

DOI: 10.5846/stxb202101260275

李丽凤, 刘文爱, 陶艳成, 许晓玲, 傅伟聪, 董建文. 广西山口红树林保护区互花米草扩散动态及其驱动力. 生态学报, 2021, 41(17): 6814-6824.

Li L F, Liu W A, Tao Y C, Xu X L, Fu W C, Dong J W. Diffusion dynamics and driving forces of *Spartina alterniflora* in the Guangxi Shankou Mangrove Reserve. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(17): 6814-6824.

广西山口红树林保护区互花米草扩散动态及其驱动力

李丽凤^{1,2}, 刘文爱³, 陶艳成³, 许晓玲¹, 傅伟聪¹, 董建文^{1,4,*}

1 福建农林大学 园林学院, 福州 350002

2 桂林电子科技大学 设计与创意学院, 北海 536000

3 广西红树林研究中心 广西红树林保护与利用重点实验室, 北海 536000

4 国家林业局森林公园工程技术研究中心, 福州 350002

摘要: 互花米草在红树林湿地中扩散对生境与生态系统造成严重影响, 已成为生物入侵问题研究的焦点之一。然而目前关于互花米草扩散动态及其驱动力的研究成果仍为鲜见。论文以广西山口红树林保护区为研究对象, 以 2009、2013、2019 年遥感影像为数据源, 采用人机互译、野外勘查结合的方法识别互花米草布局, 利用土地类型转移矩阵、质心的变化、景观指数以及灰色关联度等方法分析互花米草扩散特征及其驱动力。结果表明: (1) 2009—2019 年间, 互花米草面积、斑块数量呈现增长趋势, 但面积增幅下降, 2009—2013 年间年均增长率为 7.60%, 2013—2019 年间年均增长率为 1.99%; 互花米草面积年均增长率大于红树林, 光滩转化为互花米草的面积是其转化为红树林面积的 1.507 倍; 互花米草、红树林均有破碎化趋势; (2) 2009—2019 年间, 互花米草的质心坐标都位于丹兜海潮滩, 2009—2013 年互花米草斑块质心向西北方向偏移, 2013—2019 年向东南方向偏移; (3) 2009—2019 年间, 互花米草动态变化受到人为因素与自然因素共同影响。其中, 赶海人口比例与最大斑块指数、斑块密度、斑块数相关性最大; 年均最高温与互花米草分维数、破碎化指数、面积相关性最大。 (4) 影响互花米草面积变化的因素依次为: 年均最高温、年均最低温、赶海人口比例、地区生产总值; 互花米草面积与年均最高、年均低温均呈正相关, 与赶海人口比例呈负相关。研究结果将为互花米草监控提供科学借鉴, 为红树林保护提供理论依据。

关键词: 互花米草; 扩散动态; 驱动力; 广西山口红树林保护区

Diffusion dynamics and driving forces of *Spartina alterniflora* in the Guangxi Shankou Mangrove Reserve

LI Lifeng^{1,2}, LIU Wenai³, TAO Yancheng³, XU Xiaoling¹, FU Weicong¹, DONG Jianwen^{1,4,*}

1 School of Landscape Architecture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

2 Institution of Marine Information Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Beihai 536000, China

3 Guangxi Mangrove Research Center, Beihai 536000, China

4 Forest Park Engineering Research Center of State Forestry Administration, Fuzhou 350002, China

Abstract: Habitats and ecosystems are seriously affected by the spread of *Spartina alterniflora* in mangrove wetlands. To date, *S. alterniflora* has been a focus of biological invasion research. However, current research results on the dynamics of landscape patterns and its driving forces remain rare. In this article, remote sensing images in 2009, 2013 and 2019 were taken as data sources and the methods of man-machine translation and field exploration were used to identify the layout of *S. alterniflora* in the Shankou Mangrove Reserve. At the same time, changes in diffusion characteristics and the driving forces behind them were analysed by means of a land type transfer matrix, centroid variation, landscape index analysis and grey

基金项目: 广西自然科学基金项目(2018GXNSFBA281190, 2017GXNSFBA198159); 国家自然科学基金(32060282); 国家重点研发计划重点专项项目(2017YFC0506100)

收稿日期: 2021-01-26; **修订日期:** 2021-05-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fjdjw@126.com

correlation analysis. The results showed that (1) the area and number of patches of *S. alterniflora* increased from 2009 to 2019. But the growth rate of the area covered by *S. alterniflora* decreased, the average annual growth rate was 7.60% during 2009—2013, and 1.99% during 2009—2019. The average annual growth rate of the area covered by *S. alterniflora* was higher than that covered by mangrove. The area of mudflat transformed into *S. alterniflora* was 1.507 times that of mudflat transformed into mangrove. Both *S. alterniflora* and mangrove displayed a fragmentation trend. (2) The centroid coordinates of *S. alterniflora* were located in Dandou tidal flat during 2009—2019. The patch centroid of *S. alterniflora* shifted to the northwest during 2009—2013 and shifted to the southeast during 2013—2019. (3) The dynamic change of *S. alterniflora* was affected by both human and natural factors during 2009—2019. The proportion of the sea-going population was the most closely correlated with the maximum patch index, patch density and patch number of *S. alterniflora*. The annual maximum temperature had the highest correlation with the fractal dimension, fragmentation index and area covered by *S. alterniflora*. (4) The change in the area covered by *S. alterniflora* was mainly driven by climate change and human factors. The factors influencing the area covered by *S. alterniflora* were the lowest annual temperature, the highest annual temperature, the proportion of the sea-going population, and the GDP. The area covered by *S. alternifolia* was positively correlated with the highest annual average temperature and the lowest annual average low temperature. Also, the area was negatively correlated with the proportion of the sea-going population. It is hoped that this work will provide a valuable reference for the monitoring of *S. alterniflora* as well as a theoretical basis for mangrove protection.

