

# 基于GEE的山东靖海湾岸线和潮滩逐年提取与 形态变化分析

赵士祺<sup>1,2</sup>, 魏 潇<sup>1</sup>, 孙 伟<sup>1</sup>, 刘 宁<sup>1</sup>, 徐艳东<sup>1</sup>

(1.山东省海洋资源与环境研究院 山东省海洋生态修复重点实验室, 山东 烟台 264006; 2.上海海洋大学  
海洋生物资源与管理学院, 上海 201306)

**摘 要:**海湾岸线和潮滩具有重要的生态功能和资源价值。针对海湾地物环境复杂、潮汐变动频繁的问题, 本文基于谷歌地球引擎, 批量构建多特征数据集, 综合利用 K 均值聚类、决策树和多种后处理算法, 提出了一种自动提取岸线与潮滩逐年空间信息的方法, 选取两者变化较大的典型海湾进行应用验证。利用 R 语言实现 MovMean 算法, 定量刻画了 1985—2023 年靖海湾两者形态的年际演变过程, 并掌握了其变化特征, 结果表明: 39 年来靖海湾岸线长度由 93.17 km 增长到 133.82 km, 总体更为曲折, 大部分岸线向海扩张, 其中海湾北部岸线扩张最大 (129.73 m/a); 海湾和潮滩面积均大幅变化且趋势基本一致, 分别缩减 49.32 km<sup>2</sup> (41.61%) 和 11.89 km<sup>2</sup> (35.96%), 岸线形态呈先小幅变化 (1985—2001 年), 后显著变化 (2001—2015 年), 再趋于缓和 (2015—2023 年) 的阶段性变化, 这与全国海湾演变特征一致。

**关键词:**谷歌地球引擎; 机器学习; 岸线和潮滩; 形态年际变化

中图分类号:X87

文献标识码:A

文章编号:1007-6336(2025)03-0443-09

## GEE-based analysis of year-by-year extraction and shape changes of coastline and tidal flats in Jinghai Bay, Shandong

ZHAO Shiqi<sup>1,2</sup>, WEI Xiao<sup>1</sup>, SUN Wei<sup>1</sup>, LIU Ning<sup>1</sup>, XU Yandong<sup>1</sup>

(1.Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Ecological Restoration, Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Yantai 264006, China; 2.College of Marine Living Resource Sciences and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** The coastline and tidal flats of bay play crucial roles in ecology and are valuable for resources. This paper used the Google Earth Engine (GEE) for batch creation of multi-feature datasets to address the intricate environmental conditions and the regular tidal variations in bays. By comprehensively utilizing K-means clustering, decision trees, and diverse post-processing techniques, a method was proposed to automatically extract annual spatial information of the coastline and tidal flats, and typical bays with notable changes were selected for application verification. With the MovMean algorithm developed in the R language, the inter-annual evolution of the coastline and tidal flat shape of Jinghai Bay was quantitatively depicted and characterized from 1985 to 2023. It showed that over the past 39 years, the length of the coastline of Jinghai

收稿日期:2024-04-15, 修订日期:2024-06-07

**基金项目:**国家重点研发计划(2023YFF0611803); 山东省海洋生态修复重点实验室开放课题(201903); 山东省海域使用后评估及海洋生态保护修复工作技术支撑(37000022P11002010011E)

**作者简介:**赵士祺(1997—), 男, 内蒙古包头人, 硕士研究生, 主要从事海岸带遥感与地理信息系统研究, E-mail: [zsqli502474@163.com](mailto:zsqli502474@163.com)

**通信作者:**徐艳东(1980—), 男, 山东苍山人, 博士, 研究员, E-mail: [xuyandong@163.com](mailto:xuyandong@163.com)

Bay had increased from 93.17 km to 133.82 km. The coastline had generally become more tortuous, with most of it expanding towards the sea, especially in the northern part of the bay (129.73 m/a). Significant changes and consistent trends had been observed in the bay and tidal flats, resulting in losses of 49.32 km<sup>2</sup> (41.61%) and 11.89 km<sup>2</sup> (35.96%), respectively. Coastline shape showed a phase of small changes (1985–2001), followed by significant changes (2001–2015), and then moderation (2015–2023), which was consistent with the evolutionary characteristics of the national bays.

**Key words:** Google Earth Engine; machine learning; coastline and tidal flat; interannual variation in shape

海湾是深入陆地的明显水曲,具有独特的自然环境和显著的区位优势,是众多海洋生物、大型港口和地区核心城市的摇篮,在我国经济建设与社会发展中有着不可替代的地位<sup>[1]</sup>。受气候变化和人类活动的影响,部分海湾出现岸线形态快速变化、潮滩面积大幅缩减以及生态功能被破坏等问题<sup>[2]</sup>。岸线和潮滩具有重要的经济和生态服务价值,两者的快速提取和高时间分辨率形态变化分析,可为海湾空间资源的合理开发与保护修复提供重要的科学依据。

现阶段,提取岸线和潮滩空间信息所用的数据源主要有雷达和光学遥感影像两种,其中,雷达数据的获取成本较高、应用局限较大,而光学数据的应用相对广泛<sup>[3]</sup>。高分辨率光学遥感影像如高分等,提取误差在亚米级,但可用时间短,无法满足长时段研究的需要; Landsat 影像提取误差在 30 m,自 1972 年至今已积累超 50 年的数据,常用于大时间跨度的研究<sup>[4]</sup>。

对遥感影像进行目视解译较为依赖个人经验且耗时长,自动解译可更高效地获取空间信息,已被广泛应用于岸线和潮滩的提取。朱琳等<sup>[5]</sup>基于阈值分割方法从单特征影像中提取岸线,该方法易于实现,但存在复杂环境下分割效果不佳的问题; Ai 等<sup>[6]</sup>利用支持向量机提取多特征数据集中岸线空间信息,该方法可更好地应对复杂地物环境,但相邻像元值差异较大时有椒盐噪声。潮滩的提取方法主要有相同潮位对比法<sup>[7]</sup>、八分算潮法<sup>[8]</sup>和水边线拟合法<sup>[9]</sup>,前两者通过估算来确定潮下线的位置,难以保证较高的精度,后者通过穷举瞬时水边线拟合潮下线,存在较烦琐的潮下线拟合过程,不适合高时间分辨率的研究。针对上述岸线和潮滩提取过程中的问题,本文将多类特征数据相组合,利用 K 均值聚类、决策树和多种后处理算法,实现两者空间信

