

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.03.008

基于改进机会窗口理论的盐城湿地互花米草前缘时空变化研究

罗 锋^{1,2,3},代建成¹,陈治澎¹,周光淮¹,周 曾^{1,2},张义丰^{1,3}

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏 南京 210098; 2. 南通河海大学海洋与近海工程研究院,江苏 南通 226004;
3. 海岸灾害及防护教育部重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要:为分析江苏盐城湿地珍禽国家级保护区互花米草前缘的时空变化,提出了一种基于互花米草繁殖方式和遥感反演最小无干扰时间的改进机会窗口模型,在采用相关性分析和平均绝对误差对模型精度验证的基础上,分析了互花米草前缘的演变规律及其驱动机制。结果表明:1998—2010 年,互花米草前缘全面向海推进;2010—2020 年,前缘自北向南呈现淤-蚀-淤-蚀-淤的 W 形态变化趋势;2020—2021 年,前缘北部持续侵蚀后退,中部相对稳定,南部大面积向海推进。
关键词:互花米草;机会窗口;时空变化;遥感;盐城滨海湿地
中图分类号:P748;TP79 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2023)03-0056-09

Spatial-temporal variation of *Spartina alterniflora* edge in Yancheng wetland based on improved windows of opportunity theory

LUO Feng^{1,2,3}, DAI Jiancheng¹, CHEN Zhipeng¹, ZHOU Guanghuai¹, ZHOU Zeng^{1,2}, ZHANG Yifeng^{1,3}
(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Nantong Ocean and Coastal Engineering Research Institute, Hohai University, Nantong 226004, China;
3. Key Laboratory of Coastal Disaster and Protection (Hohai University), Ministry of Education, Nanjing 210098, China)

Abstract: To analyze the spatial and temporal variation of the leading edge of *Spartina alterniflora* in Yancheng Wetland National Reserve, Jiangsu Province, an improved window of opportunity model based on *Spartina alterniflora* reproduction mode and minimum disturbance-free time of remote sensing inversion was proposed, and the evolution pattern of *Spartina alterniflora* leading edge and its driving mechanism were analyzed through the correlation analysis and mean absolute error to verify the accuracy of the model. The results showed that from 1998 to 2010, the front of *Spartina alterniflora* advanced to the sea. From 2010 to 2020, the foreedge presents a W-shape trend of siltation-erosion-siltation-erosion-siltation from north to south. In 2020 and 2021, the *Spartina alterniflora* front continued to erode and retreat in the north, remained relatively stable in the middle, and moved seaward in the south.
Key words: *Spartina alterniflora*; windows of opportunity; temporal and spatial variation; remote sensing; Yancheng coastal wetland

滨海湿地是海岸带的重要组成部分,是陆海相互作用的关键区域,盐沼作为滨海湿地的重要生态类型,具有提供初级生产力、维持生物多样性、生物固碳及保滩护岸等重要生态和安全价值^[1-2]。近年来,在滨海盐沼植被修复的相关研究和工程实践中,Balke 等^[3]提出的机会窗口(windows of opportunity, WoO)概念被用来解释盐沼植物幼苗定植扩张现象和机制,认为盐沼植被幼苗定植初期需要一段不受潮水淹没等外界干扰的“无干扰期”使幼苗扎根定植。无干扰期是幼苗定植成功的必要条件,换言之,无干扰期为幼苗定植打开了一扇机会窗口^[4-5]。Balke 等^[4]构建了考虑扰动频率的机会窗口模型,模拟了盐沼植被覆盖范围的时空变化,随后有学者通过床面切应力和临界干扰深度等进一步完善了机会窗口框架^[6-7]。长江口崇明东滩的海三

基金项目:江苏省海洋科技创新项目(JSZRHYKJ202105);南通社会民生科技计划(MS12021083, MS12022009);国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项(2020YFD0900703)
作者简介:罗锋(1979—),男,副教授,博士,主要从事河口海岸动力及物质运输研究。E-mail:fluo@hhu.edu.cn
通信作者:代建成(1998—),男,硕士研究生,主要从事河口海岸动力及演变研究。E-mail:1227886617@qq.com
引用本文:罗锋,代建成,陈治澎,等. 基于改进机会窗口理论的盐城湿地互花米草前缘时空变化研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):56-64.
LUO Feng, DAI Jiancheng, CHEN Zhipeng, et al. Spatial-temporal variation of *Spartina alterniflora* edge in Yancheng wetland based on improved windows of opportunity theory[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(3): 56-64.

梭蓼草修复试验验证了其在生态修复中的重要性,基于机会窗口选择在高程为 2.2 ~ 2.8 m 的潮滩上进行种子播种试验,结果表明修复区域植株密度达到 478 ~ 611 株/m²,远高于基于球茎移栽的 73 ~ 216 株/m²。同时由于减少了移栽等人工成本且种子仅需 300 元/kg,修复成本降低至 1 ~ 1.5 元/m²,低于基于球茎或植株斑块移栽修复方法的 5 ~ 7 元/m²^[8-10]。

机会窗口模型的关键在于确定植被幼苗定植所需无干扰期的最短时间,即最小无干扰时间,有学者通过水槽试验和现场观测等方法确定了盐角草、海紫菀和红树林等植被幼苗定植所需的最小无干扰时间^[11-13]。水槽试验研究机理性问题更加直观,但最小无干扰时间影响因素复杂,包括生物种类、非生物因素(如淹没时间、潮流波浪、生长环境等)^[6-7],因此水槽试验做实际潮滩原型研究有局限。现场观测优势在于其结果的精确性,但现场投入较大,无法范围应用。因此,提出一种高效的反演最小无干扰时间的研究方法至关重要。遥感影像具有覆盖范围广、信息丰富、处理方式高效简单等特点^[14-15],因此本文基于高精度遥感影像,提出了一种反演盐沼植被幼苗定植所需最小无干扰时间的新方法,可以弥补水槽试验和现场观测的不足。

