

DOI: 10.20103/j.stxb.202311022384

程林, 刘西汉, 高翔, 高玥, 肖登攀. 渤海湾滨海湿地互花米草分布与扩散特征. 生态学报, 2024, 44(18): 8247-8257.

Cheng L, Liu X H, Gao X, Gao Y, Xiao D P. Distribution and diffusion characteristics of *Spartina Alterniflora* in the coastal wetlands of the Bohai Bay. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(18): 8247-8257.

渤海湾滨海湿地互花米草分布与扩散特征

程 林^{1,2,3,4}, 刘西汉^{3,4}, 高 翔^{3,4}, 高 玥³, 肖登攀^{1,2,*}

1 河北师范大学地理科学学院, 石家庄 050024

2 河北省环境演变与生态建设重点实验室, 石家庄 050024

3 河北省科学院地理科学研究所, 石家庄 050011

4 河北省地理信息开发应用技术创新中心, 石家庄 050011

摘要: 渤海湾是中国互花米草分布与扩散的最北部区域。为全面了解渤海湾互花米草扩散状况, 基于近 20 年 10m 分辨率多源遥感数据、随机森林分类模型及 Google Earth Engine(GEE) 遥感云平台, 对渤海湾互花米草进行遥感分类识别, 基于识别结果对渤海湾互花米草扩散的时空特征、扩散模式、扩散影响因素及扩散的生态环境响应进行探讨, 以为渤海湾互花米草治理及滨海湿地科学管理提供数据支撑。结果显示, 近 20 年渤海湾互花米草面积增速达 $21.62\text{hm}^2/\text{a}$, 扩散速率达 8.85%, 在时间上仍处于快速扩散阶段, 在空间上呈由天津海河口一带向南北两侧扩散的趋势。互花米草出现快速扩散的主要区域为围填海形成的半封闭潮滩、河口湿地及退养还滩区域, 其景观扩张模式由飞地式扩张向边缘式扩张演变, 近年来逐渐向填充式扩张发展。渤海湾互花米草的快速扩散基于其高纬度地区遗传发育的特殊优势上, 但更多受到区域内大规模围填海开发、不适当的退养还滩工程等因素对于潮滩快速促淤的影响。互花米草扩散有防浪减灾的积极作用, 也有挤占鸟类栖息地等不利影响。对渤海湾互花米草治理需考虑其综合影响和迫切需求, 科学合理地制定具体治理方案。

关键词: 渤海湾; 互花米草; Google Earth Engine(GEE); 随机森林; 扩散

Distribution and diffusion characteristics of *Spartina Alterniflora* in the coastal wetlands of the Bohai Bay

CHENG Lin^{1,2,3,4}, LIU Xihan^{3,4}, GAO Xiang^{3,4}, GAO Yue³, XIAO Dengpan^{1,2,*}

1 School of Geographical Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China

2 Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Shijiazhuang 050024, China

3 Institute of Geographical Science, Hebei Academy of Science, Shijiazhuang 050011, China

4 Hebei Technology Innovation Center for Geographic Information Application, Shijiazhuang 050011, China

Abstract: The Bohai Bay is the northernmost region in China where *Spartina alterniflora* is distributed and diffused. To comprehensively understand the status of *S. alterniflora* diffusion in the Bohai Bay, based on nearly 20 years of 10-meter resolution multi-source remote sensing data, the random forest classification model, and the Google Earth Engine(GEE) remote sensing cloud platform, the classification and identification of *S. alterniflora* in the Bohai Bay were conducted using remote sensing techniques. The spatial and temporal characteristics of *S. alterniflora* diffusion, diffusion patterns, influencing factors, and ecological and environmental responses to diffusion were discussed with the aim of providing data support for the management of *S. alterniflora* in the Bohai Bay and scientific management of coastal wetlands. The results showed that the annual growth rate of *S. alterniflora* in the Bohai Bay reached $21.62\text{hm}^2/\text{a}$ and the diffusion rate reached

基金项目: 河北省“三三三”人才工程资助项目(A202101047); 河北省科学院两院合作项目(23105); 河北省社会科学发展研究课题(20210201087); 河北省重点研发计划项目(22373301D)

收稿日期: 2023-11-02; **网络出版日期:** 2024-07-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaodp@sjziam.ac.cn

8.85% in the past 20 years, which was still in a rapid diffusion stage in time, and showed a trend of spreading from the Tianjin Haihe River Estuary to the north and south in space. The main areas where *S. alterniflora* rapidly spread were semi-enclosed tidal flats formed by reclamation, estuarine wetlands, and tidal flats formed by aquaculture withdrawal. The landscape expansion pattern of *S. alterniflora* has evolved from outlying to edge expansion and gradually to infilling in recent years. The rapid spread of *S. alterniflora* in the Bohai Bay based on its special advantages of genetic development in the high latitude area, but it was more affected by the large-scale reclamation in the region, inappropriate reclamation projects and other factors on the rapid silting of tidal flat. The spread of *S. alterniflora* had positive effects on wave prevention and disaster reduction, but also had adverse effects such as crowding birds' habitat. It is necessary to consider the comprehensive effects and urgent needs of *S. alterniflora* in the Bohai Bay and formulate specific management plans scientifically and reasonably.

Key Words: the Bohai Bay; *Spartina alterniflora*; Google Earth Engine; Random forest; expansion

互花米草是我国滨海湿地主要的外来物种,自 1979 年被引入福建沿海以来,已扩散至河北到广西的沿海地区^[1-2]。相比于国内潮滩湿地本土湿地植被类型,互花米草繁殖扩散方式多、能力强^[3],物候期长^[4],定植后常出现快速扩散。互花米草固碳速率较高^[5-6],对部分海岸段起到了促淤、保护海岸堤坝的正向作用^[7-8],但其对所入侵滨海湿地的营养物质及微塑料积累、本地湿地植物及底栖生物多样性、鸟类栖息等各方面均产生负面影响^[9-11],已被列入《中国第一批外来入侵物种名单》和《重点管理外来入侵物种名录》^[12-13]。

为了全面反映互花米草扩散时空特征及扩散机制,国内外就互花米草的遥感监测开展了大量研究工作。用于遥感解译、分类的图像来源涵盖了多种卫星影像及无人机航拍影像,以光学遥感图像为主。使用较广的 10—30m 分辨率卫星遥感数据具有易获取、存量影像时序长的优势,其中 30m 分辨率的 Landsat 系列影像数据适用于长时序、全国范围、处于快速扩散或稳定阶段的互花米草扩散研究^[1,14],10m 分辨率的 SPOT 系列、ALOS-AVNIR2 及 Sentinel2 影像数据,更适合于省市尺度范围内的、处于定植至扩散阶段的互花米草扩散趋势研究^[15-17]。GF 系列等超高分辨率影像及无人机航拍影像可发现尚处于定植阶段的互花米草入侵情况^[18-20],高光谱遥感数据多用于分析盐沼多类别植物共存情况下的分类研究^[21],这两类别数据获取成本相对较高,目前多用于小区域范围、短期时段的研究。近年来,融合了 Landsat、Sentinel 系列影像数据的遥感计算云平台 GEE、PIE、AL Earth 等相继投入应用,使得基于 10m 分辨率影像开展大范围 and 长时序得研究更加便利、快捷^[4]。