息的高效自动提取。

谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)存有海量数据并提供充足算力,可显著提升大时间跨度、高时间分辨率岸线和潮滩形态变化研究的效率<sup>[10]</sup>。靖海湾是山东半岛蓝色经济区九大重点区块之一<sup>[11]</sup>,人类活动使其岸线和潮滩形态均发生了显著变化,该湾可作为两者提取方法的应用验证区。本文基于 GEE 云平台,综合利用机器学习和多种后处理算法,尝试为高效提取复杂地物环境下岸线和潮滩空间信息提供解决方案,为更好地理解靖海湾岸线和潮滩形态长时间演变提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

靖海湾位于山东省威海市的南部,东起靖海角(36°50′45″N, 122°10′59″E),西迄二子岛(36°53′47″N, 122°02′10″E),其口门宽 12.78 km,纵深 19.53 km,海湾面积达 139.43 km<sup>2</sup>,湾内潮滩广布,是胶东半岛大型海湾之一<sup>[1]</sup>。本文将该湾划分成外湾西部、张家埠港汊、外湾北部、张濛港汊和外湾东部,研究区概况如图 1 所示。

### 1.2 数据来源

为兼顾研究区域遥感影像的数据质量和可获得性,本文以 Landsat Collection2 Level2 为光谱特征数据源, NASADEM 为纹理特征数据源,并以 Google Earth 高精度影像和配准后海图评价解译结果的精度。

### 1.3 技术路线

1985—2023 年靖海湾岸线和潮滩逐年数据集构建技术路线如图 2 所示。在岸线提取时,先进行影像预处理,后计算各类遥感指数,再生成超像素分割图,组建面向对象的多特征数据集;用 3000 个随机点对该数据集进行随机采样,配

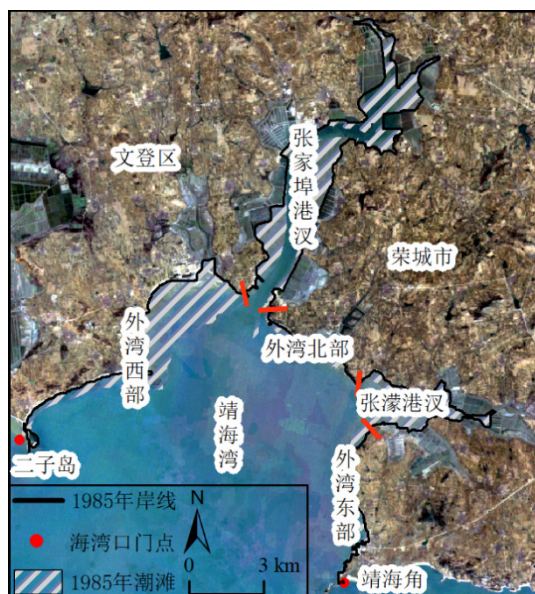


图1 研究区域

Fig. 1 Study area

合 K 均值聚类、数学形态学处理和 Canny 边缘检测提取岸线空间信息;将矢量文件下载到本

地,清除无用碎斑、重采样去除锯齿,并对岸线提取结果进行精度评价。在潮滩提取时,先进行预处理操作得到逐年影像堆栈 39 个(457 景),后计算堆栈内影像的多种遥感指数,再通过像元频数统计生成水浸和植被覆盖频率影像,与 NASADEM 高程数据组成光谱、纹理混合特征数据集,综合利用决策树算法和数学形态学处理从该数据集中提取潮滩空间信息;在本地进行人工修正,参考岸线数据去除水域和陆地碎斑,并对潮滩提取结果开展精度评价。

#### 1.4 特征数据集构建

海岸线是平均大潮高潮线<sup>[12]</sup>,通过特征工程构建数据集,增强水陆特征差异,可提高其自动解译精度。本文岸线特征数据集包含改进归一化水体指数<sup>[13]</sup>(modified normalized difference water index, *mNDWI*)、自动水体提取指数<sup>[14]</sup>(automated water extraction index, *AWEI*)、多波段水体指数<sup>[15]</sup>(multi-band water index, *MBWI*)、归一化植被

