

基于 GEE 和 GIS 的黄河三角洲 面积多尺度时间序列分析

苏志明¹, 孙永福^{1,2,3*}, 宋玉鹏¹, 缪栋杰^{1,4}, 宋丙辉¹, 杜 星¹

(1. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

2. 国家深海基地管理中心, 山东 青岛 266237;

3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266235;

4. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023)

摘要:利用遥感大数据平台 GEE(Google Earth Engine)和 GIS(Geographic Information System)技术,结合 1984—2018 年水文和气象等资料,对黄河三角洲地区岸线变迁的时间序列变化进行趋势分析,并研究河口岸段面积与年输沙量、年径流量、黄河三角洲年降水量的关系。分析结果表明,1984—2018 年黄河三角洲总面积呈先增长后逐渐减少的趋势,转折点发生在 1998 年;莱州湾岸段和人工岸段面积因固岸工程的建设基本维持稳定;刁口河岸段面积呈下降趋势,主要由于黄河改道后失去水沙补给,同时受到海水动力作用侵蚀显著;河口岸段面积受输沙量、径流量和降水量影响,存在“后效”影响,面积呈增长趋势,但随着水沙补给的减少增长速度逐渐变缓。总体来说,入海泥沙量、径流量和降水量是影响黄河三角洲面积的重要因素,但随着人工海岸的增多以及源头水沙量减少等因素,黄河三角洲面积受非自然因素的影响越来越大。

关键词:黄河三角洲;岸线变迁;平均高潮线法;小波分析;水沙;Mann-Kendall 趋势检验

中图分类号:P736

文献标志码:A

文章编号:1671-6647(2022)01-0090-12

doi:10.12362/j.issn.1671-6647.2022.01.008

引用格式:苏志明, 孙永福, 宋玉鹏, 等. 基于 GEE 和 GIS 的黄河三角洲面积多尺度时间序列分析[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(1): 90-101. SU Z M, SUN Y F, SONG Y P, et al. Multiscale time series analysis of Yellow River Delta area based on GEE and GIS[J]. Advances in Marine Science, 2022, 40(1): 90-101.

海岸带是海洋与陆地系统交叉作用、相互影响的地理单元,是研究滨海城市发展的重要平台^[1]。河口三角洲地区是典型的河流动力和海洋动力交互控制地带,同时又是多尺度动力结构的耦合区^[2]。三角洲岸线长度、形态和所围陆地面积的变化会直观地反映这种河流和海洋对河口三角洲的动力作用,海岸带的合理利用与开发对生态环境的可持续发展有重要的影响,一直以来是研究的热点区域^[1-8]。改革开放以来,我国的大陆岸线在自然和人为等因素的影响下发生了巨大的变化。黄河三角洲是中国乃至世界各大河三角洲中海陆变迁最活跃的地区,黄河尾间不断变迁、不断向海延伸,海岸线蚀退淤进交替演变,三角洲面积也在逐年发生变化。通过对黄河三角洲大陆岸线的变化检测与成因分析,可以为大陆岸线的变迁规律研究提供借鉴和思考,对于沿海生态环境保护、资源开发和可持续发展意义重大。

遥感具有宏观、高效、可重复观测的优点,结合 GIS 技术能够快速准确地分析大陆岸线长时间序列的变化信息,从而实现海岸线的动态监测^[9]。王奎峰等^[10]以黄河三角洲 1976—2014 年的 MSS、TM、ETM+影像为数据源,采用一般高潮线法提取不同时期的海岸线,结合 RS 遥感与 GIS 技术,对黄河三角洲的岸线变

收稿日期:2020-11-17

资助项目:国家自然科学基金项目——考虑波致液化度影响的新型海底粉土力学强度预测模型研究(42007274);山东省自然科学基金项目——波浪作用下海底沉积物内部孔压响应模拟试验技术研究(ZR2020QD073)

作者简介:苏志明(1997—),男,硕士研究生,主要从事海岸带 3S 方面研究. E-mail: suzhiming19@mails.ucas.ac.cn

* **通信作者:**孙永福(1964—),男,研究员,博士,主要从事海洋工程地质方面研究. E-mail: sunyongfu@fio.org.cn

(陈 靖 编辑)

化进行监测。李贺等^[11]基于 1976—2018 年的 LandSat 长时间序列卫星影像,对黄河三角洲进行了冲淤演变的研究。王一鸣等^[12]选取 1973—2016 年 41 景影像资料,借助 ArcGIS 软件得到研究区域面积,并结合利津站水沙资料,利用 SPSS 软件分析河口地区年造陆面积与入海年输沙量的关系。近年来新兴的遥感大数据处理云平台 Google Earth Engine,凭借内置的大量免费数据集和超强的数据处理能力成为遥感分析有力的工具^[13-16]。Kilian 等^[17]基于 Python 利用图像的监督分类和亚像元分类方法,结合 GEE 平台编写了 CoastSat 开源软件,使用户能够从 30 年来公开的卫星图像中获取全球任何沙质海岸线的位置。在 2019 年 Deng 等^[18]利用 GEE 平台研究了长江流域开放水体的动态监测,并且提出了一种新的水体提取规则 MIWDR 进行长江流域的水体提取。2018 年 Wang 等^[19]利用现有的成熟地表水指数方法,提出一种快速估算年际地表水面积的方法,并将 GEE 平台将所提出的方法应用于 1990—2017 年长江中游流域地表水的变化分析中。

综上所述,利用软件处理遥感影像已经能够提取并分析黄河三角洲长时间序列的水边线,但容易产生数据质量和主观选取造成的数据差异性,而在大数据平台(GEE)支撑下的遥感水边线提取技术能够通过调用该区域所有的遥感影像进行批量处理,在不减少影像幅数的情况下剔除掉影响水边线提取的噪音像素,在所有的良好观测像素中采用统一的水边线提取规则进行水体提取,可以有效减少这种差异性并且提高处理的速度。因此,本文基于遥感大数据平台 Google Earth Engine 对 1984—2018 年 35 期遥感影像数据进行处理,分析近 35 a 黄河三角洲面积的变化及其原因。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