Key Words: *Spartina alterniflora*; diffusion dynamics; driving force; Guangxi Shankou Mangrove Reserve

互花米草 (*Spartina alterniflora*) 起源于美洲大西洋沿岸和墨西哥湾, 是滨海盐沼常见的禾本科 (Gramineae) 多年生草本植物, 具有区域性入侵特征^[1]。互花米草对温度变化具有一定适应性, 分布纬度跨度大, 适宜生长在广阔的潮间带上^[2]。互花米草在许多引种地快速蔓延, 包括北美西海岸、欧洲、新西兰和中国沿海等^[3-4]。1990—2015 年中国互花米草面积从 4375.5 hm² 增加到 54579.7 hm²^[5], 成为中国东海岸分布最广的 1 个入侵种^[6-7], 改变了原来生境特征与生物群落生态结构^[8-9], 严重威胁生态系统的稳定性和功能^[10-12]。近年来, 如何防范互花米草入侵成为中国生物入侵问题研究的焦点之一。广西沿海是互花米草适宜分布区, 主要分布在丹兜海、铁山港湾、廉州湾等地^[13], 广西山口红树林保护区是互花米草扩散和蔓延面积最大的区域^[14], 其面积从 2003 年的 167 hm² 增加到 2015 年的 413.00 hm²^[5, 15], 已对当地自然生态系统产生严重的负面影响, 亦成为学术界关注的重点区域。

目前关于互花米草扩散的研究成果包括监测、扩散模拟、种群空间分布、繁殖方式、驱动力等方面。在监测和扩散模拟方面, 有学者利用遥感影像对互花米草进行监测^[16-18] 或基于元胞自动机构建互花米草种群扩散模型^[19-20]。在种群分布方面, 有学者利用景观格局指数、质心变化等方法分析互花米草群落的景观空间分布特征^[21]。在繁殖方式方面, 前人从互花米草种群繁殖方式探讨其扩张能力^[22], 或从种群的入侵力、生态系统可入侵性和入侵通道分析互花米草的爆发机制^[2]。在影响因子及驱动力方面, 对于中国沿海互花米草扩散的影响因素有海温、海流纬向分布、海盐度、温度、降雨量^[23], 有学者以气候、水文、经济、社会和政策为驱动力因子分析湿地类型景观格局动态变化^[24-25]。研究驱动力的方法主要包括 Pearson 双变量相关性分析法^[26]、灰色关联度分析方法^[27] 以及 Logistic 模型等^[28], 其中灰色关联度分析方法对于样本数量较小的情况下较为适宜^[27]。

综上, 迄今关于互花米草的研究成果颇为丰硕, 然而结合互花米草扩散动态并探讨其驱动力研究成果相对较少。本研究通过分析 2009—2019 年间广西山口红树林保护区互花米草空间分布、面积变化动态、质心的变化与景观格局, 探讨互花米草在红树林湿地中扩散特征与规律, 并通过灰色关联度分析法探讨互花米草扩散动态的驱动力, 旨在为互花米草监控、红树林资源保护和管理提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 样地概况

广西山口国家级红树林生态自然保护区(中心位置地理坐标 $21^{\circ}28'N, 109^{\circ}43'E$)距离广西北海市 105 km,东与广东省湛江红树林保护区接壤,由广西合浦县东南部沙田半岛的东西两侧海岸及海域组成(图 1),海岸线长约 50 km,面积 8000 hm^2 ,保护区于 2002 年 1 月被列入国际重要湿地名录。该保护区地属亚热带海洋性季风气候,年均气温 23.4°C ,年平均降水量为 1887.54 mm 。保护区滩涂主要为淤泥质,分布着红树林建群种有红海榄 (*Rhizophora stylosa*)、木榄 (*Bruguiera gymnorrhiza*)、桐花树 (*Aegiceras corniculatum*)、白骨壤 (*Aricennia marina*),互花米草主要分布在丹兜海潮滩、英罗潮滩,呈单优群落生长或与红树林混生。

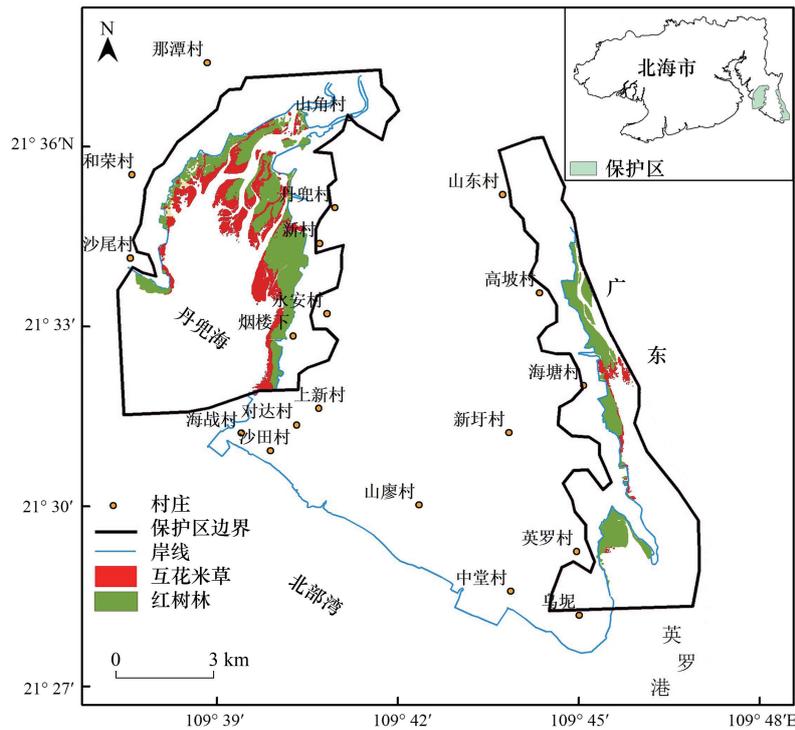


图 1 广西山口红树林保护区区位图

Fig.1 Location of Guangxi Shankou Mangrove Reserve

1.2 数据来源及处理

1.2.1 遥感影像数据

以 2013 年 12 月高分一号全色和多光谱高分辨率卫星影像为主要数据源,分辨率分别为 2 m 与 8 m 。利用 ERDAS9.2 遥感影像处理平台做正射校正、数据配准与融合处理,并组合 2、4、3 波段影像,采用人机互译的方式进行解译。利用覆盖研究区域 $1:10000$ 地形图进行遥感影像校正。以同期 QuickBird 影像为基本验证数据,随机抽取 100 个互花米草斑块,利用对比法进行精度验证^[16]。2013 年研究区互花米草抽样斑块总体面积误差为 1.1% ,斑块面积总体重叠率达到 95.8% 。

