

河口三角洲是经济社会高度发达的重要区域, 具有资源和生态系统服务等多重功能。全球约有

60% 的大城市和 6 亿人口集中在河口三角洲地区^[1]。

然而, 由于气候变化和人类活动的影响, 河口三角洲面临着海平面上升、河流来沙减少、人类活动增加等问题, 这导致了海岸侵蚀、滩涂湿地的萎缩、洪涝

灾害的加剧、堤防及涉水工程的损毁等一系列风险。当前, 全球超过 85% 的河口三角洲地区都面临着严峻的蚀退风险, 严重威胁着三角洲地区城市的安全^[2-4]。

与其他三角洲相同, 黄河三角洲在人类活动的影响下, 同样面临着蚀退的威胁。在黄河流域范围内, 由于河流筑坝、中上游水土保持工作的进行以及工农业用水量的持续增加等人类活动的影响, 河流入海

收稿日期: 2023-04-15; 修订日期: 2023-05-19。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (42330406); 山东高校青创科技团队项目 (2020KJH002)。

作者简介: 曹印 (1999—), 男, 山东省东营市人, 主要从事河口海岸地貌方面研究。E-mail : caoyin990331@163.com

* 通信作者: 战超 (1986—), 女, 教授, 主要从事河口海岸地貌与沉积环境演变研究。E-mail : zhanchao0226@163.com

泥沙量急剧下降^[5-8]。在黄河三角洲,沿海大堤的修建、盐田和养殖池的建设和石油开采等人类活动直接影响着三角洲的发育演化^[9-10]。

近几十年来,学者们对黄河三角洲进行了广泛的研究,研究方面主要包括海岸线变迁^[9, 11-13]、废弃河口-亚三角洲海岸侵蚀与潮滩地貌演变^[14-15]、水下三角洲地貌冲淤及其动力过程^[16-17]等方面。具体而言,关于黄河三角洲海岸线变迁,前人研究主要集中在三角洲海岸线的提取^[12]、海岸线时空变化和驱动力因素^[9, 11-13]、海岸线的形态变化^[13]、海岸线发育的临界水沙量研究^[18-19]等方面。对黄河三角洲的岸线稳定性评价以及入海泥沙量与河口位置变迁共同影响下的三角洲发育的定量研究还较为有限。因此,长时间的黄河三角洲岸线研究对贯彻实施“黄河三角洲区域的生态保护与高质量发展”国家战略及区域可持续发展具有重要意义。

海岸线是陆地和海洋之间的分界线^[2, 20],其研究对了解海洋与陆地之间相互作用、气候变化、海洋生态系统、自然灾害等方面具有重要意义,同时对其变迁特征的研究在一定程度上能够反映三角洲的发育演化情况。黄河三角洲是世界上最年轻的河口三角洲之一,数十年来,其岸线发生了巨大的变化,影响该区域的人类活动和生态环境^[9, 11-12, 16]。

在每天潮汐涨落海水进退的过程中,海岸线在海洋和陆地之间不间断地迁移,在风暴、台风等特殊天气和海洋动力条件下,这个迁移距离相当宽,且具体位置有着随时间变化的不确定性^[21]。因此,海岸线提取是研究岸线特征及其发育演化的重中之重。相比于实地调查、航空摄影等传统的测量方法,利用遥感手段进行海岸线提取的方法能够在减少人力物力投入的同时,获取更清晰准确的信息^[21-22]。Cui 和 Li^[18]结合 Alesheikh 等人提出的直方图阈值方法通过人机交互的方式提取黄河三角洲的平均高潮线。Fan 等^[23]通过潮位数据对提取的瞬时水边线进行校正得到海岸线。Liu 等^[13]通过提取相邻的多期瞬时水边线作为岸线。Fu 等^[16]使用自动边界检测算法同人工监督相结合提取水陆边界作为海岸线。Zhu 等^[12]利用光学图像的 SAR 强度信息和波段运算进行海陆分割提取岸线。通过总结上述海岸线提取方法,多数是选择一期合适时间的遥感影像提取其高潮线或瞬时水边线,将其作为海岸线用于岸线分析中。本文在前人研究的基础上,采用一种将修正归一化水体指数 (Modified Normalized Difference Water Index, MNDWI) 与多年水频率指数 (Multi-year Water Frequency Index, MW-

FI) 相结合的方法^[24-25],利用该年份及其前后年份全部的 Landsat 系列遥感影像进行水边线提取,并将其作为该年份年度海岸线用于岸线分析中。这种岸线提取方法与前人提出的方法相比,更具年度代表性,同时更符合海岸线平均多年的定义。

本文通过运用遥感技术和数值模型,首先提取更符合海岸线定义的水边线,将其作为年度海岸线用于研究中;其次通过对三角洲岸线变迁与陆上三角洲面积变化的分析,总结三角洲岸线发育演化的不同阶段;并对不同时期不同空间的海岸线稳定性进行分析评价,探寻其影响因素;同时,对亚三角洲淤积、侵蚀中心的变迁过程进行分析;最后,探讨人类活动主导的入海泥沙-河口位置迁移共同影响下三角洲岸线发育演化机制,以期为三角洲地区的生态环境保护和经济发展提供科学依据。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