黄河三角洲位于黄河入海口处,北临渤海,东靠莱州湾,面积约为 5 400 km²,主要位于东营境内,地势西南高、东北低;年均降水量 530~630 mm,雨量主要集中在夏季。历史上黄河三角洲分为古代、近代和现代黄河三角洲,古黄河三角洲形成于 1855 年以前。1855 年 6 月黄河回流入渤海后,尾闾决口 50 多次,大的改道 11 次,分别于 1855—1934 年和 1934 年至今形成以宁海和渔洼为顶点的近代和现代三角洲^[20]。本文中的研究区主要为现代黄河三角洲陆上部分,地理范围为(118°30′~119°24′E,37°30′~38°18′N)。除了黄河河道曾经多次变道,水沙通量也发生显著的变化。历史上黄河年均入海沙量约占全球入海沙量的 6%,居世界第二位;含沙量达 25 kg/m³,居世界第一位^[21]。但是受自然因素和人类活动的共同影响,黄河入海径流量和输沙量自 20 世纪 50 年代以来表现出明显减少的趋势,尤其近年来急剧减少^[3]。从 2002 年 7 月开始,黄河水利委员会实施了黄河调水调沙工程,利用上游的水库调节水沙,从而减轻下游河道淤积和河床升高。黄河三角洲是黄河从上游携带泥沙而沉积形成,所以入海口区域多为粉砂泥质岸线,远离入海口区域多为人工岸线。综合前人研究^[22-24]和历史资料,将研究区分为 4 个岸段:刁口河岸段、人工岸段、河口岸段和莱州湾岸段(图 1)。

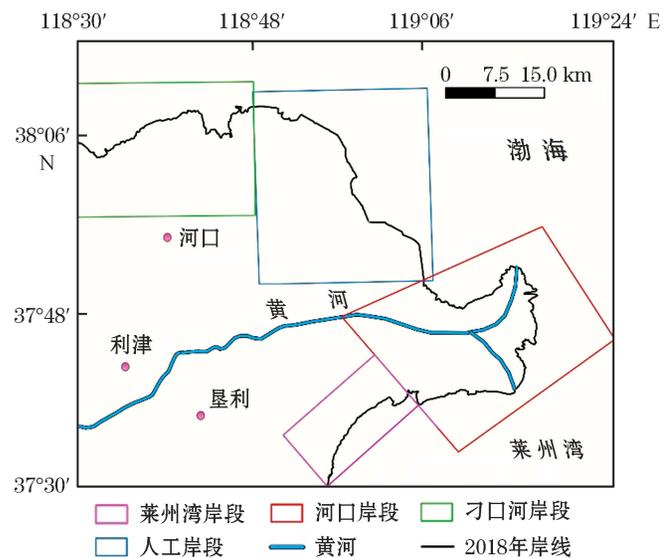


图 1 研究区域

Fig.1 Study area

1.2 数据来源

遥感影像的数据来源于 GEE 数据库,这些数据分别是 LandSat 5 的 TM 传感器、LandSat 7 的 ETM+ 传感器和 LandSat 8 的 OLI 传感器经过大气校正后的地表反射率数据集,覆盖周期为 16 d,空间分辨率为 30 m。

径流和泥沙数据采用 1984—2018 年黄河利津水文站实测的年径流量和年输沙量数据,其中 1984—2002 年数据来自《东营市水利志》^[25],2003—2018 年数据来自于《中国河流泥沙公报》^[26]。黄河三角洲降水数据来源于国家气象科学数据中心的国家地面气候资料日志数据集(V 3.0)(<http://data.cma.cn>),利用 Matlab 软件剔除气象数据集中的异常值,按照年份提取出山东省内黄河流经地区的气象站降水数据,包括章丘站、惠民站、济南站和垦利站。

1.3 研究方法

1.3.1 岸线提取

目前提取海岸线的方法主要有人机互译法^[27-29]、同月同潮位法、平均低潮位法、一般高潮线法^[9]、平均高潮线法^[5-6,30]和最大潮高潮线法^[7]等,在实际应用中都取得了不错的效果。本文采用平均高潮线法进行岸线提取,取瞬时水边线与一般高潮线的中线作为岸线,即两线所围面积的一半为最终面积。岸线提取流程见图 2。

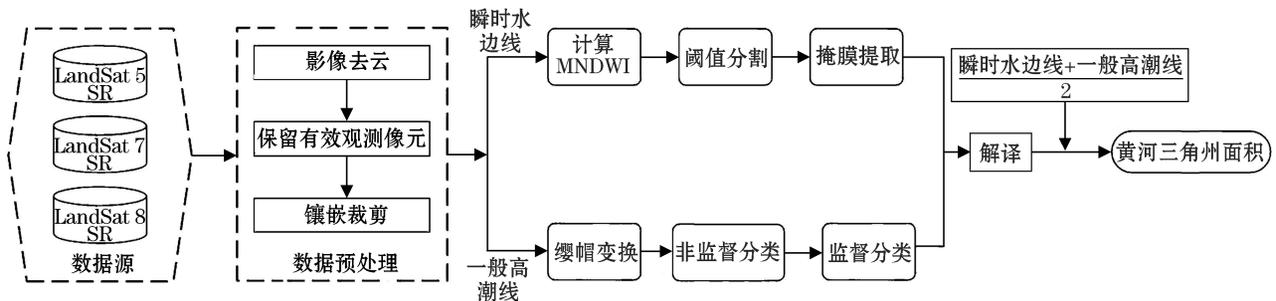


图 2 岸线提取流程

Fig.2 The process of shoreline extraction

1) 瞬时水边线的提取

本文通过修正归一化水体指数(MNDWI)提取瞬时水边线, MNDWI 是徐涵秋^[31]针对 McFeeters^[32]提出的归一化水体指数(NDWI)改进的。MNDWI 的数学表达式为:

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

式中, L_{Green} 和 L_{MIR} 分别为绿波段和中红外波段的像元亮度值。

基于 GEE 利用 MNDWI 法提取水体的方法为:①将研究区在每一年内所有 Landsat 影像进行去云处理,只保留每景影像的有效观测像元;②经过裁剪和镶嵌合成该年份研究区的无云影像;③计算 MNDWI 水体指数;④利用阈值分割法提取水体,提取面积最大的要素转化为矢量;⑤将数据导入至 ArcGIS 中,参考 Google Earth 历史影像进行目视解译。

2) 一般高潮线的提取

一般高潮线定义为高潮滩和中潮滩的界线,在提取一般高潮线时参考樊彦国等^[5]的提取方法,区别在于处理过程的前半部分在 GEE 中完成,相比于 ENVI 等遥感图像处理平台,GEE 的图像处理速度显著提升。提取过程为:①在 GEE 中将经过预处理的影像进行缨帽变换,得到亮度、绿度和湿度三个波段合成的影像;②非监督分类,根据分类的结果在 ArcMap 中选取训练样本,通过直方图和散点图评估训练样本,使不同分类的颜色尽量不重叠;③监督分类,将影像分为高潮滩、中低潮滩、水体和陆地四类;④分类后在 ArcMap 中目视解译提取出一般高潮线。

1.3.2 Mann-Kendall 趋势及突变检验

在时间序列趋势分析中,最初由 Mann 和 Kendall 提出了 Mann-Kendall(M-K)非参数检验方法,此方法不需要样本遵循一定的分布,也不受少数异常值的影响,被许多学者用于径流、降水和气温等非正态分布的数据。

