

DOI:10.20016/j.cnki.hykyfjgl.20230607.006

广东和广西滨海盐沼遥感调查与分析

董迪^{1,2}, 贾后磊^{1,3}, 田松^{1,2}, 邹智奎¹, 江瀚笙¹, 魏征^{1,2}, 许艳⁴,
曾纪胜^{1,2}, 孙玉超^{1,2}, 陈启东^{1,2}, 杨帆^{1,2}, 邓昊文¹, 李雪瑞¹

(1. 国家海洋局南海规划与环境研究院 广州 510300; 2. 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室 广州 510300;
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州) 广州 511458; 4. 国家海洋信息中心 天津 300171)

摘要:滨海盐沼作为重要的湿地生态系统,有极大的社会、经济和生态价值。文章采用多源国产高空空间分辨率卫星数据,结合野外现场调查,对广东和广西滨海盐沼开展遥感调查与分析。2019年年底,广东和广西滨海盐沼分布面积分别为1 258.00 hm²和1 450.36 hm²。广东14个沿海市除茂名市外均有滨海盐沼分布,珠海市、江门市、湛江市的分布面积分别为438.89 hm²、331.83 hm²和162.36 hm²,占广东滨海盐沼总面积的34.89%、26.38%和12.91%。广西3个沿海市均有滨海盐沼分布,北海市、防城港市和钦州市的分布面积分别为1 354.87 hm²、49.73 hm²和45.76 hm²,占广西滨海盐沼总面积的93.41%、3.43%和3.16%。广东和广西互花米草分布面积分别为327.96 hm²和1 312.02 hm²。广东海岸带互花米草主要分布在江门市、阳江市、湛江市和潮州市,分布面积分别为179.07 hm²、73.64 hm²、69.72 hm²和5.52 hm²。广东近5年海岸带互花米草面积较为稳定,没有大范围暴发式扩散。广西海岸带互花米草主要分布在北海市和钦州市,分布面积分别为1 309.04 hm²和2.98 hm²。广西海岸带互花米草面积比最早引种时增加了1 311.08 hm²。互花米草在广西北海东海岸、铁山港、廉州湾和大风江口不断扩张,廉州湾的互花米草仍处于种群扩散的暴发期,需加强对互花米草的监测和防控工作。

关键词:盐沼;互花米草;遥感;广东;广西

中图分类号:S763;P76

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2023)05-0064-07

Remote Sensing Investigation and Analysis of Coastal Salt Marshes in Guangdong and Guangxi

DONG Di^{1,2}, JIA Houlei^{1,3}, TIAN Song^{1,2}, ZOU Zhilei¹, JIANG Hansheng¹,
WEI Zheng^{1,2}, XU Yan⁴, ZENG Jisheng^{1,2}, SUN Yuchao^{1,2},
CHEN Qidong^{1,2}, YANG Fan^{1,2}, DENG Haowen¹, LI Xuerui¹

收稿日期:2022-10-07;修订日期:2023-03-28

基金项目:自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室自主设立课题“基于密集时序多源遥感影像的互花米草监测方法研究”(MESTA-2020-C001)、“典型海洋生态系统价值评估及其价值实现路径”(MESTA-2021-C005);自然资源部海洋生态监测与修复技术重点实验室开放研究基金(MEMRT202115);广东省自然科学基金-博士启动“基于多源遥感影像的围海养殖动态监测与时空变化研究”(2018A030310032);南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0404);2023年省级促进经济高质量发展(海洋经济发展)海洋六大产业专项项目(GDNRC[2023]41)。

作者简介:董迪,高级工程师,博士,研究方向为海岸带植被与滨海湿地遥感、海洋内波和海洋中尺度涡研究

通信作者:贾后磊,教授级高级工程师,硕士,研究方向为海域综合管理、海洋防灾减灾研究

(1. South China Sea Institute of Planning and Environmental Research, SOA, Guangzhou 510300, China; 2. Key laboratory of Marine Environmental Survey Technology and Application, MNR, Guangzhou 510300, China; 3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China; 4. National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China)