互花米草扩散特征研究的热点区域为山东至福建沿海地区,其中研究较多的地点包括黄河三角洲^[5,18]、盐城湿地^[15,17,22-23]、上海崇明岛^[24]、浙江及福建的主要河口或海湾(如杭州湾^[6]、乐清湾^[16]、象山港^[25]、漳江口^[19]),渤海湾互花米草分布扩散的研究相对较少。渤海湾,包括天津、河北沿海,互花米草引种历史起源于 1997—2000 年^[7,26],是目前国内互花米草分布的最北区。渤海湾互花米草的遥感调查仅见于基于 Landsat 影像对全国范围互花米草分布与扩散的研究(如 Liu M 等^[1],Mao D 等^[2]),其他研究以互花米草生物学研究为主^[27-28]。根据前期调研结果,互花米草分布空间狭窄、面积相对较小,Landsat 影像分类结果无法完全反映处于定植及扩散期的图斑特征。本文结合渤海湾互花米草分布特征,综合考虑遥感数据分辨率、时序、获取成本及研究方法,采用 10m 分辨率的多源遥感影像,基于 GEE 平台,对近 20 年以来的互花米草分布与扩散特征进行研究,以期对互花米草治理及滨海湿地科学管理提供数据支撑。

1 数据与方法

1.1 遥感影像数据处理与分类

影像选择方面,为反映处于定植至扩散阶段的互花米草,采用 10m 分辨率的遥感影像(SPOT 系列、ALOS-AVNIR2 及 Sentinel2 影像数据)为数据源。考虑到反映 2003 年以来渤海湾大规模围填海活动的影响,本文确

定的研究时间范围为 2002—2023 年,影像选择主要标准为:时段选择互花米草种子成熟期的 8 月—10 月^[17](部分该时段影像资料较少的年份扩展至 11 月中旬),影像云覆盖范围 ≤ 20%,影像高、中潮滩出露完整。2015—2023 年采用已融合到 GEE 平台的 Sentinel2 数据。2015 年之前的数据视数据质量选择年限及数据源,最终确定对 2002、2004、2008、2010 及 2012 年数据进行处理并上传至 GEE 平台,具体数据源选择、处理见图 1。影像分类范围为相应年份的围填海堤坝以下至海图零米线范围的开敞或半封闭潮滩。参与遥感分类的相关指数见表 1。

样本点选择方面,根据文献^[26]及作者所在团队 2015—2022 年多年多次现场踏勘调查,确认互花米草是渤海湾潮间带湿地的唯一植物群落,因此本文分类仅划分为互花米草及其他两类。结合 Google Earth 高分辨率在线影像判读解译、现场调查记录点位,选择互花米草及非米草区域样本点,每年度各类别样本点数量不少于 100 个。

分类算法方面,选择随机森林算法作为 GEE 平台的分类算法。随机森林算法是一种基于决策树的新型机器学习算法^[29],利用 bootstrap 重抽样方法从原始样本中抽取多个样本,对每个 bootstrap 样本进行决策树建模,然后组合多棵决策树的预测,通过投票得出最终预测结果^[30],具有训练速度快、分类精度高、不易过拟合、可处理高维数据等优点^[31],已在滨海湿地植被分类方面获得了广泛的应用,且分类精度普遍高于面向对象、支持向量机等分类方法^[22,25,32]。随机选择 70% 的样本点,以随机森林方法建立互花米草分类模型,其余 30% 样本点用于对分类结果的验证。分类结果的精度评价方法选择混淆精度 OA 和 kappa 系数,其具体计算公式可见于赵英时等^[33]。通过现场踏勘和复杂区域无人机航拍的方法,对 2022—2023 年分类结果进行再核实。

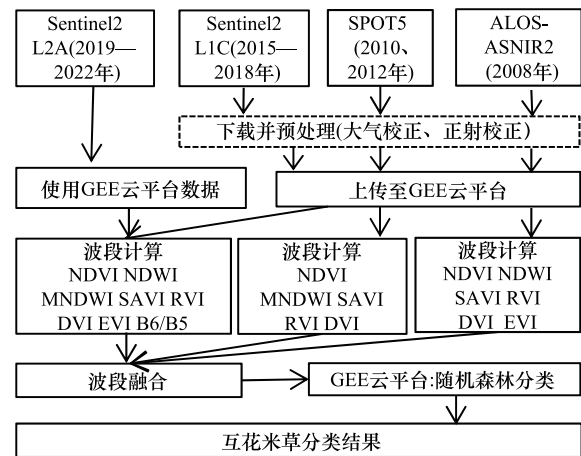


图 1 互花米草遥感分类技术路线

Fig.1 Technical route of remote sensing classification of *S. alterniflora*

GEE:谷歌地球遥感云平台(Google Earth Engine);SPOT:法国地球观测系统卫星;ALOS-ASNIR2:日本先进对地观测卫星的先进可见光与近红外辐射计传感器;NDVI:归一化植被指数;NDWI:归一化水体指数;MNDWI:修正归一化水体指数;SAVI:土壤调节植被指数;RVI:比值植被指数;DVI:差值植被指数;EVI:增强型植被指数

表 1 参与遥感分类的波段参数

Table 1 Band parameters involved in remote sensing classification

参数类别 Parameter class	参数名称 Parameter name	备注 Remarks
影像波段 Bands	B2—B12(Sentinal2)	Sentinal-2 涵盖 RGB 波段、近红外 NIR 波段、红边波段和短波红外 SWIR 波段
	B1—B4(SPOT5)	SPOT5 涵盖 Blue、Red、NIR、SWIR 波段
	B1—B4(ALOS AVNIR2)	ALOS AVNIR2 涵盖 RGB 波段、NIR 波段
植被指数 Vegetation index	NDVI	$(NIR - Red) / (NIR + Red)$
	SAVI	$(NIR - Red) \times 1.5 / (NIR + Red + 0.5)$
	RVI	NIR / Red
	DVI	$NIR - Red$
	EVI	$2.5 \times (NIR - Red) / (NIR + 6 \times Red - 7.5 \times Blue + 0.5)$
水体指数 Water Index	NDWI	$(Green - NIR) / (Green + NIR)$ (不适用于 Spot5)
	MNDWI	$(Green - MIR) / (Green + MIR)$ (不适用于 ALOS AVNIR2)
其他 Others	红边指数	B6/B5(仅适用于 Sentinal2)