对一个序列通过计算得到检验统计量 Z ,并将其与 α 显著水平下的 $Z_{1-\alpha/2}$ 相比较,如果 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$,就可以认为序列中存在相应的变化趋势。文中取 95% 显著度, $Z_{1-\alpha/2} = 1.96$ 。在突变检测中,统计量 UF_k 为时间序列 X 按照顺序计算的秩序列标准化参数, UF_k 为标准正态分布,对于给定的显著性水平 α ,若 $|UF_k| > U$,表明序列存在明显的趋势变化。 UB_k 为按照时间序列 X 逆序计算的秩序列标准化参数。若统计量 UF_k 大于 0,则表明序列呈上升趋势,若小于 0 则为下降趋势。若 UF_k 和 UB_k 存在交点,且交点位于临界点之间,那么交点对应的时间为发生突变的时刻^[33-34]。

1.3.3 交叉小波变换(Cross Wave Transform, XWT)

与传统的傅里叶变换相比,小波变换能够有效地提取信号中的时频特性,有利于分析长时间序列的数据^[35]。本文通过小波变换分析黄河三角洲面积和泥沙量径流量以及降水量的周期性变化特征,然后通过交叉小波和小波相干进一步分析数据之间的响应关系。

交叉小波可以对 2 个时间序列在不同时频域中的相互关系进行分析研究^[36-37],设 $W^X(s)$ 、 $W^Y(s)$ 分别为给定的两个时间序列 X 和 Y 的交叉小波变换,其交叉小波谱为 $W_n^{XY}(s) = W_n^X(s)W_n^{Y*}(s)$,其中的复共轭,交叉小波功率谱密度为,其值越大表示两个时间序列的相关程度越高^[38]。

1.3.4 小波相干(Wavelet Transform Coherence, WTC)

小波相干谱可以反映 2 个时间序列在时频空间上的局部相关程度^[39],定义为:

$$R_n^2(s) = \frac{|S(s^{-1}W_n^{XY}(s))|^2}{S(|s^{-1}W_n^X(s)|^2) \times S(|s^{-1}W_n^Y(s)|^2)}, \quad (2)$$

式中: S 为平滑器; s 为伸缩尺度; $W_n^X(s)$ 和 $W_n^Y(s)$ 分别为 X 、 Y 的小波变换; $W_n^{XY}(s)$ 为交叉小波谱。对上述小波分析的结果显著性都采用理论红噪声谱进行检验^[39]。

2 结果与分析

2.1 黄河入海径流量、输沙量和降水量结果

为了分析黄河三角洲面积和黄河入海水沙量(包含输沙量、径流量和降水量)的关系,首先分析水沙量趋势:对 1984—2018 年水沙时间序列数据做五年滑动平均处理,并用 M-K 非参数检验法对水沙量进行趋势检验和突变检测。

1)采用滑动平均法,取 $k=5$ 绘制出年输沙量、年径流量和年降水量的趋势图:做五年滑动平均后可看出年输沙量(图 3)呈显著的下降趋势;做五年滑动平均后可看出年径流量(图 4)在 1984—2001 年呈显著下降趋势、2001—2008 年呈上升趋势、2009—2018 年总体呈下降趋势;做五年滑动平均后可看出年降水量(图 5)总体呈波动上升趋势。黄河三角洲入海口 1984—2018 年的年输沙量、年径流量和年降水量的 M-K 趋势检验统计值 Z 值和斜率见表 1。年输沙量和年径流量的 Z 值与斜率均小于 0,二者呈增大的趋势,年径流量的减小速率大于年输沙量,但年径流量 $|Z| < 1.96$,趋势不显著;年降水量的 Z 值与斜率均 > 0 ,呈增加的趋势, $|Z| < 1.96$,趋势不显著。

表 1 趋势性检验

Table 1 Trend test

统计量	Z 值	斜率
年输沙量	-4.118 4	-0.175 0
年径流量	-1.661 6	-1.348 9
年降水量	1.391 7	3.193 0

2)用 M-K 检验法对年输沙量、年径流量和年降水量进行趋势分析和突变检验、年输沙量的统计量 UF (图 3b)和年径流量的 UF (图 4b)整体均为负值,表明二者一直是减少的趋势,年输沙量突变发生在 1996 年

和 1998 前后、年径流量突变发生在 1985 和 2012 年前后,两者突变点的时间存在偏差,这与黄河三角洲的“水沙异源”特点以及一些其他非自然因素的影响有关^[40];年降水量的统计量 UF 和 UB(图 5b)虽然有交点,但均在 ±1.96 之间,变化趋势不显著,故无突变点。

