

◆特邀栏目◆

广西海岸带互花米草入侵时空动态遥感监测研究*

陶艳成^{1,2**}, 潘良浩¹, 刘文爱¹, 孙仁杰¹, 葛文标¹

(1. 广西科学院广西海洋科学院(广西红树林研究中心), 广西红树林保护与利用重点实验室, 广西北海 536007; 2. 厦门大学环境与生态学院, 滨海湿地生态系统教育部重点实验室, 福建厦门 361102)

摘要:为全面了解和析外来入侵物种互花米草(*Spartina alterniflora*)在广西海岸带的时空分布特征与扩散趋势,应用遥感与GIS技术手段,基于多源多时序高分辨率遥感影像对广西海岸带互花米草进行时空动态监测,并结合历史调查资料进行分析。结果表明:2001、2008、2010、2013、2016、2019年广西海岸带互花米草面积分别为46.90、204.05、331.23、608.75、776.99、1320.79 hm²;2001-2019年,互花米草面积增加了1273.89 hm²,年均增长率为20.38%。2019年,北海市海岸带互花米草总面积为1317.06 hm²,占广西互花米草总面积的99.72%;钦州市互花米草面积为3.68 hm²;互花米草已入侵防城港市,面积约为0.05 hm²。丹兜海、铁山港湾、廉州湾及北海银滩至营盘镇近岸滩涂是互花米草集中扩张区,且仍处于快速增长阶段;防城港市企沙半岛东侧近岸滩涂及北海市涠洲岛均已出现互花米草零星斑块;广西山口红树林生态国家级自然保护区内互花米草扩散有所减缓,而广西合浦儒艮国家级自然保护区内仍处于增长阶段。广西海岸带互花米草入侵仍处于快速扩张状态,且呈由东往西扩散的趋势。本研究可为广西海岸带互花米草治理提供基础数据和理论指导,对湿地保护、管理和可持续发展具有重要意义。

关键词:互花米草;生物入侵;时空动态;高分辨率遥感监测;广西海岸带

中图分类号:P962 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2023)04-0776-11

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20230928.017

互花米草(*Spartina alterniflora*)是禾本科(Gramineae)米草属(*Spartina*)多年生湿生草本植物,原产北美洲大西洋沿岸,从加拿大的纽芬兰到墨西哥湾沿岸都有分布,主要生长于平均海平面至平均高潮位之间的广阔滩面以及河口湾^[1]。互花米草具有极强

的耐盐、耐淹和扩散能力^[2],以及显著的促淤造陆和消浪护堤作用,因此被许多国家引种,如今成为全球性的海滩外来入侵植物^[3]。互花米草的大量繁殖可替代本地原生植物、改变鸟类栖息地、降低生物多样性并危害养殖产业^[4-6],特别是对原本生长在滩涂上

收稿日期:2021-07-11

修回日期:2022-11-25

* 国家自然科学基金区域联合创新重点项目(U21A2022),广西自然科学基金项目(2017GXNSFBA198159),广西红树林保护与利用重点实验室基金项目(GKLMC-22A03)和广西科技计划技术创新引导专项项目(桂科 AC19245001)资助。

【第一作者简介】

陶艳成(1985-),男,在读博士研究生,高级工程师,主要从事滨海湿地遥感与GIS应用研究,E-mail:taoyc@mangrove.org.cn。

【**通信作者】

【引用本文】

陶艳成,潘良浩,刘文爱,等.广西海岸带互花米草入侵时空动态遥感监测研究[J].广西科学,2023,30(4):776-786.

TAO Y C, PAN L H, LIU W A, et al. Study on Spatio-temporal Dynamic Remote Sensing Monitoring of *Spartina alterniflora* Invasion in Guangxi Coastal Zone [J]. Guangxi Sciences, 2023, 30(4): 776-786.

的红树林、海草、土著盐沼植被等海洋生态系统造成了直接的威胁和破坏^[7]。鉴于此,我国于2003年将其列为中国第一批16种外来入侵物种之一^[8]。监测互花米草在海岸带地区的分布与扩散对维护海岸生态系统的可持续发展和安全至关重要^[9,10]。近年来,国内外学者主要利用遥感手段监测区域尺度的互花米草入侵^[11-14],然而这些研究多是基于中低分辨率卫星影像,难以应用于实际的管理和防治工作中。自20世纪70年代末引种广西以来,互花米草在潮间带上迅速扩张繁殖^[15-17]。当前对广西互花米草入侵的研究多集中于生理生态及其对环境的影响^[18,19],尚未见利用多源多时序高分辨率卫星影像监测广西海岸带互花米草时空动态分布信息的相关报道。本研究利用2001-2019年多源多时序高分辨率卫星影像对广西海岸带互花米草进行时空动态变化分析,掌握其入侵现状、时空分布特征和动态扩散趋势,以期为广西互花米草的科学治理、海洋生态环境保护以及海岸滩涂可持续开发利用提供基础数据和理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

广西海岸线东起合浦县与广东接壤的英罗港洗米河口,西至中越交界的北仑河口,东南与海南岛隔海相望,南濒北部湾,地理坐标为东经 $107^{\circ}56' - 109^{\circ}47'$,北纬 $20^{\circ}54' - 21^{\circ}24'$ ^[20]。广西北部湾(广西沿岸地区,包括北海市、钦州市及防城港市)位于北部湾北缘,大陆岸线曲折,全长约1 628.59 km;海岸类型多为冲积平原海岸和台地海岸;气候为南亚热带季风性

表1 用于互花米草信息提取的影像数据源

Table 1 Image data sources used for *S. alterniflora* information extraction

年份 Year	影像类型 Image types	覆盖区域 Coverage areas			空间分辨率 Spatial resolution
		北海市 Beihai City	钦州市 Qinzhou City	防城港市 Fangchenggang City	
2001	SPOT4	√	√	√	HRV 10 m
2008	ALOS/Google image	√	√	√	HRV 2.5 m/RGB 0.5 m
2010	ALOS/Google image	√	√	√	HRV 2.5 m/RGB 0.5 m
2013	GF-1/Google image	√	√	√	PAN 2 m/RGB 0.5 m
2016	GF-1/Google image	√	√	√	PAN 2 m/RGB 0.5 m
2019	GF-1/Google image	√	√	√	PAN 2 m/RGB 0.5 m