黄河三角洲地区位于 $37^{\circ}35' \sim 38^{\circ}12'N$, $118^{\circ}33' \sim 119^{\circ}20'E$ 之间,是山东省东北部、渤海湾与莱州湾之间呈扇形隆起的区域,总面积为 $5\,460\text{ km}^2$,海岸线长度约为 350 km (图 1)。现代黄河下游以多沙善徙为特征,河口是典型的多泥沙弱潮河口,口门沿岸南北迁移、改道频繁,每次迁移都会迅速形成新的河口与亚三角洲,不同时期形成的废弃亚三角洲及现代清水沟亚三角洲共同构成了现代黄河三角洲^[7, 13, 16, 26]。该地区位于温带季风气候区,波浪受季风影响显著,以风浪为主,风向多为 S 向、NE-NNE 向、N-NNW 向,其潮流多为沿岸流动的往复流,以半日潮为主,是典型的河控弱潮型三角洲^[27-29]。作为世界上发育最迅速的河口三角洲,黄河三角洲拥有丰富的土地、油气、生物等资源。

黄河清水沟亚三角洲的泥沙运移主要包括陆域来沙与海域泥沙输运两部分。根据已有研究,黄河清水沟亚三角洲陆域来沙量每年约 $1.4 \times 10^8\text{ m}^3$ 。这一数值在过去几十年间有明显的变化。在人类活动和自然气候变化的影响下,在过去的 60 年里,黄河三角洲入海泥沙量下降了约 90%^[9, 30],其中 80%~90% 的入海泥沙减少是由于人类活动造成的^[31]。海域泥沙输运同样是清水沟亚三角洲泥沙运移的主要方式,其方向和量值受到多种因素的影响,如河流入海方向、海洋水动力条件、气候变化、三角洲形态等^[26, 32]。1976 年,黄河改道至清水沟流路后,河口泥沙主要呈先向南方向,再向东北方向扩散。在改道至清 8 汉流

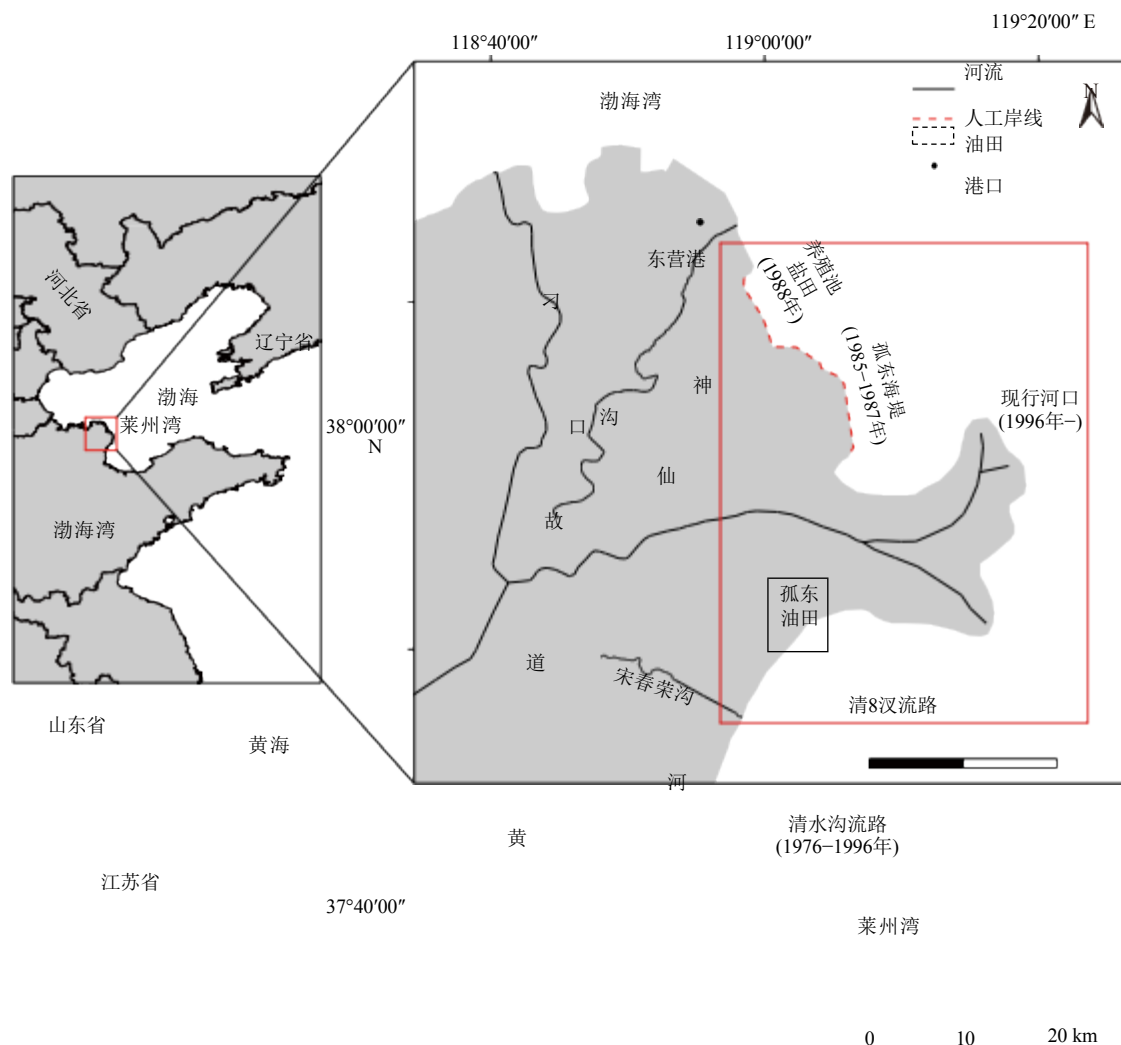


图 1 研究区域概况

Fig. 1 Overview of the study area

路后，河流入海泥沙在现行河口外主要向莱州湾方向输运，并逐渐在该海域形成一个表层悬沙浓度高值区^[15, 33-34]。在气候变化背景下，海域沿岸输沙也存在着变化。例如，气候变暖导致的海平面上升和海洋风暴的频率增加，在短时强风天气的影响下，波浪掀沙作用增强，使得泥沙扩散范围增大^[35]。