Abstract: Coastal salt marshes, as an important wetland type, have great social, economic and ecological values. This study surveyed and analyzed the distribution of coastal salt marshes in Guangdong Province and Guangxi Zhuang Autonomous Region, based on multi-source domestic high spatial resolution satellite imagery and field survey. At the end of 2019, the distribution areas of coastal salt marshes in Guangdong and Guangxi were 1 258.00 hm² and 1 450.36 hm², respectively. Salt marshes distributed in 14 coastal cities of Guangdong except Maoming. The distribution areas of salt marshes in Zhuhai, Jiangmen and Zhanjiang were 438.89 hm², 331.83 hm² and 162.36 hm², respectively, accounting for 34.89%, 26.38% and 12.91% of the total salt marsh area in Guangdong. Salt marshes distributed in 3 coastal cities of Guangxi. The distribution areas of salt marshes in Beihai, Fangchenggang, and Qinzhou were 1 354.87 hm², 49.73 hm² and 45.76 hm², respectively, accounting for 93.41%, 3.43% and 3.16% of the total salt marsh area in Guangxi. The distribution areas of *Spartina alterniflora* in Guangdong and Guangxi were 327.96 hm² and 1 312.02 hm², respectively. *Spartina alterniflora* in Guangdong was mainly distributed in Jiangmen, Yangjiang, Zhanjiang and Chaozhou, with the area of 179.07 hm², 73.64 hm², 69.72 hm² and 5.52 hm², respectively. The area of *Spartina alterniflora* in the coastal tidal zone of Guangdong has been relatively stable in the past 5 years. *Spartina alterniflora* in Guangxi was mainly distributed in Beihai and Qinzhou, with the area of 1 309.04 hm² and 2.98 hm², respectively. The area of *Spartina alterniflora* in Guangxi increased by 1 311.08 hm² compared with the introduction year. *Spartina alterniflora* expanded continuously in the east coast of Beihai, Tieshan Harbor, and Lianzhou Bay, especially *Spartina alterniflora* in Lianzhou Bay was in the rapid expansion period. More work is suggested to strengthen the operational monitoring, prevention and control of *Spartina alterniflora*.

Keywords: Salt marsh, *Spartina alterniflora*, Remote sensing, Guangdong, Guangxi

0 引言

滨海盐沼是处于海洋和陆地两大生态系统过渡地带,被海水周期性淹没,具有较高草本或低矮灌木植被覆盖度的一种重要湿地生态系统^[1-3]。滨海盐沼是重要的初级生产者,也是滨海湿地高生产力生态系统之一,其输出的有机物是光滩和浅海生物食物链的重要组成部分,提供保滩护堤、拦淤造陆、水源净化、为滨海生物提供栖息地、繁育场和饵料基地等多种生态功能^[3-4];一些滨海湿地植物具有重要的海洋经济价值,可作为饲料和肥料,提取药物和绿色产品。滨海盐沼还是重要的海岸带蓝

碳生态系统之一,在减缓气候变化方面起到巨大作用^[5]。然而,受到气候变化和人类活动的影响^[6],1980—2010年,我国59%的滨海盐沼已丧失^[7]。外来物种,例如互花米草的入侵,改变了盐沼植被的种间组成和空间分布,破坏了我国本土滨海盐沼植物群落,影响了滨海盐沼的生态系统结构和服务功能^[8]。因此,监测滨海盐沼,特别是入侵种互花米草的空间分布,对于科学地管理和保护本地滨海盐沼生态系统,服务于评估和分析滨海蓝色碳汇意义重大。

滨海盐沼广泛分布在全球中、高纬度地区,而在低纬度地区常常被红树林替代,盐沼在热带、亚热带

不易生长红树林的区域也有少量分布^[1,3-4]。广东和广西潮间带分布的高等植物以红树林为主,滨海盐沼常与红树林形成红树林—滨海盐沼生态交错带^[3,9]且分布较少,因此对滨海盐沼的研究较少^[10]。近年来,广东滨海盐沼的研究多集中在互花米草、生态学等方面^[11-12],且多是局部区域的分析,鲜有广东滨海盐沼分布系统性的遥感调查。潘良浩等^[3]总结了广西滨海盐沼生态系统的研究现状,指出广西滨海盐沼物种多样性高,需进行有效保护,但考虑到广西滨海盐沼与红树林常形成交错带且斑块面积较小,第二次全国湿地资源调查的盐沼面积结果偏小。