1.2.2 互花米草面积数据

研究区 1979、2000、2003、2007、2008、2011、2015 年互花米草面积数据来源于参考文献(表 1)。2009 年 10 月、2019 年 12 月互花米草数据来源于 Google Earth 影像,影像分辨率为 $0.61\text{—}2.4\text{ m}$ ^[31-32]。利用 ArcGIS 的“线切割面”的功能目视解译研究区 Google Earth 影像。随机抽取 100 个斑块进行现场手持 GPS 绕测精度验证,2019 年研究区抽样斑块总体面积误差为 1.3% ,斑块面积总体重叠率达到 95.4% 。

本次研究对象为互花米草,主要分布在滩涂上,因此将保护区滩涂用地进行分类:互花米草、红树林、光滩、养殖滩涂。此外,本研究还解译了海堤内废弃虾塘中的互花米草。辅助数据有 ALOS 卫星 12.5 m Dem 数据、潮位信息数据。本研究采用 ArcGIS 10.4 软件进行矢量数据处理及制图。

表 1 山口保护区互花米草面积及数据来源

Table 1 Data source of *Spartina alterniflora* in Shankou Nature Reserve

年份 Year	面积/hm ² Area	数据源 Data source	影像分辨率 Image resolution	数据获取方法 The data acquisitions methods	参考文献 References	调查机构 Investigation organization
1979	0.67	引种	—	—	[14]	—
2000	44.5	Landsat 影像	30 m	影像解译	[5]	中国科学院大学
2003	167	—	—	统计	[16,29]	广西师范大学
2007	206.7	—	—	GPS 结合 1:50000 地形图 进行草斑勾绘	[15]	广西山口红树林生态自然保区
2008	381.6	—	—	GPS 绕测	[30]	广西红树林研究中心
2009	304.21	Google Earth 影像	0.61—2.4 m	影像解译	本次调查	福建农林大学
2013	403.52	GF-1	2 m/8 m	影像解译	本次调查	福建农林大学
2015	413.00	Landsat 影像	15 m	影像解译	[5]	中国科学院大学
2019	454.24	Google Earth 影像	0.61—2.4 m	影像解译	本次调查	福建农林大学

资料来源:根据相关文献整理

1.2.3 气象、经济、社会数据

年均最高温、最低温、年降雨量数据来源于北海历史天气数据 (<http://lishi.tianqi.com/beihai/201911.html>) 和国家气象科学数据中心地面资料数据 (<https://data.cma.cn/site/index.html>)。地区国民生产总值、人口数据来源于北海市统计年鉴 (http://xxgk.beihai.gov.cn/bhsdfzbzwyhbgs/zjtd/bhnj_98776/);赶海人数数据来源于广西红树林研究中心开展的山口红树林保护区本底调查。

1.3 研究方法

1.3.1 土地类型转移矩阵

用土地类型转移矩阵来分析用地类型的结构特征及不同用地类型变化方向,根据不同时期的用地类型,按公式(1),在 GIS 中进行地图代数计算^[33]。

$$C_{ij} = A_{ij}^k \times 10 + A_{ij}^{k+1} \quad (1)$$

式中, C_{ij} 表示 K 时期至 $K+1$ 时期用地类型变化, A_{ij}^k 、 A_{ij}^{k+1} 表示两个时期的用地类型面积(hm²)。利用 ArcGIS 10.4 软件叠置的分析功能,得到用地类型转移矩阵。

1.3.2 质心的变化

在 ArcGIS 10.4 中标出各互花米草斑块的质心点,记录斑块质心的经纬度坐标。通过计算互花米草的面积加权质心变化,揭示互花米草在空间上的扩散方向和速度,计算方法按公式(2)^[21]:

$$X_c = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i X_i)}{\sum_{i=1}^n C_i}; \quad Y_c = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i Y_i)}{\sum_{i=1}^n C_i} \quad (2)$$

式中, X_c 和 Y_c 是按面积加权的互花米草质心坐标, X_i 和 Y_i 是互花米草的第 i 个斑块的质心坐标, C_i 为互花米草的第 i 个斑块的面积, n 为互花米草斑块的总数目。

1.3.3 景观格局分析

对 2009、2013、2019 年山口红树林保护区互花米草景观格局指数开展分析,以了解研究区互花米草格局及其变化特征。通过 Fragstats4.1 进行计算斑块数量(Number of patches, NP)、斑块密度指数(Patch Density, PD)、平均斑块大小(Patch Density, MPS)、分维数(Dimension, D)和最大斑块指数(Patch Density, LPI)等 5 个景观指数^[34]。

1.3.4 灰色关联度分析方法

灰色关联度分析方法,是指两个系统或两个因素之间关联性的度量,目的在于找到系统间影响因素的关系,以反映各评价对象与参考序列的关联关系。本研究通过灰色关联度分析互花米草景观格局指数与人为因素、气候因素的关联性,在具体研究中对指标数据利用初值法做无量纲化处理,计算比较序列与参考序列对应元素的绝对差值,分辨系数取 0.5,最终定量各因素之间的数值关系。关联度值大于 0.5 时,说明关联度显著;关联度值越接近 1,关联度越强^[27]。

2 结果与分析

2.1 互花米草空间分布和扩散速度

2.1.1 互花米草空间分布

2009—2013 年间,广西山口红树林保护区滩涂主要分布着红树林和互花米草斑块,互花米草在保护区丹兜海潮滩、英罗港海塘村、英罗村滩涂上蔓延,与红树林形成竞争滩涂空间的群落(图 2)。2019 年养殖滩涂斑块面积增加 13.77 hm²,主要是由于当地居民刈割处理禾荣村潮滩(中心位置:经度 109°38′19",纬度 21°35′15")互花米草,在滩涂上养殖红树蚬(*Geloina erosa*)。2009—2013 年间互花米草面积最大的斑块分布位置不变(中心位置:经度 109°39′45",纬度 21°33′44"),但面积变小,2009 年、2013 年与 2019 年依次为 64.34 hm²、53.91 hm²、53.54 hm²。

丹兜村海堤坍塌(中心位置:经度 109°40′13",纬度 21°35′19"),互花米草种子随着海水倒灌进堤内,互花米草在废弃的虾塘蔓延。2009 年堤内互花米草斑块 24 个,面积 3.57 hm²,2013 年堤内斑块 53 个,面积 37.38 hm²。2013—2019 年间,当地居民对废弃虾塘进行整治将堤内互花米草用地转为虾塘,至 2019 年堤内互花米草斑块 7 个,面积约 7.06 hm²。