1.2.2 影像预处理

应用ENVI5.3遥感图像处理平台,结合参考无人机航拍正射影像、地形图及实测GPS控制点等基

气候,春夏季多暴雨,降水丰沛,多年平均气温为 $22.0 - 23.4^{\circ}\text{C}$,全年平均日照时数为1 561-2 253 h。广西近岸海域为不规则全日潮海区,沿岸有南流江、大风江、钦江、茅岭江等独立入海河流;多天然港湾,从西往东主要分布有珍珠湾、防城港湾、钦州湾、廉州湾、铁山港湾等;拥有全国最大的火山岛——涠洲岛。广西北部湾沿岸分布有红树林、海草床、珊瑚礁等三大典型海洋生态系统,是我国重要的滨海湿地原生分布区^[21]。

1.2 影像数据源及预处理

1.2.1 数据源

互花米草主要生长在海岸潮间带的高潮带上部至中潮带下部,具有广盐性、耐淹性、强繁殖能力等生理特点,为C4植物^[22],潮水上涨时多处于水淹状态,低潮时才会完全裸露。广西北部湾海域属于不规则全日潮海区,全日潮时间仅占60%-70%,平均潮差达2.42 m,为强潮海区^[23]。同时,考虑到处于爆发期的互花米草斑块比较碎小,因此,应选择低潮且无云时期的影像。为提高信息提取精度,本研究选取2001-2019年共6期高分辨率影像进行互花米草信息提取,通过查阅影像获取日潮汐表,所选影像均满足相关要求。具体参数见表1。同时收集研究区相应年份的高精度谷歌影像(Google images)、互花米草历史调查数据、1:10 000地形图、数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)及局部无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)航拍正射影像(采用大疆精灵4 RTK进行采集生成,定位精度达厘米级)等作为辅助数据资料。

础资料,对原始影像进行几何精校正,并作融合、空间增强、镶嵌及裁剪等处理。控制点应选取待纠正影像和参考影像上均有且均匀分布的明显特征地物点,误

差控制在1个像元内。成果影像应保持纹理清晰,色调均匀,便于分辨互花米草与其他植被。

1.3 互花米草空间信息提取

1.3.1 互花米草形态特征

不同空间分辨率多源影像的互花米草形态特征

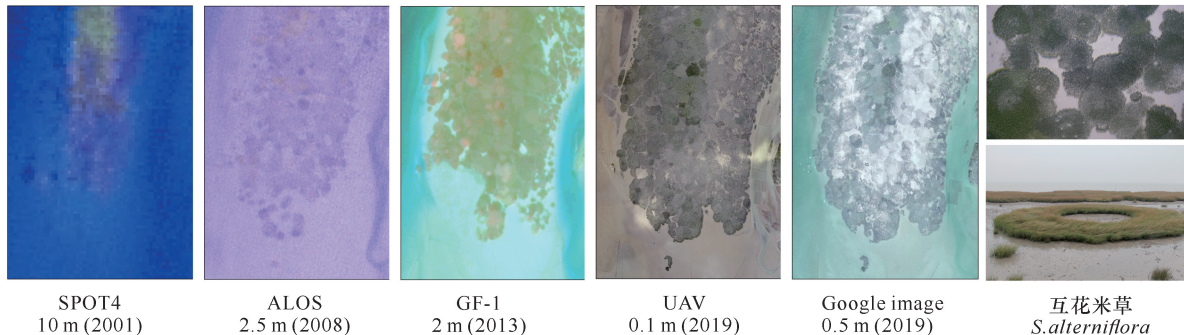


图1 不同空间分辨率多源时序影像的互花米草形态特征

Fig. 1 Morphological characteristics of *S. alterniflora* from multi-source time-series images with different spatial resolutions

1.3.2 信息提取与验证

通过野外踏勘,采集互花米草和红树林湿地样本,记录其GPS坐标信息,建立解译标志。在此基础上采取人机交互式解译方法,在ArcGIS软件平台对广西海岸带红树林和互花米草进行信息提取,将互花米草斑块屏幕矢量化。解译时,尽量做到矢量边界与红树林、互花米草斑块边界重合,对于难以辨别的边界,采用Google Earth影像和以往调查数据作为参考,必要时实地GPS定位进行边界界定。同时,对于历史影像的互花米草判读,应采取由最近影像解译斑块往后倒推的方法进行反复研判,即解译工作应按影像成像时间由“近→远”(2019年→2016年→2013年→2010年→2008年→2001年)开展,以保证互花米草历史数据的准确性。解译完成后,需要选取一定数量的斑块进行野外核查。将解译完成的2019年互花米草数据与影像数据进行叠加,生成野外调查图与KML数据文件,导入手机或手持GPS进行实地定位,开展野外验证工作。经过野外踏查、室内修改、专家讨论等,最终形成2019、2016、2013、2010、2008、2001年共6期广西互花米草信息数据集。

1.3.3 面积精度评价

以斑块重叠率法^[20,24]对互花米草斑块进行解译

不同,构建不同空间分辨率影像下互花米草解译标志,直接关系到信息提取的准确性。根据影像数据源及已有资料,构建同区域多源多时序影像真彩色互花米草解译标志(图1)。

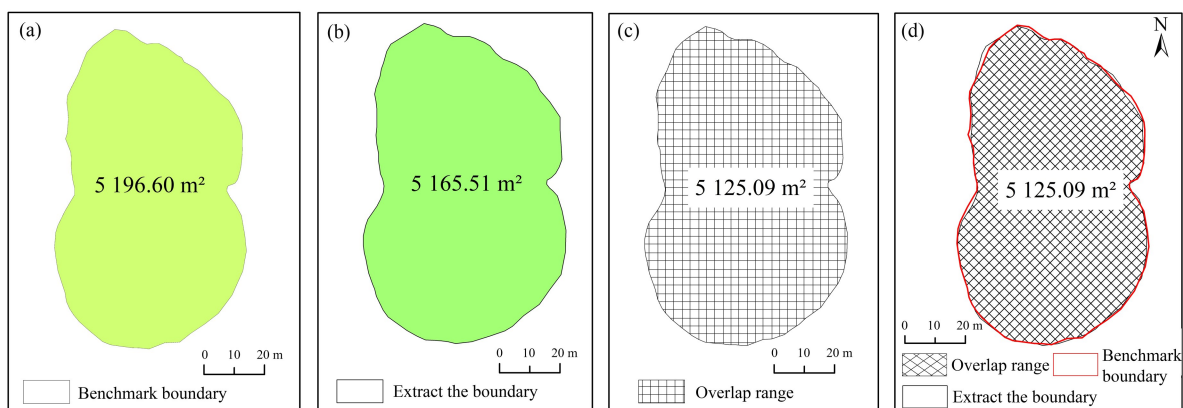
精度验证。原则是需利用更高精度影像解译成果来检验此次与其相对应的解译成果,彼此作对比的影像数据源,其成像时间应尽可能一致,以保证互花米草斑块获取时间一致。验证步骤如下:

(1)在ArcGIS软件平台生成无人机影像或卫星影像的正射影像后进行人机交互式解译,准确提取每个互花米草斑块的边界并计算其面积,作为基准数据。

(2)将基准数据和相对应的影像解译斑块数据进行叠加分析(Intersect),得到一个新的面图层,该图层为两者叠加的重合部分,计算该图层面积。

(3)随机选取若干个互花米草斑块参与验证,逐一对参加验证的斑块进行面积误差和重叠率的计算。图2为2019年单个互花米草斑块验证过程。

随机选取研究区域范围内部分互花米草斑块进行验证,经计算统计后,由无人机影像提取的部分互花米草斑块基准总面积为20.86 hm²,由工作影像提取的总面积为20.43 hm²,通过叠加分析得到两者斑块重叠总面积为19.75 hm²,互花米草总体面积误差为2.06%,斑块面积总体重叠率达94.68%,斑块面积和空间位置误差均较小,说明此次互花米草面积解译结果较为可靠。



(a) Boundary extracted by UAV images (2019); (b) Boundary extracted from working images (2019); (c) Overlapping scope between (a) & (b); (d) Overlapping patches.

图2 互花米草解译精度验证过程

Fig. 2 Interpretation accuracy verification for *S. alterniflora*

2 结果与分析

2.1 互花米草分布及其数量变化趋势

2.1.1 互花米草空间分布及数量状况

以广西北部湾海岸带 2001–2019 年的互花米草空间分布数据分析互花米草动态变化情况(表 2、表

3、图 3、图 4)。2001、2008、2010、2013、2016、2019 年广西海岸带互花米草入侵面积分别为 46.90、204.05、331.23、608.75、776.99、1 320.79 hm^2 ，斑块个数分别为 27、689、3 850、4 701、7 130、9 166 个。2001–2019 年互花米草面积增加了 1 273.89 hm^2 ，年均增长率为 20.38%。

表 2 2001–2019 年广西互花米草面积及变化趋势

Table 2 Area and change trend of *S. alterniflora* in Guangxi from 2001 to 2019

海域/市域 Coastal waters/City domains	面积/ hm^2 Area/ hm^2					
	2001	2008	2010	2013	2016	2019
East coast of Qisha Peninsula						0.05
Dafengjiang River		1.75	4.25	6.26	10.68	14.38
Lianzhou Bay		1.59	7.33	54.63	99.37	247.64
Beihai Silver Beach to Yingpan Town		4.22	27.22	67.61	121.48	193.86
Tieshangang Bay		9.13	30.42	93.86	119.22	275.56
Dandou Sea	46.65	176.45	236.74	339.01	349.41	447.20
Shatian Town to Yingluogang Bay	0.25	10.91	25.26	47.39	76.82	121.62
Weizhou Island						0.02
Fangchenggang City						0.05
Qinzhou City		0.03	0.07	0.13	0.57	3.68
Beihai City	46.65	204.02	331.16	608.62	776.42	1 317.06
Total of city domains	46.90	204.05	331.23	608.75	776.99	1 320.79

表 3 2001 - 2019 年广西互花米草斑块数量及变化趋势

Table 3 Patch number and change trend of *S. alterniflora* in Guangxi from 2001 to 2019

海域/市域 Coastal waters/City domains	斑块数量/个 Number of patches/piece					
	2001	2008	2010	2013	2016	2019
East coast of Qisha Pennisala						6
Dafengjiang River		27	29	68	96	221
Lianzhou Bay		38	173	3 352	3 184	2 529
Beihai Silver Beach to Yingpan Town		78	648	271	894	1 188
Tieshangang Bay		176	619	297	1 742	3 546
Dandou Sea	24	322	2 131	470	658	1 024
Shatian Town to Yingluogang Bay	3	48	250	243	556	628
Weizhou Island						8
Fangchenggang City						9
Qinzhou City		1	1	3	21	197
Beihai City	27	688	3 849	4 698	7 109	8 960
Total of city domains	27	689	3 850	4 701	7 130	9 166