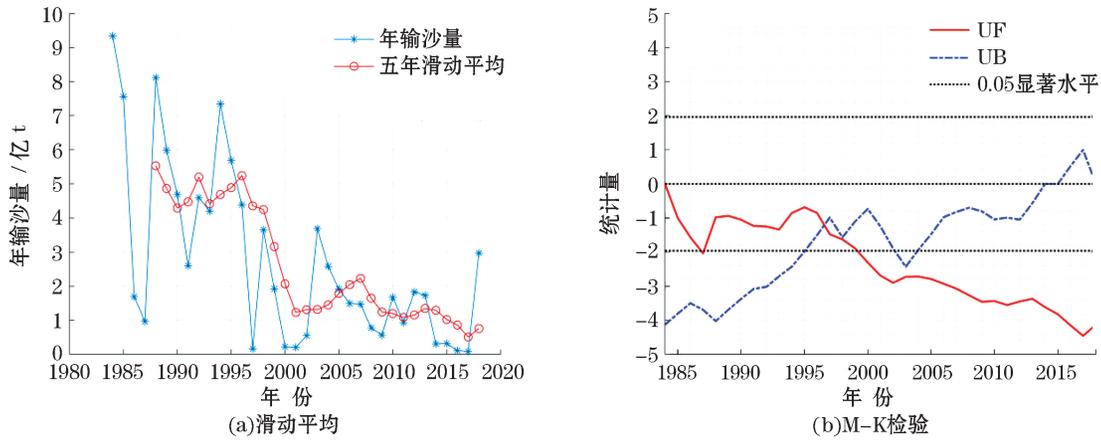


图 3 年输沙量滑动平均图和 M-K 检验

Fig.3 Moving average chart and M-K test of annual sediment discharge

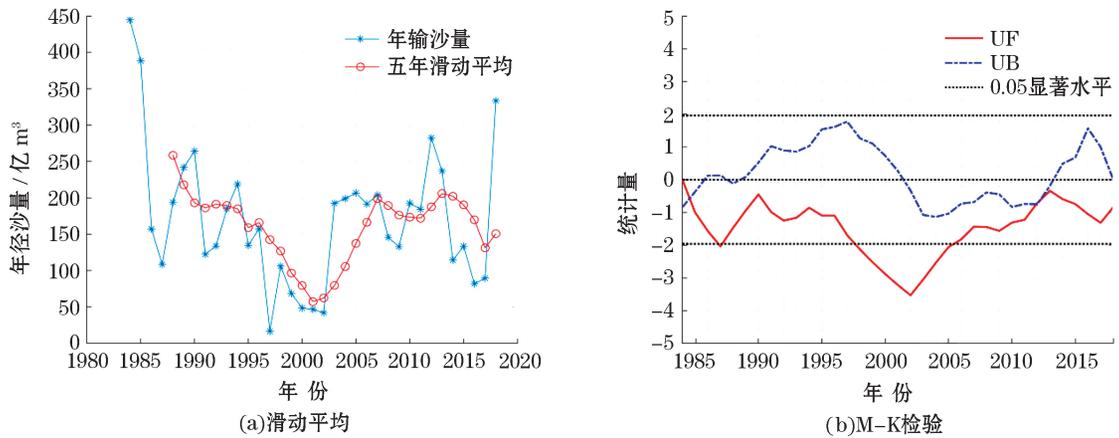


图 4 年径流量滑动平均图和 M-K 检验

Fig.4 Moving average chart and M-K test of annual runoff

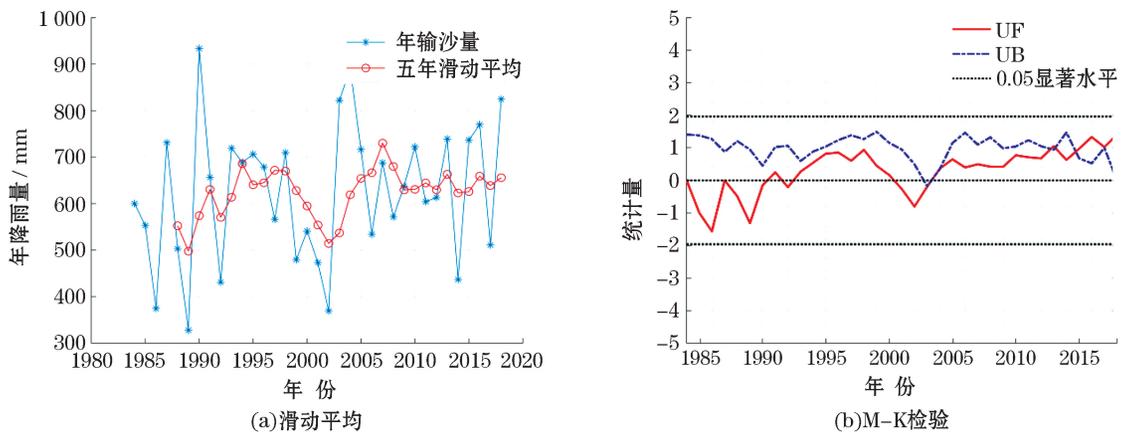


图 5 年降水量滑动平均和 M-K 检验

Fig.5 Moving average chart and M-K test of annual precipitation discharge

2.2 岸线提取结果分析

首先提取出瞬时水边线(图 6)和一般高潮线(图 7),并基于平均高潮线法计算得出黄河三角洲在 1984—2018 年的陆地面积,然后对计算结果开展分析。

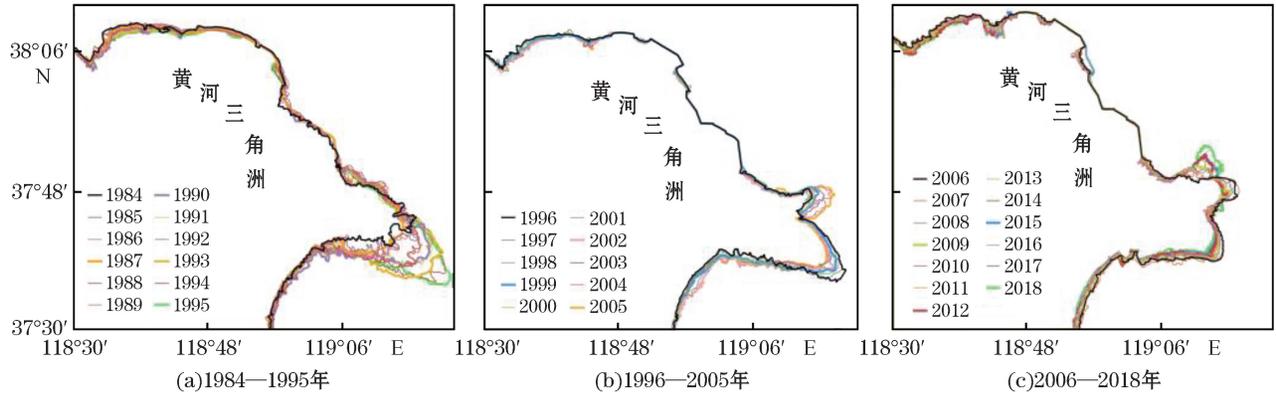


图 6 1984—2018 年瞬时水边线变化

Fig.6 Changes of instantaneous waterline during 1984—2018

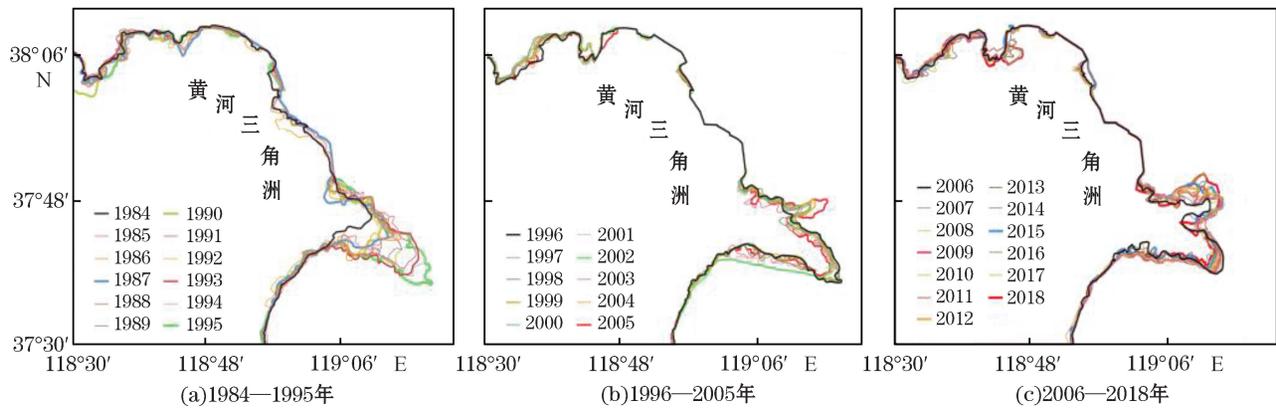


图 7 1984—2018 年一般高潮线变化

Fig.7 Changes of mean high tide line during 1984—2018

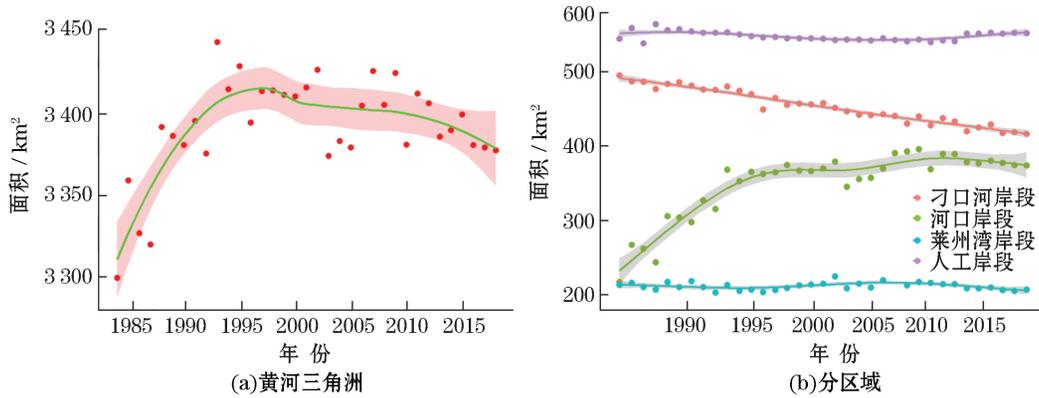
2.2.1 拟合结果分析