2.1.2 互花米草扩散速度及面积变化趋势

2009—2019 年间,保护区互花米草面积呈现增加趋势,但增长速度下降。2009 年互花米草面积为 301.04 hm²,至 2019 年增加到 454.24 hm²。互花米草年均增长率大幅下降,2009—2013 年年均增长率为 7.60%,2013—2019 年则下降为 1.99%(表 2)。

2009—2013 年间红树林面积呈增加态势,其年均增长率为 3.42%,但面积增长率小于互花米草,而 2013—2019 年呈减少趋势,主要是位于禾荣村马扒栏滩涂的红树林死亡(中心位置:经度 109°38′36"、纬度 21°35′40")。

表 2 斑块面积及年均增长率(2009—2019 年)/%

Table 2 The area and annual growth rate of patch from 2009 to 2019

年份 Year	互花米草面积/hm ² Area of <i>Spartina alterniflora</i>	互花米草年均增长率/% Average annual growth rate	红树林面积/hm ² Area of mangrove	红树林年均增长率/% Average annual growth rate of mangrove	养殖滩涂面积/hm ² Area of aquaculture on tidal flat
2009	301.04	—	767.19	—	—
2013	403.52	7.60	877.93	3.42	—
2019	454.24	1.99	868.98	-0.17	13.77

以 2009—2019 年间广西山口自然保护区的面积数据为因变量(表 2),通过 Excel 绘制互花米草面积散点图(图 3),得到互花米草面积预测模型式(3):

$$y = 12.703x - 25219 \quad (3)$$

式中, x 为预估测的年份, y 为预测的互花米草面积, $R^2 = 0.785$,利用 SPSS 22.0 软件进行方差分析、模型统计检验, $F = 23.013$, $P = 0.001 < 0.01$,该模型具有统计学意义。结果表明互花米草面积呈线性递增态势。如果互花米草不进行控制,预测模型显示 2029 年互花米草面积将达到 555.387 hm²,2039 年达 682.417 hm²,届时将

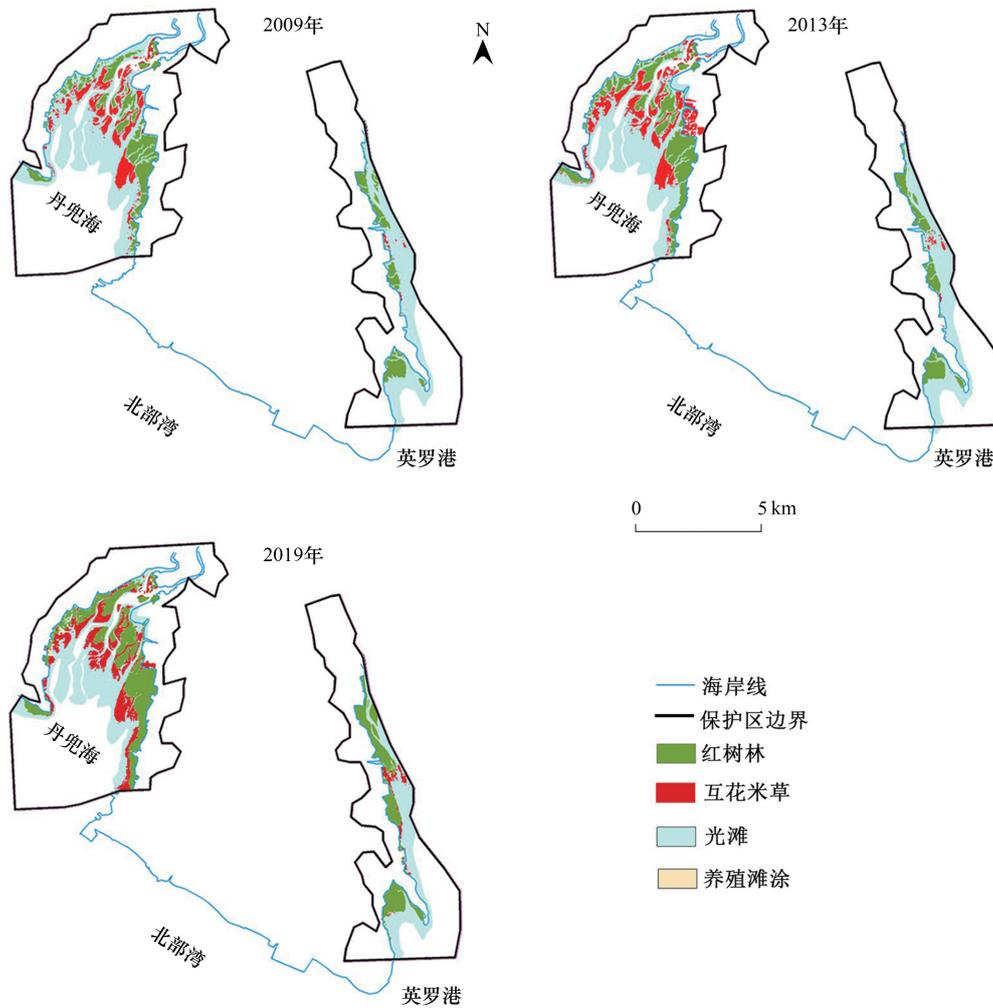


图2 广西山口红树林保护区互花米草分布
Fig.2 The distribution of *Spartina alterniflora*

有更多的适林滩涂被侵占。这也印证了前人的研究结论^[14]。

2.1.3 用地类型转移分析

通过保护区 10 年间土地利用转移矩阵分析,可进一步说明研究区互花米草面积变化情况。总体而言,2009—2019 年间研究区各地类中活跃程度位列前三的依次为养殖滩涂、互花米草、红树林(表 3)。互花米草侵占滩涂的空间速度比红树林快,红树林将面临生长空间的限制。2009—2019 年间,光滩转化为互花米草是其转化为红树林面积的 1.507 倍。2019 年红树林面积为 868.98 hm²,增加面积主要来自互花米草(17.99 hm²)、光滩(137.52 hm²)转入。位于那潭村滩涂(经度 109°39'56"、纬度 21°36'23")互花米草转入为红树林,主要是相关部门在此种植人工林。2019 年互花米草面积为 454.24 hm²,主要来自红树林(13.77 hm²)、光滩(207.26 hm²)、堤内虾塘(3.49 hm²)转入;2019 年保护区