传统的滨海盐沼野外调查方法时间长、成本高、难度大,且潮汐、淤泥质底质等因素导致存在人和车辆难以达到的区域;遥感具有覆盖范围广、重复观测等诸多优势,已被广泛用于滨海盐沼遥感监测^[8,13-15]。Liu 等^[8]基于 2014—2016 年 43 景 Landsat-8 影像,联合面向对象分割和支持向量机分类方法获得中国大陆海岸带互花米草空间分布状况。Mao 等^[15]使用 1990 年、2000 年和 2015 年 3 个时段 Landsat 卫星影像,分析互花米草 25 年间在我国大陆海岸带的入侵动态。罗敏^[16]基于 2015 年 Landsat-8 卫星影像,使用最大似然分类方法获得中国大陆海岸盐沼种类和分布情况。潘良浩等^[17]基于国产高分卫星影像,通过目视解译方法分别获得 2013 年和 2016 年广西海岸互花米草分布情况,但均未对广西其他滨海盐沼植被类型进行遥感调查。虽然以上研究已获得广东和广西盐沼分布信息,但多依赖中等空间分辨率卫星影像,或仅关注 2017 年以前的广西互花米草分布情况,鲜见基于高空间分辨率卫星数据对广东和广西滨海盐沼分布进行系统性的研究。为了全面掌握广东和广西滨海盐沼的分布情况,本研究基于国产高分卫星影像数据集,结合野外现场调查,对广东和广西滨海盐沼进行遥感监测与分析,为低纬度滨海盐沼生态学的深入研究提供新的线索,为广东和广西滨海湿地生态系统的管理和保护提供基础数据支持。

1 数据与方法

本研究使用中国资源卫星应用中心提供的 2019 年 6 月—2020 年 1 月的高分一号、高分六号、

资源三号 02 星共 28 景覆盖广东大陆海岸带、11 景覆盖广西大陆海岸带的全色和多光谱卫星影像作为主要数据源,数据要求少云覆盖且拍摄时间为当地低潮时。其中,高分一号卫星和高分六号卫星分别于 2013 年和 2018 年发射,均搭载了 1 台 2.0 m 空间分辨率全色和 1 台 8.0 m 空间分辨率多光谱相机;资源三号 02 星于 2016 年发射,其搭载了 4 台光学相机,包括 1 台地面分辨率 2.1 m 的正视全色 CCD 相机、2 台地面分辨率 2.5 m 的前视和后视全色 CCD 相机、1 台地面分辨率 5.8 m 的正视多光谱相机(表 1)。用于几何校正的底图数据包括 2 m 空间分辨率真彩色正射影像图,沿海 1:1 万地形图,30 m 空间分辨率数字高程模型等。校正后的正射影像平面位置中误差小于 3 m。为了提高多光谱影像的空间分辨率,使用全色锐化方法对经过几何校正的多光谱和全色影像进行融合,并重采样到 2 m 空间分辨率,获得 4 波段更高空间分辨率多光谱数据。精度分析使用 2019 年覆盖部分海岸带区域的 WorldView-2 卫星影像,空间分辨率 0.5 m。此外,研究数据还包括海岸线、6 m 等深线以及行政区划矢量数据、2019 年广东和广西海岸带野外调查获取的无人机低空航拍照片等。

表 1 高分一号、高分六号和资源三号 02 星传感器参数
Table 1 Key parameters of the Gaofen-1, Gaofen-6 and ZY3-02 satellite camera systems

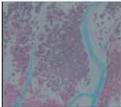
平台	有效载荷	波段号	光谱范围/ μm	空间分辨率/m
高分一号	全色相机	—	0.45~0.90	2
		1	0.45~0.52	8
	多光谱相机	2	0.52~0.59	
		3	0.63~0.69	
4	0.77~0.89			
高分六号	全色相机	—	0.45~0.90	2
		1	0.45~0.52	8
	多光谱相机	2	0.52~0.60	
		3	0.63~0.69	
4	0.76~0.90			
资源三号 02 星	前视相机	—	0.50~0.80	2.5
		后视相机	—	0.50~0.80
	正视相机	—	0.50~0.80	2.1
		多光谱相机	1	0.45~0.52
2	0.52~0.59			
3	0.63~0.69			
4	0.77~0.89			