1.2 互花米草时空扩散特征分析方法

对分类完成后获得的多年多地区互花米草分布区范围数据,分别采取面积及速率测算、景观格局指数分

析及景观扩张指数分析、逐年增减变化分类分析,以分析渤海湾互花米草时空扩散特征。其中景观格局指数反映某一固定时期互花米草景观特征,本文选择可反映互花米草扩散特征的斑块数量(NP)、最大斑块指数(LPI)、平均近邻指数(MNN)、聚集度指数(AI),各指数算法及涵义参见表2,计算使用Fragstats4.2。景观扩张指数(LEI)反映不同时期景观空间扩张特征^[34],其根据新增斑块缓冲区内原有斑块的面积占比的差异(式1),将景观扩张模式划分为飞地式、边缘式和填充式扩张(图2),多用于城市及土地利用变化分析,近年来也开始应用于互花米草等湿地植被扩张研究^[23],基于ArcGIS建模的方法计算不同年份间的LEI值。

表2 景观格局指数选择及其涵义
Table 2 Selection of landscape pattern index and its implication

指数名称 Index name	计算方法 Index calculation method	指数涵义 Index meaning
斑块数量 NP Number of patches	—	表征互花米草斑块的总数,反映互花米草以飞地模式扩散的总体特征。
斑块密度 PD Patch density	$PD=NP/A$, A 为互花米草总面积,下同	表征互花米草分布区单位面积斑块的数量。值越大,显示景观越破碎、小面积斑块数量越多。
最大斑块指数 LPI Largest patch index	$LPI=\max(a_{ij})/A$, a_{ij} 表示斑块 ij 的面积	表征互花米草斑块中最大斑块占总面积的比例。
斑块形状指数 LSI Landscape shape index	$LSI=0.25 * E/\sqrt{A}$, E 表示所有斑块边界的总长度。	表征互花米草景观的形状变化。值越大,景观斑块形状越复杂。
平均近邻距离 MNN Mean nearest-neighbor distance	$MNN = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n h_{ij}}{N}$, h_{ij} 为斑块 ij 到同类型斑块的最近距离之和, N 为具有最近距离的斑块总数。	表征互花米草斑块之间的团聚程度。值越大,反映互花米草分布较离散;反之,说明互花米草呈团聚分布。
聚集度指数 AI Aggregation Index	$AI = \frac{g_{ij}}{\max g_{ij}} \times 100$, g_{ij} 为相应景观类型的相似临界斑块数量。	表征互花米草斑块之间的聚集程度。值越大,反映景观内部聚集度较高、破碎度较低。

$$LEI=100 \times \frac{A_0}{A_0+A_v} \tag{1}$$

LEI 的计算围绕新一期图层相对于上一期图层的新增斑块展开。 A_0 为新增斑块的缓冲区内上一期斑块的面积, A_v 为缓冲区其余面积; A 为新增斑块缓冲区总面积。Liu 等^[34] 根据 LEI 计算结果将景观扩张模式划分为填充式扩张模式 ($LEI \in [50, 100]$)、边缘式扩张模式 ($LEI \in (0, 50)$) 和飞地式扩张模式 ($LEI = 0$) 三种类型(图2)。

2 结果

2.1 互花米草分类识别结果

从遥感分类的精度评价结果来看(图3),渤海湾互花米草遥感分类的混淆精度在99%以上,Kappa系数在97%以上,检验样本的检验精度在95%以上,反映了随机森林分类算法对于渤海湾滨海湿地的分类精度较高,满足互花米草扩散研究的应用要求。基于2022年分类结果,2022年7月对唐山和沧州两地的6处互花米草分布区进行了现场核实,显示核查点均被正确识别为互花米草;基于2023年分类结果,2023年9月对天津、唐山、沧州共11处互花米草分布区进行了现场踏勘核实,并利用无人机对无法抵达的2处互花米草分布区进行航拍核实,显示核查点均被正确识别为互花米草。

分类结果显示(图4),渤海湾互花米草主要分布在唐山市双龙河口至沧州黄骅港之间,空间分布规律呈

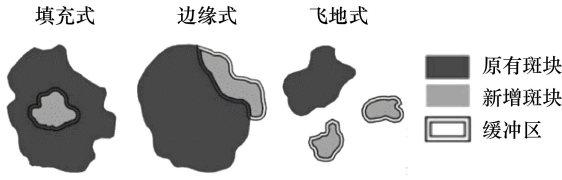


图2 景观扩张指数的三种分类(改自Liu等^[34])
Fig.2 Three types of landscape expansion index (From Liu et al.,^[34])

海河口向南北两侧扩散的趋势。截至 2023 年,互花米草总面积已达到 554.21hm^2 ,互花米草单个斑块面积较大的分布区主要位于唐山沙河口及其附近潮滩、天津永定新河口、天津东疆港港内潮滩、天津独流减河口及附近潮滩、天津子牙新河口及附近潮滩、黄骅南排河口及附近潮滩、黄骅港北侧潮滩,其中东疆港港内潮滩、子牙新河口及附近潮滩、南排河口潮滩、黄骅港北侧潮滩定植年限均在 20 年以上。

2.2 互花米草扩散特征

近 20 年来,渤海湾互花米草呈快速扩散的趋势(图 5),研究期内多年平均增速达 $21.62\text{hm}^2/\text{a}$,扩散速率达 8.85% 。互花米草扩散的阶段特征显著。2002—2008 年渤海湾互花米草处于定植阶段,增速为 $-0.30\text{hm}^2/\text{a}$,分布区主要位于永定新河、海河、子牙新河、北排河、南排河等河口以及天津大神堂、天津东疆港、天津大港区、沧州冯家堡等滨海滩涂,以零星斑块为主,分布区相对稳定,无大面积扩散现象,面积超过 10a 的斑块仅有海河口及天津东疆港。2008—2015 年渤海湾互花米草处于快速扩散阶段,面积增速达 $43.54\text{hm}^2/\text{a}$,扩散速率达 11.38% ,在 2008 年分布区基础上,新增唐山双龙河口、沙河口、润河口、天津独流减河口等河口以及沧州后唐堡滨海滩涂,最大斑块面积超过

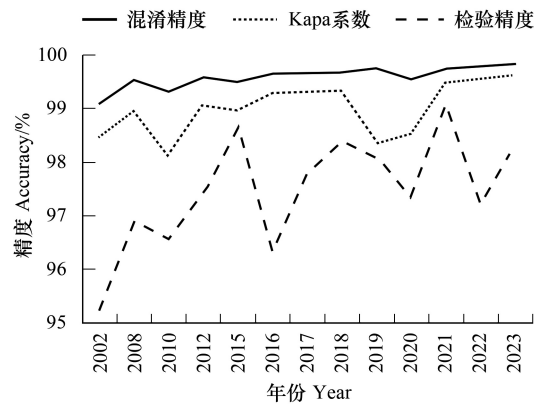


图3 基于随机森林算法的互花米草分类精度

Fig.3 Classification accuracy of *S. alterniflora* based on random forest algorithm