现行清水沟亚三角洲是 1976 年黄河改道至清水沟流路以来巨量黄河泥沙入海堆积而成，包含清水沟废弃流路与清 8 汉现行流路两部分。为研究现行黄河三角洲河口处的岸线变迁和冲淤变化及其对周围地区海岸线的影响，本文选择整个清水沟亚三角洲作为研究区，研究范围包括东营港以南至宋春荣沟。

2.2 数据源

本研究采用了 207 幅 Landsat MSS、Landsat TM、Landsat OLI 卫星影像的多时相遥感数据，涵盖了

1976 年、1986 年、1996 年、2002 年、2006 年、2008 年、2014 年、2016 年、2021 年及其前后年份的数据。这些遥感影像来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>) 和美国地质勘察局 (<https://www.usgs.gov>)。图 2 展示了这些遥感影像的获取时间分布情况。此外，本研究还搜集了《中国河流泥沙公报》以及《黄河泥沙公报》中利津水文站 (37°31'N, 118°18'E, 距河口 104 km) 的实测资料，包括 1976–2021 年的年径流

量和年输沙量，这些资料将用于分析入海水沙量变化对河口三角洲岸线变迁与冲淤变化的影响。

2.3 方法

2.3.1 海岸线提取

遥感影像具有获取成本低、覆盖范围广、空间分辨率高等特点，广泛应用于海岸线提取中^[12, 21]。基于卫星遥感影像进行岸线提取的方法主要依靠提取遥感影像上的水陆分界线来实现。然而，卫星遥感影像上记录的水陆分界线可能是位于高潮线和低潮线之间的任意水边线。为提高海岸线的代表性，本文结合前人的研究，采用 MNDWI-MWFI 的方法对年度水边线进行提取，并将其作为年度海岸线用于海岸线分析。具体实施步骤如下。

为了保证遥感影像的精度，本研究首先对搜集到的 207 幅遥感影像进行了包括裁剪、辐射定标、大气校正、地理配准在内的预处理。其中，地理配准以 2021 年 11 月 12 日遥感影像为标准进行，处理后的误差保持在 0.5 个像元内。

MNDWI 是一种通过对绿光波段和中红外波段进行波段运算得到水体指数的用于提取水体的方法。与其他水体指数相比，如归一化水体指数 (Normalized Difference Water Index, NDWI) 和自动水提取指数 (Automated Water Extraction Index, AWEI), MNDWI 对