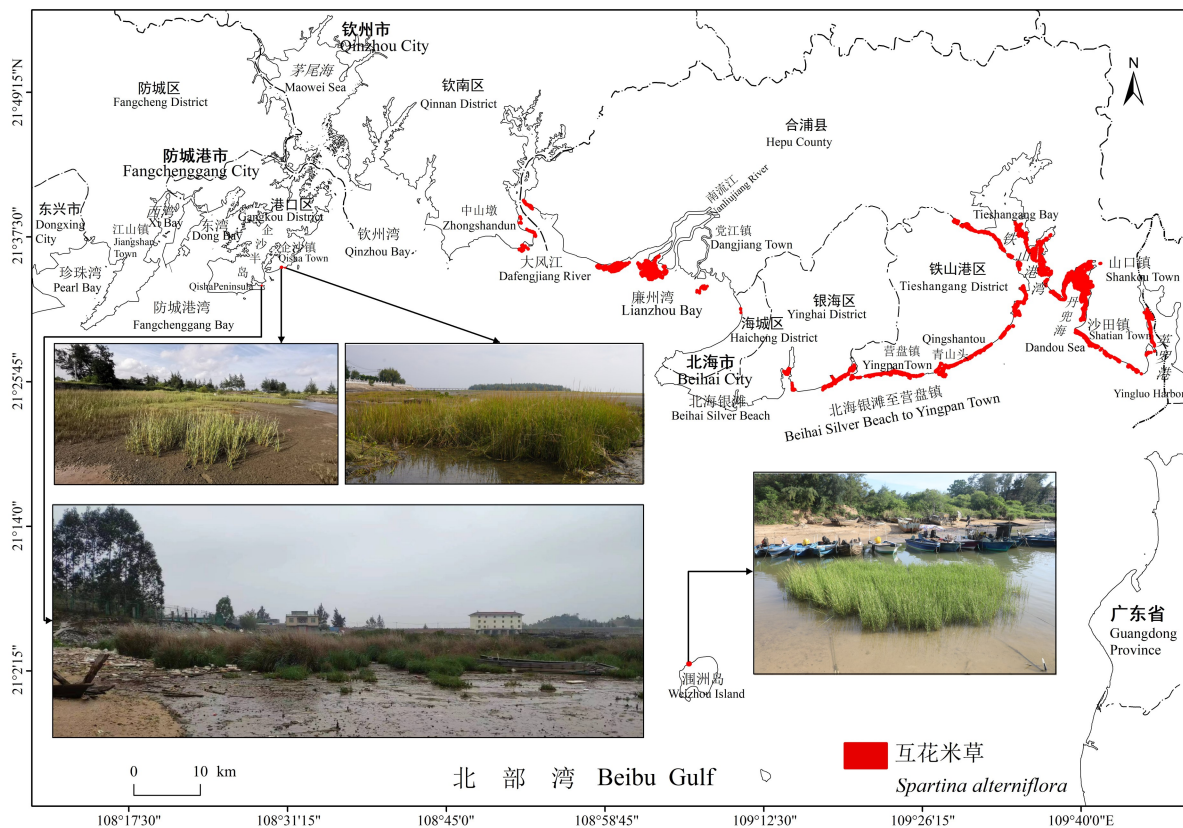
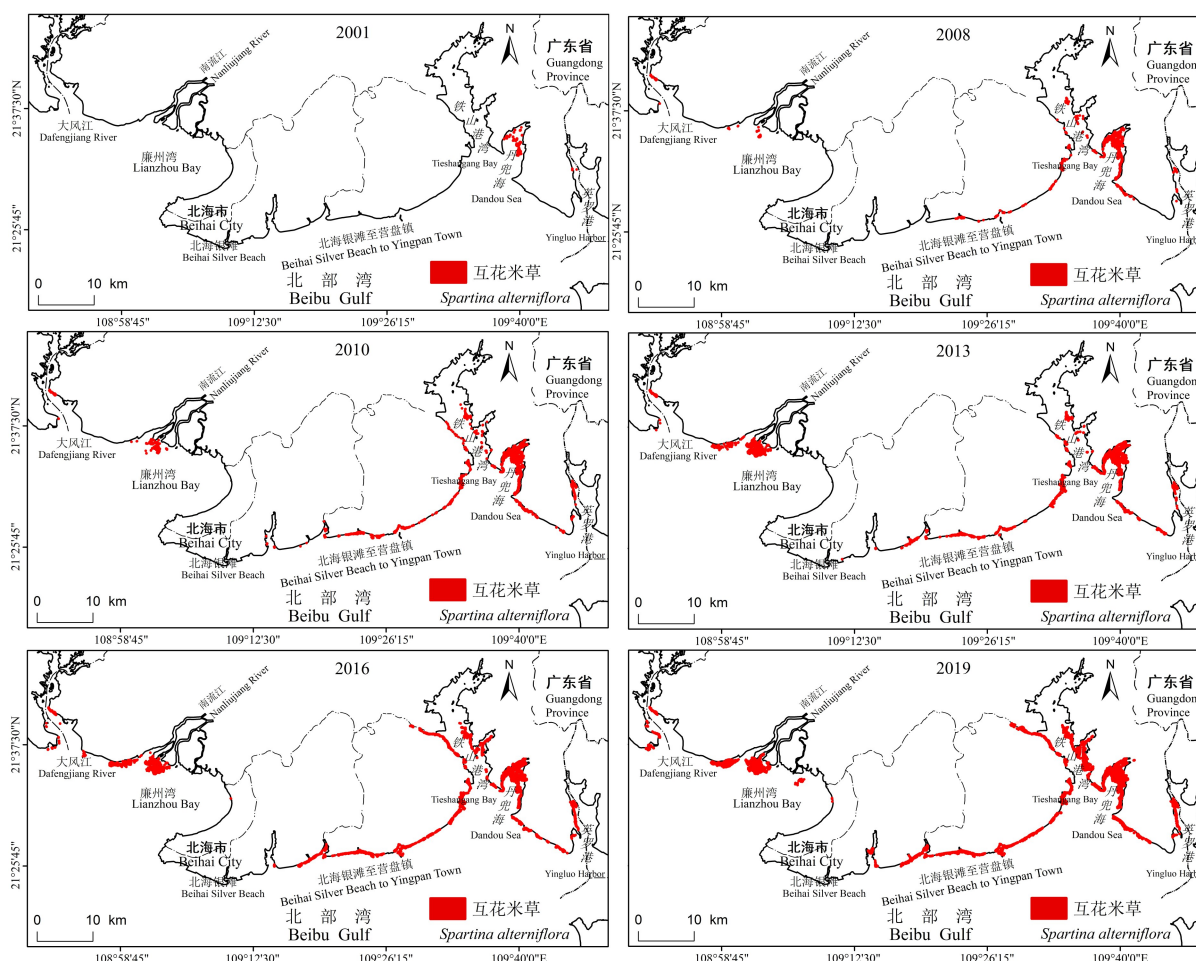


图 3 2019 年广西海岸带互花米草空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of *S. alterniflora* in Guangxi coastal zone in 2019



Distribution data of Fangchenggang City and Weizhou Island are not included in 2019 (shown in Fig. 3)

图4 2001-2019年广西海岸带互花米草入侵时空分布

Fig. 4 Spatial and temporal distribution of *S. alterniflora* invasion in Guangxi coastal zone from 2001 to 2019

按市级行政区域统计分析,互花米草主要分布在北海市和钦州市所辖海岸带。北海市2001-2019年互花米草入侵面积及斑块数量均呈增加趋势,面积由2001年的46.65 hm²增加到2019年的1317.06 hm²,斑块数则由27个增加到8960个。钦州市海岸带在2001年还未监测到互花米草入侵,但2008年已有互花米草面积0.03 hm²,至2019年达到3.68 hm²。按2019年数据统计,北海市互花米草入侵面积占广西互花米草入侵总面积的99.72%。新发现防城港市海域互花米草分布点有3处,位于企沙半岛东侧近岸滩涂,该处总面积约0.05 hm²。涠洲岛互花米草入侵已有相关文献报道^[25],笔者于2020年5月21日进行GPS现场绕测,获得互花米草分布面积约为0.02 hm²,零星分布有互花米草斑块8个。