结合野外调查和卫星影像数据,建立卫星遥感解

译标志(表2),并使用人机交互目视解译的方式,对广东和广西的滨海盐沼进行解译。滨海盐沼遥感识别的范围是以海岸线为基准,向陆延伸1 km,向海延伸至6 m等深线。考虑到海岸带区域卫星成像易受云、雨的影响,遥感解译时需基于多源卫星数据进行综合分析。互花米草是我国第一批16种外来入侵物种之一,其大量繁殖对于当地海洋生态系统造成了严重的威胁和破坏^[17],本研究对互花米草进行单独识别,其他盐沼植被类型则不进行进一步细分。为辅助滨海盐沼的分类、识别以及斑块边界的提取,本研究收集了2019年广东和广西海岸带地区野外现场调查获取的无人机航拍数据,用于辅助目视解译和盐沼图斑的修正,最后获得广东和广西滨海盐沼空间分布数据。考虑到卫星影像的空间和光谱分辨率,本研究盐沼图斑以面积不小于0.2 hm²为统计对象。

表2 调查区滨海盐沼和红树林解译标志

Table 2 Interpretation symbols of coastal salt marshes and mangroves in the survey area

名称	解译标志	解译标志描述
滨海盐沼—其他		不规则形状,蔷薇红,细腻,有不规则潮沟痕迹
滨海盐沼—互花米草		斑块状或聚簇状,细腻,暗红色或亮红色
红树林		不规则形状,深红,粗糙,有不规则潮沟痕迹

注:解译标志和解译标志描述基于高分6号和高分1C卫星标准假彩色合成(波段组合:近红外,红,绿波段)。

使用对比法分析盐沼分布范围遥感解译的精度^[18],随机选择广西丹兜海的盐沼图斑进行验证,基于2019年WorldView-2卫星影像提取的该区域部分盐沼图斑总面积14.47 hm²,由国产高分辨率卫星影像提取的总面积14.59 hm²,叠加分析得到的盐沼图斑重叠总面积13.96 hm²,盐沼总面积误差为0.79%,图斑面积总体重叠率达到96.48%,证明了本研究盐沼面积遥感解译结果具有较高的精度。

2 结果与讨论

2.1 广东盐沼分布及面积

截至2019年11月,广东滨海盐沼的分布面积为1258.00 hm²(互花米草327.96 hm²,其他930.04 hm²)。依据行政区划统计,广东14个沿海市除茂名市外均有滨海盐沼分布。其中,滨海盐沼在珠海市、江门市、湛江市的分布面积较大,分别为438.89 hm²、331.83 hm²和162.36 hm²,占广东滨海盐沼总面积的34.89%、26.38%和12.91%;阳江市、汕头市、广州市、揭阳市的滨海盐沼面积分别为121.59 hm²、88.23 hm²、42.17 hm²和26.75 hm²;其他沿海市滨海盐沼面积占广东滨海盐沼总面积比例均小于1%。依据港湾划分统计,广东滨海盐沼主要分布在黄茅海、镇海湾、海陵湾、雷州湾、珠江口、广海湾和汕头港,湛江湾、安浦港和碣石湾有一定数量的滨海盐沼分布。在广东沿海各港湾中,黄茅海的滨海盐沼分布面积最大,为168.41 hm²,其他港湾的滨海盐沼分布面积由大到小依次为:镇海湾129.17 hm²、海陵湾120.91 hm²、雷州湾73.03 hm²、珠江口69.63 hm²、广海湾42.91 hm²、汕头港26.70 hm²、湛江湾18.88 hm²、安浦港12.31 hm²、碣石湾11.20 hm²。

广东海岸带互花米草面积为327.96 hm²,主要分布在湛江市、阳江市、江门市和潮州市。其中,江门市互花米草的分布面积最大,为179.07 hm²,阳江市、湛江市和潮州市互花米草的分布面积分别为73.64 hm²、69.72 hm²和5.52 hm²。就港湾划分而言,广东海岸带互花米草主要分布在镇海湾、海陵湾、广海湾、黄茅海和安浦港。其中,镇海湾的互花米草分布面积最大,为123.73 hm²,其他港湾的互花米草分布面积由大到小依次为:海陵湾73.64 hm²、广海湾42.91 hm²、黄茅海12.44 hm²、安浦港12.31 hm²。

2.2 广西盐沼分布及面积

截至2020年1月,广西滨海盐沼的分布面积为1450.36 hm²(互花米草1312.02 hm²,其他138.34 hm²)。依据行政区划统计,广西3个沿海市均有滨海盐沼分布。其中,滨海盐沼在北海市的分布面积最大,为1354.87 hm²,占广西滨海盐沼总面积的93.41%;防城港市和钦州市的滨海盐沼面积分别为49.73 hm²和45.76 hm²,占广西滨海盐沼总面积的3.43%和