本文以盐城自然保护区为研究区域,针对其潮滩典型分布的盐沼类型互花米草,提出了一种基于互花米草繁殖方式和遥感反演最小无干扰时间的改进机会窗口模型,分析互花米草前缘的时空变化。以遥感解译数据为基础,通过相关系数和平均绝对误差探讨改进机会窗口模型在江苏潮滩运用的精度,以期能为后期盐城自然保护区互花米草管控以及其他类型盐沼生态修复工程的实施提供一种新途径。

1 研究区概况

江苏盐城湿地珍禽国家级保护区核心区位于江苏海岸中部(32°20' ~ 34°37'N, 119°29' ~ 121°16'E),主要保护丹顶鹤等珍稀野生动物及其赖以生存的滩涂湿地生态系统,是拉姆萨尔公约中的重要湿地之一,于 2019 年被列为世界自然遗产。研究区域盐沼湿地宽约 6 ~ 9 km,且具有明显的盐沼植被分带性(图 1),由陆向海依次为芦苇、盐蒿、互花米草和光滩。其中,互花米草是一种多年生米草属草本植物,具有发达的根系和抗冲促淤能力,是其原生地滨海盐沼生态系统的优势物种^[16]。1979 年被引入我国并率先在福建省罗源湾试种成功^[17],1983 年在江苏沿海各市县均试栽成功^[18]。保护区是典型的淤泥质潮滩湿地,受互花米草扩张影响严重,1993 年之前尚未形成大面积的群落,无法在影像上观测到;1993—1996 年处于逐渐加快扩展阶段,年平均扩展率为 30%;1996—1999 年处于快速扩展阶段,年平均扩展率为 43%;1999 年之后年扩展率约为 10%^[19]。2006 年保护区互花米草面积达到 33.81 km²,近些年扩展率进一步减小到不足 4%,至 2015 年面积达到 45.95 km²^[20]。

2 研究数据和方法

改进的机会窗口模型计算流程主要分为 4 个步骤:①选取 1998—2021 年的 24 幅 Landsat 遥感影像,通过目视解译分析互花米草前缘的时空变化趋势。同时考虑到 2002 年前未形成完整的互花米草前缘线,且 2020 年后前缘线变化不大,所以选择 2002—2010 年和 2010—2020 年作为研究时间段;②选取 2020—2021 年的 4 幅 Sentinel-2 遥感影像,以研究区域南部(图 1)为研究对象,用水边线法构建潮滩的数字高程模型(digital elevation model,DEM),通过基于支持向量机的监督分类方法确定研究区域南部互花米草定植范围,反演互花米草在前缘光滩上定植所需的最小无干扰时间;③以最小无干扰时间和 TPX09.0 预报潮位数据为输入,通过改进的机会窗口模型模拟 2002—2010 年和 2010—2020 年 2 个时间段前缘线的变化趋势;④通过相关系数 r 和平均绝对误差(MAE)评估改进机会窗口模型的精度。

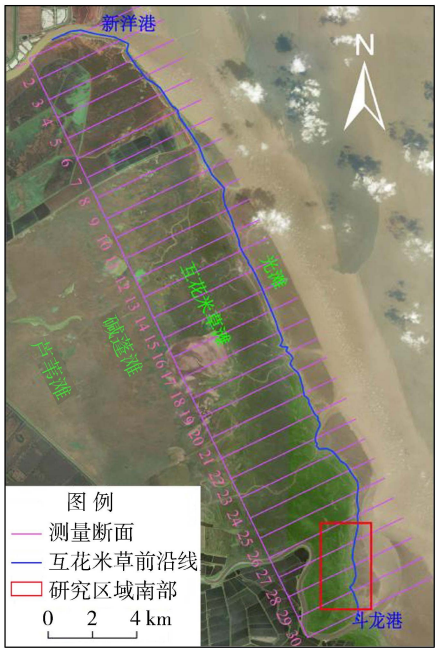


图 1 江苏盐城湿地珍禽国家级保护区核心区的盐沼植被分布及测量断面

Fig. 1 Location, distribution and measurement section of salt marsh vegetation in Yancheng National Rare Birds Nature Reserve, Jiangsu Province

2.1 基础数据及处理

2.1.1 遥感影像数据

为了研究 1998—2021 年互花米草前缘时空变化,选取了 24 幅 Landsat 遥感影像,包括 Landsat4-5 TM、Landsat7 ETM 和 Landsat8 OLI 图像(分辨率 30 m),遥感影像下载自地理空间数据云(www.gscloud.cn),考虑到互花米草最佳监测时间为生长季末期,选择的遥感影像日期均为 9—12 月。利用 ENVI5.3 对 Landsat 遥感影像进行研究区域裁剪、辐射定标和大气校正,并进行 RGB 假色彩波段组合,以突出植被的光谱特征。由于互花米草的地物特征比较明显,与光滩的差别大,因此将合成的影像导入 ArcMap10.8 软件,通过常规的目视解译方法对前缘进行提取。同时,在研究区设置 30 条垂直于岸线的等间距观测断面用于测量断面上相邻年份的盐沼前缘变化距离和速率。选取 2020—2021 年的 4 幅 Sentinel-2 遥感影像(分辨率为 10 m,下载自欧洲空间局官网(<https://scihub.copernicus.eu/>)),反演互花米草定植所需的最小无干扰时间。选取 2007 年的 2 幅 Landsat7 和 2020 年的 1 幅 Landsat8、1 幅 Sentinel-2 遥感影像,研究改进的机会窗口模型模拟前缘时空变化的精度。