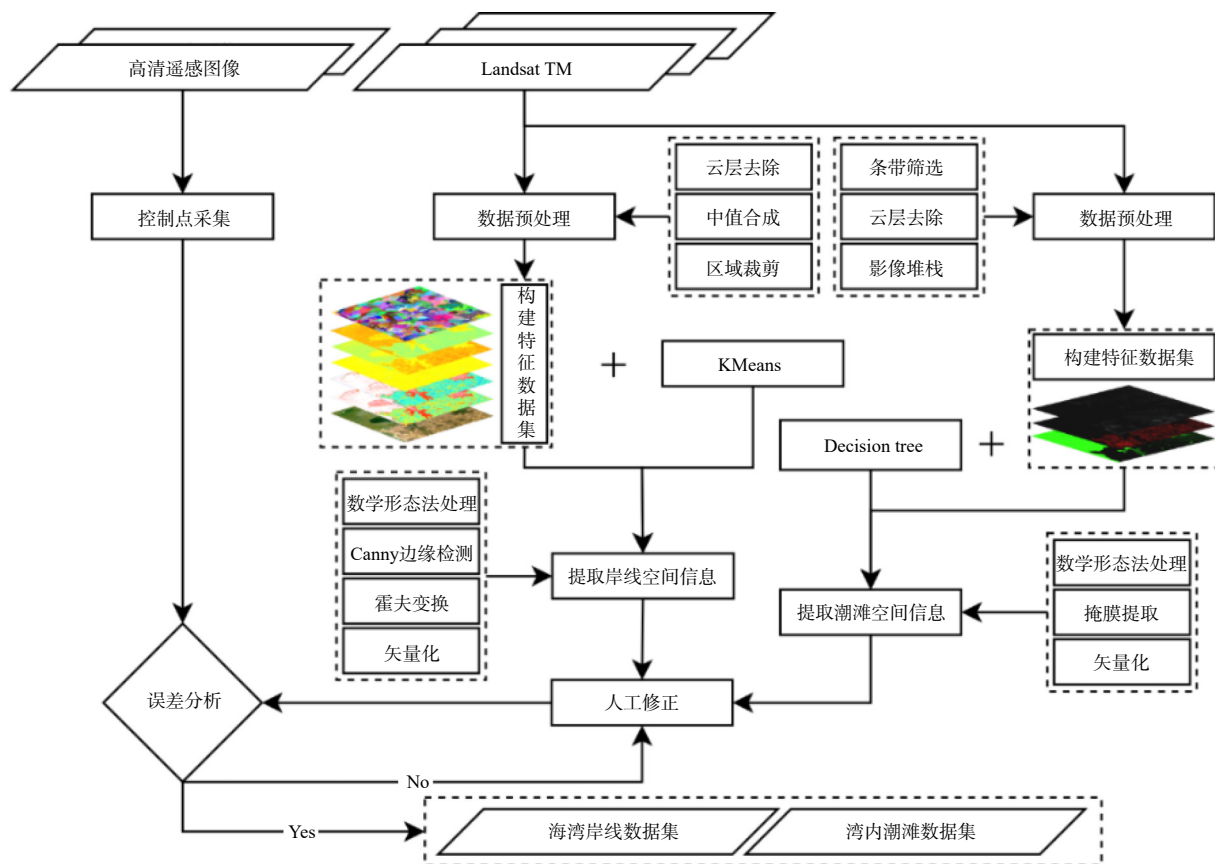


图2 岸线和潮滩数据集构建技术路线

Fig. 2 Technical route construction of coastline and tidal flat data sets

指数<sup>[16]</sup>(nominalized difference vegetation index, *NDVI*)、归一化建筑物指数<sup>[17]</sup>(normalized difference built-up index, *NDBI*)、简单非迭代聚类(simple non-iterative clustering, *SNIC*)特征影像以及原始遥感影像红光波段 $\rho_{\text{red}}$ 、绿光波段 $\rho_{\text{green}}$ 、蓝光波段 $\rho_{\text{blue}}$ 、近红外波段 $\rho_{\text{nir}}$ 、短波红外1波段 $\rho_{\text{swir1}}$ 和短波红外2波段 $\rho_{\text{swir2}}$ ,遥感指数计算公式如下所示。

$$mNDWI = \frac{\rho_{\text{green}} - \rho_{\text{swir1}}}{\rho_{\text{green}} + \rho_{\text{swir1}}} \quad (1)$$

$$AWEI = 4 \times (\rho_{\text{green}} - \rho_{\text{swir1}}) - (0.25 \times \rho_{\text{nir}} + 2.75 \times \rho_{\text{swir2}}) \quad (2)$$

$$MBWI = (2 \times \rho_{\text{green}}) - \rho_{\text{red}} - \rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{swir1}} - \rho_{\text{swir2}} \quad (3)$$

$$NDVI = \frac{\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}}}{\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{red}}} \quad (4)$$

$$NDBI = \frac{\rho_{\text{swir1}} - \rho_{\text{nir}}}{\rho_{\text{swir1}} + \rho_{\text{nir}}} \quad (5)$$

潮滩在潮汐作用下,高潮时被水淹没、低潮时露出水面,难以在一景遥感影像中被完全捕捉<sup>[18]</sup>。通过地表水体指数<sup>[19]</sup>(land surface water index, *LSWI*)和增强植被指数<sup>[20]</sup>(enhanced vegetation index, *EVI*)计算水浸和植被覆盖频率,可有效减少潮汐影响。在复杂环境下单特征提取往往存在一定误差,为保证提取精度,本文先使用式(6)和式(7)提取单一影像的水体、植被信息,再基于式(8)和式(9)计算逐年的水浸频率和植被覆盖频率。在式(6)到式(9)中,Water为水体; $F_{\text{Water}}$ 为水浸频率; $\sum N_{\text{Water}}$ 为水体出现频数;Vegetation为植被; $F_{\text{Vegetation}}$ 为植被覆盖频率; $\sum N_{\text{Vegetation}}$ 为植被出现频数; $\sum N_{\text{Total}}$ 为总观察数。

$$\text{Water} = \text{EVI} < 0.1 \text{ and } (mNDWI > \text{EVI or } mNDWI > NDVI) \quad (6)$$

$$\text{Vegetation} = \text{EVI} \geq 0.1 \text{ and } NDVI \geq 0.2 \text{ and } LSWI > 0 \quad (7)$$

$$F_{\text{Water}} = \frac{\sum N_{\text{Water}}}{\sum N_{\text{Total}}} \quad (8)$$

$$F_{\text{Vegetation}} = \frac{\sum N_{\text{Vegetation}}}{\sum N_{\text{Total}}} \quad (9)$$

### 1.5 自动解译算法实现

K均值聚类以像素为基本单元,相邻像素之间差异较大可能导致椒盐现象,利用SNIC算法构建面向对象特征可有效抑制该现象。在GEE上实现决策树提取算法时,综合Wang等<sup>[21]</sup>和陈

慧欣等<sup>[22]</sup>研究确定的潮滩提取决策规则,如式(10)所示,*Elevation*为海拔高度。

$$F_{\text{Vegetation}} \geq 0.15 \text{ and } (F_{\text{Water}} \leq 0.95 \text{ and } F_{\text{Water}} \geq 0.05) \text{ and } \text{Elevation} \leq 1 \quad (10)$$