2008—2015 年渤海湾互花米草处于快速扩散阶段,面积增速达 $43.54\text{hm}^2/\text{a}$,扩散速率达 11.38% ,在 2008 年分布区基础上,新增唐山双龙河口、沙河口、润河口、天津独流减河口等河口以及沧州后唐堡滨海滩涂,最大斑块面积超过

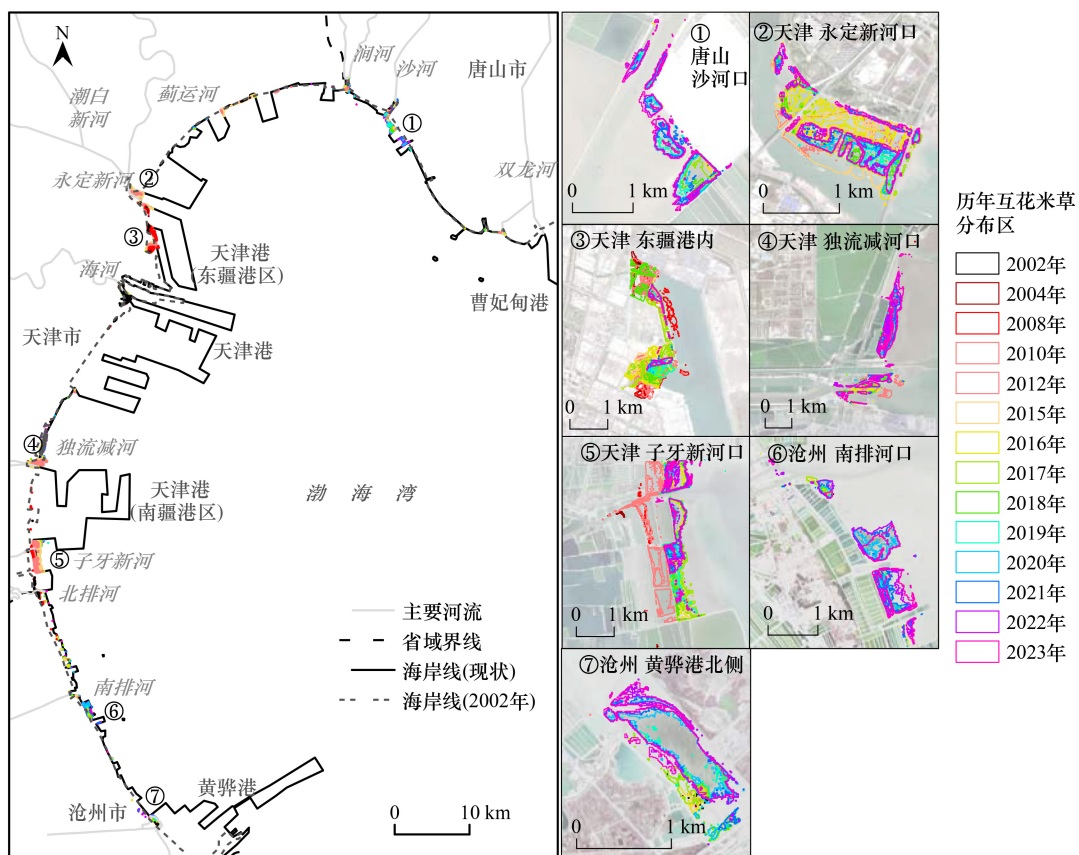


图4 渤海湾互花米草主要分布区

Fig.4 The main distribution area of *S. alterniflora* in the Bohai Bay

10hm²的分布区包括天津大神堂、永定新河口、东疆港、独流减河、子牙新河。2015—2019 年互花米草面积呈下降趋势,面积增速为-33.56hm²/a,但这一时期在2015 年分布区的基础上又新增唐山一号人工岛、沧州赵家堡等滨海滩涂,面积超过 10hm²的斑块在 2015 年的基础上又新增唐山沙河口、沧州赵家堡。2019 年以来,互花米草分布区面积再次出现快速扩散,面积增速达 71.35 hm²/a,扩散速率达 19.66%,面积超过 10hm²的斑块在 2019 年的基础上又新增沧州赵家堡。

渤海湾互花米草在空间分布上存在显著的区域分异特征(图 5)。互花米草主要以分布在天津为主,2016 年以前,天津市沿海地区互花米草分布区面积占总面积比例稳定在 90%以上。2016 年以来,沧州、唐山两地互花米草面积持续上升,到 2023 年河北两市互花米草总面积占渤海湾互花米草总面积比例升至 43.98%;天津市互花米草面积 2015 年以来出现持续下降,2018 年以来天津市互花米草面积总体相对稳定略有上升。

2.3 互花米草景观格局特征及景观扩张模式

互花米草的主要景观格局指数均呈现为较明显的连续变化趋势(图 6),反映了互花米草斑块面积快速扩散且呈相向扩散的趋势。表征互花米草景观斑块数量和面积量的指标中,斑块数量 NP 以上升趋势为主,斑块密度指数 PD 呈上升-稳定-下降趋势,最大斑块指数 LPI 呈显著下降趋势,结合前文的互花米草面积变化特

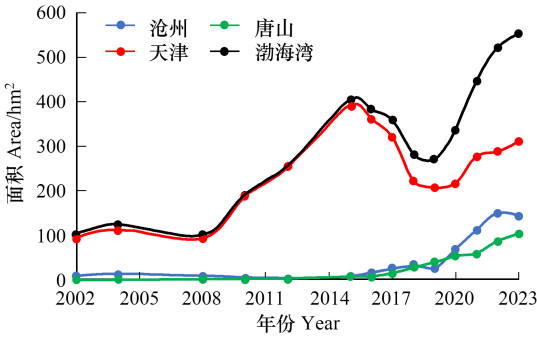


图 5 近 20 年渤海湾滨海湿地互花米草面积变化

Fig.5 Changes of *S. alterniflora* area in the Bohai Bay coastal wetland in recent 20 years