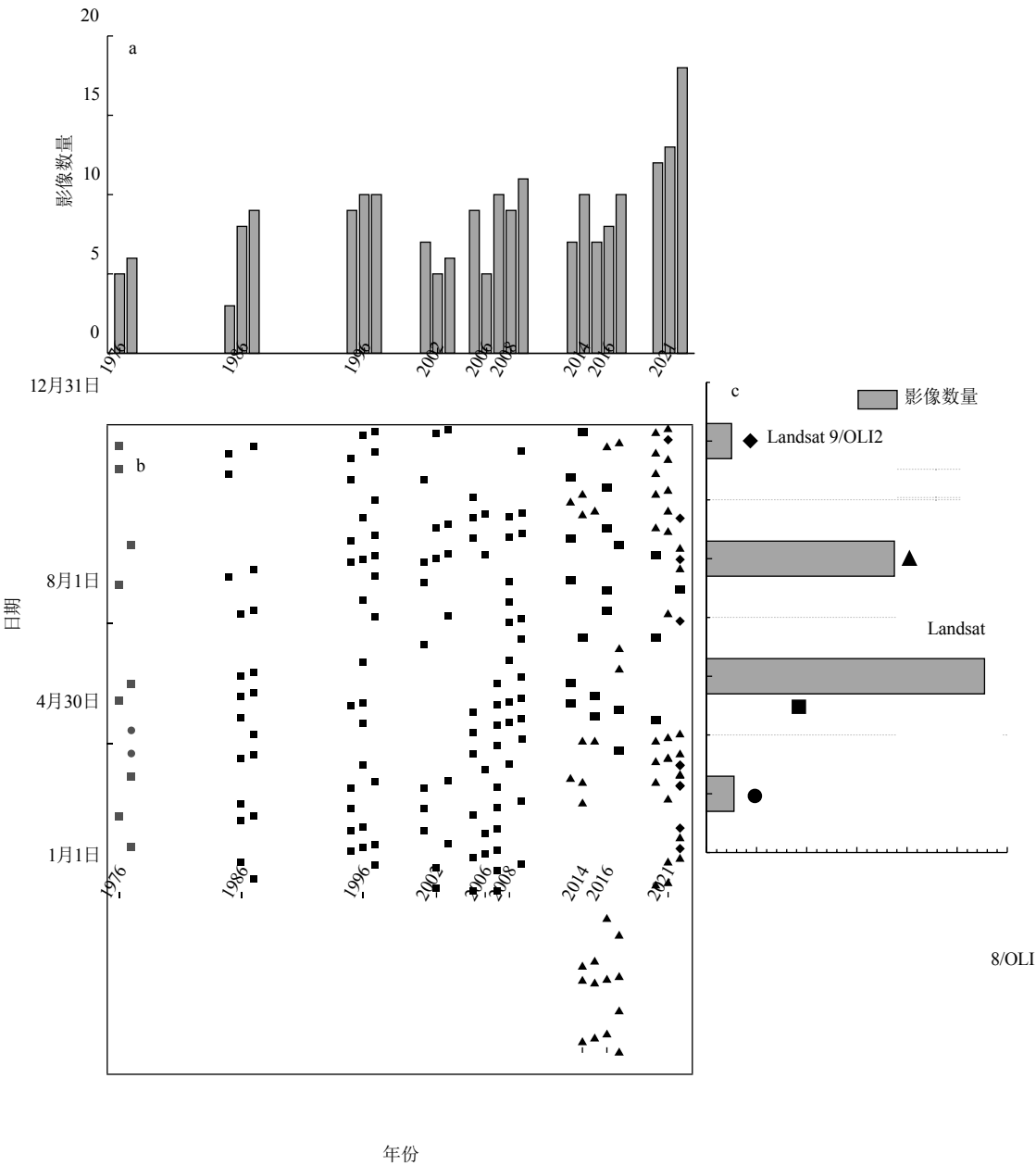


图 2 遥感影像获取时间分布

Fig. 2 Temporal distribution of remote sensing images acquisition

建筑物和道路等地面物体的干扰较小，能够更好地消除陆地上的土地噪声 [36–37]。因此，对于泥沙悬浮物含量较高的黄河三角洲地区，其能有效地消除悬浮泥沙、人工建筑等阴影对水体的影响，提高精准度，具有更好的应用效果，得到广泛的应用 [12, 38]，图 3 展示了 MNDWI 处理前后影像的对比。

MNDWI 计算如下 [36]：

$$\text{MNDWI} = \frac{\text{Green} - \text{MIR}}{\text{Green} + \text{MIR}}, \quad (1)$$

式中, Green 代表遥感影像的绿光波段; MIR 代表遥感影像的中红外波段; MNDWI 计算结果得到的水体指数位于-1 到 1 之间。之后结合天地图选择合适的阈值对直方图进行分割, 将遥感影像的像元点分为两类, 即陆地 0 类和水体 1 类。另外, 由于 Landsat 2MSS 传感器 MIR 波段的缺失, 本文中对 Landsat 2 遥感影像的二值化处理采用归一化水体指数 (NDWI) 进行。

在利用 MNDWI 对各景遥感影像的像元点进行分类后, 本文利用 MWFI 对分类结果进行计算, 从而

获取年度水陆分类图, 并以此提取年度水边线。同其他方法相比, 该方法的优点在于能够平均每年的海岸线, 减轻短期内海平面变化和季节性沉积物变化的影响, 完整地反映本年度海岸线的空间位置^[24-25, 39]。研究表明, 当用于制作年度水陆分类图的遥感影像达到 10 幅时, 海岸线在空间位置上的误差小于 1.5 m, 海岸线变化率的误差小于 0.03 m/a^[24]。在本文中, 关于 MWFI 方法的使用, 采用了该年份及其前后年份的全部 MNDWI 的分类结果图进行计算。这种方法更符合海岸线多年平均的定义, 更具代表性和科学性。

MWFI 计算如下:

$$MWFI = \frac{N_{\text{water}}}{N_{\text{water}} + N_{\text{land}}}, \quad (2)$$

式中, N_{water} 和 N_{land} 分别是指多年内同一像元被观测为水体和陆地的次数。图 3 显示了 2021 年研究区域的年度水陆分类图制作过程。计算结果 $MWFI \geq 0.5$ 的像元被重分类为水体, $MWFI < 0.5$ 的像元重分类为陆地^[24]。最后通过使用 ArcMap10.8 结合天地图将生