### 1.6 形态变化分析方法

#### 1.6.1 海湾岸线长度和分形维数

长度是岸线的基本属性,在不同尺度下测量会有显著差异,分形维数是尺度变化下的不变量,可刻画岸线复杂程度,其值越高表示岸线越曲折,常见的计算方法为网格法<sup>[23]</sup>。

$$\lg N(\varepsilon) = -D \lg \varepsilon + C \quad (11)$$

式中: $N(\varepsilon)$ 为覆盖有被测岸线正方形网格数目; $\varepsilon$ 为正方形网格长度(m); $C$ 为待定系数; $D$ 为岸线分形维数。

本文选定 $\varepsilon$ 的尺度分别是30、60、75、150、300、600、900、1000、1050、1100、1150、1200、1500、1800、2500、3000、3500、4500、6000、7500和9000 m<sup>[24]</sup>。

#### 1.6.2 线性回归速率

线性回归速率(linear regression rate, *LRR*)基于最小二乘法综合考虑多期岸线,能较好地拟合多年海岸线位置变迁情况,本文手动绘制基线,每50 m生成一个剖面,并参考默认置信区间,将 $LRR < -0.5 \text{ m/a}$ 视为收缩、 $LRR > 0.5 \text{ m/a}$ 视为扩张<sup>[25]</sup>。

#### 1.6.3 滑动平均差检测法

为进一步刻画岸线和潮滩演变过程,本文通过R语言实现滑动平均差检测法(MovMean)进行突变点检测,并以突变点横坐标为特征年进行阶段划分,该方法相比其他方法具有直观易理解、检测更精确并能同时检测出所有突变点的突变位置和突变强度等优势<sup>[26]</sup>。

#### 1.6.4 海湾面积和潮滩面积

海湾面积是指海湾岸线在口门处闭合所形成平面图斑的面积,潮滩面积是指遥感影像中平面潮滩的图斑面积,对比分析两者的数值变化,可进一步刻画湾内潮滩的形态演变特征<sup>[24]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 岸线与潮滩提取精度评价

本文采用点线法和缓冲区法分别评价岸线

和潮滩抽样数据的精度。点线法<sup>[24]</sup>是指在谷歌地球高精度遥感影像上采集控制点, 计算岸线与控制点间的距离, 并用所有点线间距离的均值和均方根与理论最大允许误差比较。缓冲区法<sup>[9]</sup>是指做特定半径的缓冲区, 每个缓冲区内随机生成一定数量的控制点, 再借助高精度影像和配准后的海图对控制点进行标注, 并计算混淆矩阵。

$$Mean = \frac{D_1 + D_2 + D_3 + \cdots + D_n}{n}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{D_1^2 + D_2^2 + D_3^2 + \cdots + D_n^2}{n}} \quad (12)$$

$$OA = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad Kappa = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (13)$$

式中:  $Mean$  为均值;  $RMSE$  为均方根误差;  $D$  为控制点至岸线的垂直距离;  $n$  为控制点个数;  $P_o$  为正确分类的样本比例;  $P_e$  为预期的正确分类比例;  $OA$  为总体精度;  $TP$  为真正例数量;  $TN$  为真负例数量;  $FP$  为假正例数量;  $FN$  为假负例数量。点线法每期岸线数据采集控制点 150 个, 理论最大允许误差为 28.28 m<sup>[12]</sup>, 控制点空间分布如图 3a 所示, 与刘闯等<sup>[27]</sup>解译的全球多尺度海岸线数据集进行对比, 本文的岸线数据集位置准确, 可以满足研究需要, 如图 3b 所示。