绘制了黄河三角洲总体(图 8a)和各岸段(图 8b)近 35 a 的面积时间序列变化散点图,然后通过非参数方法局部加权回归(LOWESS)^[41]拟合。从黄河三角洲总面积(图 8a)可知:陆地面积表现出了明显的先增加、后缓慢减少的趋势。1984—1997 年为黄河三角洲总面积的增长期,在 1993 年达到峰值 3 443.31 km²,比 1984 年增加了 144.09 km²,河口岸段面积的增长为总面积的增长做出了主要贡献;1997—2018 年为黄河三角洲总面积的缓慢减少期,2018 年比 1993 年减少了 66.01 km²,减少速率随时间逐渐降低趋于平缓,主要是由河口岸段面积增长速度小于北部刁口河岸段面积的侵蚀速度所致。

图 8b 明显地反映出黄河三角洲各分区面积的变化趋势,其中刁口河岸段面积呈显著的减少趋势,河口岸段呈显著的增加趋势,1984—1996 年大于 1996—2018 年面积的增长速率;莱州湾岸段和人工岸段没有显著的变化趋势,莱州湾岸段近 35 a 面积积极差为 23.11 km²,人工岸段为 25.51 km²。

2.2.2 河口岸段面积与水沙量交叉小波和小波相干结果分析

利用交叉小波和小波相干方法分析黄河三角洲河口岸段面积和水沙量的时间序列在不同时间尺度的变化和相互关系。交叉小波变换利用 2 个时间序列的连续小波变换分析共同高能量区和相位关系,小波相干分析 2 个时间序列在时频空间中局部的相关关系,可以进一步解释在交叉小波能量谱中低能量区的相关性。

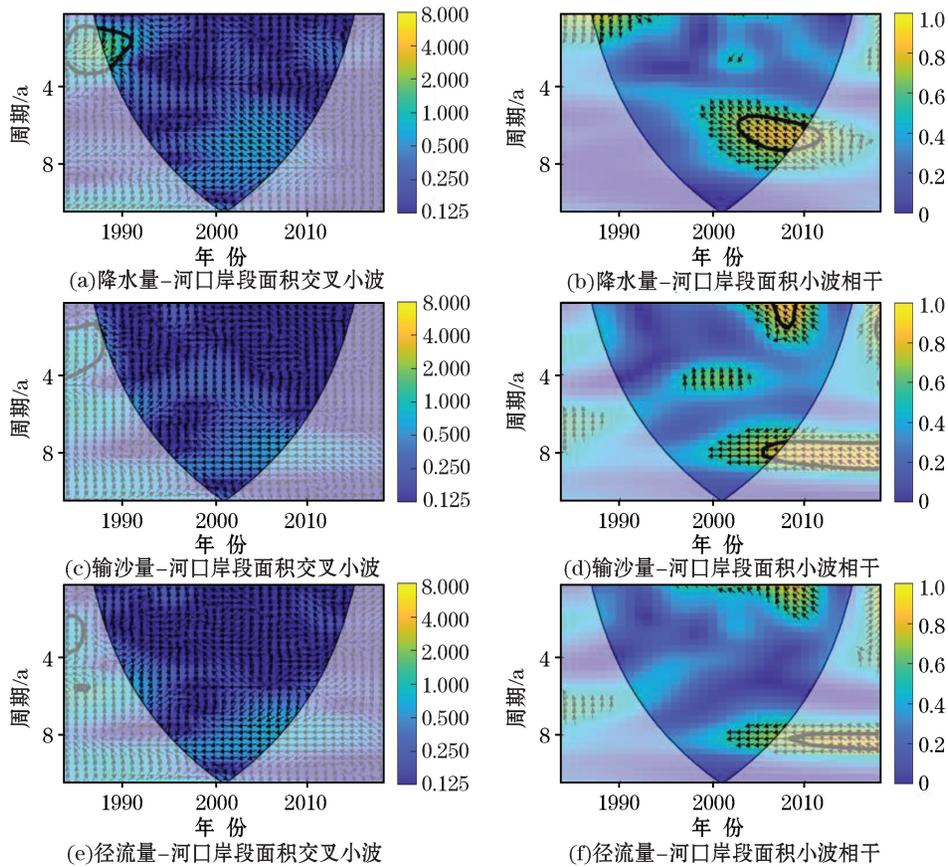


注:线条为拟合曲线;阴影区为拟合置信区间

图 8 面积的时间序列变化

Fig.8 Time series changes of area

图 9 给出了河口岸段面积与降水量、泥沙量以及径流量的交叉小波和小波相干功率谱图。由河口岸段面积和降水量的交叉小波功率谱(图 9a)可知,两者在 1989—1991 年存在一年的显著的共振周期,通过小波相干图(图 9b)可知在 2003—2010 年存在周期为 5~7 a 的显著的负相位关系;由河口岸段面积和泥沙量与径流量的交叉小波和小波相干功率谱(图 9c~图 9f)可知,面积和泥沙量与径流量不存在显著的相关关系。