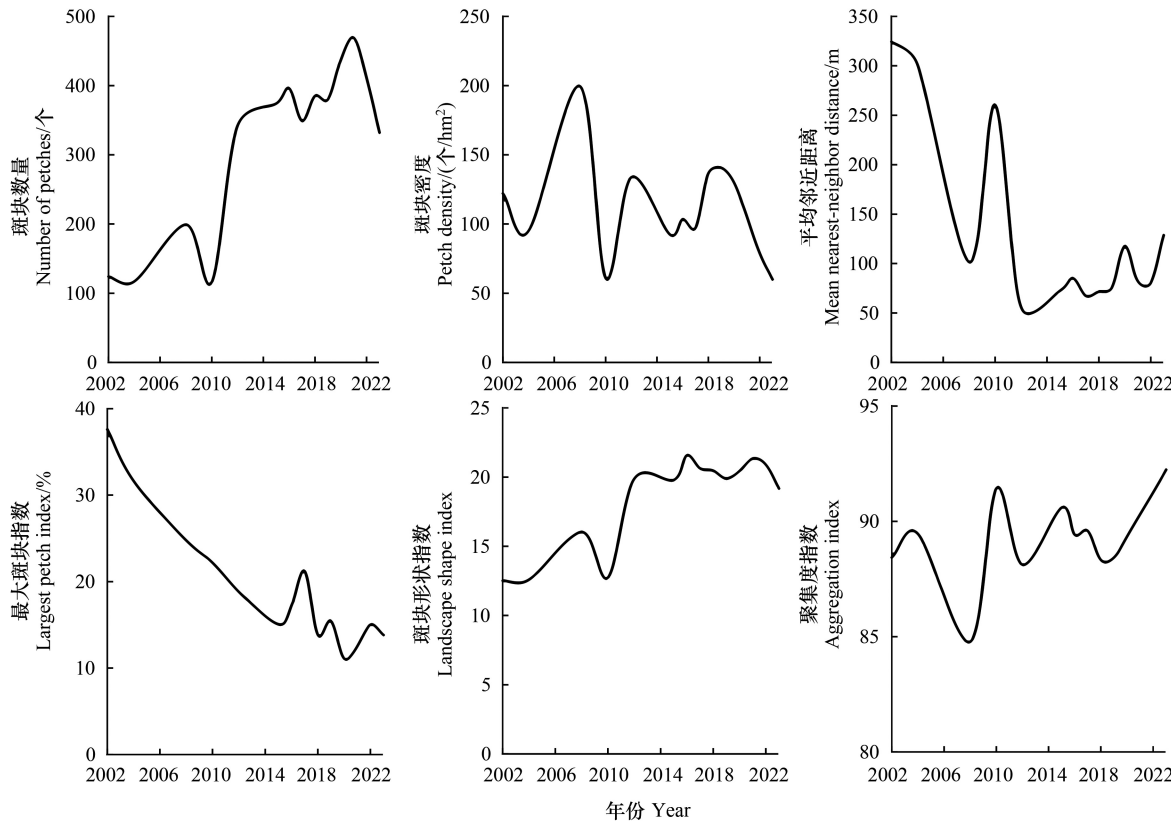


图 6 渤海湾滨海湿地互花米草主要景观格局指数变化

Fig.6 Change of main landscape pattern index of *S. alterniflora* in the Bohai Bay coastal wetland

征,可知渤海湾互花米草斑块的面积和数量都处于增加趋势,但面积增速逐渐快于斑块数量增速,面积较大的斑块数量不断增加,使得斑块密度、最大斑块占比均出现下降。表征互花米草斑块形状的景观形状指数 LSI 总体呈缓慢上升趋势,显示随时间发展互花米草景观形状表现出一定的复杂性。表征互花米草斑块间关系的指标中,平均近邻距离 MNN 总体趋势呈下降趋势,聚集度指数 AI 由 88.43 波动上升至 92.24,显示各斑块或斑块群之间的距离不断缩小、聚集性不断增强。

渤海湾互花米草的景观扩张模式的变化趋势为从飞地式扩张到边缘式扩张,到填充式扩张面积及比例逐渐增多(图 7),这一变化趋势与景观格局指数变化特征相一致。2012 年及之前以飞地扩张为主,飞地式扩张斑块面积从 2004 年的 4.34hm²增至 2012 年的 97.64hm²,占比超 50%,显示互花米草入侵初期,新生定植斑块面积较多;边缘式扩张斑块的面积呈增长趋势,填充式扩张斑块的面积量极低。2015—2020 年以边缘式扩张为主,2015 年边缘式扩张斑块面积量达 240.85hm²,其后面积及占比稳定在 40—90hm²、50%—70% 范围内,显示互花米草已经在渤海湾形成相对稳定的分布区域,新增斑块主要为已有斑块的扩散;飞地式扩张面积量及占比均显著降低并保持稳定,填充式扩张占比显著上升。2021 年以来,填充式扩张斑块的面积及占比快速上升,2023 年填充式扩张总面积及占比分别达 52.12hm²及 46.66%,与边缘式扩张的面积及占比相当,显示在分布区总体稳定的情况下互花米草扩张更多发生于大斑块内部及周围区域;飞地式扩张面积及占比进一步降低。

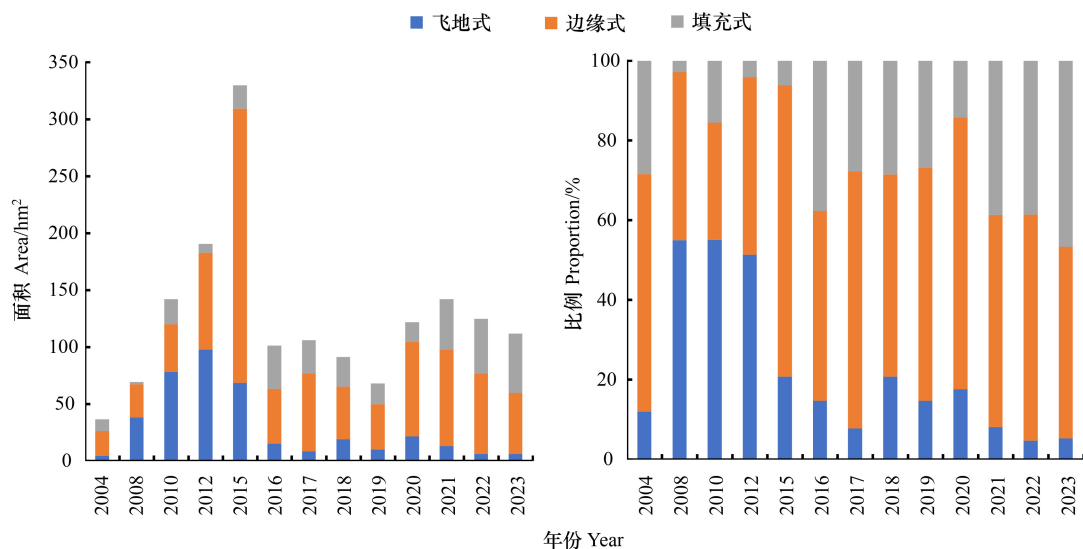


图 7 渤海湾滨海湿地互花米草景观扩张指数变化

Fig.7 Change of landscape expansion index of *S. alterniflora* in the Bohai Bay coastal wetland

2.4 互花米草分布区面积变化分析

各年份互花米草相对于上一年份,既存在新增区域,也存在消亡区域(图 8)。除 2016—2019 年时段外,新增区域面积均高于消失区域,这一变化趋势契合了互花米草总面积变化特征。其中,新增区域 2004—2015 年呈逐年快速增加趋势,由 36.40hm²上升至 329.55 hm²;2016 年以来新增面积稳定在 100—125hm² 范围内。互花米草消亡面积峰值时段为 2012—2018 年,年消亡区域面积介于 120—180hm²,其余年份消亡区域面积多在 80hm² 以下。