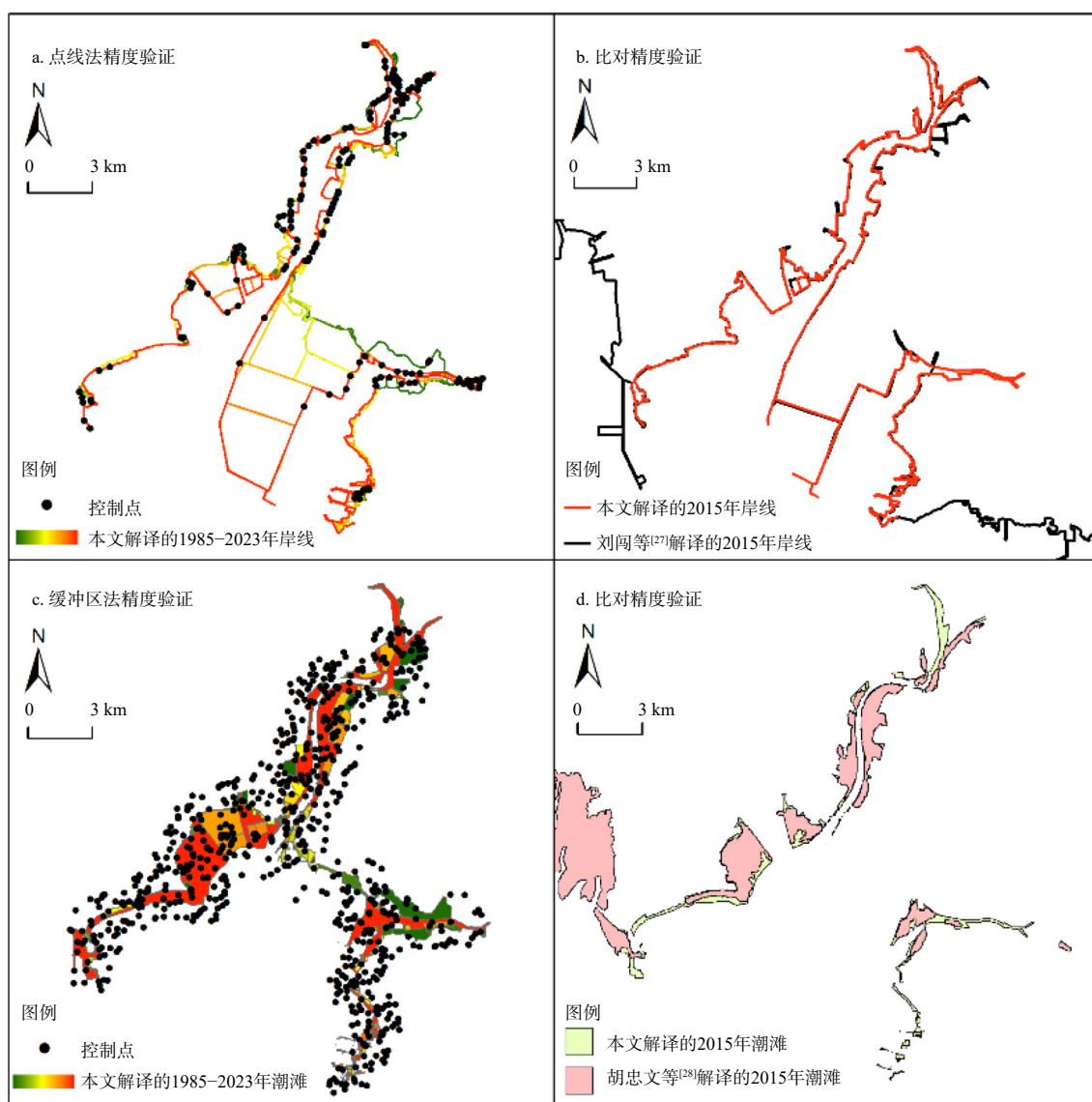


图3 靖海湾岸线和潮滩数据集精度验证

Fig. 3 Accuracy evaluation of the Jinghai Bay coastline and tidal flats dataset

缓冲区法每期潮滩数据采集控制点 200 个,缓冲区半径 1 km,控制点空间分布如图 3c 所示,与胡忠文等<sup>[28]</sup>解译的中国北部滨海滩涂湿地分布数据

集进行对比,本文潮滩数据集细节更为丰富,形态更为完整,如图 3d 所示。表 1 精度评价结果表明抽样数据的误差均可接受。

表 1 靖海湾岸线和潮滩提取精度评价结果

Tab.1 Evaluation of the results of coastline and tidal flats extraction in Jinghai Bay

|    | 时相/a     | 1985  | 1990  | 1995  | 2000  | 2005  | 2010  | 2015  | 2022  |
|----|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 岸线 | 均值/m     | 16.90 | 17.54 | 19.68 | 17.84 | 18.24 | 18.34 | 17.74 | 18.39 |
|    | 均方根/m    | 20.55 | 20.93 | 24.44 | 21.16 | 21.27 | 21.41 | 21.43 | 21.41 |
| 潮滩 | 总体精度/(%) | 92.50 | 96.00 | 93.00 | 92.00 | 93.00 | 94.00 | 98.00 | 96.00 |
|    | Kappa系数  | 0.79  | 0.90  | 0.81  | 0.79  | 0.75  | 0.81  | 0.89  | 0.87  |

2.2 岸线长度和分形维数变化分析

1985—2023 年靖海湾岸线长度大幅增长,由 1985 年的 93.17 km 到 2023 年的 133.82 km,共增加长度 40.65 km,增幅为 43.63%,岸线分形维数整体呈增长特征,由 1985 年的 1.12 增加到 2023 年的 1.18。岸线长度、分形维数时序突变点检测(图 4)和叠置分析(图 5)结果表明,特征

年是 1991 年、2001 年、2005 年、2009 年、2012 年和 2015 年,两者分阶段演变特征分析如下:1985—2001 年小幅增长,2001—2005 年先增长后减少而后又增长,2005—2009 年先增长后减少而后又增长,2009—2012 年先小幅减少后大幅增长,2012—2015 年大幅增长,2015—2023 年先小幅增长后维持稳定。

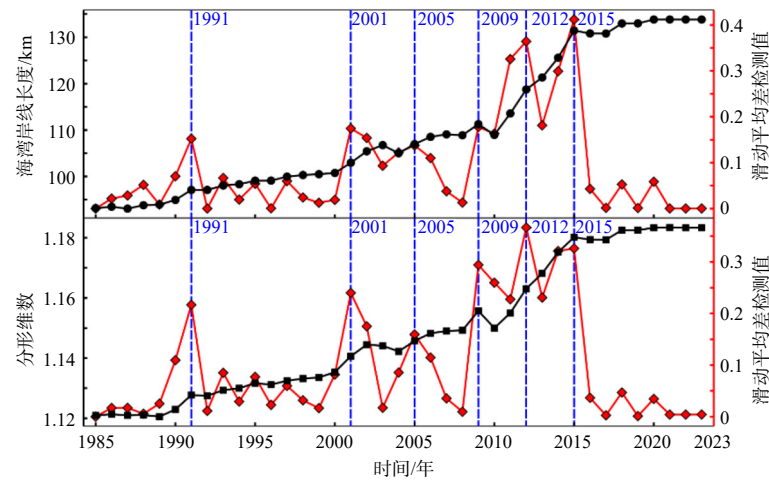


图 4 1985—2023 年靖海湾岸线长度、分形维数及其特征年

Fig. 4 The coastline length, fractal dimension and their characteristic years of Jinghai Bay from 1985 to 2023

从整体看,1985—2001 年是岸线长度和分形维数的小幅平稳增长期,该时期岸线长度增加 9.79 km,分形维数增加 0.02,岸线形态变化遍布全湾;2001—2015 年是两者的大幅波动增长期,该时期岸线长度增加 28.48 km,分形维数增加 0.04,特征年分布密集,岸线形态变化遍布全湾;2015—2023 年是两者的小幅平稳增长期,该时期岸线长度增加 2.39 km,分形维数保持稳定,岸线

形态变化主要集中在外湾部分。

2.3 岸线位置变化分析

将研究时段内起止和特征年岸线叠加作为样线,线性回归速率计算结果(图 6 和图 7)表明:外湾西部平均速率为 9.75 m/a, 68.04% 的断面向海扩张;张家埠港汊平均速率为 5.73 m/a, 62.67% 的断面向海扩张;外湾北部平均速率为 129.73 m/a, 96.49% 的断面向海扩张;张濛港汊