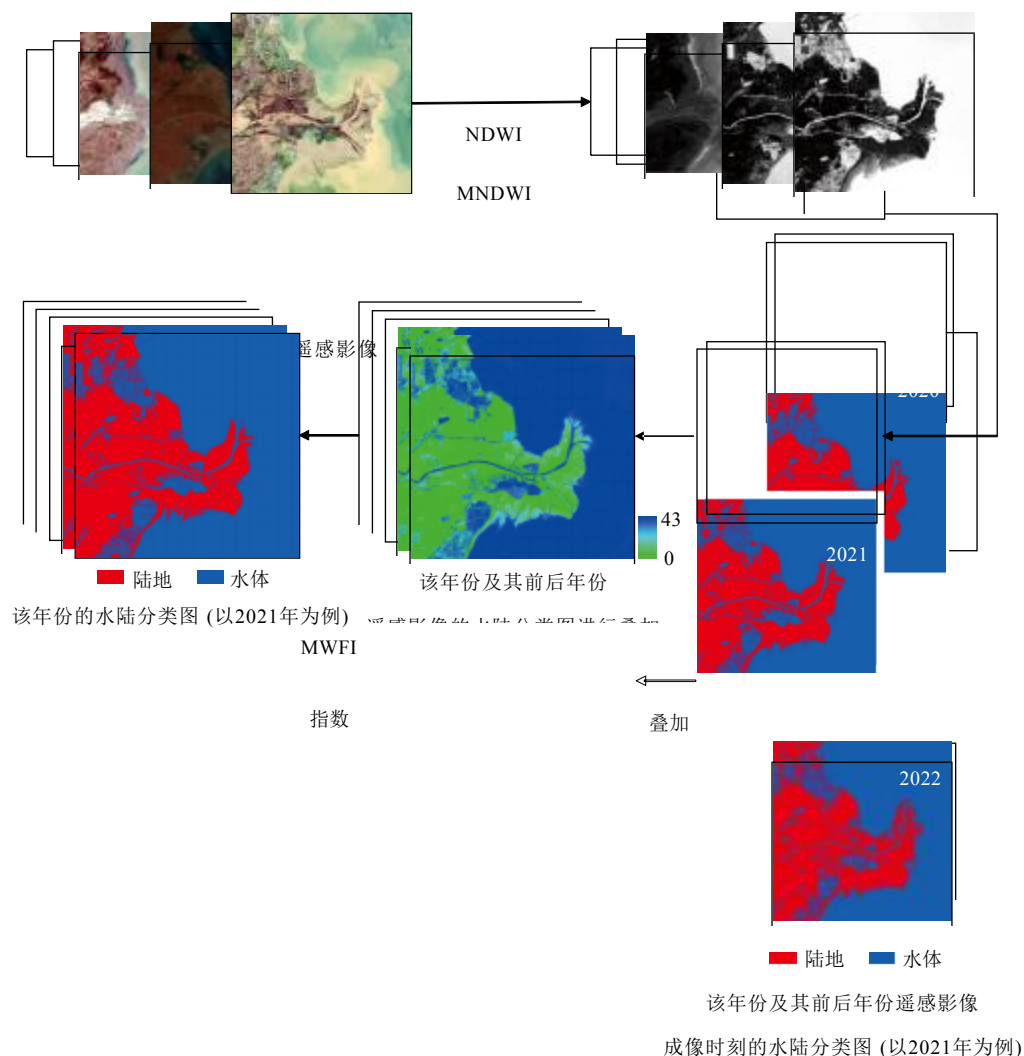


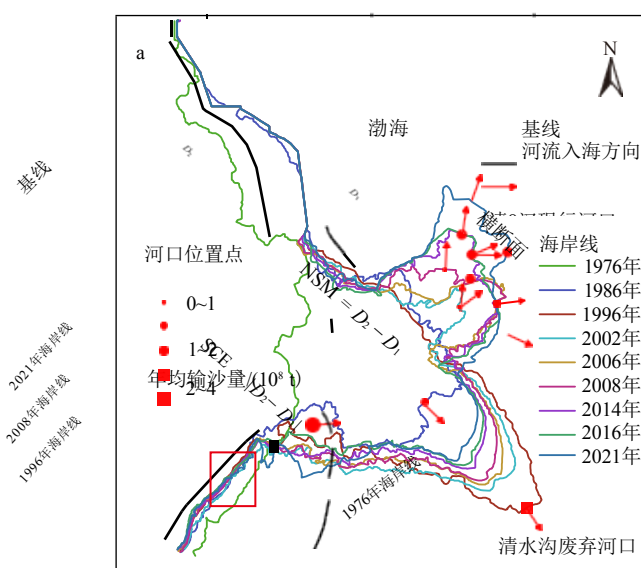
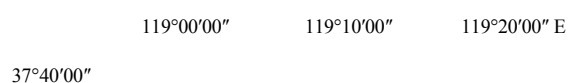
图 3 年度水陆分类图制作流程 (以 2021 年为例)

Fig. 3 Flowchart for making annual water and land classification map (taking 2021 as example)

成的多年水陆分类图进行目视解译提取水边线，并对提取的水边线进行适当的平滑处理，得到最终岸线（图 4a）。

2.3.2 海岸线长度

海岸线长度变化是研究海岸线演变规律的重要指标之一，可以了解不同时期海岸线长度的变化情况，用于揭示海岸线的演变规律。海岸线长度变化计算



如下：

$$\Delta L_{ij} = L_j - L_i, \quad (3) \text{ 式}$$

中， ΔL_{ij} 是指第 i 年至第 j 年海岸线变化长度； L_i 和 L_j 分别指第 i 年和第 j 年的海岸线长度。

2.3.3 海岸线变迁

海岸线变迁分析是研究海岸线演变过程、分析变化原因和趋势的重要方法。数字岸线分析系统 (Di-

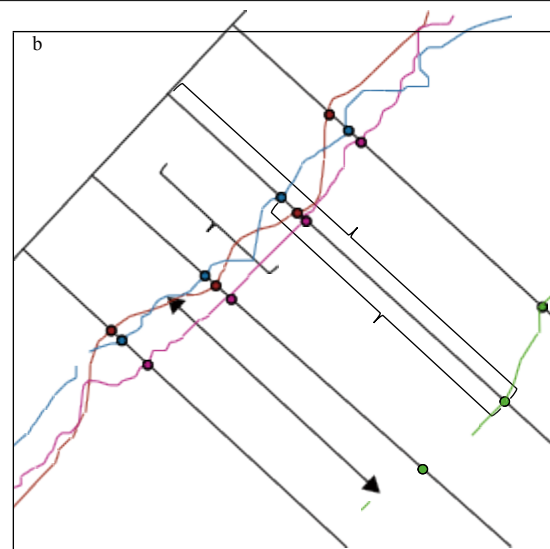


图 4 1976–2021 年海岸线 (a) 与数字岸线分析参数说明 (b) (a 中红框为图 b 位置)

Fig. 4 Coastline map from 1976 to 2021 (a) and digital shoreline analysis parameter description (b) (the red box in a is the position of b)

gital Shoreline Analysis System, DSAS) 是由美国地质勘察局开发的定量化分析海岸线的 Esri ArcGIS Desktop 软件的一个插件, 常用于海岸线变迁分析中^[40-41]。它可以通过在自定义基线和提取到的多时相海岸线之间建立垂直横断面的方法来计算不同时期的海岸线迁移情况。