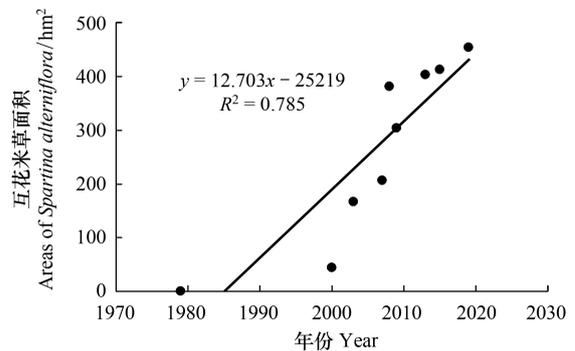


图3 互花米草面积散点图
Fig.3 Scatter plot of the area of *Spartina alterniflora*

滩涂养殖面积来自红树林(1.21 hm²)、互花米草(3.37 hm²)以及光滩(9.19 hm²)转入。

表 3 2009—2019 年山口红树林保护区用地类型转移矩阵

Table 3 The land use transition matrix of the Guangxi Shankou Mangrove Reserve in 2009—2019

2009 年用地类型 Types of land in 2009/hm ²	2019 年用地类型 Types of land in 2019/hm ²					变化率/%
	红树林	互花米草	光滩	虾塘	行总计	
红树林 Mangrove	713.48	17.99	137.52	0	868.98	17.90
互花米草 <i>Spartina alterniflora</i>	13.77	229.72	207.26	3.49	454.24	49.43
养殖滩涂 Aquaculture on tidal flat	1.21	3.37	9.19	0	13.77	100
光滩 Area of mudflat	38.73	49.96	2 598.95	0	2 687.64	3.30
总计 Total	767.19	301.04	2 952.92	3.49	4 024.64	—

2.2 保护区互花米草扩散特征

2009、2013、2019 年互花米草的质心坐标都位于丹兜海潮滩(图 4)。互花米草斑块质心整体移动方向:2009—2013 年向西北方向偏移,2013—2019 年向东南方向偏移。2009—2013 年向北移动速度较快,而 2013—2019 年向南移动速度较快。前一阶段质心变化,主要是因为互花米草扩散进入保护区西北侧稀疏的红树林,而后一阶段互花米草在英罗湾、烟楼下等潮滩平行海岸线向海一侧扩散。

保护区互花米草种群扩散表现为点源扩散、多点爆发的特点。以丹兜潮滩上互花米草斑块(中心位置:经度 109°39'8", 纬度 21°34'53")扩散过程为例(图 5),图中 2009 年互花米草斑块由破碎的多个点源构成,随着时间变迁多点爆发,至 2013 年多个点源连接形成面状的斑块,至 2019 年形成片状的互花米草斑块。这种扩散的特点,被邓自发等称之为短程“流”式扩张^[2]。互花米草对土壤要求不高,在淤泥质的滩涂上生长最好^[35],而山口红树林保护区为海湾淤泥滩涂生境,有利于互花米草生长扩散,因此在丹兜海潮滩上形成大面积互花米草优势群落。

2.3 互花米草景观格局变化

本研究用高度浓缩景观格局信息的景观格局指数反映斑块结构组成和景观变化特征。如表 4 所示,2009—2019 年红树林平均斑块大小先上升后降低,分维数数值和斑块密度值均先降低后上升,表明期间斑块形状趋向复杂变化,红树林斑块有破碎化趋势。

互花米草斑块数量 2013 年较 2009 年减少,主要是小斑块连接成大斑块的缘故,2013—2019 年斑块数量增加,互花米草斑块整体质心偏移,位于丹兜海潮滩的烟楼下、永安、上新村、以及英罗、海塘的滩涂上有新斑块生成。

互花米草分维数 2019 年<2009 年<2013 年,表明 2009—2013 年互花米草爆发高峰期,斑块复杂,并且随着时间推移,至 2019 年斑块逐步成型。相对 2013 年,2019 年的互花米草斑块形状由复杂变为简单。2009—2019 年间互花米草斑块密度数值先减小后增大、平均斑块大小数值先增大后减小,说明期间互花米草呈现破碎化趋势。

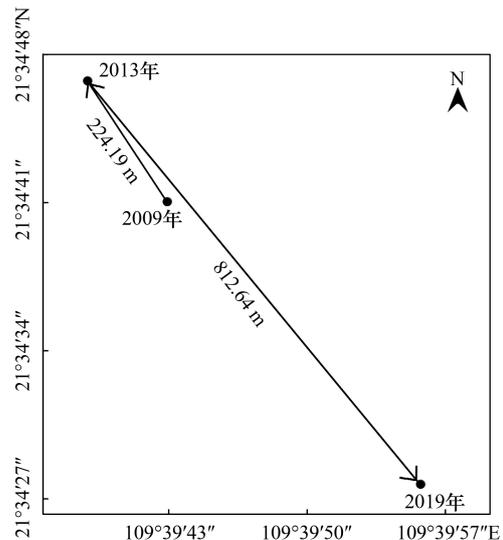


图 4 不同年份互花米草斑块质心变化

Fig. 4 The patch centroid variation of *Spartina alterniflora* in different years