考虑到影像数据的空间分辨率一致性,以2008年为基期年统计分析(表4)。2008-2019年,广西海岸带互花米草入侵总面积增加了1116.74 hm²,年

均增长率为18.50%;斑块数量增加了8477个,年均增长率为26.53%。2008-2010年间斑块数量增长率达136.39%,说明互花米草在此间呈爆发式扩散增长。虽然2013-2016年面积增长率较低,为8.47%,但斑块数量平均增长率却达14.89%,表明互花米草入侵区域进一步增加。各时期入侵面积及斑块数量平均增长率均为正数,可见广西海岸带互花米草仍处于快速扩张期。空间分布上,互花米草沿海岸滩涂纵向和横向扩散,从引种点最远已扩散到达防城港市港口区企沙半岛东侧近岸滩涂(图3)。

从各海湾或海岸角度分析互花米草入侵状况(图4)。2001年,互花米草仅分布在丹兜海及英罗港湾。2008年,互花米草自东向西已入侵到大风江口西岸,此时丹兜海正处于互花米草爆发期,离丹兜海最近的铁山港湾是互花米草扩散的主要区域,斑块个数达176个,而平均斑块面积仅为0.05 hm²,说明斑块扩散破碎化,呈多点定植状态;廉州湾已出现互花米草

零星斑块。2010年,除丹兜海外,北海银滩至营盘镇互花米草面积与斑块数量均增加较多,其次为沙田镇至英罗港湾沿岸,处于互花米草的稳定扩张期。2013年,廉州湾互花米草入侵面积为54.63 hm²,但斑块数却达到了3 352个,平均斑块面积仅为0.02 hm²,处于互花米草入侵的快速定植期;这一时期丹兜海、北海银滩至营盘镇、铁山港湾的斑块数量有较大幅度减少,意味着相当多的碎小斑块连成了整片,互花米草面积进一步增加。2016年,丹兜海互花米草入侵较2013年面积增加放缓,但斑块数有所增加,表明互花米草继续往周边滩涂扩散定植,此阶段铁山港湾仍然是互花米草的主要扩散地,斑块数量较2013年增加了1 445个,分布于铁山港中内湾近岸滩涂。2019年,廉州湾、铁山港湾互花米草面积较2016年分别增加了148.27、156.34 hm²,处于互花米草的爆发期,并有进一步扩张的趋势。

表4 2008-2019年广西互花米草面积及斑块数量平均增长率

Table 4 Average growth rate of *S. alterniflora* area and patch number in Guangxi from 2008 to 2019

时间 Times	面积平均增长率/% Average growth rate of area/%	斑块数量平均增长率/% Average growth rate of number of patches /%
2008-2010	27.41	136.39
2010-2013	22.49	6.88
2013-2016	8.47	14.89
2016-2019	19.35	8.73
2008-2019	18.50	26.53

综上,互花米草面积及斑块数量均处于急速递增阶段,表明广西海岸带互花米草总体上仍处于爆发增长期。北海市互花米草爆发点主要位于北海银滩至营盘镇、廉州湾、铁山港湾、沙田镇至英罗港近岸滩涂;在钦州大风江西海岸互花米草已进入定植稳定扩张阶段;防城港市港口区企沙半岛东侧近岸滩涂互花米草入侵尚处于扩散早期阶段,应及时清理与防控。

2.1.2 斑块面积特征变化趋势

从广西海岸带不同年度互花米草斑块面积特征看(表5),2001年斑块平均面积最大,为1.74 hm²,2010年面积最小,为0.09 hm²;2019年最大斑块面积已达56.58 hm²;2001年时面积大于1 hm²的斑块数量仅为5个,到了2019年已达201个,2001-2019年,斑块面积大于1、5、10 hm²的斑块数量基本

均呈增长趋势。随着互花米草入侵的加速,尽管斑块平均面积呈不规则变化趋势,但是最大斑块的面积仍在继续扩张,大面积斑块互花米草数量明显增加,大量零星的互花米草斑块逐渐形成草滩。

表5 不同年度互花米草斑块面积特征

Table 5 Characteristics of *S. alterniflora* patch area in different years

年度 Year	斑块平均面积/ hm ² Average area of patch/ hm ²	最大斑块面积/ hm ² Area of the biggest patch/hm ²	斑块数量/个 Number of patches/piece		
			≥10 hm ²	≥5 hm ²	≥1 hm ²
2001	1.74	28.63	1	1	5
2008	0.30	46.84	4	6	30
2010	0.09	42.64	4	8	60
2013	0.13	46.44	11	26	92
2016	0.11	47.21	11	33	114
2019	0.14	56.58	22	54	201

2.2 自然保护区互花米草时空变化

广西山口红树林生态国家级自然保护区由合浦县沙田半岛东侧的英罗港和西侧的丹兜海两个区域组成,保护区总面积8 000 hm²,其中海域面积4 970.5 hm²,陆域面积3 029.5 hm²,分别占保护区总面积的62.1%和37.9%,总海岸线长40.9 km^[26],是我国重要的红树林集中分布区。自引种以来,互花米草大量繁殖,对保护区内的红树林、海草床等生态系统造成巨大影响。

广西合浦儒艮国家级自然保护区位于广西北海市合浦县,东起合浦县山口镇英罗港,西至沙田镇海域,海岸线全长约43 km,总面积350 km²,是我国目前唯一的以儒艮为主要保护对象的自然保护区,分布有大面积的海草生态系统,生物多样性丰富。

基于各保护区互花米草入侵面积、斑块数量及变化趋势(表6、表7),统计分析2001-2019年保护区互花米草入侵时空动态特征。结果表明:广西山口红树林生态国家级自然保护区互花米草入侵面积从2001年的46.90 hm²增长到2019年的485.43 hm²,斑块数量从27个增长到1 483个,分别增长了约9、54倍;互花米草入侵面积每时段均呈快速增加趋势,2001-2010年斑块数量急剧增加,达到2 068个,说明红树林保护区内此阶段互花米草处于快速定植扩张爆发期;2010-2013年斑块数量急剧下降,减少了1 484个,表明斑块破碎化程度降低,互花米草成功定植后稳定扩张;2013-2016年,互花米草入侵面积