2.1.2 潮位预报方法及精度评估

历史潮位采用潮位数据模型 TPX09.0 提供的 M2、S2、N2、K2、K1、O1、P1、Q1、MF、MM、M4、MS4 和 MN4 分潮的调和常数进行潮位预报,并且基于 MATLAB 的潮位提取工具 TidalModelDriver(TMD)生成给定点的潮位时间序列数据。考虑到潮汐在近岸浅水区域会变形,基于新洋港水文站实测潮位数据,对潮位数据模型 TPX09.0 在近岸区域预报潮位的可靠性和稳定性进行误差评估。实测潮位数据来源于江苏省水文局在 2006 年 12 月 21 日、26 日和 31 日对新洋港大潮、中潮、小潮的潮汐运动进行的监测,测验断面位置设在新洋港下游离海口 2~3 km 处,使用 ADCP 测流,全潮期平均 2 h 监测 1 次,遇涨、落急则 1 h 监测 1 次,节点位置增加测次。每闸共测 12 个潮次,白天和夜间潮形各半^[21]。

由图 2 可知,大、中、小潮潮位的模拟潮位与实测值总体吻合良好,仅部分时段有所偏差,比如中潮平均绝对误差最大,达到 0.23 m。模拟值与实测值在振幅上比较吻合,仅在相位上有一定偏差,表现为模拟值涨潮和落潮出现滞后且涨潮历时较长落潮历时较短。这是因为河口水域比外海浅,潮差比外海大,使得潮波波形发生变化,导致涨潮历时缩短落潮历时延长。除此之外,大潮和小潮模拟值的平均绝对误差均较小,分别为 0.14 m 和 0.08 m,并且在振幅和相位上都比较吻合。由图 2(d)的相关性曲线可知,模拟值和实测值的相关系数达 0.98,决定系数 R^2 为 0.96,平均绝对误差为 0.15 m。总体而言,TPX09.0 潮位模型的精度较高,并且能较好预报近岸浅水区域的潮位。

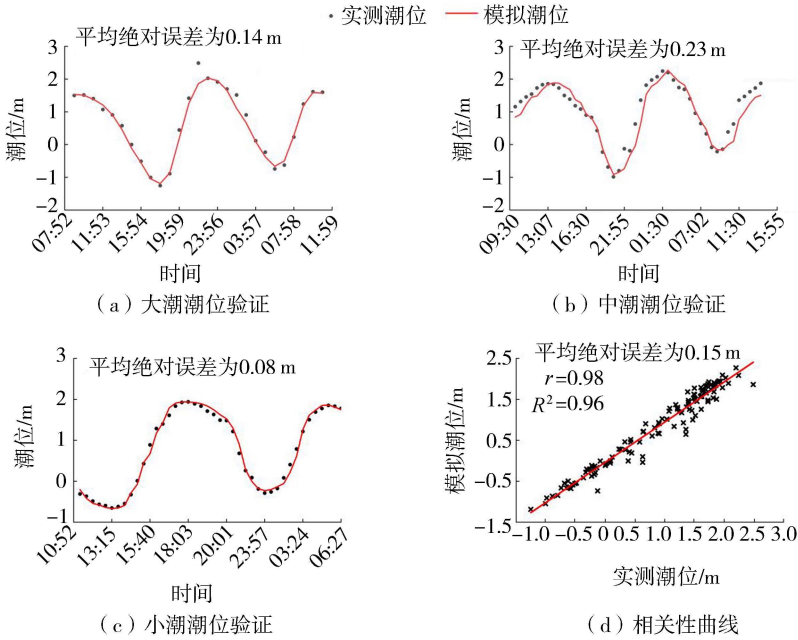


图 2 预报潮位误差验证

Fig. 2 Error verification diagram for forecasted tide level

2.2 水边线法构建 DEM

遥感水边线是卫星过境时获取的瞬时水边线^[22],准确提取水边线是潮滩 DEM 构建的关键。利用遥感影像提取水边线,关键在于水陆分类,目前常用的方法主要有边缘检测算子法、阈值分割法、区域生长法、主动轮廓模型法、面向对象分类法等^[23]。其中,改进归一化差异水体指数(modified normalized difference water index,MNDWI)是在归一化差异水体指数(normalized difference water index,NDWI)的基础上改进的水体指数,提取的水边线位置偏移最小,效果也最理想^[24]。采用基于 MNDWI 指数的阈值分割法辅以大津法(OTSU)进行水体提取,选择 Landsat 影像和 Sentinel-2 影像的绿光波段和短波红外波段 2 个波段,构建灰度影像,增强影像中的水体信息^[24]。

采用边缘检测算子法从灰度影像中提取水边线,通过中值滤波和低通滤波处理 MNDWI 灰度影像,在保留大于卷积核边缘的同时平滑图像,消除高频噪声。通过 OTSU 算法计算阈值,对 MNDWI 灰度影像进行二值化,该方法又称作最大类间方差法,是一种按图像灰度特性确定图像二值化分割阈值的算法,具有计算简单快速,不受图像亮度和对比度影响等优点^[25]。通过数学形态学滤波,对二值图做开运算处理和闭运算处理,去除潮滩上的潮沟和小区域水体,得到水边线提取结果。利用研究区域的 TPX09.0 预报潮位数据对获取的水边线赋以高程,从而由不同的水边线产生一系列等高线,在 ArcGIS 中运用分析模块中 TIN 插值功能构建研究区潮滩的数字高程模型 DEM。值得注意的是,本文通过边缘检测算子法从灰度影像中自动提取水边线,使得精度受限于 Landsat 遥感影像分辨率,所以构建的 DEM 精度为 30 m。

2.3 改进机会窗口模型

互花米草主要通过有性和无性 2 种繁殖方式在沿海湿地扩张,但是 Balke 等^[4]的研究仅考虑了互花米草的有性繁殖,低估了其扩张速度。因此,本研究在机会窗口模型的基础上考虑了无性繁殖,并且使用 R 语言构建一套改进的机会窗口模型,期望能完善模型对互花米草繁殖方式的刻画。