3.16%。依据港湾划分统计,广西滨海盐沼主要分布在丹兜海、廉州湾、铁山港、北海银滩至营盘镇和茅尾海,英罗港和大风江口有一定数量的滨海盐沼分布。在广西沿海各港湾中,丹兜海滨海盐沼分布面积最大,为 356.90 hm²,其他港湾滨海盐沼分布面积由大到小依次为:廉州湾 346.59 hm²、铁山港 224.20 hm²、北海银滩至银盘镇 134.67 hm²、茅尾海 68.27 hm²、英罗港 30.70 hm²、大风江口 18.21 hm²。

广西海岸带互花米草面积为 1 312.02 hm²,主要分布在北海市和钦州市。其中,北海市互花米草面积最大,为 1 309.04 hm²,占广西互花米草总面积的 99.77%;钦州市互花米草分布面积为 2.98 hm²。就港湾划分统计,广西海岸带互花米草主要分布在丹兜海、英罗港、铁山港、北海银滩至营盘镇、廉州湾和大风江口。其中,丹兜海、英罗港、铁山港、北海银滩至营盘镇分布的滨海盐沼以互花米草为主;廉州湾和大风江口的滨海盐沼植物种类多样,互花米草的面积分别为 305.32 hm²和 16.57 hm²。

2.3 广东和广西互花米草分布历史与特点

广东海岸带互花米草目前主要分布在粤西和粤东。江门市台山是广东最早引种互花米草的区域,在 1982 年开始互花米草的种植^[19],而本研究提取的江门市互花米草也全部分布在台山市镇海湾和广海湾。广东互花米草分布和扩散的研究主要集中在近 10 年以内(表 3),2015 年,广东互花米草面积为 253.00 hm²,2018 年扩大到 363.20 hm²,2019 年稳定在 327.96 hm²。考虑到不同空间分辨率遥感影像、不同识别方法等因素造成的互花米草识别误差,广东近 5 年海岸带互花米草面积较为稳定,没有大范围暴发式扩散。另外,基于现有文献和历史影像对比发现,2018—2019 年,湛江市和阳江市部分海岸带区域^[12]互花米草已被人为清理。

表 3 广东海岸带互花米草分布面积

Table 3 The areas of *Spartina alterniflora* in Guangdong Province

调查时间	数据源	数据获取方法	面积/hm ²
2015 年	Landsat-8	监督分类	253.00 ^[16]

2018 年	Sentinel-1 Sentinel-2	组合分类	363.20 ^[19]
2019 年 6 月— 2019 年 11 月	GF-1,15 景 GF-6,9 景 ZY3-02,4 景	影像解译	327.96

自 1979 年广西引种互花米草以来,众多学者对当地互花米草的分布进行了大量跟踪监测(表 4)。广西海岸带互花米草的面积在最早引种时是 0.94 hm²,2008 年扩大到 389.20 hm²,2016 年为 686.48 hm²,2019 年已达到 1 312.02 hm²,比引种时增加了 1 311.08 hm²。广西海岸带互花米草的扩张仍处于快速扩散期^[18,20]。2008 年之前,广西海岸带互花米草只分布在北海半岛以东,例如丹兜海、营盘镇青山头和山口镇北界村^[21];2013 年,在北海半岛以西,廉州湾和大风江口也发现互花米草^[17];2019 年,互花米草在大风江口和廉州湾进一步扩散,在北海东海岸、铁山港继续扩张。廉州湾互花米草面积由 2013 年 51.17 hm²迅速增长到 2019 年 305.32 hm²;铁山港互花米草面积由 2013 年 93.86 hm²增长到 2019 年 224.20 hm²。值得一提的是,丹兜海互花米草面积 2013 年为 372.11 hm²,2019 年为 356.90 hm²,减少了 15.21 hm²,证实了山口红树林保护区互花米草清理工作的成效。本研究在廉州湾的南流江口提取了大面积新增互花米草斑块,证实了潘良浩等^[17]对于廉州湾互花米草在 2016 年处于种群扩散的暴发期,南流江口很可能被互花米草占据的结论。

表 4 广西海岸带互花米草分布面积

Table 4 The areas of *Spartina alterniflora* in Guangxi Zhuang Autonomous Region

调查时间	数据源	数据获取方法	面积/hm ²
1979 年	—	—	0.94
2003 年	—	—	167.00 ^[22]
2008 年	—	手持 GPS 测量	389.20 ^[21]
2009 年	卫星和航空数据	影像解译	300.00 ^[23]
2011 年	卫星和航空数据	影像解译	357.20 ^[23]