增加有所减缓,仅增加了 20.51 hm²,一定程度上扩散有所趋缓,但 2016-2019 年面积增加了 110.49 hm²,同时斑块数量增加了 496 个,表明该阶段广西山口红树林生态国家级自然保护区互花米草入侵呈持续扩张特点。以 2001 年为基期年,2001-2019 年,广西山口红树林生态国家级自然保护区互花米草

表 6 2001-2019 年广西互花米草入侵自然保护区面积及变化趋势

Table 6 Area and change trend of *S. alterniflora* invasion in nature reserves in Guangxi from 2001 to 2019

名称 Name	面积/hm ² Area/hm ²					
	2001	2008	2010	2013	2016	2019
Guangxi Shankou Mangrove Ecological National Nature Reserve	46.90	175.39	241.74	354.43	374.94	485.43
Guangxi Hepu Dugong National Nature Reserve	0	3.85	8.60	20.52	35.63	61.25

表 7 2001-2019 年广西互花米草入侵自然保护区斑块数量及变化趋势

Table 7 Number and change trend of patches of invasive *S. alterniflora* in Guangxi Nature Reserves from 2001 to 2019

名称 Name	斑块数量/个 Number of patches/piece					
	2001	2008	2010	2013	2016	2019
Guangxi Shankou Mangrove Ecological National Nature Reserve	27	317	2 095	611	987	1 483
Guangxi Hepu Dugong National Nature Reserve	0	14	106	108	115	182

由于本研究所使用的影像分辨率所限,广西合浦儒艮国家级自然保护区 2001 年暂未发现互花米草的分布,而 2008 年时已监测到互花米草入侵面积 3.85 hm²,至 2019 年达 61.25 hm²,斑块数从 14 个增长到 182 个,分别增长了约 15、12 倍。以 2008 年为基期年,2008-2019 年广西合浦儒艮国家级自然保护区互花米草面积和斑块数量年均增长率分别为 28.59%、26.26%,面积总体上呈正增长趋势,斑块数量则有所下降,表明广西合浦儒艮国家级自然保护区互花米草正处于稳定扩张期,其面积将继续呈增加态势。

3 讨论

3.1 关于广西互花米草入侵状况的争议和待解决的数据偏差问题

广西有文献记录的引种互花米草活动有 2 次,一次是 1979 年由合浦县科学技术委员会(简称合浦县科委)与南京大学合作,在山口镇山角海滩和党江镇沙涌船厂海滩分别引种 0.67 hm² 和 0.27 hm² 的互花米草^[27],另一次是 1994 年广西红树林研究中心在山口镇北界村盐场海滩移植了 0.34 hm² 的互花米草^[28]。2008 年调查发现互花米草主要分布在丹兜

面积增加了 438.52 hm²,平均增长率为 13.86%,相对广西海岸带整体而言扩张趋势有所减缓。一些保护区内红树林林缘及潮沟两侧淤积滩涂废弃虾塘成为互花米草新的扩张区域,面积及斑块数呈增加趋势。

海、英罗港(山口镇北界村海滩)、北海银滩至营盘镇(青山头)近岸滩涂^[29];2013 年调查发现互花米草已到达大风江东岸,入侵面积为 3.33 hm²^[16];2016 年调查发现互花米草入侵已到达大风江河口西岸中三墩村南部滩涂,面积为 0.57 hm²^[17]。然而笔者于 2019 年所做的调查发现,互花米草 2008 年已到达钦州市大风江东岸,2013 年时已入侵到大风江西岸中三墩村南部滩涂,面积为 0.13 hm²,斑块数量为 3 个。防城港市江山半岛曾发现一处互花米草斑块而后被人为清理^[16],此次 2019 年遥感监测并结合地面调查,发现防城港市港口区企沙半岛东侧近岸滩涂有互花米草斑块,面积为 0.05 hm²,斑块数量为 9 个。以上分析表明广西海岸带互花米草 2019 年已入侵到北海市、钦州市、防城港市海域滩涂。互花米草 2013 年仅在北海市有分布^[29]的结论尚需探讨。

查阅广西互花米草引种历史资料并结合近年来发表的有关广西海岸带互花米草空间分布的相关研究结果(表 8)可知,因研究方法、影像数据类型和技术手段的差异,通过遥感手段获取互花米草的面积也存在较大差异。采用 GPS 绕测斑块,野外工作量大,且大多滩涂人工难以到达,还受天气、位置、卫星传输等因素的影响,加上解译人员的经验不同,精度上会

有一定误差;采用遥感影像监测互花米草入侵斑块(尤其是较小斑块),对空间分辨率要求较高,且需进

表 8 广西互花米草入侵面积状况回顾

Table 8 A retrospect on *S. alterniflora* invasion area in Guangxi

调查时间 Survey time	数据源 Data source	影像分辨率 Image resolution	获取方法 Acquisition method	斑块数量 Number of patch	面积/hm ² Area/hm ²	参考文献 References
1979	Introduction				0.94	[27]
1994	Introduction				0.34	[28]
2003			Statistical investigation		167.00	[15]
2008			GPS measurement	23	389.20	[29]
2009	Satellite images/Aerial photo		Image interpretation		300.00	[30]
2011	Satellite images/Aerial photo		Image interpretation		357.20	[30]
2013	GF-1	2 m/8 m				
	ZY-3	2.1 m/6 m				
	ZY102C	2.36 m/10 m	Image interpretation	3 623	602.27	[16]
2016	GF-1	2 m/8 m	Image interpretation	5 191	686.48	[17]