改进的机会窗口模型原理如图 3 所示。首先,互花米草通过实生苗的传播(有性繁殖)在前缘光滩上定植,本文以最小无干扰时间和每年 4 月 1 日至 10 月 1 日的 TPX09.0 预报潮位数据为输入,通过机会窗口模型模拟出适合实生苗定植的范围,即其前缘通过有性繁殖在光滩上扩张的距离 X_1 。然后,互花米草会通过快速分蘖和根状茎生长(无性繁殖)形成斑块,扩张速度约为 25 m/a^[26],据此算出其前缘通过无性繁殖在光滩上扩张的距离 X_2 (式(1))。最后,得到互花米草前缘扩张总距离 $X=X_1+X_2$,通过相关系数和平均绝对误差对模型预测结果的准确性进行定量评估。因为 2002 年前研究区域未形成完整的互花米草前缘线,并且 2020 年后前缘线变化不大,所以选择 2002—2010 年和 2010—2020 年 2 个时间段的前缘时空变化评估模型性能。

$$X_2 = 25(T_3 - T_2)$$

(1)

式中: T_2 为实生苗传播在前缘光滩上定植的最远距离出现的年份; T_3 为扩张结束年份。

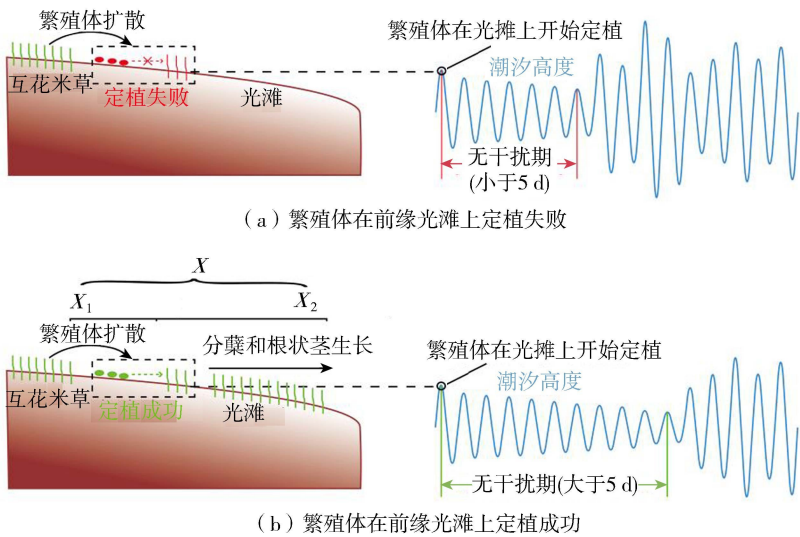


图 3 改进的机会窗口模型原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of improved windows of opportunity model

2.4 最小无干扰时间确定

为了确定定植需要的最小无干扰时间,提出一种基于遥感反演的新方法。以 2020—2021 年研究区域南部的互花米草为研究对象,基于支持向量机的监督分类确定互花米草定植范围。假设定植所需的最小无干扰时间为 3 d、4 d、5 d、6 d,通过 2021 年 4—10 月水位数据和改进的机会窗口模型计算对应高程,分别记为 h_3 、 h_4 、 h_5 、 h_6 ,根据 DEM 得到对应等高线,确定最小无干扰时间。

3 结果与分析

3.1 通过遥感影像观测互花米草前缘时空变化

保护区互花米草前缘时空变化可分为 3 个阶段,每个阶段变化距离见图 4,变化速率见图 5。1998—2010 年,由于丰富的沉积物来源^[27]和互花米草的保滩促淤功能^[28],研究区域互花米草全面向海推进,与其他学者遥感观测的现象一致^[29]。通过量测,平均推进距离为 561 m,平均推进速率为 47 m/a,其中 19 号断面推进距离最大,向海推进距离为 1 259 m,推进速率为 105 m/a,而 12 号和 13 号断面推进距离最小,向海推进距离分别为 72 m 和 65 m,推进速率为 6 m/a 和 5 m/a。2010—2020 年,前缘出现侵蚀现象,其中 3 号断面侵蚀最严重,侵退距离为 405 m,侵退速率为 41 m/a,可能与射阳河口双导堤的建设导致下游沉积物来源减少有关^[30]。总体来说,前缘自北向南基本呈现淤-蚀-淤-蚀-淤的 W 形变化趋势,1 号、28 号、29 号和 30 号断面仍处于向海扩张状态,可能是受到新洋港和斗龙港入海泥沙河口淤积的影响。2020—2021 年,研究区域北部继续侵蚀后退,平均侵退距离为 84 m,核心区中部盐沼前缘的位置相对稳定,研究区域南部盐沼大面积向海推进,平均推进距离可达 319 m。