注:图中箭头表示两者的相位关系,箭头向右表示两者为正相关关系,箭头向左表示两者为负相关关系,箭头向上表示后者的变化超过前者变化的 1/4 个周期,箭头向下表示后者的变化滞后前者变化的 1/4 个周期

图 9 各因子和河口岸段面积的交叉小波和小波相干功率谱

Fig.9 CWT and WTC power spectrum between factors and estuary coastal area

3 讨论

3.1 黄河三角洲总面积和各岸段面积变化特征分析

黄河三角洲主要是由黄河挟带泥沙冲积而形成的粉砂淤泥质海岸,其面积稳定性较差,受入海水沙、河流改道以及海洋动力条件等因素的影响。从 1978—1998 年黄河三角洲的面积总体呈现增长的趋势,随后直到 2016 年起黄河三角洲面积开始呈现减少的趋势^[12]。本研究也得到相似的结果:1984—1997 年黄河三角洲总面积呈增长趋势,且增长速度逐渐变缓;1998—2018 年黄河三角洲面积呈缓慢减少趋势。1976 年黄河入海口由原来的北部刁口河河口改为南部清水沟河口,这导致了自 1976 年后刁口河岸段面积急剧减少、现行河口岸段面积增加,是影响黄河三角洲总面积的主要原因。

本文根据岸段的特点,将整体岸段按照发展特点分为刁口河岸段、河口岸段、莱州湾段和人工岸段四个区域。与牛明香^[22]划分的刁口段、东营港及附近岸段、入海口段及莱州湾岸段四个区域相比,虽然岸线提取方法有差异,两者的数据不完全一致,但整体趋势大致相同。

莱州湾岸段在研究时段内没有显著的变化趋势,1984—2007 年面积大致稳定,2007 年后有轻微的减少趋势,这种变化一方面是由于黄河入海泥沙减少,渤海冷流南下^[42]输运到莱州湾岸段的泥沙量相应减少;另一方面由于防潮堤的建设减缓了岸线的扩张。河口岸段面积受黄河入海泥沙影响最显著,在研究时段内呈显著的增长趋势,按照增长速率可分为 1984—1996 年和 1996—2018 年两个时间段。由于胜利油田孤东围堤之间有稳固的防潮堤,所以该人工岸段相对稳定。刁口河岸段从 1976 年黄河改道后一直呈后退趋势,虽然人工固化海岸逐渐增多,但仍然不及海水动力作用的侵蚀速度,故总体面积呈减少趋势。

3.2 水沙量对河口岸段面积的影响

因为水沙量对现行河口岸段的影响最大,故单独选出河口岸段分析其面积的变化与利津站年输沙量、年径流量和黄河三角洲年降水量的关系。通过河口岸段面积的时间序列图(图 8b)可知,1984—1996 年河口岸段面积呈显著增长的趋势,同时期的输沙量和径流量通过 5 a 滑动平均(图 3a、图 4a)亦可得到为 1984—2018 年的最大值时间段,年降水量的 5 a 滑动平均也为增长的趋势,说明 1984—1996 年水沙量是河口面积增长的重要驱动力;1997—2003 年河口岸段面积呈缓慢的减少趋势,这也与水沙量有密切的关系。由图 3b,图 4b 和图 5b 可知年输沙量突变发生在 1997 年,年输沙量、年径流量和年降水量 1997—2002 年均为下降的趋势。根据利津水文站的观测数据可知,1996 年黄河改道清 8 汉后,原清水沟流路失去水沙的供应,1997 年黄河断流 202 d,岸线不断被侵蚀,一直到 2004 年黄河处于严重的断流状态,导致清 8 汉流路的造陆面积变小,河口岸段面积整体呈减少趋势。2004—2011 年由于调水调沙工程河口岸段面积呈增加趋势;2011—2018 年北部沙嘴朝向(图 6c 和图 7c)逐渐由东向变为北向,河口岸段面积呈减少趋势。此时间段输沙量、径流量和降水量与面积的变化关系不显著,可能是因为黄河 2002 年调水调沙之后,入海水沙模式与之前不同,具体原因尚需进一步探讨。

通过交叉小波和小波相干分析了河口岸段面积与水沙量在不同时间尺度的变化和相互关系,由河口岸段面积与泥沙径流量交叉小波谱和小波相干谱(图 9c~图 9f)可知,面积与泥沙径流不存在显著的相关关系,这进一步佐证了河口岸段的面积不仅受入海水沙的影响,还受潮汐、海流、泥沙粒径及调水调沙工程等因素的影响,未通过显著性检验的低能量区均以负相位为主,也可以说明河口面积的变化滞后于水沙的变化;由小波交叉谱图(图 9a)可知,河口岸段面积与降水量只在 1989—1991 年存在 1 a 的显著共振周期,其他未通过显著性检验的低能量区均以负相位为主,由小波相干谱(图 9b)可知在 2003—2010 年存在周期为 5~7 a 的显著的负相位关系,说明河口岸段面积变化滞后于黄河三角洲年降水量,这与黄河入海泥沙对黄河三角洲造陆存在明显的“后效”影响^[22]一致。

4 结 论

基于 Landsat 卫星数据,利用遥感大数据平台 Google Earth Engine 和 GIS 技术分析了黄河三角洲地区岸线变迁趋势,并研究了河口岸段面积与黄河三角洲年输沙量、年径流量、年降水量的关系。得到主要结论:

1)1984—2018 年黄河三角洲总面积先增加后缓慢减少,变化主要发生在北部刁口河岸段和现行河口岸段,因人工固化和防潮堤的修建,人工岸段和莱州湾岸段面积保持稳定,对黄河三角洲总面积的影响较小。

2)输沙量和径流量总体趋势基本一致,丰枯交替,整体呈下降趋势。河口岸段面积与水沙量存在密切的关系,并且输沙量、径流量和降水量对面积的变化存在明显的“后效”影响,比面积变化提前一年。此外,海洋中的潮汐和海流等海水动力作用以及人工固岸和调水调沙等非自然因素也对河口岸段的变化起着至关重要的影响。

本文使用的岸线提取方法相对方便快捷,具有一定的普适性,平均高潮线法提取岸线受潮汐影响较小,能够满足宏观分析的精度。LandSat 系列卫星的 TM、ETM+ 和 OLI 数据量大,可以筛选出少云清晰的影像,而 GEE 平台的高性能计算能力使分析处理数据更高效,特别是在对全球各地岸线的大尺度和长时间序列分析。所以,此方法未来可在其他河口地区进行试验。

参考文献(References):