对各年份互花米草新增区域所处的滩涂环境特征进行分类分析,结果显示近 20 年来互花米草新增区域主要出现在大规模围填海工程所围栏的单侧、双侧或多侧封闭潮滩上(图 8),其中以双侧封闭潮滩为主;半封闭性潮滩的新增互花米草面积占比 2008—2016 年为 50%—70%,2017 年来上升至 70%—80%。河口潮滩是新增互花米草的第二大来源,2004—2016 年河口潮滩新增互花米草面积占比稳定在 30% 以上,其中 2004 年、

2016 年超过 40%;2017 年以来河口潮滩新增互花米草占比降至 25% 以下。近年来,部分沿海地区退养还滩区域成为互花米草扩散的新热点,2020、2021 年退围还滩区域新增互花米草面积占比超过 10%,成为新增互花米草的第三来源区。

对各年份相对于上一年份消亡的互花米草的可能消亡原因进行分类。其中人为干预因素包括河口及航道清淤、围填海、互花米草治理,自然原因主要为潮滩快速淤积、海水动力环境变化等导致的互花米草消亡(图 8)。结果显示,不同年份互花米草消亡各有其主导因素,但在互花米草消亡面积峰值时段(2012—2018 年),人为干预是促使互花米草消亡的主要原因。就具体原因而言,因河口及航道清淤导致的互花米草消亡面积及其占比在 2008 年、2016 年达到最高,分别为 71.37hm²、77.02% 及 44.05hm²、33.88%,其余峰值时段因清淤消亡面积多介于 30—45hm²。围填海圈占互花米草面积及比例在 2012 年达到最高,为 126.40hm²、69.90%,其余峰值时段圈占面积多介于 15—40hm²。2016 年以来,渤海湾三市先后投入互花米草治理,治理面积及比例 2018 年达到最高,为 75.58hm²、44.92%,2023 年以来天津及沧州等地互花米草治理工程再次启动。

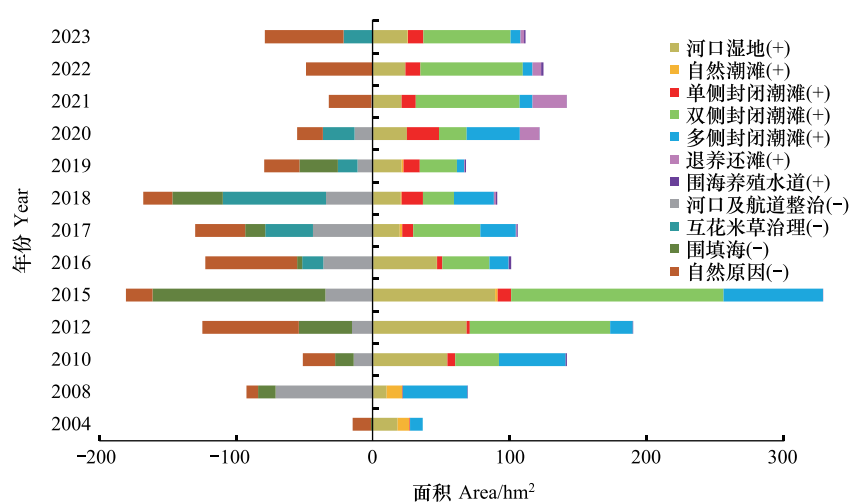


图 8 渤海湾滨海湿地互花米草面积增减变化分类统计

Fig.8 Statistics of area increase and decrease of *S. alterniflora* in the Bohai Bay coastal wetland

3 讨论

3.1 互花米草扩散的影响因素

互花米草为北美东海岸及墨西哥湾沿岸外来物种,其在我国的定植和跨区域传播主要有人工有意引种、互花米草种子或无性繁殖体受水动力影响的自然扩散或船舶压舱水影响而无意引入等三种方式^[35–36]。渤海湾滨海湿地有明确记载的人工有意引种始于 1997—2000 年^[7,26],最早定植区域包括天津大神堂潮滩、天津塘沽盐场潮滩(后为天津东疆港)、沧州歧口河口及沧州南排河口等地,后期又相继扩散至多处渔港或码头所在的河口,如唐山涧河口、双龙河口、沙河口、天津独流减河口等地。

影响互花米草扩散的宏观环境因素包括区域纬度差异^[3–4,37–38]及其相应的气温、海水温度区际差异^[14],有关研究从物候学和遗传发育等多角度研究,发现相较于低纬度地区,天津等北方沿海高纬度地区互花米草种子萌发率和幼苗存活率较高^[3,37–38],始花日期早^[39],植株扩散速率高^[14],这些因素均有利于渤海湾沿海地区互花米草的扩散。

影响互花米草扩散微观因素包括高程和潮汐下平均淹水时间、平均淹水深度和土壤盐度的差异等^[19,40–42],其中高程因子关系着淹水程度、风浪大小、土壤条件,环境因子沿高程梯度也呈一定梯度变化^[40],不同研究^[40,43–44]均显示相对于中低潮滩,高潮滩更有利于互花米草根茎苗定植、生物量更高。渤海湾受地质

条件等多因素影响,自然潮滩面积广阔、坡度平缓、潮差大,但潮间带围海工程多年以来持续开展,推动海岸线不断向海平行推进。围海工程挤迫下渤海湾海域潮间带尤其是高潮滩不断收窄,适宜互花米草生长的高中潮滩面积较小,因此互花米草入侵以来长期扩散较为缓慢。2003 年开始的渤海湾新一轮大规模围填海工程,打破了渤海湾海岸带原有的岸线形态特征和连续分布的海岸带潮滩湿地,形成了多处单侧、双侧甚至多侧封闭的潮滩。半封闭性潮滩附近水动力环境减弱并产生快速淤积^[45—46],推动潮滩高程增加、高潮带面积不断扩大,为互花米草快速扩散提供了地貌条件。此外,不合理的退养还滩,使得原有沿海养殖池塘区域被改造为自然高潮滩,容易被互花米草占据并短时间内快速扩散。

3.2 互花米草扩散的生态环境响应

渤海湾互花米草的人工引种意在促淤固堤,根据曹大正等^[7]对米草种植区和自然滩涂高程及水动力条件的调查分析,互花米草引种实现了促淤固土、缓流波浪、防潮减灾的作用。根据作者 2022 年沧州南排河口附近潮滩及养殖区的现场调查,无植被区域的养殖池塘外墙遭海浪严重侵蚀,海水养殖户每年均需投入 30—70 万元/km 进行养殖区加固,互花米草定植区域的养殖池外墙则相对稳定,显示互花米草仍在发挥一定的防浪固堤的积极作用。对互花米草整治后海滩沉积地貌及水环境变化的监测^[47]也显示出海堤前风暴潮峰值增加、潮间带泥沙捕集能力降低、甚至加剧潮间带侵蚀。