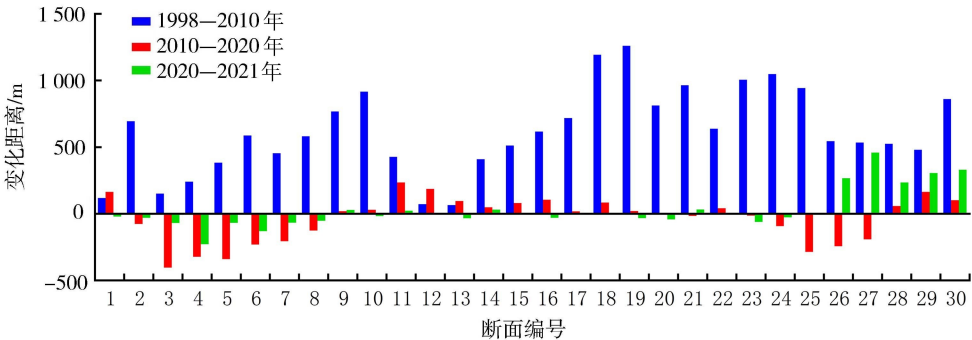


图 4 互花米草前沿线的变化距离

Fig. 4 Variation distance along the front of *Spartina alterniflora*

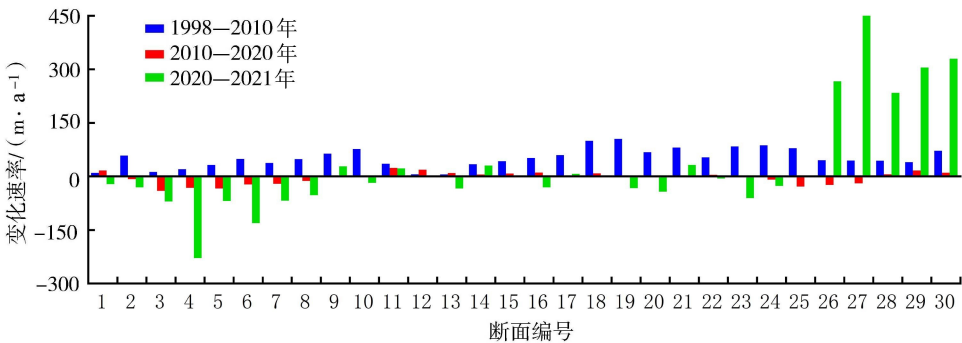


图 5 互花米草前沿线的变化速率

Fig. 5 Change rate along the front of *Spartina alterniflora*

3.2 互花米草定植所需的最小无干扰时间

通过水边线法构建的潮滩 DEM(图 6(a))和改进的机会窗口模型,确定了最小无干扰时间为 3 d、4 d、5 d、6 d 对应的最低高程 h_3 、 h_4 、 h_5 、 h_6 分别为 0.74 m、0.91 m、0.93 m、1.05 m(图 6(b))。由图 6(b)可知互花米草定植区域高程均大于 0.93 m,可以认为互花米草定植所需的最小无干扰时间为 5 d。类似无干扰时间的确定,许多学者通过水槽试验和现场监测等方法得到盐草最小无干扰时间为 2~3 d^[11],海紫菀最小无干扰时间为 5 d^[12],红树林最小无干扰时间为 5 d^[13]。

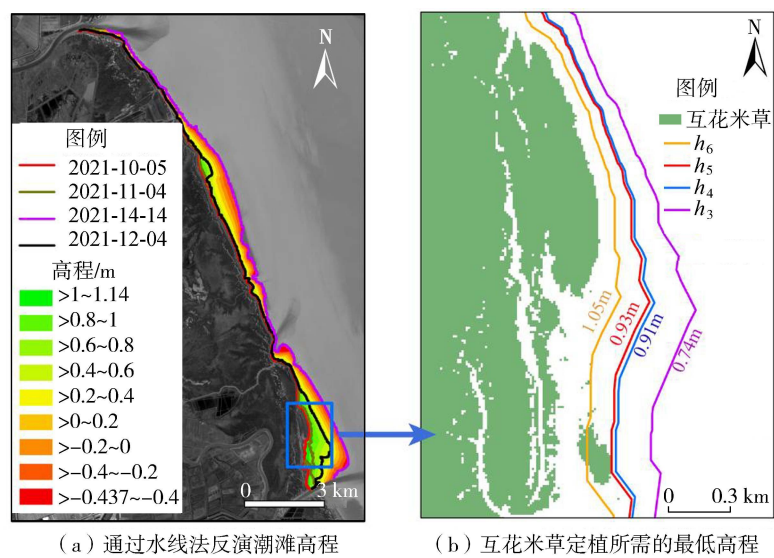


图 6 水边线法反演的潮滩高程及互花米草定植所需的最低高程

Fig. 6 Inversed elevation of tidal flat by water edge method and minimum elevation required for *Spartina alterniflora*

3.3 通过改进的机会窗口模型模拟互花米草前缘时空变化

2002—2010 年和 2010—2020 年 2 个时间段满足互花米草定植所需的最低高程分别为 0.930 1 m 和 0.947 0 m,出现的时间分别为 2007 年 5 月 25 日和 2020 年 6 月 14 日。因此,在 2007 年和 2020 年各选择 2 幅遥感影像通过 ArcGIS 中的 TIN 插值功能得出模拟的前缘线(图 7),从而模拟 2 个时间段内前缘的变化趋势。