- [1] 林松,俞晓攀,庄小冰,等. 厦门岛海岸线分形特性演变规律的研究[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(1): 121-129. LIN S, YU X D, ZHUANG X B, et al. Fractal characteristics evolution of coastline of the Xiamen Island[J]. *Advances in Marine Science*, 2020, 38(1): 121-129.
- [2] 欧素英,杨清书,杨昊,等. 河口三角洲径流和潮汐相互作用模型及应用[J]. 热带海洋学报, 2017, 36(5): 1-8. OU S Y, YANG Q S, YANG H, et al. The development and application of river-tide harmonic model[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2017, 36(5): 1-8.
- [3] 何传光,李小娟,左学玲. 黄河口滨海区泥沙容重试验分析研究[J]. 水资源开发与管理, 2017(4): 70-72, 76. HE C G, LI X J, ZUO X L. Analysis and research on sediment bulk density test in coastal area of Yellow River Estuary[J]. *Water Resources Development and Management*, 2017(4): 70-72, 76.
- [4] 藏政晨,王厚杰,薛佐,等. 黄海近岸锋面的时空变化及其对沉积物输运和沉积的影响[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(7): 1-10. ZANG Z C, WANG H J, XUE Z, et al. Temporal and spatial variability of nearshore fronts in the Yellow Sea and its influence on sediment transport and deposition[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2015, 31(7): 1-10.
- [5] 樊彦国,张淑芹,侯春玲,等. 基于遥感影像提取海岸线方法的研究——以黄河三角洲地区黄河口段和刁口段海岸为例[J]. 遥感信息, 2009(4): 67-70, 74. FAN Y G, ZHANG S Q, HOU C L, et al. Study on method of coastline extraction from remote sensing: taking Yellow River Mouth reach and Diaokou reach of Yellow River Delta area as an example[J]. *Remote Sensing Information*, 2009(4): 67-70, 74.
- [6] CUI B L, LI X Y. Coastline change of the Yellow River Estuary and its response to the sediment and runoff (1976—2005)[J]. *Geomorphology*, 2010, 127(1): 32-40.
- [7] 魏帆,韩广轩,韩美,等. 1980—2017 年环渤海海岸线和围填海时空演变及其影响机制[J]. 地理科学, 2019, 39(6): 997-1007. WEI F, HAN G X, HAN M, et al. Temporal-spatial dynamic evolution and mechanism of shoreline and the sea reclamation in the Bohai rim during 1980—2017[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(6): 997-1007.
- [8] GODWYN-PAULSON P, JONATHAN M P, HERNANDEZ F R, et al. Coastline variability of several Latin American cities alongside Pacific Ocean due to the unusual “Sea Swell” events of 2015[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(8): 522.
- [9] 彭修强,夏非,张永战. 苏北废黄河三角洲海岸线动态演变分析[J]. 海洋通报, 2014, 33(6): 630-636. PENG X Q, XIA F, ZHANG Y Z. Analysis of the dynamic changes of the coastline along the Abandoned Yellow River Delta of Northern Jiangsu, China[J]. *Marine Science Bulletin*, 2014, 33(6): 630-636.
- [10] 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. WANG K F, LI N C, WANG W. Characteristics of coastline change and multiyear evolution of the Yellow River Delta[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2018, 37(3): 330-338.

- [11] 李贺, 黄翀, 张晨晨, 等. 1976 年以来黄河三角洲海岸冲淤演变与入海水沙过程的关系[J]. 资源科学, 2020, 42(3): 486-498. LI H, HUANG C, ZHANG C C, et al. Coastal erosion and sediment dynamics of the Yellow River Delta and their responses to the runoff-sediment flux since 1976[J]. Resources Science, 2020, 42(3): 486-498.
- [12] 王一鸣, 高鹏, 穆兴民, 等. 1973 年以来黄河三角洲形态与入海水沙通量关系研究[J]. 泥沙研究, 2018, 43(5): 39-45. WANG Y M, GAO P, MU X M, et al. Relationship between the shape of the Yellow River delta and the runoff-sediment flux Since 1973[J]. Journal of Sediment Research, 2018, 43(5): 39-45.
- [13] 李培林, 刘小平, 黄应淮, 等. 基于 GEE 平台的广州市主城区不透水面时间序列提取[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(3): 638-648. LI P L, LIU X P, HUANG Y H, et al. Mapping impervious surface dynamics of Guangzhou downtown based on Google Earth Engine [J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(3): 638-648.
- [14] GORELICK N, HANCHER M, DIXON M, et al. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone[J]. Remote Sensing of Environment, 2017(202): 18-27.
- [15] JOHANSEN K, PHINN S, TAYLOR M. Mapping woody vegetation clearing in Queensland, Australia from Landsat imagery using the Google Earth Engine[J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2015(1): 36-49.
- [16] SOMNATH B, BIKASH R P, ARVIND C P. Landsat-8 and Sentinel-2 based Forest fire burn area mapping using machine learning algorithms on GEE cloud platform over Uttarakhand, Western Himalaya[J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2020 (18): 100324.
- [17] KILIAN V, SPLINTER K D, HARLEY M D, et al. CoastSat: a Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery[J]. Environmental Modelling and Software, 2019, 122: 104528.
- [18] DENG Y, JIANG W G, TANG Z H, et al. Long-term changes of open-surface water bodies in the Yangtze River Basin based on the Google Earth Engine cloud platform[J]. Remote Sensing, 2019, 11(19): 2213.
- [19] WANG C, JIA M M, CHEN N C, et al. Long-term surface water dynamics analysis based on Landsat imagery and the Google Earth Engine platform: a case study in the middle Yangtze River Basin[J]. Remote Sensing, 2018, 10(10): 1635.
- [20] 安永会, 张福存, 姚秀菊. 黄河三角洲水土盐形成演化与分布特征[J]. 地球与环境, 2006(3): 65-70. AN Y H, ZHANG F C, YAO X J. Distribution and evolution of the Yellow River Delta plain and ground water as well as salts in the Yellow River Delta[J]. Earth and Environment, 2006(3): 65-70.
- [21] MILLIMAN J D, SYVITSKI J P M. Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers[J]. The Journal of Geology, 1992, 100(5): 525-544.
- [22] 牛明香, 王俊. 基于 Landsat 遥感影像的黄河三角洲东营段海岸线变化分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 26-33. NIU M X, WANG J. Analysis of coastline variations in Dongying section of Yellow River Delta based on Landsat remote sensing image[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 26-33.
- [23] 栗云召, 于君宝, 韩广轩, 等. 基于遥感的黄河三角洲海岸线变化研究[J]. 海洋科学, 2012, 36(4): 99-106. SU Y Z, YU J B, HAN G X, et al. Coastline change detection of the Yellow River Delta by satellite remote sensing[J]. Marine Sciences, 2012, 36(4): 99-106.
- [24] 薛允传, 马圣媛, 周成虎. 基于遥感和 GIS 的现代黄河三角洲岸线变迁及发育演变研究[J]. 海洋科学, 2009, 33(5): 36-40. XUE Y C, MA S Y, ZHOU C H. The shoreline migration and the delta changes study in the modern Yellow River Delta using remote sensing and GIS[J]. Marine Sciences, 2009, 33(5): 36-40.
- [25] 东营市水利志编纂委员会编撰. 东营市水利志[M]. 青岛: 青岛出版社, 2011: 54-58. Compiled by Dongying Water Conservancy Chronicle Compilation Committee. Dongying water conservancy chronicle[M]. Qingdao: Qingdao Press, 2011: 54-58.
- [26] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报[EB/OL]. (2020-07-24)[2021-07-21]. <http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zghlnsgb/>. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China river sediment bulletin[EB/OL]. (2020-07-24)[2021-07-21]. <http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zghlnsgb/>
- [27] 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.
- [28] 杨雷, 孙伟富, 马毅, 等. 近 10 年珠海海岸带海岸线时空变化遥感分析[J]. 海洋科学, 2017, 41(2): 20-28. YANG L, SUN W F, MA Y, et al. Remote sensing analyses of the spatial and temporal changes in Zhuhai shoreline[J]. Marine Sciences, 2017, 41(2): 20-28.
- [29] 姚晓静, 高义, 杜云艳, 等. 基于遥感技术的近 30 年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.
- [30] 王正军, 张鹰, 陈理凡, 等. 从高分辨率卫星影像挖掘海岸冲淤变化信息的方法[J]. 海洋科学进展, 2012, 30(1): 63-68. WANG Z J, ZHANG Y, CHEN L F, et al. Methods for extracting the information of coastal accretion-erosion variations from high-resolution satel-