但同时,互花米草的扩散也导致底栖生物和鸟类的减少,对滨海湿地生态环境质量和生物多样性产生不利影响。渤海湾滨海湿地因其宽阔的潮滩,成为东亚-澳大利亚地区候鸟迁徙路线的重要停歇地,滦南-嘴东湿地、南大港湿地等多处湿地被列入中国黄(渤)海候鸟栖息地(第二期)。互花米草快速扩散形成高密度植被区并占据高潮滩面积,降低了底栖生物的生存区域,挤占了迁徙鸟类的栖息区和觅食区。相关分析数据也显示,在滦南-嘴东湿地米草分布扩散高峰期(2015—2019 年),春季北迁期间水鸟最大日观测数量、春季红腹滨鹬及弯嘴滨鹬最大数量等指标均较低^[48]。

4 结论

本文基于近 20 年 10m 分辨率多源遥感数据、随机森林分类模型及 GEE 遥感云平台,对渤海湾滨海湿地互花米草分布区进行了遥感分类识别,对互花米草时空扩散特征进行了分析,对互花米草扩散的影响因素及生态环境响应进行了讨论。主要结论如下:

(1) 渤海湾互花米草在空间上由天津海河口一带向南北两侧扩散,在时间上经历了定植-快速扩散-下降-恢复快速扩散的扩张阶段,近 20 年增速达 $21.62\text{hm}^2/\text{a}$,扩散速率达 8.85%,其中天津互花米草 2016 年来呈下降趋势,河北两市仍呈上升趋势。互花米草新增区域多出现在围填海形成的半封闭海滩、河口湿地及退养还滩形成的高潮滩上,互花米草的消亡主要受围填海圈占、河口航道清淤及互花米草治理等因素影响。从景观格局指数变化来看,互花米草呈显著相向扩散的趋势,面积增速逐渐高于斑块数量增速。从景观扩张指数变化来看,互花米草由飞地式扩张过渡至边缘式扩张,近三年来填充式扩张逐渐增多。

(2) 互花米草在渤海湾的快速扩散受物候和遗传优势等宏观因素、人类活动导致的海滩高程快速增加等微观因素等多方面影响。其中人类不合理的围填海开发导致滨海湿地水动力减弱及滩涂淤积,不适当的退养还滩导致快速形成适生互花米草的高潮滩,均促进了互花米草的快速扩散。

(3) 互花米草的扩散在渤海湾海岸带地区起到了促淤固堤、防浪减灾的积极作用,但也存在挤占候鸟栖息地等不良影响。当前滨海湿地管理和互花米草治理,应全面评价互花米草对滨海湿地的综合影响,综合考量治理地对于生态环境或防灾减灾的具体需求,科学、合理地规划互花米草治理的优先区域、治理方式。

参考文献(References):

- [1] Mao D H, Liu M Y, Wang Z M, Li L, Man W D, Jia M M, Zhang Y Z. Rapid invasion of *Spartina alterniflora* in the coastal zone of mainland China: spatiotemporal patterns and human prevention. *Sensors*, 2019, 19(10): 2308.
- [2] Liu M Y, Mao D H, Wang Z M, Li L, Man W D, Jia M M, Ren C Y, Zhang Y Z. Rapid invasion of *Spartina alterniflora* in the coastal zone of

- mainland China; new observations from landsat OLI images. *Remote Sensing*, 2018, 10(12): 1933.
- [3] Liu W W, Maung-Douglass K, Strong D R, Pennings S C, Zhang Y H. Geographical variation in vegetative growth and sexual reproduction of the invasive *Spartina alterniflora* in China. *Journal of Ecology*, 2016, 104(1): 173-181.
- [4] Zhang X, Xiao X M, Qiu S Y, Xu X, Wang X X, Chang Q, Wu J H, Li B. Quantifying latitudinal variation in land surface phenology of *Spartina alterniflora* saltmarshes across coastal wetlands in China by Landsat 7/8 and Sentinel-2 images. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 269: 112810.
- [5] Zhang X H, Zhang Z S, Li Z, Li M, Wu H T, Jiang M. Impacts of *Spartina alterniflora* invasion on soil carbon contents and stability in the Yellow River Delta, China. *The Science of the Total Environment*, 2021, 775: 145188.
- [6] Cai T L, Huang S L, Wu J Q, Zhang Z Y, Xue C F, Chen Y N. Saltmarsh carbon stock changes under combined effects of vegetation succession and reclamation. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2023, 9: 0114.
- [7] 曹大正, 王银生, 张冬然, 顾立军, 唐廷贵. 互花米草在吹填筑挡工程上的试验与应用. *中国工程科学*, 2005, 7(7): 14-23.
- [8] 王爱军, 高抒, 贾建军. 互花米草对江苏潮滩沉积和地貌演化的影响. *海洋学报*, 2006, 28(1): 92-99.
- [9] Meng W Q, Feagin R A, Innocenti R A, Hu B B, He M X, Li H Y. Invasion and ecological effects of exotic smooth cordgrass *Spartina alterniflora* in China. *Ecological Engineering*, 2020, 143: 105670.
- [10] Yao W M, Di D, Wang Z F, Liao Z L, Huang H, Mei K, Dahlgren R, Zhang M H, Shang X. Micro- and macroplastic accumulation in a newly formed *Spartina alterniflora* colonized estuarine saltmarsh in southeast China. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 149: 110636.
- [11] Jackson M V, Fuller R A, Gan X J, Li J, Mao D H, Melville D S, Murray N J, Wang Z M, Choi C Y. Dual threat of tidal flat loss and invasive *Spartina alterniflora* endanger important shorebird habitat in coastal mainland China. *Journal of Environmental Management*, 2021, 278 (Pt 2): 111549.
- [12] 农业农村部. 中华人民共和国农业部公告第 1897 号. http://www.moa.gov.cn/nybg/2013/dsanq/201712/t20171219_6119282.htm/2013-03-20.
- [13] 农业农村部. 农业农村部自然资源部生态环境部住房和城乡建设部海关总署国家林草局公告第 567 号. http://www.moa.gov.cn/govpublic/KJJYS/202211/t2022_1109_6415160.htm /2022-12-20.
- [14] Zhang D H, Hu Y M, Liu M, Chang Y, Sun L S. Geographical variation and influencing factors of *Spartina alterniflora* expansion rate in coastal China. *Chinese Geographical Science*, 2020, 30(1): 127-141.
- [15] 薛星宇, 刘红玉. 基于 ALOS 影像的盐城海滨湿地遥感信息分类方法研究. *遥感技术与应用*, 2012, 27(2): 248-255.
- [16] Wang A Q, Chen J D, Jing C W, Ye G Q, Wu J P, Huang Z X, Zhou C S. Monitoring the invasion of *Spartina alterniflora* from 1993 to 2014 with landsat TM and SPOT 6 satellite data in Yueqing Bay, China. *PLoS One*, 2015, 10(8): e0135538.
- [17] 刘瑞清, 李加林, 孙超, 孙伟伟, 曹罗丹, 田鹏. 基于 Sentinel-2 遥感时间序列植被物候特征的盐城滨海湿地植被分类. *地理学报*, 2021, 76(7): 1680-1692.
- [18] Chen M M, Ke Y H, Bai J H, Li P, Lyu M Y, Gong Z N, Zhou D M. Monitoring early stage invasion of exotic *Spartina alterniflora* using deep-learning super-resolution techniques based on multisource high-resolution satellite imagery: a case study in the Yellow River Delta, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, 92: 102180.
- [19] Zhu X D, Meng L X, Zhang Y H, Weng Q H, Morris J. Tidal and meteorological influences on the growth of invasive *Spartina alterniflora*: evidence from UAV remote sensing. *Remote Sensing*, 2019, 11(10): 1208.
- [20] Zhou Y, Qiu C Q, Li Y F, Wang C, Zhang Y L, Huang W C, Li L, Liu H Y, Zhang D. Integrating UAV data to explore the relationship between microtopographic variation and *Spartina alterniflora* expansion during its early invasion. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110633.
- [21] Cui B G, Li X H, Wu J, Ren G B, Lu Y. Tiny-scene embedding network for coastal wetland mapping using Zhuhai-1 hyperspectral images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 2504105.
- [22] 刘明月, 郑浩, 陈星彤, 杨晓芳, 宋敬茹, 张永彬, 满卫东. GEE 支持下联合植被物候特征与机器学习的入侵植物互花米草提取. *测绘通报*, 2023(6): 36-43.
- [23] 王娟, 刘红玉, 李玉凤, 刘伶, 谢富赋. 入侵种互花米草空间扩张模式识别与景观变化模拟. *生态学报*, 2018, 38(15): 5413-5422.
- [24] Zhang X, Xiao X M, Wang X X, Xu X, Chen B Q, Wang J, Ma J, Zhao B, Li B. Quantifying expansion and removal of *Spartina alterniflora* on Chongming Island, China, using time series Landsat images during 1995-2018. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 247: 111916.
- [25] 梁立成, 傅晓强, 张滨, 程谷梅, 李佐晖. 基于 GEE 与随机森林的象山港互花米草动态监测. *林业资源管理*, 2023(3): 38-45.
- [26] 赵彩云, 李俊生, 赵相健. 中国沿海互花米草入侵与防控管理. 北京: 科学出版社, 2015.
- [27] Ma J G, Shi F C, Chai M W, Liu L M. Population expansion of invasive plant *Spartina alterniflora* in the Tianjin coastal wetland, China. 2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering. Nanjing. IEEE, 2011: 8399-8402.
- [28] 李程程. 独流减河河口互花米草生态化学计量与根围丛枝菌根真菌多样性研究[D]. 保定: 河北大学, 2021.