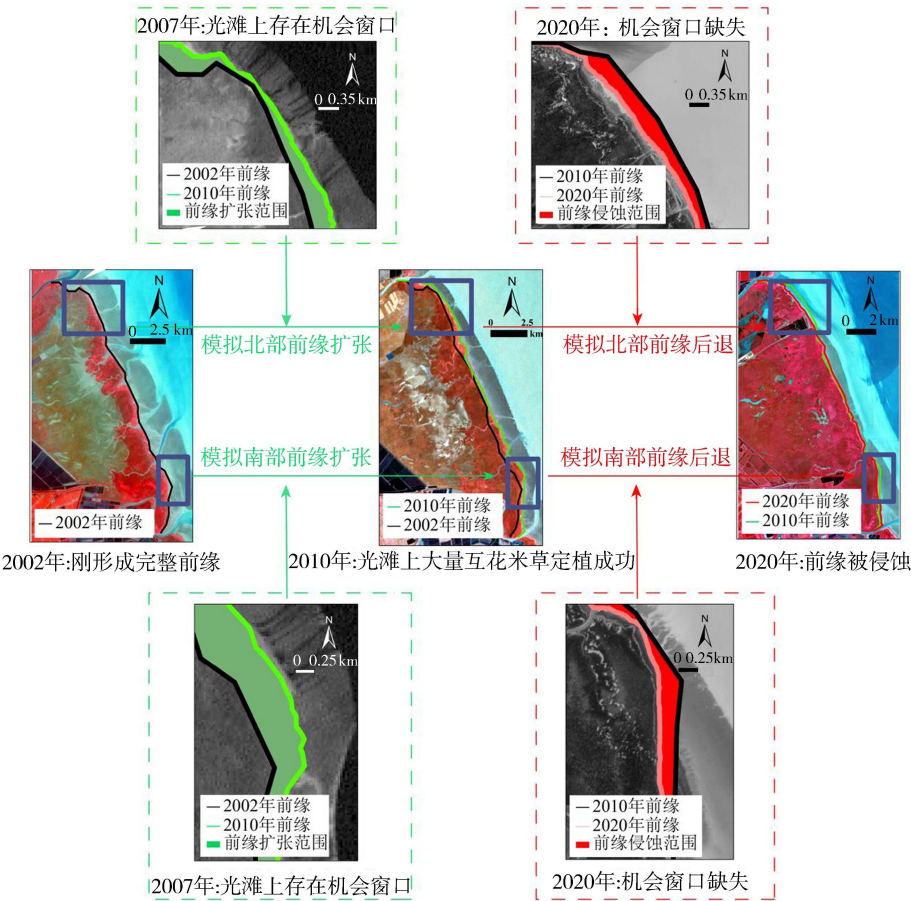


图 7 通过改进的机会窗口模型模拟互花米草前缘时空变化

Fig. 7 Spatial-temporal variation of *Spartina alterniflora* front modelled by improved windows of opportunity model

由图 7 可知,2007 年研究区域互花米草前缘的光滩上存在大量的机会窗口,2020 年前缘光滩上机会窗

口缺失,因此 2002—2010 年研究区域互花米草将大面积向海扩张推进,2010—2020 年前缘将后退。上述定性分析结果与第 3.1 节中通过遥感影像观测的前缘时空变化的结果一致。

3.4 改进的机会窗口模型精度评估和相关性分析

对于研究区域互花米草前缘时空变化的第一阶段(2002—2010 年),互花米草通过实生苗传播在前缘光滩上定植的最远距离出现在 2007 年,之后 3 a 时间里通过无性繁殖扩张距离为 75 m。采用 Balke 等^[4]的机会窗口模型模拟值的平均绝对误差为 66.67 m(图 8),而本文改进的机会窗口模型的平均绝对误差为 28.83 m,降低了 37.84 m,显著减小了误差并提高了机会窗口模型的精度。需要说明的是,平均绝对误差小于 Landsat 影像的一个像素格尺寸(分辨率均为 30 m),是因为本文通过目视解译得到观测的互花米草前缘线。

用遥感影像的观测值,对改进的机会窗口模型的模拟值进行相关性分析,模拟值与观测值的相关系数具有统计学意义($p<0.05$),相关系数均达到 0.99,平均绝对误差分别为 28.83 m 和 17.00 m,总体上的平均绝对误差为 22.92 m,小于 Landsat 影像的一个像素格尺寸(分辨率均为 30 m)。综上,改进后的机会窗口模型有效减少了平均绝对误差,是一种可行的研究互花米草前缘时空变化的方法。

3.5 互花米草入侵的管控建议

近年来,互花米草的治理工作已在我国各地开展,但由于其强大的生长繁殖能力及治理措施的局限性,加大了入侵风险评估和管控的难度。互花米草入侵初期主要依赖种子和实生苗的扩散和定植,定植成功后的零星互花米草能以无性繁殖的方式充分占领光滩,从而实现入侵。实生苗定植的成功率主要取决于潮滩高程和潮侵频率^[7],这意味着考虑高程、潮侵频率并且量化实生苗定植能力对于控制互花米草扩散和评估入侵风险有重要意义。

本文改进的机会窗口模型主要考虑了高程、潮侵频率和最小无干扰时间,并成功模拟了互花米草前缘时空演变。在互花米草前缘光滩上,高程较高、潮侵频率较低的地点有利于互花米草扩张。此外,最小无干扰时间也直接决定了实生苗在潮滩上的定植能力,从而影响互花米草通过有性繁殖扩张的距离。总体而言,高程越高、潮侵频率越低且最小无干扰时间越长的区域应被视为互花米草管控的重点区域,需加强观测、管控与风险评估,以防互花米草肆意蔓延。因此,可通过本文的方法反演最小无干扰时间并且模拟互花米草前缘线时空变化,从而为互花米草管控以及入侵风险评估提供参考。

4 结 论

- a. 通过对江苏盐城湿地珍禽国家级保护区互花米草前缘的时空变化进行观测,前缘时空变化分为 3 个阶段:第一阶段(1998—2010 年),互花米草全面向海推进,平均推进速率为 47 m/a;第二阶段(2010—2020 年),研究区域北部和南部出现侵蚀现象,前缘自北向南呈现淤-蚀-淤-蚀-淤的 W 形变化趋势;第三阶段(2020—2021 年),研究区域北部继续侵蚀后退,核心区中部盐沼前缘的位置相对稳定,研究区域南部盐沼大面积向海推进,平均推进距离可达 319 m。
- b. 互花米草定植所需的最小无干扰时间是运用改进的机会窗口模型模拟前缘时空变化的关键,本文通过水边线法构建潮滩数字高程模型 DEM,结合 2020—2021 年研究区域南部的互花米草定植范围,反演其定植所需的最小无干扰时间为 5 d。
- c. 本文针对互花米草有性繁殖和无性繁殖结合的繁殖方式,提出了一种改进的机会窗口模型,模拟 2002—2010 年和 2010—2020 年 2 个时间段前缘的时空变化,并且通过相关系数和平均绝对误差对改进机会窗口模型预测结果的准确性进行定量评估。结果显示,改进后的机会窗口模型对 2002—2010 年前缘扩张的