3.2 广西互花米草未来扩散的趋势

互花米草具有耐淹、耐盐、高适应性、高繁殖及遗传等生理特性,种群能快速扩张爆发^[22],其扩散模式呈点源扩散、多点爆发的特点^[1]。互花米草在某处定居后,会通过有性和无性繁殖进行扩散,以占据更大的生境空间^[31,32],广西互花米草的扩散规律也表现出类似“引种-定居-扩散”的模式^[29,33]。始于1979年的广西互花米草引种活动,除丹兜海成功外,廉州湾以失败告终^[28],2008年营盘镇青山头成为新的引种区,现实中互花米草以丹兜海、营盘镇青山头、廉州湾为引种中心向周边海岸区域滩涂扩散^[16]。由互花米草空间分布及斑块特征(表2-4、图3)可知,丹兜海、铁山港中外湾、英罗港湾已形成较大面积的互花米草斑块,虽周边分布有茂密的红树林,互花米草难以入侵,但稀疏低矮的红树林区域仍是互花米草入侵风险较高区域。廉州湾虽然沿岸分布有大面积的红树林,但是地处南流江河口三角洲,滩涂广阔,河口常年泥沙淤积,为互花米草提供了良好的生境,可以预测互花米草在此区域将会继续向周边滩涂扩散爆发。铁山港内湾多为泥沙质滩涂,且该区域红树林外缘分布有大量光滩,坡度较缓,适合比原生先锋物种白骨壤(*Avicennia marina*)更耐淹的互花米草定植和生长,从分布动态变化可以看出,该区域近年来定植较多小斑块互花米草,成为互花米草面积增加的主要增长区域之一。营盘镇青山头互花米草入侵造成了南康江河口淤积抬升,互花米草大量在外滩扩散,目前

行大量的野外验证才能降低数据误差,以便准确揭示广西海岸带互花米草入侵时空演变及入侵历史。

已进入爆发阶段。大风江口红树林高大密集,滩涂面积较小,互花米草的生存空间有限,但仍会沿着红树林林缘继续向两侧扩散。丹兜海是广西山口红树林生态国家级自然保护区所属区域,生长有茂密的红树林,研究发现,该保护区内与潮沟相连的废弃虾塘是互花米草扩散的主要地点^[16],2016年监测发现,与潮汐连通的废弃虾塘中互花米草的分布有扩散趋势^[17],2019年互花米草斑块分布也有部分入侵到废弃虾塘。另外,由于人为或自然原因造成的红树林退化会导致林相稀疏,互花米草会入侵至林内,因此,保护区沿岸废弃虾塘与林相稀疏的红树林湿地可能会成为互花米草入侵新的爆发点。防城港市港口区企沙半岛东侧近岸滩涂和北海市涠洲岛互花米草尚处于早期定植阶段,短时间内应不会爆发扩散,但应及时治理以防止其继续扩张。而廉州湾、铁山港中内湾、北海银滩至营盘镇海岸以及大风江口西岸由于其良好的生境条件,仍将是互花米草扩散的主要区域,未来互花米草分布范围将会进一步扩大。

4 结论

通过分析2001-2019年6个时相的广西海岸带互花米草入侵动态分布信息,可以发现:

(1)2019年,广西海岸带互花米草入侵面积为1 320.79 hm²,斑块数9 166个。广西海岸带互花米草入侵仍处于快速扩张阶段,2001-2019年,面积增长了1 273.89 hm²,年均增长率为20.38%。以行政

区划分,互花米草主要分布在北海市、钦州市,北海市互花米草入侵面积占广西互花米草入侵总面积的99.72%;以港湾划分,互花米草主要分布在丹兜海、铁山港湾、廉州湾近岸滩涂。2001-2016年,互花米草扩散速率总体呈下降趋势,2016-2019年总体扩散速率有所上升。

(2)大风江口西岸滩涂互花米草目前仍处于定植阶段,廉州湾、铁山港中内湾、北海银滩至营盘镇海岸互花米草斑块已处于快速爆发阶段,未来将占据更大的滩涂空间。随着互花米草扩散加快,大斑块数量呈增加趋势特征。广西山口红树林生态国家级自然保护区内互花米草扩散有所减缓,但不排除继续往红树林区扩散的可能性;广西合浦儒艮国家级自然保护区互花米草仍处于爆发阶段。防城港市港口区企沙半岛东侧近岸滩涂与北海涠洲岛均已出现互花米草小斑块。广西海岸带互花米草入侵趋势总体上呈由东往西的扩散规律。

(3)遥感数据的精度对互花米草信息提取会产生较大影响,应尽可能采用高分辨率数据源对互花米草进行监测以保证数据的准确性和可操作性,以满足管理部门的需要。

(4)必须要高度重视互花米草入侵对广西近岸海洋生态系统带来的威胁,积极采取相应措施综合治理和防控互花米草在广西北部湾海岸带的扩散,以保护好该区域海洋典型生态系统的完整性。