2013年12月— 2014年1月	GF-1,7景	影像解译	602.27 ^[17]
	ZY-3,6景 ZY1-02C,1景		
2015年	Landsat-8	监督分类	657.00 ^[16]
2016年	GF-1,9景	影像解译	686.48 ^[18]
2019年6月— 2020年1月	GF-1,7景	影像解译	1 312.02
	GF-6,2景 ZY3-02,2景		

3 结论

本研究基于多源国产高空间分辨率卫星影像,结合野外调查,对广东和广西的滨海盐沼进行遥感调查,获取了滨海盐沼的分布、种类和面积信息,并结合文献资料分析了广东和广西入侵种互花米草的分布现状及历史变化,为深入研究生物入侵影响下的滨海盐沼生态学、滨海盐沼—红树林生态交错带的生态过程,以及互花米草治理、滨海盐沼的管理提供了基础数据支撑。

2019年年底,广东和广西海岸带滨海盐沼分布面积分别为1 258.00 hm²和1 450.36 hm²。以港湾划分,广东滨海盐沼在黄茅海的分布面积最大,其在镇海湾、海陵湾、雷州湾、珠江口、广海湾、汕头港、湛江湾、安浦港、碣石湾的分布面积依次减小。广西滨海盐沼在丹兜海的分布面积最大,其在廉州湾、铁山港、北海银滩至银盘镇、茅尾海、英罗港和大风江口的分布面积依次减小。

入侵种互花米草在广东和广西海岸带的分布面积分别为327.96 hm²和1 312.02 hm²。广东互花米草的分布呈现粤西和粤东聚集。广东互花米草在镇海湾的分布面积最大,其海陵湾、广海湾、黄茅海、安浦港的分布面积依次减少。广西互花米草在丹兜海的分布面积最大,其在廉州湾、铁山港、北海银滩至银盘镇、英罗港和大风江口的分布面积依次减小。广西互花米草在北海市分布面积最大,并自东向西扩张到钦州市大风江口西部海岸带区域。互花米草对广东和广西本土的生态系统造成严重威胁,需加强对互花米草的监测和防控工作。

参考文献(References):

[1] 贺强,安澜,崔保山.滨海盐沼及其植物群落的分布与多样性

[J].生态环境学报,2010,19(3):657-664.

HE Qian, AN Yuan, CUI Baoshan. Coastal salt marshes and distribution and diversity of salt marsh plant communities [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19 (3): 657-664.

[2] ADAM P. Saltmarsh ecology[M]. Cambridge, England: Cambridge University Press, 1993.

[3] 潘良浩,史小芳,曾聪,等.广西滨海盐沼生态系统研究现状及展望[J].广西科学,2017,24(5):453-461.

PAN Lianghao, SHI Xiaofang, ZENG Cong, et al. Status and characteristics of the research on salt marshes along Guangxi coast[J]. Guangxi Sciences, 2017, 24 (5): 453-461.

[4] 林鹏.海洋高等植物生态学[M].北京:科学出版社,2006.

LIN Peng. Marine higher plant ecology[M]. Beijing: Science Press, 2006.

[5] HOWARD J, HOYT S, ISENSEE K, et al. Coastal blue carbon: methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses[M]. Arlington, VA, USA: Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature, 2014.

[6] 崔保山,谢焱,王青,等.大规模围填海对滨海湿地的影响与对策[J].中国科学院院刊,2017,32(4):418-425.

CUI Baoshan, XIE Tian, WANG Qing, et al. Impact of large-scale reclamation on coastal wetlands and implications for ecological restoration, compensation, and sustainable exploitation framework [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32 (4): 418-425.

[7] GU Jiali, LUO Min, ZHANG Xiujuan, et al. Losses of salt marsh in China: trends, threats and management [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2018, 214: 98-109.

[8] LIU Mingyue, MAO Dehua, WANG Zongming, 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.

[9] KELLEWAY J J, SAINTILAN N, MACREADIE P I, et al. Seventy years of continuous encroachment substantially increases 'blue carbon' capacity as mangroves replace intertidal salt marshes [J]. Global Change Biology, 2016, 22 (3): 1097-1109.

[10] 梁国昭.广东的湿地及其保护[J].热带地理,2004,24(3):265-269,274.