由于黄河三角洲变化剧烈, 海岸线曲折, 本研究基于提取到的 1976 年海岸线手动生成沿海岸线不同方向的基线, 并在设置基线与多时相海岸线属性后生成间隔为 100 m 横断面 553 条。以此计算净岸线移动距离 (Net Shoreline Movement, NSM) 和岸线侵蚀速率 (Littoral Recession Rate, LRR) 等指标。其中, NSM 是生成的横断面与不同时期两条岸线交点之间的距离, LRR 是海岸线的变化率, 即岸线位置的变化速度^[25, 38, 42]。这些指标可以用于分析海岸线在 45 年间的变化情况, 并提供有关黄河三角洲海岸线变化的重要信息。图 4b 展示了这些指标的分析参数代表的含义。

NSM 计算如下^[25]:

$$\text{NSM} = D_2 - D_1, \quad (4)$$

式中, D_1 是指两条岸线较早时期和基线的距离; D_2 是指两条岸线较晚时期和基线的距离。

LRR 计算如下^[25]:

$$\text{LRR} = \frac{L_1 - L_2}{t_1 - t_2}, \quad (5)$$

式中, L_1 表示当前岸线位置; L_2 表示上次测量岸线位置; $t_1 - t_2$ 为岸线变化时间间隔。

NSM 和 LRR 有正有负, 正值表示向海淤进, 负值表示向陆蚀退。通过使用 DSAS 技术生成净岸线移动距离 (NSM) 和岸线侵蚀速率 (LRR) 的统计数据对研究区 45 年来的岸线变迁进行分析。

2.3.4 海岸线稳定性

海岸线稳定性是指海岸线在一定时间内的稳定性质, 即海岸线的位置、形态、长度等特征是否发生变化^[43-45]。海岸线稳定性分析以各时期海岸线变迁分析为基础, 利用岸线变迁分析中的海岸线变化距离 (Shoreline Change Envelope, SCE) 指标表示向海推进或向陆蚀退的水平距离, 以此计算岸线稳定性指数, 分析海岸线稳定性。

SCE 计算如下^[25]:

$$\text{SCE} = jD_2 - D_1j, \quad (6)$$

式中, D_1 是指两条岸线较早时期和基线的距离; D_2 是指两条岸线较晚时期和基线的距离。

海岸线纵深度年均变化速度 SY^[44] 计算如下:

$$SY = \frac{AveSCE}{t_1 - t_2}, \quad (7)$$

式中, AveSCE 为岸线平均纵深度; $t_1 - t_2$ 为岸线变化时间间隔。

岸线稳定性指数是指相对稳定的岸段的长度与该分析区域岸线总长度的比值, 该比值越大, 说明该岸线越稳定^[46], 其计算公式如下:

$$E = \frac{L_s}{L}, \quad (8)$$

式中, L_s 为稳定岸段岸线总长度; L 为该分析区域岸线总长度。海岸线稳定性参考海岸线变化距离、海岸线资源保护与利用以及黄河三角洲岸线的特征划定^[44, 46] (划分标准见表 1)。

表 1 海岸线稳定性分区划分标准

Table 1 Division criteria of coastline stability zoning

分类标准	极稳定区	稳定区	较活跃区	活跃区	极活跃区
SCE/m	0~100	100~500	500~1 000	1 000~2 000	> 2 000

2.3.5 淤积、侵蚀面积变化

淤积、侵蚀面积变化分析指对海岸线围成的三角洲面积进行定量分析和评估的过程, 主要包括淤积面积、侵蚀面积、淤积中心、侵蚀中心变迁等指标。其中, 淤积面积和侵蚀面积变化为海岸线前进和后退引起的二维海岸长、宽的变化, 是一个二维指标, 用于直观地反映三角洲淤积和侵蚀的范围和分布情况。淤积、侵蚀中心是指海岸线发育演变过程中, 在河流输沙、海洋水动力等作用共同影响下三角洲面积变化在空间上的中心点, 其位置变化情况, 会对海岸线的地貌形态、水文环境、生态系统等产生影响, 在本文中主要通过 ArcMap10.8 中的平均中心方法以变化面积为权重对不同时期的空间位置进行提取并分析。

以上指标的获取与计算均采用 ArcMap10.8 与 Origin 软件进行。除此之外, 本文还使用 Excel、SPSS 等软件对各指标进行相关性分析。

3 结果

本文通过对多时相卫星遥感影像数据的处理和分析, 研究了黄河清水沟亚三角洲 45 多年来的海岸线变迁与冲淤变化, 研究结果如下。

3.1 海岸线长度与三角洲面积

通过对海岸线变化长度及三角洲变化面积的数据进行相关性分析, 在一定程度上表明二者之间存在相关性, $R^2 = 0.963\ 4$ (图 5c)。如图 5a 所示, 总体而