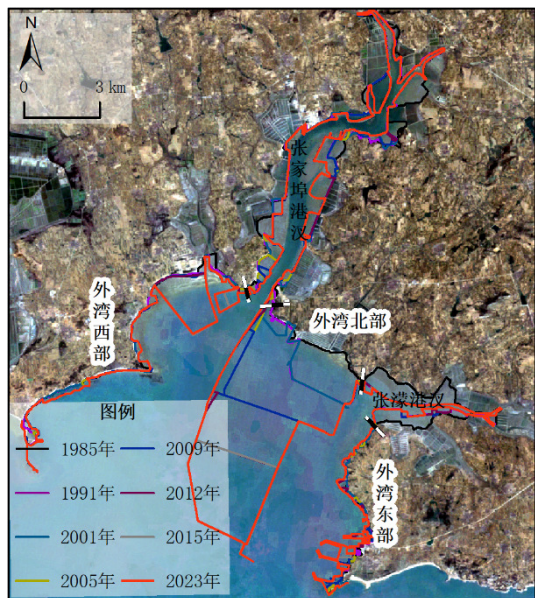


图5 1985—2023年靖海湾特征年岸线空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of characteristic years coastline in Jinghai Bay from 1985 to 2023

平均速率为 7.49 m/a, 80.40% 的断面向海扩张; 外湾东部平均速率为 4.52 m/a, 87.94% 的断面向海扩张。从整体看, 1985—2023 年靖海湾向海扩张断面占比 70.43%, 保持稳定断面占比 29.57%, 无明显向陆收缩断面, 该湾大部分岸线向海扩

张, 保持稳定的多为不再变化的人工岸线。将海湾各部分按照向海扩张速度从大到小排序, 依次为: 外湾北部、外湾西部、张濛港汊、张家埠港汊和外湾东部。

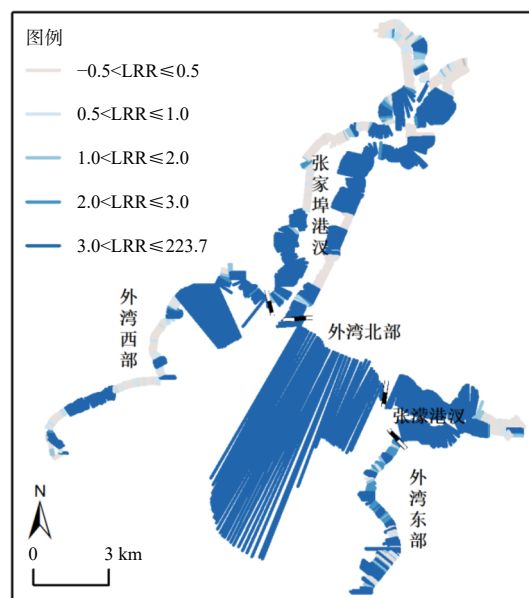


图6 1985—2023年靖海湾岸线位置变化的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of coastline location changes in Jinghai Bay from 1985 to 2023

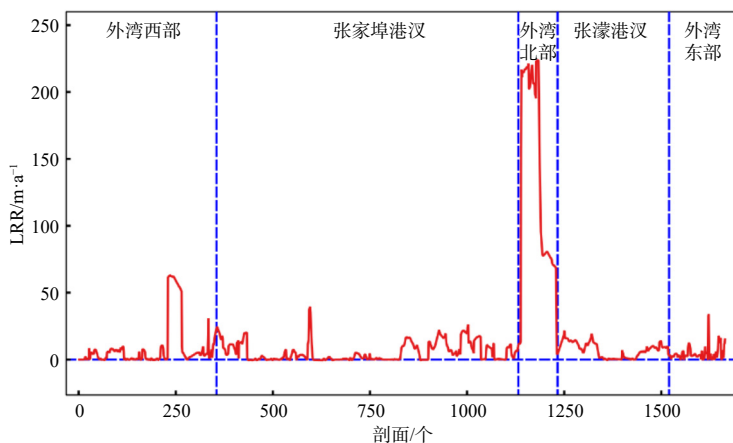


图7 1985—2023年靖海湾岸线的线性回归速率

Fig. 7 Linear regression rates of coastline in Jinghai Bay from 1985 to 2023

## 2.4 海湾和潮滩面积变化分析

1985—2023 年研究区域海湾面积出现大幅减少, 由 1985 年的 118.55 km<sup>2</sup> 到 2023 年的 69.22 km<sup>2</sup>, 共减少 49.32 km<sup>2</sup>, 减幅 41.61%。39 年来潮滩面积亦减少, 由 1985 年的 32.90 km<sup>2</sup> 到

2023 年的 21.01 km<sup>2</sup>, 共减少 11.89 km<sup>2</sup>, 减幅 36.14%。海湾面积、潮滩面积时序突变点检测 (图 8) 和叠加分析 (图 9) 结果表明, 共同特征年是 1988 年和 1991 年。1985—1988 年和 1988—1991 年海湾与潮滩面积均呈先缓慢后快速减少

的特征, 1991年后两者变化特征出现不同; 1991—2003年海湾面积先缓慢后快速减少, 2003—2012年先快后慢而后再快速减少, 2012—2016年快速减少, 2016—2023年维持稳定; 1991—