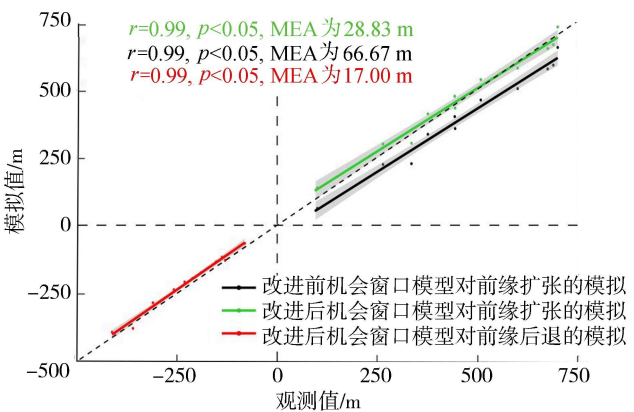


图 8 改进前和改进后机会的窗口模型模拟值与观测值之间的平均绝对误差和相关性分析

Fig. 8 Mean absolute error and correlation analysis between simulated and observed values of window model before and after opportunities improvement

模拟值的平均绝对误差为 28.83 m,比改进前降低了 37.84 m。对 2010—2020 年前缘后退模拟值的平均绝对误差为 17.00 m,总体上的平均绝对误差为 22.92 m,小于一个像素格的尺寸。改进的机会窗口模型显著提高了模拟精度,是一种可行的研究互花米草前缘时空变化的方法。

参考文献:

[1] 唐洪根,周廷璋,辛沛. 淤积刺激下滨海湿地植物根系吸水及土壤水分变化[J]. 水资源保护,2020,36(4):87-92. (TANG Honggen, ZHOU Tingzhang, XIN Pei. Stimulation of sediment deposition to root water uptake and soil water change in wetland near sea[J]. Water Resources Protection,2020,36(4):87-92. (in Chinese))

[2] 应征涛,詹沛成,唐洪根,等. 螃蟹扰动作用对滨海湿地水盐交换的影响[J]. 水资源保护,2021,37(3):152-157. (YING Zhengtao, ZHAN Lucheng, TANG Honggen, et al. Effects of crab disturbance on water and salt exchange in coastal wetlands [J]. Water Resources Protection,2021,37(3):152-157. (in Chinese))

[3] BALKE T,BOUMA T J,HORSTMAN E M,et al. Windows of opportunity: thresholds to mangrove seedling establishment on tidal flats[J]. Marine Ecology Progress Series,2011,440:1-9.

[4] BALKE T,HERMAN P M J,BOUMA T J. Critical transitions in disturbance-driven ecosystems:identifying windows of opportunity for recovery[J]. Journal of Ecology,2014,102(3):700-708.

[5] CAO H,ZHU Z,BALKE T,et al. Effects of sediment disturbance regimes on *Spartina* seedling establishment:Implications for salt marsh creation and restoration[J]. Limnology and Oceanography,2018,63(2):647-659.

[6] HU Z J,GE Z M,MA Q,et al. Revegetation of a native species in a newly formed tidal marsh under varying hydrological conditions and planting densities in the Yangtze Estuary[J]. Ecological Engineering,2015,83:354-363.

[7] POPPEMA D W,WILLEMSSEN P W J M, DE VRIES M B,et al. Experiment-supported modelling of salt marsh establishment [J]. Ocean & Coastal Management,2019,168:238-250.

[8] YUAN L, CHEN Y H, WANG H, et al. Windows of opportunity for salt marsh establishment: the importance for salt marsh restoration in the Yangtze Estuary[J]. Ecosphere,2020, 11(7): e03180.

[9] 陈雅慧. 长江口海三棱藨草种群的生态修复研究[D]. 上海:华东师范大学,2020.

[10] HU Z J, GE Z M, MA Q,et al. Revegetation of a native species in a newly formed tidal marsh under varying hydrological conditions and planting densities in the Yangtze Estuary[J]. Ecological Engineering, 2015, 83: 354-363.

[11] WIEHE P O. A quantitative study of the influence of tide upon populations of *Salicornia europaea*[J]. Ecological Applications, 1935,23(2):323-333.

[12] BOORMAN L A, HAZELDEN J, BOORMAN M. The effect of rates of sedimentation and tidal submersion regimes on the growth of salt marsh plants[J]. Continental Shelf Research,2001,21(18/19):2155-2165.

[13] RABINOWITZ D. Dispersal properties of mangrove propagules[J]. Biotropica,1978,10:47-57.

[14] 潘鑫,杨子,杨英宝,等. 基于高分六号卫星遥感影像的太湖叶绿素 a 质量浓度反演[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021,49(1):50-56. (PAN Xin, YANG Zi, YANG Yingbao, et al. Mass concentration inversion analysis of chlorophyll a in Taihu Lake based on GF-6 satellite data [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49 (1) : 50-56. (in Chinese))

[15] 陈嘉琪,陈仕琦,马芬艳,等. 基于数字遥感影像的呼伦湖水量平衡分析[J]. 水资源保护,2020,36(6):73-79. (CHEN Jiaqi, CHEN Shiqi, MA Fenyan, et al. Analysis of water balance of Hulun Lake based on digital remote sensing images[J]. Water Resources Protection,2020,36(6):73-79. (in Chinese))

[16] XIA L,YANG W,GENG Q, et al. Research on *Spartina alterniflora* using molecular biological techniques:an overview[J]. Marine and Freshwater Research,2020,71(12):1564-1571.