LIANG Guozhao. Wetlands in Guangdong and their conservation [J]. Tropical Geography, 2004, 24 (3): 265-269,274.

[11] 蔡立哲,许鹏,傅素晶,等.湛江高桥红树林和盐沼湿地的大

- 型底栖动物次级生产力[J]. 应用生态学报, 2012, 23 (4): 965-971.
- CAI Lizhe, XU Peng, FU Sujing, et al. Secondary productivity of macrobenthos in mangrove and salt marsh in Gaoqiao of Zhanjiang, Guangdong Province of South China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23 (4): 965-971.
- [12] 郭欣, 潘伟生, 陈粤超, 等. 广东湛江红树林自然保护区及附近海岸互花米草入侵与红树林保护[J]. 林业与环境科学, 2018, 34 (4): 58-63.
- GUO Xin, PAN Weisheng, CHEN Yuechao, et al. Invasion of *Spartina alterniflora* and protection of mangroves in Guangdong Zhanjiang Mangrove National Nature Reserve and adjacent coastal area [J]. Forestry and Environmental Science, 2018, 34 (4): 58-63.
- [13] 董迪, 曾纪胜, 魏征, 等. 联合星载光学和 SAR 影像的漳江口红树林与互花米草遥感监测[J]. 热带海洋学报, 2020, 39 (2): 107-117.
- DONG Di, ZENG Jisheng, WEI Zheng, et al. Integrating spaceborne optical and SAR imagery for monitoring mangroves and *Spartina alterniflora* in ZhangJiang Estuary[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2020, 39 (2): 107-117.
- [14] DONG Di, WANG Chao, YAN Jinhui, et al. Combining Sentinel-1 and Sentinel-2 image time series for invasive *Spartina alterniflora* mapping on Google Earth Engine: a case study in Zhangjiang Estuary [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2020, 14 (4): 044504.
- [15] MAO Dehua, LIU Mingye, WANG Zongming, et al. Rapid invasion of *Spartina alterniflora* in the coastal zone of mainland China: spatiotemporal patterns and human prevention [J]. Sensors, 2019, 19 (10): 2308.
- [16] 罗敏. 2015 年中国海岸带盐沼遥感监测与生态服务价值评估[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- LUO Min. Remote sensing monitoring and ecosystem service value assessment of coastal salt marshes in China in 2015 [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [17] 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.
- PAN Lianghao, SHI Xiaofang, TAO Yancheng, et al. Distribution and Expansion of *Spartina alterniflora* in coastal tidal zone, Guangxi [J]. Wetland Science, 2016, 14 (4): 464-470.
- [18] 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.
- TAO Yancheng, PAN Lianghao, FAN Hangqing, et al. Remote sensing monitoring of *Spartina alterniflora* in coastal intertidal zone of Guangxi [J]. Guangxi Sciences, 2017, 24 (5): 483-489.
- [19] 赵欣怡. 基于时序光学和雷达影像的中国海岸带盐沼植被分类研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2020.
- ZHAO Xinyi. Classification of salt marsh vegetation in coastal zone of China based on temporal optics and radar images [D]. Shanghai: East China Normal University, 2020.
- [20] 黄华梅, 张利权. 上海九段沙互花米草种群动态遥感研究[J]. 植物生态学报, 2007 (1): 75-82.
- HUANG Huamei, ZHANG Liquan. Remote sensing analysis of range expansion of *Spartina alterniflora* at Jiuduansha Shoals in Shanghai, China [J]. Journal of Plant Ecology, 2007 (1): 75-82.
- [21] 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.
- MO Zhucheng, FAN Hangqing, LIU Liang. Investigation on smooth cordgrass (*Spartina alterniflora*) along Guangxi coastal tidal zone [J]. Guangxi Sciences, 2010, 17 (2): 170-174.
- [22] 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 (2): 47-50.
- QIN Yingying, LIANG Shichu. Current status and eradication strategy of invasive alien plants *Spartina alterniflora* in Guangxi [J]. Wetland Science & Management, 2008 (2): 47-50.
- [23] 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]//2013 年生物多样性评估国际研讨会论文集, 南京: 中国环境科学学会, 2013.
- WAN Huawei, YANG Yipeng, WANG Changzuo. Dynamical monitoring of *Spartina alterniflora* invasion using remote sensing data in Beihai, Guangxi [C]//International Symposium on Biodiversity Assessment in 2013, Nanjing: China Environmental Science Society, 2013.