2005年潮滩面积缓慢减少, 2005—2011年先缓慢减少后快速减少, 2011—2013年快速减少, 2013—2023年维持稳定。

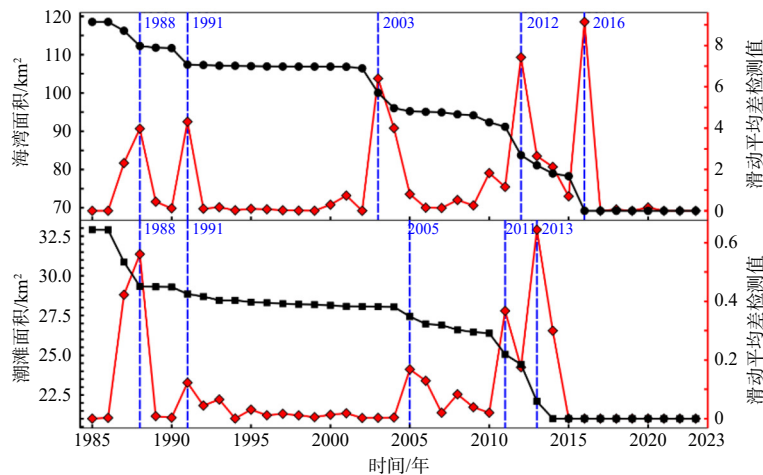


图8 1985—2023年靖海湾面积、潮滩面积及其特征年

Fig. 8 Bay area, tideland area, and their characteristic years of Jinghai Bay from 1985 to 2023

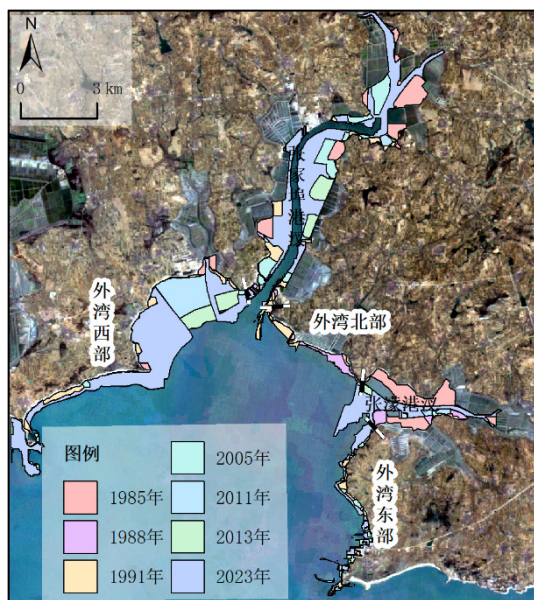


图9 1985—2023年靖海湾特征年潮滩空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of characteristic years tidal flats in Jinghai Bay from 1985 to 2023

从整体看, 1985—1991年是海湾和潮滩面积的小幅同步减少期, 该时期海湾面积减少  $11.15 \text{ km}^2$ , 潮滩面积减少  $4.05 \text{ km}^2$ , 潮滩面积减少约占海湾面积减少的 36.28%; 1991—2016年是两者的大幅异步减少期, 该时期海湾面积减

少  $38.17 \text{ km}^2$ , 潮滩面积减少  $7.84 \text{ km}^2$ , 潮滩面积减少约占海湾面积减少的 20.55%; 2016—2023年是两者的稳定期。

## 2.5 形态变化特征分析

结合本文数据与已有研究<sup>[29]</sup>, 与全国尺度对比分析, 20世纪90年代以来我国海湾开发进入活跃期, 湾内围填海活动引起岸线和潮滩形态的大幅频繁变化, 2015年后围填海管控逐渐严格, 两者形态变化均减弱。靖海湾岸线和潮滩形态演变基本符合该特征, 岸线具体表现为: 小幅平稳变化(1985—2001年), 显著频繁变化(2001—2015年), 趋于缓和(2015—2023年); 潮滩具体表现为: 大幅变化(1985—1991年), 小幅变化(1991—2005年), 大幅变化(2005—2013年), 趋于缓和(2013—2023年)。

39年来靖海湾岸线长度和分形维数大幅增长, 海湾和潮滩面积大幅缩减, 前两者变化特征高度一致, 而后两者变化特征基本一致, 但在1991年后特征年有所不同。究其原因, 与该湾近岸以围海养殖为主的用海方式直接相关, 1985—1991年养殖池建设主要集中在海湾沿岸, 新增池塘多位于潮滩上, 导致海湾和潮滩面积同时缩

减;1991年后养殖池大多建设在原有池塘基础上,新增养殖池主要位于水域中,造成海湾面积的明显缩减的同时,却对潮滩面积影响较小。

### 3 结论

(1)本文建立了基于 GEE 云平台提取岸线和潮滩的技术流程,通过构建多特征数据结合 K 均值聚类、决策树和多种后处理方法,克服了单特征阈值分割在复杂地物环境下表现不佳的问题,提高了岸线和潮滩的解译结果的可靠性。选取靖海湾作为实验对象,验证了本文提取流程的有效性与适用性,为高效准确提取海湾岸线和湾内潮滩空间信息提供了解决方案。

(2)1985—2023年靖海湾岸线长度增加 40.65 km(增幅 43.63%),分形维数增加 0.06(增幅 5.36%);大部分岸线向海扩张,无明显向陆收缩岸线,外湾北部扩张最明显(129.73 m/a),外湾西部次之(9.75 m/a);海湾和潮滩面积大幅减少,其中海湾面积缩减 49.32 km<sup>2</sup>(减幅 41.61%),潮滩面积缩减 11.89 km<sup>2</sup>(减幅 36.14%)。

(3)1985—2001年和 2015—2023年是靖海湾岸线形态的小幅平稳变化期,2001—2015年是大幅频繁变化期,其形态变化符合我国主要海湾岸线演变的普遍特征;靖海湾的海湾和潮滩面积变化趋势基本一致,但 1991年后两者特征年分布有所不同,以近岸养殖围海为主的开发方式是导致这一现象的主要原因。