- lite images[J]. *Advances in Marine Science*, 2012, 30(1): 63-68.
- [31] 徐涵秋. 基于压缩数据维的城市建筑用地遥感信息提取技术[J]. *中国图像图形学报*, 2005, 10(2): 223-229. XU H Q. Remote sensing information extraction of urban built up land based on a data dimension compression technique[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2005, 10(2): 223-229.
- [32] MCFEETERS S K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [33] 章诞武, 丛振涛, 倪广恒. 基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J]. *水科学进展*, 2013, 24(4): 490-496. ZHANG D W, CONG Z T, NI G H. Comparison of three Mann-Kendall methods based on the China's meteorological data[J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(4): 490-496.
- [34] 王延贵, 刘茜, 史红玲. 江河泥沙变化趋势分析方法与比较[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2014, 12(2): 190-195. WANG Y G, LIU Q, SHI H L. Analytical methods and their comparisons for water and sediment variation trends[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2014, 12(2): 190-195.
- [35] 董林焱, 张平仑, 刘纪根, 等. 太阳黑子和 ENSO 对日本吉野川流域水文要素影响[J]. *水科学进展*, 2017, 28(5): 671-680. DONG L Y, ZHANG P C, LIU J G, et al. Combined influence of solar activity and ENSO on hydrological processes in Yoshino River basin, Japan [J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(5): 671-680.
- [36] GRINSTED A, MOORE J C, JEVREJEVA S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series[J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2004, 11(40): 561-566.
- [37] 刘志方, 刘友存, 郝永红, 等. 黑河出山径流过程与气象要素多尺度交叉小波分析[J]. *干旱区地理*, 2014, 37(6): 1137-1146. LIU Z F, LIU Y C, HAO Y H, et al. Multi-time scale cross-wavelet transformation between runoff and climate factors in the upstream of Heihe River[J]. *Arid Land Geography*, 2014, 37(6): 1137-1146.
- [38] 张克新, 潘少明, 曹立国, 等. 横断山区季风期水分盈亏量时空变化特征及其与若干气候指数的相关性分析[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(11): 1869-1877. ZHANG K X, PAN S M, CAO L G, et al. Variation of water deficit and its association with climate indices in summer monsoon in Hengduan Mountains[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(11): 1869-1877.
- [39] TORRENCE C, J WEBSTER P. Interdecadal changes in the ENSO-monsoon system[J]. *Journal of Climate*, 1999, 12(8): 125-137.
- [40] 许炯心. 流域降水和人类活动对黄河入海泥沙通量的影响[J]. *海洋学报*, 2003, 25(5): 125-135. XU J X. Sediment flux into the sea as influenced by the changing human activities and precipitation; example of the Huanghe River, China[J]. *Haiyang Xuebao*, 2003, 25(5): 125-135.
- [41] WILLIAM S. CLEVELAND, SUSAN J. DEVLIN. Locally weighted regression: an approach to regression analysis by local fitting[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 2012, 83(403): 596-610.
- [42] 崔承琦, 李师汤, 孙晓霞, 等. 黄河三角洲海岸岸线和潮水沟体系发育及其分维研究——黄河三角洲潮滩海岸时空谱系研究 III [J]. *海洋通报*, 2001, 20(6): 61-71. CUI C Q, LI S T, SUN X X, et al. Research on the development of the Huanghe River Delta coastline and the tidal creek system as well as fractional dimension; research on the space-time lineage of tidal bank coast of the Huanghe River Delta III [J]. *Marine Science Bulletin*, 2001, 20(6): 61-71.

Multiscale Time Series Analysis of Yellow River Delta Area Based on GEE and GIS

SU Zhi-ming¹, SUN Yong-fu^{1,2,3}, SONG Yu-peng¹, MIAO Dong-jie^{1,4}, SONG Bing-hui¹, DU Xing¹

(1. *First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China;*

2. *National Deep Sea Center, Qingdao 266237, China;*

3. *Marine Geology and Environment Laboratory Process, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266235, China;*

4. *School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China)*

Abstract: Using remote sensing big data platform GEE (Google Earth Engine) and GIS (Geographic Information System) technology, combined with hydrological and meteorological data, this paper analyzes the time series change of the shore line in the Yellow River Delta region, and studies the relationship between the estuary area and annual sediment discharge, runoff and precipitation of the Yellow River Delta. The results show that the total area of the Yellow River Delta increased and then decreased gradually from 1984 to 2018, and the turning point occurred in 1998. The area of Laizhou Bay shore section and artificial shore section is basically stable due to the construction of solid shore project. The area of the Diaokou River shore section shows a downward trend, Which is mainly due to the loss of water and sand recharge after the yellow river re-route, and the erosion by the dynamic action of the sea water is significant. But as the supply of water and sand decreases, the rate of growth slows down. In general, the sediment discharge, runoff and precipitation into the sea are important factors affecting the area of the Yellow River Delta, but with the increase of artificial coast and the decrease of water and sand at the source, the area of the Yellow River Delta is more and more affected by unnatural factors.

Key words: Yellow River Delta; shoreline change; mean high tide water line method; wavelet analysis; runoff and sediment; Mann-Kendall trend test

Received: November 11, 2020