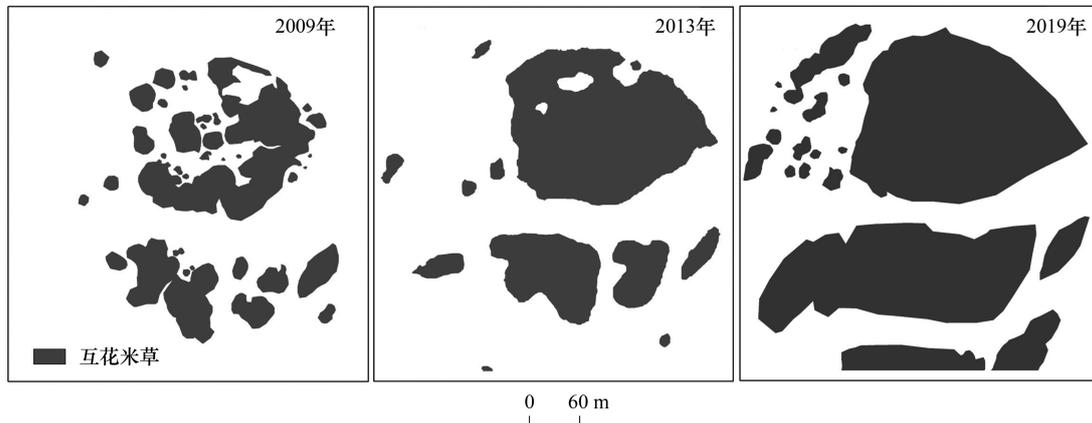


图5 斑块演变示意图

Fig.5 Schematic diagram of patches evolution

表4 广西山口红树林保护区湿地景观格局指数

Table 4 The wetland landscape pattern index of Guangxi Shankou Mangrove Reserve

年份 Year	斑块名称 The name of patches	斑块数量/个 NP	斑块密度/ (个/100hm ²) PD	最大斑块 指数/% LPI	平均斑块 大小/hm ² MPS	分维数 D
2019	养殖滩涂	7	0.005×10^{-2}	0.20	1.968	1.004
	红树林	171	0.128×10^{-2}	10.01	5.081	1.084
	互花米草	787	0.587×10^{-2}	4.00	0.583	1.025
2013	红树林	105	0.082×10^{-2}	10.48	8.361	1.026
	互花米草	662	0.517×10^{-2}	4.18	0.610	1.660
2009	红树林	230	0.215×10^{-2}	6.30	3.336	1.102
	互花米草	753	0.705×10^{-2}	6.27	0.400	1.027

NP: 斑块数量 Number of patches; PD: 斑块密度 Patch Density; LPI: 最大斑块指数 Patch Density; MPS: 平均斑块大小 Mean Patch Size; D: 分维数 Dimension

2.4 互花米扩散的驱动力因素

本研究利用社会环境因素结合灰色关联度分析法研究样地互花米草动态变化驱动力。引起互花米草扩散动态变化的社会环境因素分为人为因素和自然因素,其中人为因素主要体现在地区国民生产总值变化、山口赶海人口比例;自然因素包括年均最低温、年均最高温(图6)。因研究期间年均气温与年均降雨量变化趋势不明显,未纳入到影响因素中。

表5所示,分别以2009—2019年间研究区互花米草分维数、最大斑块指数、破碎化指数、斑块密度、面积作为参考序列,针对4个驱动因素赶海人口比例、年均最高温、年均最低温、地区生产总值,进行关联度分析。各个影响因子关联度值均大于0.5,各因子选择具有一定合理性^[27]。研究结果表明,2009—2019年间互花米草动态变化受到自然因素与人为因素共同影响,互花米草景观格局指数对年均最高温、赶海人口比例、年均最低温较敏感。其中,年均最高温与互花米草分维数、破碎化指数、面积相关性最大;赶海人口比例对最大斑块指数、斑块密度、斑块数影响最大;年均最低温与破碎化指数、互花米草面积、最大斑块指数、斑块密度、斑块数的关联度值均排在第二位;地区生产总值与互花米草景观格局指数的关联度相对较小。

2009—2019年间影响互花米草面积变化的各个因子关联度排序依次为:年均最高温>年均最低温>赶海人口比例>地区生产总值。因此研究区域互花米草面积主要是受到气候因素的影响,其次为人为因素。从气候因素上看,随着全球温度的上升,研究区域年均高温和年均最低温都有上升趋势(图6),互花米草面积与研究样地的年均最高温正相关($R^2=0.9958$),与年均最低温正相关($R^2=0.9304$)(图7)。从人为因素来看,互花

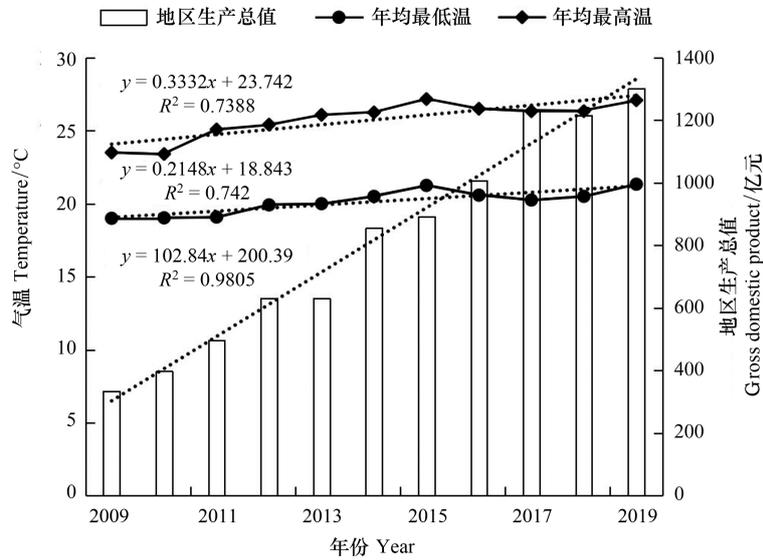


图6 2009—2019年社会环境因素变化动态

Fig.6 The changes of social environmental factors in 2009—2019

米草面积与地区生产总值正相关 ($R^2 = 0.8448$), 互花米草面积与研究样地赶海人口比例呈负相关 ($R^2 = 0.9986$)。2009—2019年间,北海市地区生产总值为从335亿元上升到1300.80亿元,年均增长率为14.53% ($R^2 = 0.9805$)。2009—2019年间从事赶海活动的人口比例下降,说明该地经济发展为当地居民提供了更多的就业岗位与多样化的经济收入来源,赶海人口比例相应减少,有利于互花米草扩散。

表5 各影响因子与互花米草景观格局指数的关联度

Table 5 The correlation degree of each influencing factor with landscape pattern index of *Spartina alterniflora*

驱动因素 Driving factors	驱动因素与参考序列的关联度大小 The correlation degree between driver and reference sequence					
	分维数 D	最大斑块指数 LPI	破碎化指数 MPS	斑块密度 PD	斑块数 NP	面积 Area
赶海人口比例 Proportion of sea-going population	0.876	0.903	0.790	0.943	0.958	0.810
年均最高温 Annual highest temperature	0.882	0.848	0.850	0.876	0.930	0.875
年均最低温 Annual minimum temperature	0.881	0.859	0.836	0.889	0.946	0.859
地区生产总值 Gross domestic product	0.725	0.635	0.702	0.635	0.640	0.672