### 参考文献:

- [1] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志 (第四分册)(山东半岛南部和江苏省海湾)[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- [2] YUAN Y, SONG D H, WU W, et al. The impact of anthropogenic activities on marine environment in Jiaozhou Bay, Qingdao, China: a review and a case study[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2016, 8: 287-296.
- [3] 毋 亭, 侯西勇. 海岸线变化研究综述 [J]. 生态学报, 2016, 36(4): 1170-1182.
- [4] 梁 立, 刘庆生, 刘高焕, 等. 基于遥感影像的海岸线提取方法综述 [J]. *地球信息科学学报*, 2018, 20(12): 1745-1755.
- [5] 朱 琳, 黄玉玲, 杨 刚, 等. 基于 GEE 的杭州湾海岸线遥感提取与时空演变分析 [J]. 自然资源遥感, 2023, 35(2): 50-60.
- [6] AI B, ZHANG R, ZHANG H, et al. Dynamic process and artificial mechanism of coastline change in the Pearl River Estuary[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2019, 30: 100715.
- [7] 王小丹, 方 成, 康 慧, 等. 曹妃甸地区潮间带演变的遥感监测 [J]. *海洋通报*, 2014, 33(5): 559-565.
- [8] 张春桂. MODIS 遥感数据在福建省海岸带滩涂资源监测中的应用研究 [J]. *海洋学报*, 2007, 29(4): 51-58.
- [9] 郑修诚, 周 斌, 雷 惠, 等. 基于 GEE 的杭州湾慈溪段潮滩提取及时空变化分析 [J]. 自然资源遥感, 2022, 34(1): 18-26.
- [10] ZHAO Q, YU L, LI X C, et al. Progress and trends in the application of Google Earth and Google Earth Engine[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(18): 3778.
- [11] 刘 潇, 冯秀丽, 刘 杰, 等. 山东半岛靖海湾及其附近海域悬浮泥沙分布与变化 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(6): 9-15.
- [12] 侯西勇, 毋 亭, 王远东, 等. 20 世纪 40 年代以来多时相中国大陆岸线提取方法及精度评估 [J]. *海洋科学*, 2014, 38(11): 66-73.
- [13] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数 (MNDWI) 提取水体信息的研究 [J]. *遥感学报*, 2005, 9(5): 589-595.
- [14] FEYISA G L, MEILBY H, FENSCHOLT R, et al. Automated water extraction index: a new technique for surface water mapping using Landsat imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 140: 23-35.
- [15] WANG X B, XIE S P, ZHANG X L, et al. A robust Multi-Band Water Index (MBWI) for automated extraction of surface water from Landsat 8 OLI imagery[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 68: 73-91.
- [16] TUCKER C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1979, 8(2): 127-150.
- [17] ZHA Y, GAO J, NI S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(3): 583-594.
- [18] CHEN J Y, CHENG H Q, DAI Z J, et al. Harmonious development of utilization and protection of tidal flats and wetlands—a case study in Shanghai Area[J]. *China Ocean Engineering*, 2008, 22(4): 649-662.
- [19] CHANDRASEKAR K, SETHA SAI M V R, ROY P S, et al. Land Surface Water Index (LSWI) response to rainfall and NDVI using the MODIS Vegetation Index product[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(15): 3987-4005.

(下转第 480 页)

- quality standards[EB/OL]. (2000-10-01)[2024-05-09]. <https://www.globalseafood.org/advocate/effluent-composition-and-water-quality-standards/>.
- [27] European Commission. Directive 2000/60/EC of the European parliament and of the council of 23 October 2000 establishing a framework for community action in the field of water policy[R]. Brussels: European Commission, 2000.
- [28] Council of the European Union. Directive 2006/11/EC of the European Parliament and of the Council of 15 February 2006 on pollution caused by certain dangerous substances discharged into the aquatic environment of the Community[R]. Brussels: Council of the European Union, 2006.
- [29] European Union. Waste water discharge regulations[R]. Brussels: European Union, 2020.
- [30] European Commission. Strategic guidelines for a more sustainable and competitive EU aquaculture for the period 2021 to 2030[R]. Brussels: European Commission, 2021.
- [31] 中华人民共和国生态环境部. 海水水质标准: GB 3097—1997[S]. 北京: 环境科学出版社, 2004.
- [32] 杨宇峰, 王庆, 聂湘平, 王朝晖. 海水养殖发展与渔业环境管理研究进展[J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 2012, 33(5): 531-541.
- [33] 张晓蕾. 池塘循环流水养殖水体浮游动植物和微生物分布格局及氮循环生态模型研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2021.
- [34] 郁颖. 菌藻共生-滤食性水生动物协同净化水产养殖废水的应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [35] REDFIELD A C, KETCHUM B H, RICHARDS F A. The influence of organisms on the composition of the sea water[M]// HILL M N. The Sea. New York: Interscience Publishers, 1963: 26-77.

(本文编辑: 胡莹莹)

(上接第 451 页)

- [20] LIU H Q, HUETE A. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(2): 457-465.
- [21] WANG X X, XIAO X M, ZOU Z H, et al. Tracking annual changes of coastal tidal flats in China during 1986–2016 through analyses of Landsat images with Google Earth Engine[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 238: 110987.
- [22] 陈慧欣, 陈超, 张自力, 等. 一种基于 Google Earth Engine 云平台的潮间带遥感信息提取方法[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(4): 60-67.
- [23] 张云, 张建丽, 景昕蒂, 等. 1990 年以来我国大陆海岸线变迁及分形维数研究[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(3): 406-410.
- [24] 毋亭. 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, 2015.
- [25] HIMMELSTOSS E A, HENDERSON R E, KRATZMANN M G, et al. Digital shoreline analysis system (DSAS) version 5.1 user guide[R]. US Geological Survey, 2021.
- [26] 包为民, 沈丹丹, 倪鹏, 等. 滑动平均差检测法的提出及验证[J]. 地理学报, 2018, 73(11): 2075-2085.
- [27] 刘闯, 石瑞香, 张应华, 等. 2015 年全球岛(礁)有多少? 陆地面积及海岸线长几何?: 基于 Google Earth 遥感影像的数据结果[J]. 全球变化数据学报, 2019, 3(2): 124-148.
- [28] 胡忠文, 徐月, 尹玉蒙, 等. 18°以北中国滨海滩涂湿地分布数据集 (1989—2020)[J]. 全球变化数据学报, 2022, 6(1): 125-132.
- [29] 徐鹤, 张玉新, 侯西勇, 等. 2010—2020 年中国沿海主要海湾形态变化特征[J]. 自然资源学报, 2022, 37(4): 1010-1024.

(本文编辑: 曲丽梅)