[17] 徐国万,卓荣宗. 我国引种互花米草的初步研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1985, 40(2): 212-225. (XU Guowan, ZHUO Rongzong. A preliminary study on introducing *Spartina alterniflora* in China[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science),1985, 40(2): 212-225. (in Chinese))

[18] 仲崇信,卓荣宗. 大米草在我国的二十二年[J]. 南京大学学报(自然科学版),1985,40(2):31-35. (ZHONG Chongxin, ZHUO Rongzong. *Spartina anglica* in the 22 years of China[J]. Journal of Nanjing University(Natural Science), 1985, 40 (2) : 31-35. (in Chinese))

[19] 张忍顺,沈永明,陆丽云,等. 江苏沿海互花米草(*Spartina alterniflora*)盐沼的形成过程[J]. 海洋与湖沼,2005,36(4):358-366. (ZHANG Renshun, SHEN Yongming, LU Liyun, et al. The formation process of *Spartina alteruiflora* salt marsh along the coast of Jiangsu[J]. Ocean and Limnology,2005,36(4):358-366. (in Chinese))

[20] 王娟. 盐城淤泥质滩涂湿地互花米草入侵对丹顶鹤越冬生境质量影响研究[D]. 南京:南京师范大学,2020.

[21] 马小雪,杨军,曾春芬,等. 江苏沿海四港感潮河段非汛期水沙运动特点初探[J]. 人民长江,2014,45(19):9-12. (MA Xiaoxue, YANG Jun, ZENG Chunfen, et al. Characteristics of water and sediment movement in non-flood season in tidal reach of four ports in coastal Jiangsu Province[J]. Yangtze River,2014,45(19):9-12. (in Chinese))

[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 Mingxiang, WANG Jun. 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. (in Chinese))

[23] 张珂,吴南,徐国鑫,等. GF-1 遥感影像结合等高线消除云层干扰的连续水体重建法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021,49(4):295-302. (ZHANG Ke, WU Nan, XU Guoxin, et al. An extraction method for continuous water body through cloud interference removal using GF-1 remote sensing and DEM[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(4):295-302. (in Chinese))

[24] 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. (XU Hanchu. A study on Information extraction of water body with the modified normalized difference water index(MNDWI)[J]. Journal of Remote Sensing,2005,9(5):589-595. (in Chinese))

[25] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979,9(1):62-66.

[26] 肖德荣. 长江河口盐沼湿地外来物种互花米草扩散方式与机理研究[D]. 上海:华东师范大学,2010.

[27] 于谦,王韞玮,高抒. 潮汐与陆架环流作用下的悬沙输运:江苏新洋港海岸冬季观测结果[J]. 南京大学学报(自然科学), 2014,50(5):626-635. (YU Qian, WANG Yunwei, GAO Shu. Suspended sediment transport under the action of tidal and shelf circulation: winter observation of Xinyang Port coast, Jiangsu Province[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2014,50(5):626-635. (in Chinese))

[28] 陈才俊. 大米草对江苏省淤泥质海滩环境的影响[J]. 海洋与海岸带开发,1988(3):7-10. (CHEN Caijun. Effects of *Spartina anglica* on the environment of silt beach in Jiangsu Province[J]. Marine and Coastal Zone Development,1988(3):7-10. (in Chinese))

[29] 赵秧秧. 江苏中部海岸盐沼前缘的地貌动力过程[D]. 南京:南京大学,2015.

[30] 陈可锋,王乃瑞,徐俊辉,等. 射阳港拦门沙航道整治工程建设前后水沙特征分析[J]. 海洋工程,2018,36(4):129-137. (CHEN Kefeng, WANG Nairui, XU Junhui, et al. Analysis of water and sediment characteristics before and after construction of ganmensha channel regulation project in sheyang port[J]. Ocean Engineering,2018,36(4):129-137. (in Chinese))

(收稿日期:2022-06-10 编辑:刘晓艳)

(上接第 30 页)

[20] KARLSSON M,YAKOWITZ S. Nearest-neighbor methods for Nonparametric rainfall-runoff forecasting[J]. Water Resources Research,1987(7):1300-1308.

[21] 刘开磊,李致家,姚成,等. 基于 k-最近邻筛选的 BMA 集合预报模型研究[J]. 水利学报,2017,48(4):390-397. (LIU Kailei,LI Zhijia,YAO Cheng,et al. Study on the Bayesian model averaging coupling with the k-nearest neighbor selection[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2017,48(4):390-397. (in Chinese))

[22] 刘开磊,李致家,姚成,等. 水文学与水力学方法在淮河中游的应用研究[J]. 水力发电学报,2013,32(6):5-10. (LIU Kailei,LI Zhijia,YAO Cheng,et al. Study on hydrology and hydraulic methods applied to the middle Huai River Basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2013,32(6):5-10. (in Chinese))

[23] 黄一昕,王钦钊,梁忠民,等. 洪水预报实时校正技术研究进展[J]. 南水北调与水利科技,2021,19(1):12-35. (HUANG Yixin,WANG Qinzhaoh,LIANG Zhongmin,et al. Research advances on real-time correction methods for flood forecasting[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2021,19(1):12-35. (in Chinese))

[24] 王建群,张显扬,卢志华. 秦淮河流域数字水文模型及其应用[J]. 水利学报,2004,35(4):42-47. (WANG Jianqun,ZHANG Xianyang,LU Zhihua. Digital hydrological model of Qinhuai River Basin and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2004,35(4):42-47. (in Chinese))

[25] 李致家,姚成,章玉霞,等. 栅格型新安江模型的研究[J]. 水力发电学报,2009,28(2):25-34. (LI Zhijia,YAO Cheng,ZHANG Yuxia,et al. Study on grid-based Xin'anjiang model[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2009,28(2):25-34. (in Chinese))

[26] 徐杰,李致家,霍文博,等. 半湿润流域洪水预报实时校正方法比较[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(4):317-322. (XU Jie, LI Zhijia, HUO Wenbo, et al. Comparison of real-time correction methods of flood forecasting in semi-humid watershed[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2019,47(4):317-322. (in Chinese))

(收稿日期:2022-06-21 编辑:胡新宇)