3 讨论

(1) 气候变化对互花米草的景观格局指数和面积变化有一定影响。互花米草分维数、破碎化指数、面积对年均最高温变化表现较为敏感,互花米草面积与当地的年均最高温、年均最低温正相关。Chuine 等认为增温显著提高了 C4 植物的竞争力^[36],本研究中互花米草面积年均增长率大于红树林,可能是因为在温度变化背景下,互花米草的竞争力高于红树林的缘故。

(2) 在全球变暖的趋势下,2009—2019年间山口保护区互花米草总面积呈现增长趋势,但扩散速率呈现下降趋势。这与广西海岸互花米草整体变化趋势基本一致^[14,16]。究其原因,一方面是由于温度的影响,祝振昌等研究结果认为互花米草萌发率随温度升高呈现先增大后减小的趋势^[37]。另一方面因为经过前期的

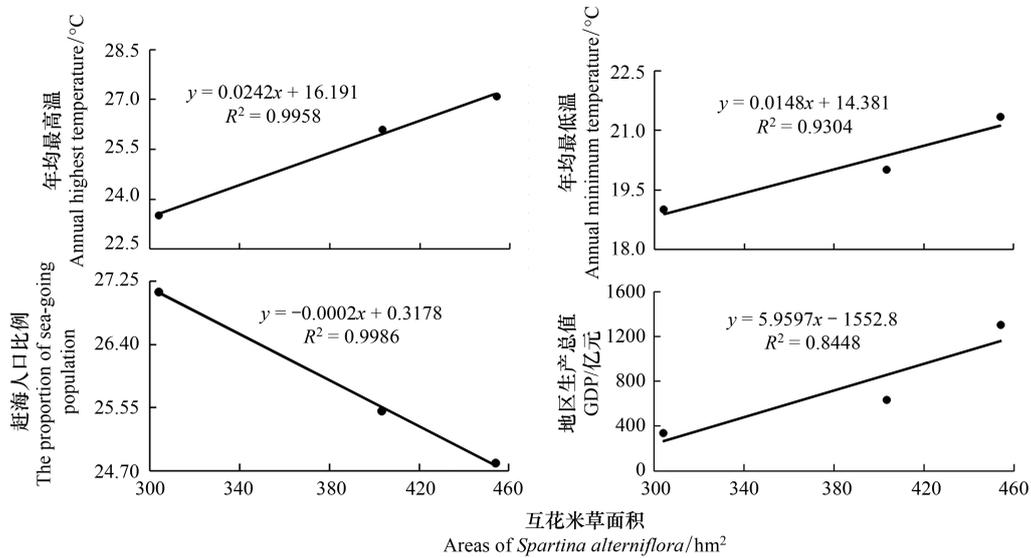


图 7 互花米草面积与影响因素的关系

Fig.7 The relationship between the area of *Spartina alterniflora* and the influencing factors

互花米草爆发式扩散,面积迅速增加,但受保护区滩涂空间限制,其扩散速率降低。在研究区域互花米草入侵的红树林空间主要是保护区西北部的红树林密度小的区域,在红树林密度大、树形高大的英罗港区域,互花米草主要是位于红树林斑块外缘^[23],未能入侵到斑块内部空间中,这与前人研究互花米草容易向低矮、稀疏的红树林内扩散的结论一致^[14,38]。

(3)从 2009—2019 年土地利用变化可以看出,2019 年局部滩涂上的互米草(面积 3.37 hm²)被刈割,互花米草滩涂转为养殖滩涂。当然,养殖滩涂是否长期有效抑制互花米草生长,需要后期进一步监测。此外通过滩涂养殖取代互花米草的方式,其生态影响也需要进一步关注,因养殖滩涂面积还包括红树林面积(1.21 hm²)、光滩面积(9.19 hm²)转入,人为干扰加剧,将对红树林生长造成一定影响。

(4)本研究中驱动力分析的因素主要包括自然因素和人为因素,在气候因子中选择年均值,具体月份的气候因子影响差异还需要进一步研究。在后期研究中,拟将互花米草入侵前后土壤的理化性质变化、地形、土地利用纳入驱动因素中进行深度分析,为红树林湿地环境生态保护提供依据。

4 结论

(1)广西山口红树林保护区互花米草呈现扩散趋势,与红树林争夺生长空间。2009—2019 年间互花米草面积呈现增长趋势,在光滩上生长优势较红树林明显,且年均增长率大于红树林,生长占用滩涂空间,将使宜林空间减少。期间,红树林趋向破碎化,其中主要是由于互花米草侵入红树林边缘,局部入侵斑块内部的缘故,特别是丹兜海西北侧稀疏的红树林,使红树林斑块形状趋向复杂变化。近年互花米草质心向保护区东南方向偏移,应注意防范。

(2)2009—2019 年间互花米草动态变化受到人为因素与自然因素共同影响。在人为因素方面,赶海人口比例是景观格局变化的主要影响因子之一,与最大斑块指数、斑块密度、斑块数关联度最大。在自然因素方面,气候变化是互花米草景观格局及面积变化的重要影响因素。2009—2019 年间,年均最高温对互花米草分维数、破碎化指数变化影响相对较大。互花米草面积变化的主要影响因子亦为气候因素,与年均最高温、年均最低温均呈正相关。随着全球气候变暖,互花米草面积增加,红树林生长将面临严峻挑战。

致谢:感谢福建师范大学地理科学学院祁新华教授对论文提出宝贵的修改意见。

参考文献 (References):