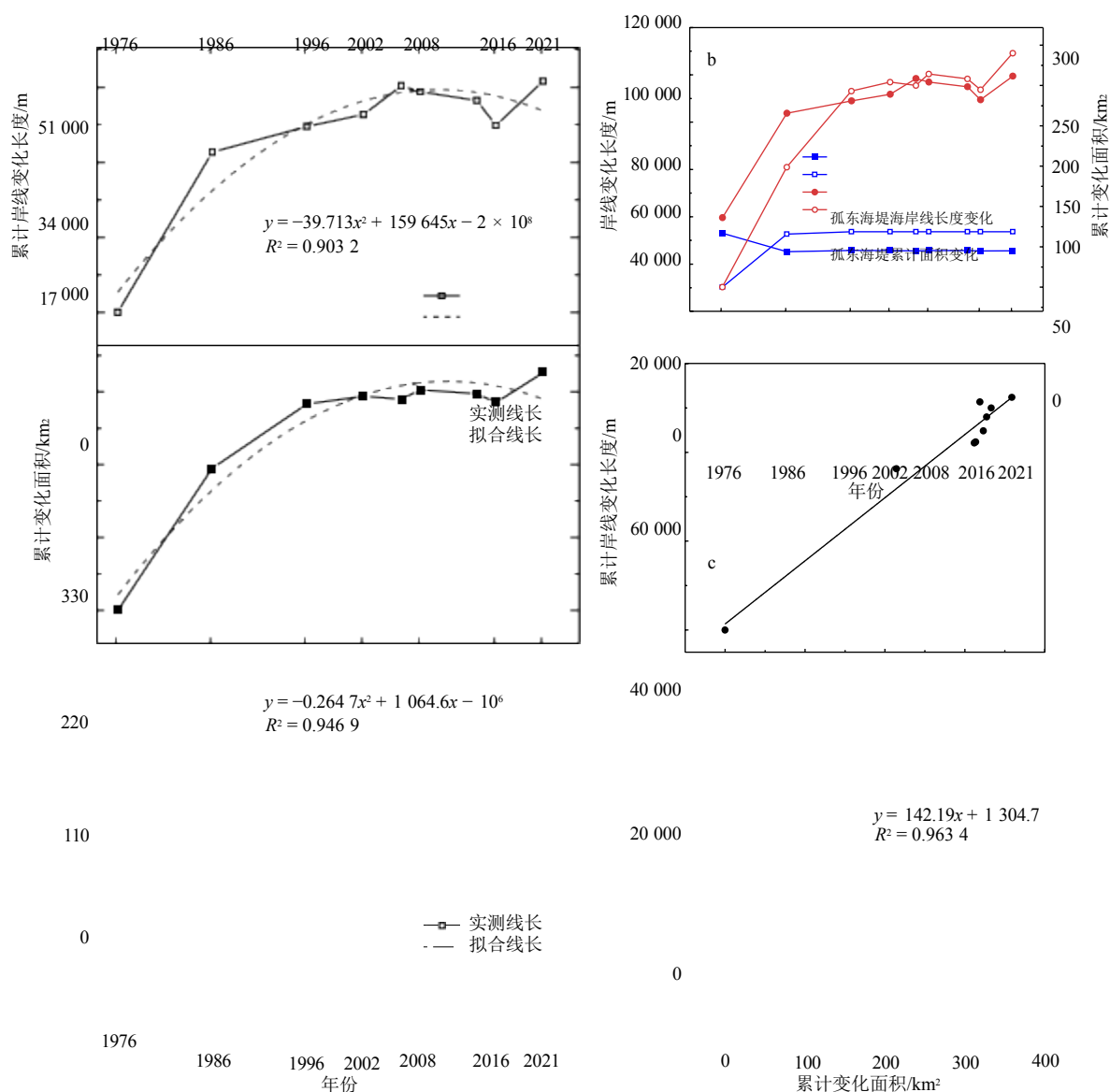


图 5 累计岸线变化长度与三角洲变化面积 (a), 不同岸段岸线长度变化与三角洲面积变化 (b), 三角洲变化面积与岸线变化长度的相关性 (c)

Fig. 5 Cumulative changes of coastline length and delta area (a), changes of coastline length and delta area in different coastal segments (b), correlation between changes of delta area and coastline length (c)

言, 岸线长度和三角洲面积的变化趋势相似, 呈现出先上升后保持稳定的趋势, 其中 2002 年是一个转折点, 2002 年之前处于增长阶段, 之后虽然有一定波动但总体保持稳定, 进入波动稳定阶段。不同的是, 在 1986–1996 年期间, 岸线长度的变化表现为缓慢增长, 而三角洲面积的增长速度仍然较快。1976–2021 年, 三角洲面积增长了 360.16 km², 年平均增长约 8.00 km²。三角洲岸线长度由 1976 年的 72.62 km 快速增长到 2021 年的 124.99 km, 增长了 72.13%, 相当于每年增长 1.16 km。

不同区域的岸线长度和三角洲面积变化情况不同。其中, 1985–1987 年孤东海堤的建设以及 1988 年孤东海堤北部盐田、养殖池的建设改变了该区域岸

线的属性, 将自然岸线转变成了人工岸线, 岸线长度及其后的三角洲面积保持稳定, 如图 5b 所示。而清水沟亚三角洲自 1976 年改道形成后处于快速增长阶段, 直到 2002 年后在调水调沙的影响下, 岸线长度与三角洲面积增长放缓, 进入波动稳定阶段。

海岸线长度的变化可以分为 3 个阶段: 1976–1986 年处于快速增长阶段, 10 年期间岸线长度增长 36.30 km, 年平均增长 3.63 km, 增长速度最快; 1986–2002 年, 岸线增长速度放缓, 进入缓慢增长阶段; 随

后进入波动稳定阶段。三角洲面积变化同样经历了 3 个阶段,即 1976–1996 年的快速增长阶段,1996–2002 年的缓慢增长阶段以及 2002 年后的波动稳定阶段。

3.2 海岸线变迁

本文主要通过 NSM 等指标对 1976–2021 年之间的海岸线变迁进行了定量分析,量化结果见表 2。研究结果显示(图 6),黄河清水沟三角洲的海岸线总体呈现向海推进的趋势。在河流巨量泥沙供给的作用下,河口附近的海岸线变化程度最大,最大的向海推进距离达到了 19.24 km。整个研究区平均向海推进了 4.70 km,每年推进约 0.11 km,平均 LRR 为 79.71 m/a。