参考文献

- [1] 邓自发,安树青,智颖飙,等. 外来种互花米草入侵模式与爆发机制[J]. 生态学报,2006,26(8):2678-2686.
- [2] 袁月,李德志,王开运. 芦苇和互花米草入侵性研究进展[J]. 湿地科学,2014,12(4):533-538.
- [3] 陈中义,李博,陈家宽. 米草属植物入侵的生态后果及管理对策[J]. 生物多样性,2004,12(2):280-289.
- [4] AN S Q, GU B H, ZHOU C F. *Spartina* invasion in China: implications for invasive species management and future research [J]. Weed Research, 2007, 47: 183-191.
- [5] CHUNG C H. Forty years of ecological engineering with *Spartina* plantations in China [J]. Ecological Engineering, 2006, 27: 49-57.
- [6] LU J B, ZHANG Y. Spatial distribution of an invasive plant *Spartina alterniflora* and its potential as biofuels in China [J]. Ecological Engineering, 2013, 52: 175-181.
- [7] 李加林. 互花米草海滩生态系统及其综合效益:以江浙沿海为例[J]. 宁波大学学报(理工版), 2004, 17(1): 38-42.
- [8] 顾欣,马力. 我国公布首批外来入侵物种名单[J]. 生态经济, 2003, 4: 78.
- [9] LEVIN L A, NEIRA C, GROSHOLZ E D. Invasive cordgrass modifies wetland trophic function [J]. Ecology, 2006, 87(2): 419-432.
- [10] ZHANG Y H, HUANG G M, WANG W Q, et al. Interactions between mangroves and exotic *Spartina* in an anthropogenically disturbed estuary in southern China [J]. Ecology, 2012, 93(3): 588-597.
- [11] ZHANG D H, HU Y M, LIU M, et al. Introduction and spread of an exotic plant, *Spartina alterniflora*, along coastal marshes of China [J]. Wetlands, 2017, 37(6): 1181-1193.
- [12] LIU M Y, MAO D H, WANG Z M, et al. Rapid invasion of *Spartina alterniflora* in the coastal zone of mainland China: new observations from Landsat OLI images [J]. Remote Sensing, 2018, 10(12): 1933.
- [13] ZHU X D, MENG L X, ZHANG Y H, et al. Tidal and meteorological influences on the growth of invasive *Spartina alterniflora*: evidence from UAV remote sensing [J]. Remote Sensing, 2019, 11(10): 1208.
- [14] TIAN J Y, WANG L, YIN D M, et al. Development of spectral-phenological features for deep learning to understand *Spartina alterniflora* invasion [J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 242: 111745.
- [15] 覃盈盈,梁士楚. 外来种互花米草在广西海岸的入侵现状及防治对策[J]. 湿地科学与管理, 2008, 4(2): 47-50.
- [16] 潘良浩,史小芳,陶艳成,等. 广西海岸互花米草分布现状及扩散研究[J]. 湿地科学, 2016, 14(4): 464-470.
- [17] 陶艳成,潘良浩,范航清,等. 广西海岸潮间带互花米草遥感监测[J]. 广西科学, 2017, 24(5): 483-489.
- [18] 陈圆,张新德,韦江玲. 广西近岸海域互花米草侵害与防控方法分析[J]. 南方国土资源, 2012, 8: 20-22, 25.
- [19] 赵彩云,李俊生,宫璐,等. 广西北海市滨海湿地互花米草入侵对大型底栖动物的影响[J]. 湿地科学, 2014, 12(6): 733-739.
- [20] 李春干,谭必增. 基于“3S”的红树林资源调查方法研究[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 215-221.
- [21] 范航清. 红树林: 海岸环保卫士[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 2000.
- [22] 关道明. 中国滨海湿地米草盐沼生态系统与管理[M]. 北京: 海洋出版社, 2009.
- [23] 梁士楚. 广西红树植物群落特征的初步研究[J]. 广西科学, 2000, 7(3): 210-216.
- [24] 李春干. 红树林遥感信息提取与空间演变机理研究[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [25] 邱广龙,潘良浩,王欣,等. 广西涠洲岛滨海湿地潮下带海草、红树林与互花米草的分布和群落结构特征[J]. 应用海洋学学报, 2021, 40(1): 56-64.
- [26] 广西山口红树林生态自然保护区管理处. 广西山口红树林生态自然保护区总体规划(2011-2020)报告[R]. [出版地不详: 出版者不详], 2013.
- [27] 吴敏兰,方志亮. 大米草与外来生物入侵[J]. 福建水产, 2005, 1: 56-59.
- [28] 何斌源,莫竹承. 红海榄人工苗光滩造林的生长及胁迫

- 因子研究[J]. 广西科学院学报, 1995, 11(3/4): 37-42.
- [29] 莫竹承, 范航清, 刘亮. 广西海岸潮间带互花米草调查研究[J]. 广西科学, 2010, 17(2): 170-174.
- [30] 万华伟, 杨一鹏, 王昌佐. 基于遥感技术的广西北海市入侵植物互花米草监测和动态扩展分析[C]. 生物多样性评估国际研讨会. [出版地不详: 出版者不详], 2013.
- [31] CAREY J R. The incipient Mediterranean fruit fly population in California: implications for invasion biology [J]. Ecology, 1996, 77(6): 1690-1697.
- [32] SUAREZ A V, HOLWAY D A, CASE T J. Patterns of spread in biological invasions dominated by long-distance jump dispersal: insights from Argentine ants [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2001, 98(3): 1095-1100.
- [33] 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[J]. 植物资源与环境学报, 2002, 11(2): 33-38.

Study on Spatio-temporal Dynamic Remote Sensing Monitoring of *Spartina alterniflora* Invasion in Guangxi Coastal Zone

TAO Yancheng^{1,2**}, PAN Lianghao¹, LIU Wen'ai¹, SUN Renjie¹, GE Wenbiao¹

(1. Guangxi Key Laboratory of Mangrove Conservation and Utilization, Guangxi Academy of Marine Sciences (Guangxi Mangrove Research Center), Guangxi Academy of Sciences, Beihai, Guangxi, 536007, China; 2. Key Laboratory of the Ministry of Education for Coastal and Wetland Ecosystems, College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen, Fujian, 361102, China)

Abstract: In order to fully understand and analyze the spatio-temporal distribution characteristics and diffusion trend of the invasive alien species *Spartina alterniflora* in the coastal zone of Guangxi, remote sensing and GIS techniques were used to monitor the spatial and temporal dynamics of *S. alterniflora* in the coastal zone of Guangxi based on multi-source and multi-temporal high-resolution remote sensing images, and the historical survey data were analyzed. The results showed that the area of *S. alterniflora* in Guangxi coastal zone in 2001, 2008, 2010, 2013, 2016 and 2019 were 46.90, 204.05, 331.23, 608.75, 776.99 and 1 320.79 hm², respectively. From 2001 to 2019, the area of *S. alterniflora* increased by 1 273.89 hm², with an average annual growth rate of 20.38%. In 2019, the total area of *S. alterniflora* in the coastal zone of Beihai City was 1 317.06 hm², accounting for 99.72% of the total area of *S. alterniflora* in Guangxi. The area of *S. alterniflora* in Qinzhou City was 3.68 hm². *S. alterniflora* has invaded Fangchenggang City, with an area of about 0.05 hm². Dandou Sea, Tieshan Bay, Lianzhou Bay and Beihai Silver Beach to Yingpan Town nearshore tidal flats are concentrated expansion areas of *S. alterniflora*, which are still in the stage of rapid increase. Scattered patches of *S. alterniflora* have appeared in the coastal tidal flats on the east side of Qisha Peninsula in Fangchenggang City and Weizhou Island in Beihai City. The diffusion of *S. alterniflora* in Guangxi Shankou Mangrove National Nature Reserve has slowed down, while it is still in the increase stage in Hepu Dugong National Nature Reserve of Guangxi. The invasion of *S. alterniflora* in Guangxi coastal zone is still in a state of rapid expansion and shows a trend of spreading from east to west. This study can provide basic data and theoretical guidance for the management of *S. alterniflora* in the coastal zone of Guangxi, and is of great significance for wetland protection, management and sustainable development.

Key words: *Spartina alterniflora*; biological invasion; spatio-temporal dynamics; high resolution remote sensing monitoring; coastal zone of Guangxi

责任编辑: 陆雁