- [1] 赵聪蛟, 邓自发, 周长芳, 关保华, 安树青, 陈琳, 陆霞梅. 氮水平和竞争对互花米草与芦苇叶特征的影响. 植物生态学报, 2008, 32(2): 392-401.
- [2] 邓自发, 安树青, 智颖飙, 周长芳, 陈琳, 赵聪蛟, 方淑波, 李红丽. 外来种互花米草入侵模式与爆发机制. 生态学报, 2006, 26(8): 2678-2686.
- [3] Ayres D R, Smith D L, Zaremba K, Klohr S, Strong D R. Spread of exotic cordgrasses and hybrids (*Spartina* sp.) in the tidal marshes of San Francisco Bay, California, USA. *Biological Invasions*, 2004, 6(2): 221-231.
- [4] Chen Z Y, Li B, Chen J K. Ecological consequences and management of *Spartina* spp. Invasions in coastal ecosystems. *Biodiversity Science*, 2004, 12(2): 280-289.
- [5] 刘明月. 中国滨海湿地互花米草入侵遥感监测及变化分析[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2018.
- [6] 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.
- [7] 章莹. 中国沿海滩涂入侵物种互花米草(*Spartina alterniflora*)的空间分布及生物质能估测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010: 65-65.
- [8] 江旷, 陈小南, 鲍毅新, 李海宏, 施渭渭, 王华, 任鹏. 互花米草入侵对大型底栖动物群落垂直结构的影响. 生态学报, 2016, 36(2): 535-544.
- [9] 冯建祥, 黄茜, 陈卉, 申倩倩, 黄建荣, 黎祖福. 互花米草入侵对盐沼和红树林滨海湿地底栖动物群落的影响. 生态学杂志, 2018, 37(3): 943-951.
- [10] Zhao Z Y, Xu Y, Yuan L, Li W, Zhu X J, Zhang L Q. Emergency control of *Spartina alterniflora* re-invasion with a chemical method in Chongming Dongtan, China. *Water Science and Engineering*, 2020, 13(1): 24-33.
- [11] 高抒, 杜永芬, 谢文静, 高文华, 王丹丹, 吴晓东. 苏沪浙闽海岸互花米草盐沼的环境-生态动力过程研究进展. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(11): 2339-2357.
- [12] 解雪峰, 孙晓敏, 吴涛, 蒋国俊, 濮励杰, 项琦. 互花米草入侵对滨海湿地生态系统的影响研究进展. 应用生态学报, 2020, 31(6): 2119-2128.
- [13] 张丹华, 胡远满, 刘森. 基于 Maxent 生态位模型的互花米草在我国沿海的潜在分布. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2329-2337.
- [14] 潘良浩, 史小芳, 陶艳成, 范航清, 莫竹承. 广西北岸互花米草分布现状及扩散研究. 湿地科学, 2016, 14(4): 464-470.
- [15] 李武峰. 山口红树林保护区互花米草分布调查与评价. 南方国土资源, 2008, (7): 39-41.
- [16] 陶艳成, 潘良浩, 范航清, 葛文标, 刘文爱, 史小芳. 广西北岸潮间带互花米草遥感监测. 广西科学, 2017, 24(5): 483-489.
- [17] 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.
- [18] Sun L M, Shao D D, Xie T, Gao W L, Ma X, Ning Z H, Cui B S. How does *Spartina alterniflora* invade in salt marsh in relation to tidal channel networks? Patterns and processes. *Remote Sensing*, 2020, 12(18): 2983.
- [19] 王东辉, 张利权, 管玉娟. 基于 CA 模型的上海九段沙互花米草和芦苇种群扩散动态. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2807-2813.
- [20] 张思青, 刘依, 刘怡然, 邵冬冬, 孙丽敏, 郑劭彦. 基于元胞自动机的黄河三角洲互花米草种群扩散动态模拟. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2021, 57(1): 121-127.
- [21] 王娟, 刘红玉, 李玉凤, 刘伶, 谢富斌. 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.
- [22] 徐伟伟, 王国祥, 刘金娥, 陈正勇, 杭子清, 王会. 苏北海滨湿地互花米草种群繁殖方式. 生态学报, 2014, 34(14): 3839-3847.
- [23] 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.
- [24] 张敏, 宫兆宁, 赵文吉, 阿多. 近 30 年来白洋淀湿地景观格局变化及其驱动机制. 生态学报, 2016, 36(15): 4780-4791.
- [25] 闫欣, 牛振国. 1990—2017 年白洋淀的时空变化特征. 湿地科学, 2019, 17(4): 436-444.
- [26] 雷金睿, 陈宗铸, 陈毅青, 陈小华, 李苑菱, 吴庭天. 1990—2018 年海南岛湿地景观格局演变及其驱动力分析. 生态环境学报, 2020, 29(1): 59-70.
- [27] 侯蒙京, 高金龙, 葛静, 李元春, 刘洁, 殷建鹏, 冯琦胜, 梁天刚. 青藏高原东部高寒沼泽湿地动态变化及其驱动因素研究. 草业学报, 2020, 29(1): 13-27.
- [28] 杨尊尊, 段渊古, 高天, 肖波, 付林江, 余婷. 1999-2017 年西咸新区景观格局变化及驱动力研究. 西部林业科学, 2020, 49(1): 99-106, 113-113.
- [29] 覃盈盈, 梁士楚. 外来种互花米草在广西北岸的入侵现状及防治对策. 湿地科学与管理, 2008, 4(2): 47-50.
- [30] 莫竹承, 范航清, 刘亮. 广西北岸潮间带互花米草调查研究. 广西科学, 2010, 17(2): 170-174.
- [31] 魏亚男. 基于 LUR 模型的重庆主城区公园绿地格局对 PM_{2.5} 影响研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [32] 万波, 丁浩, 王超. 基于 Google Earth 的浑河断裂带遥感影像解译分析. 防灾减灾学报, 2020, 36(4): 1-8.
- [33] 史培军, 陈晋, 潘耀忠. 深圳市土地利用变化机制分析. 地理学报, 2000, 55(2): 151-160.
- [34] 张文军. 生态学研究方法. 广州: 中山大学出版社, 2007: 167-169.
- [35] 沈永明, 刘咏梅, 陈全站. 江苏沿海互花米草(*Spartina alterniflora* Loisel)盐沼扩展过程的遥感分析. 植物资源与环境学报, 2002, 11(2): 33-38.
- [36] Chuine I, Morin X, Sonié L, Collin C, Fabreguettes J, Degueldre D, Salager J L, Roy J. Climate change might increase the invasion potential of the alien C4 grass *Setaria parviflora* (Poaceae) in the Mediterranean Basin. *Diversity and Distributions*, 2012, 18(7): 661-672.
- [37] 祝振昌, 张利权, 肖德荣. 上海崇明东滩互花米草种子产量及其萌发对温度的响应. 生态学报, 2011, 31(6): 1574-1581.
- [38] 关道明. 中国滨海湿地米草盐沼生态系统与管理. 北京: 海洋出版社, 2009.