1976–2021 年之间的海岸线变迁研究虽然反映了黄河清水沟三角洲 45 年来海岸线的整体变化情况,但也存在一定的局限性。在海岸线整体表现为向海推进的趋势下,不同岸段在不同时期的变化特征不同。如图 7 所示,孤东海堤段海岸线除 1976–1986 年表现为强烈的向海淤进外,始终处于稳定状态,建成后至今,累计 NSM 变化为 -0.51 m。清 8 河口段海岸线向海淤进幅度最大,45 年来整段岸线平均向海淤进 10.29 km,尤其是 1996 年黄河人工出汉到清 8 汉流路入海后,向海淤进速度增加且较为稳定。在

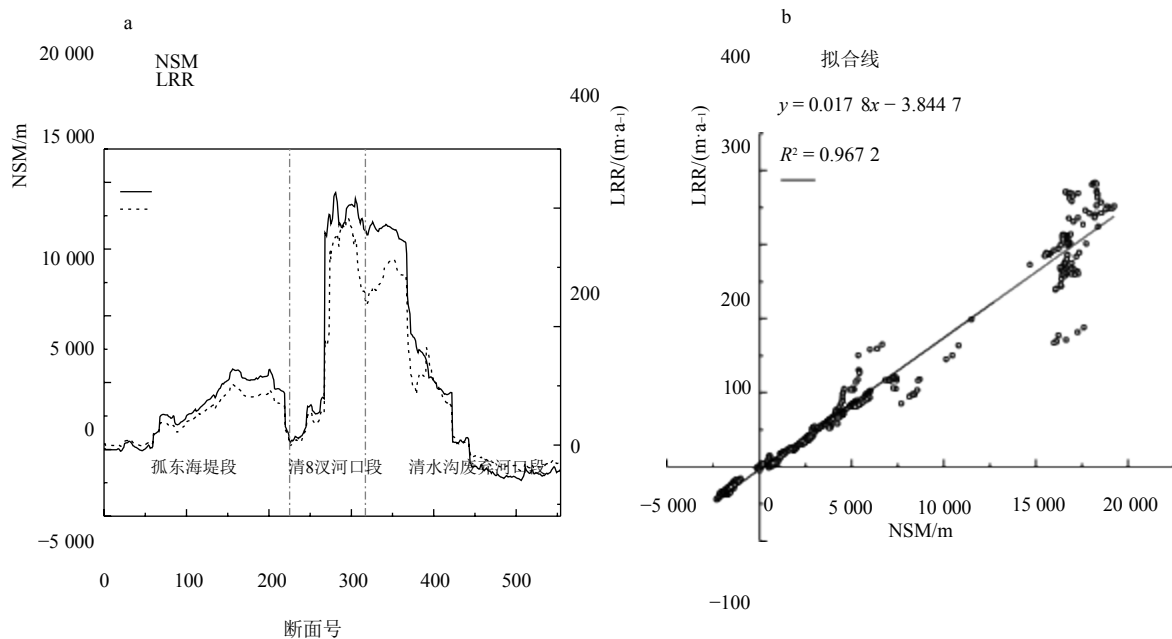


图 6 1976–2021 年研究区海岸线移动距离 (NSM) 与岸线侵蚀速率 (LRR) 折线图 (a) 及 NSM 与 LRR 关系 (b)

Fig. 6 Line chart of net shoreline movement (NSM) and littoral recession rate (LRR) in the study area from 1976 to 2021 (a), and the relationship between NSM and LRR (b)

表 2 不同岸段不同时期岸线移动距离及其变化率

Table 2 The coastline movement distance and its change rate of different coast segments in different periods

研究区域	时间	平均移动距离/m	最大移动距离/m	最小移动距离/m	平均变化率/(m·a ⁻¹)	最大变化率/(m·a ⁻¹)	最小变化率/(m·a ⁻¹)
总研究区	1976–2021年	4 699.66	19 237.13	15.08	104.44	427.49	0.34
	1976–1986年	3 407.41	16 921.08	2.94	340.74	1 692.11	0.29
	1986–1996年	983.72	14 122.78	0	98.37	1 412.28	0
	1996–2002年	215.14	5 540.83	0	35.86	923.47	0
	2002–2006年	-210.40	8 464.43	0	-52.60	2 116.11	0
	2006–2008年	118.94	4 948.06	0	59.47	2 474.03	0
	2008–2014年	-133.85	10 476.48	0	-22.31	1 746.08	0
	2014–2016年	-215.34	1 074.34	0	-107.67	537.17	0
	2016–2021年	361.57	4 625.49	0	72.31	925.10	0
孤东海堤段	1986–1996年	52.06	887.50	0	5.21	88.75	0
	1996–2002年	0.88	30.32	0	0.15	5.05	0
	2002–2006年	-0.44	16.60	0	-0.11	4.15	0
	2006–2008年	0.95	180.13	0	0.47	90.07	0
	2008–2014年	-2.51	17.26	0	-0.42	2.88	0
	2014–2016年	-0.77	132.64	0	-0.38	66.32	0
	2016–2021年	1.38	22.68	0	0.28	4.54	0

清水沟三角洲段	1986–1996年	1 618.03	14 122.78	1.68	161.80	1 412.28	0.17
	1996–2002年	361.02	5 540.83	10.20	60.17	923.47	1.70
	2002–2006年	–353.35	8 464.43	3.03	–88.34	2 116.11	0.76
	2006–2008年	199.28	4 948.06	0	99.64	2 474.03	0
	2008–2014年	–223.28	10 476.48	0	–37.21	1 746.08	0
	2014–2016年	–361.43	1 074.34	0	–180.71	537.17	0
	2016–2021年	606.81	4 625.49	1.45	121.36	925.10	0.29

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/118002065135006056>