- [29] 吕红燕, 冯倩. 随机森林算法研究综述. 河北省科学院学报, 2019, 36(3): 37-41.
- [30] 方匡南, 吴见彬, 朱建平, 谢邦昌. 随机森林方法研究综述. 统计与信息论坛, 2011, 26(3): 32-38.
- [31] 张悦琦, 任鸿瑞. 融合特征优选与随机森林算法的 GF-6 影像东北一季稻遥感提取. 遥感学报, 2023, 27(9): 2153-2164.
- [32] Wen L, Hughes M. Coastal wetland mapping using ensemble learning algorithms: a comparative study of bagging, boosting and stacking techniques. Remote Sensing, 2020, 12(10): 1683.
- [33] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法. 2 版. 北京: 科学出版社, 2013.
- [34] Liu X P, Li X, Chen Y M, Tan Z Z, Li S Y, Ai B. A new landscape index for quantifying urban expansion using multi-temporal remotely sensed data. Landscape Ecology, 2010, 25(5): 671-682.
- [35] 左平, 刘长安, 赵书河, 王春红, 梁玉波. 米草属植物在中国海岸带的分布现状. 海洋学报, 2009, 31(5): 101-111.
- [36] Salmon A, Ainouche M L, Wendel J F. Genetic and epigenetic consequences of recent hybridization and polyploidy in *Spartina* (Poaceae). Molecular Ecology, 2005, 14(4): 1163-1175.
- [37] 刘文文, 陈欣淙, 王佳瑜, 吴福佳, 陈亚松, 黄昊, 夏露, 张原野, 张宜辉. 互花米草沿纬度梯度的生态适应性研究进展. 厦门大学学报: 自然科学版, 2022, 61(5): 739-749.
- [38] 李琳. 入侵植物互花米草种子萌发和幼苗定植特性沿纬度的变异格局及适应机制[D]. 厦门: 厦门大学, 2021.
- [39] 陈欣淙. 大尺度纬度梯度下外来入侵植物互花米草的开花物候格局研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2018.
- [40] 闫振宁, 梅宝玲, 张桂萍, 韩广轩, 谢宝华, 张树岩, 周英锋, 刘展航. 高程对盐沼湿地互花米草生长与扩散的影响. 生态环境学报, 2021, 30(6): 1183-1191.
- [41] 栾兆擎, 闫丹丹, 薛媛媛, 史丹, 徐丹丹, 刘彬, 王立波, 安玉亭. 滨海湿地互花米草入侵的生态水文学机制研究进展. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 469-476.
- [42] 王倩, 史欢欢, 于振林, 王天厚, 汪承焕. 盐度及种间相互作用对海三棱藨草、互花米草萌发及生长的影响. 生态学报, 2022, 42(20): 8300-8310.
- [43] 谢宝华, 闫振宁, 张树岩, 梅宝玲, 乔沛阳, 王晓杰, 刘展航, 韩广轩. 不同潮滩生境互花米草的植被性状与治理技术. 环境工程, 2023, 41(6): 1-8, 16.
- [44] Xiao D R, Zhang C, Zhang L Q, Zhu Z C, Tian K, Gao W. Seed dispersal capacity and post-dispersal fate of the invasive *Spartina alterniflora* in saltmarshes of the Yangtze Estuary. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2016, 169: 158-163.
- [45] 田立柱, 王福, 裴艳东, 李勇, 施佩歆, 姜兴钰, 李建芬, 商志文, 王宏. 渤海湾天津滨海新区围海造陆前后海底冲淤变化. 华北地质, 2021, 44(4): 28-34.
- [46] 张立奎, 吴建政, 李巍然, 胡日军, 仇建东. 渤海湾西部与南部海岸线和潮滩演变及其影响因素. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(1): 21-27.
- [47] 高翔, 王柯萌, 武国相, 梁丙臣, 张树岩. 黄河三角洲互花米草整治对潮滩湿地防灾功效和沉积动力的影响. 海洋与湖沼, 2023, 54(6): 1586-1596.
- [48] 雷维蟠, 伍洋, 张正旺. 河北滦南南堡嘴东世界自然遗产提名地鸟类多样性现状评估. 自然与文化遗产研究, 2021, 6(2): 1-13.