

引用格式:周振超,李贺,黄翀,等.红树林遥感动态监测研究进展[J].地球信息科学学报,2018,20(11):1631-1643. [Zhou Z C, Li H, Huang C, et al. Review on dynamic monitoring of mangrove forestry using remote sensing[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20(11):1631-1643.] DOI:10.12082/dqxxkx.2018.180247

红树林遥感动态监测研究进展

周振超^{1,2}, 李贺², 黄翀^{2*}, 刘庆生², 刘高焕², 何云², 于涵¹

1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101

Review on Dynamic Monitoring of Mangrove Forestry Using Remote Sensing

ZHOU Zhenchao^{1,2}, LI He², HUANG Chong^{2*}, LIU Qingsheng², LIU Gaohuan², HE Yun², YU Han¹

1. College of Geo-Exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China;

2. State Key Laboratory of Resources and Environment Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Mangrove dynamics is one of the hotspots of geography, ecology and wetland science. Remote sensing technology is characterized by macroscopicity, high efficiency and economy, and plays an increasingly important role in the dynamic monitoring of mangroves. This paper searches and summarizes the articles published by Web of Science and China Knowledge Network from 2000 on the basis of keywords, from research area distribution, number of documents, remote sensing data sources and methods, global mangrove dynamics and national red The five aspects of dynamic change analysis of forests summarize the research progress on dynamic monitoring of mangrove remote sensing in the past 20 years. The research results show that multi-sensor high spatial and temporal resolution data will become an important data source for mangrove remote sensing dynamic monitoring. The fusion of radar data and optical remote sensing data will help to further enhance the mangrove satellite remote sensing monitoring capability. The UAV platform is equipped with various types of sensors (such as multi-spectral, hyperspectral or lidar sensors), which can obtain mangrove ecosystem parameters from different aspects. Combined with remote sensing intelligent analysis algorithms, it helps mangrove remote sensing research in the depth direction. development of. The total area of mangrove forests monitored by mangrove remote sensing is roughly 11 million to 24 million hectares, and the overall trend is still decreasing. In the region, the area of mangroves in China has recovered. At the end of this paper, the development trend of mangrove remote sensing dynamic monitoring is prospected.

Key words: mangrove; remote sensing; classification; sensor; dynamic monitoring

收稿日期:2018-05-16;修回日期:2018-09-14.

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA19060302);红树林资源遥感监测与评估(2017FY100706);中国地质调查局“一带一路”地区资源环境卫星遥感解译与应用基金资助项目(DD20160117)。[**Foundation items:** Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (A class), No.XDA19060302; Mangrove Resources Remote Sensing Monitoring and Evaluation, No.2017FY100706; China Geological Survey “Belt and Road” Regional Resource and Environment Satellite Remote Sensing Interpretation and Application Funding Project, No.DD20160117.]

作者简介:周振超(1992-),女,硕士生,主要从事林业遥感研究。E-mail: 657492111@qq.com

*通讯作者:黄翀(1975-),男,博士,副研究员,主要从事生态遥感与海岸带评估研究。E-mail: huangch@lreis.ac.cn

*Corresponding author: HUANG Chong, E-mail: huangch@reis.ac.cn

摘要:红树林动态是地理学、生态学和湿地学等学科关注的热点之一。遥感技术具有宏观性、高效性和经济性等特点,在红树林动态监测中发挥日益重要的作用。本文通过关键词对 Web of Science 和中国知网 2 个数据库自 2000 年以来发表的文章进行梳理和归纳,从研究区域分布、文献数量、遥感监测数据源与方法、全球红树林动态以及全国红树林动态变化分析 5 个方面总结了近 20 年来国内外对于红树林遥感动态监测研究进展。研究表明,多传感器高时空分辨率数据将成为红树林遥感动态监测的重要数据源。将雷达数据和光学遥感数据进行融合,有助于进一步提升红树林卫星遥感监测能力。无人机平台搭载多种类型的传感器(如多光谱、高光谱或激光雷达传感器),可以从不同方面获取红树林生态系统参数,结合遥感智能分析算法,有助于推动红树林遥感研究向纵深方向发展。红树林遥感动态监测相关研究表明,全球红树林总面积范围大致在 $1.1 \times 10^8 \sim 2.4 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 总体仍呈减少趋势,而在区域上中国红树林面积则有所恢复。本文最后对红树林遥感动态监测的发展趋势进行了展望。

关键词:红树林;遥感;分类;传感器;动态监测

1 引言

红树林受周期性涨落潮的影响,以常绿灌木或者乔木组成的耐盐木本植物群落^[1-4],是同时拥有陆地和海洋特征的复杂生态系统。红树林具有多方面的生态系统服务功能,如防风搏浪、固岸护堤、净化海水、保护耕地、防止侵蚀等^[5]功能,对维护和改善海湾、河口地区生态环境具有不可替代的作用^[6-7]。但是受全球气候变化以及海洋环境污染等多方面的影响,红树林生长环境遭到严重破坏^[8],而大量的围海造田、滩涂养殖、工业建设等人类开发利用更是导致大面积红树林被砍伐^[9-13],面积急剧减少^[14-16]。20 世纪 50 年代以来,在自然因素和人为干扰的双因素作用下,红树林遭受了严重破坏^[17],全球红树林面积减少 35% 左右。红树林资源的保护成为国际上湿地保护和生物多样性保护的重要对象^[11,18],因此加强红树林保护、遏制红树林面积减少趋势已经迫在眉睫。

红树林资源调查和动态监测是红树林科学保护与管理的基础和前提,也是加强海洋生态系统的恢复机理与技术研究的重要步骤^[19-20]。但红树林生长在地势开阔平坦的潮间带浅滩,传统的实地调查存在费时、费力、观测尺度小等问题^[21-23]。与现场调查相比,遥感技术在红树林监测方面具有省时、省力、观测范围广、信息获取快等优势^[24-30],已成为现今红树林监测和管理不可或缺的手段^[1,5]。尤其是近年来,不同平台传感器技术的快速发展和广泛应用,红树林遥感数据源更为多样,相关研究日益增多,研究方法也不断深化^[31-39]。系统性梳理和归纳当前红树林遥感动态监测研究进展,有助于及时掌握国内外研究前沿,理清技术发展脉络,探究今后研究趋势与方向。鉴于此,本研究在参阅 2000

年以来红树林遥感相关文献、调查报告、专著等的基础上,系统总结了红树林遥感动态监测的国内外应用进展,探讨了基于不同传感器红树林遥感提取方法的应用现状,以期后续红树林遥感研究指明方向。

2 红树林遥感文献分析

本文首先通过“Remote Sensing (遥感)”和“Mangrove (红树林)”2 个关键词对 Web of Science 和中国知网 2 个数据库自 2000 年以来发表的文章进行搜索;进一步,利用“土地覆盖”和“湿地”为关键词,并在全文里加“红树林”为索引进一步扩大搜索范围。通过对上述文献及相关专著进行系统梳理和归纳,整理了从 2000-2017 年以来涉及红树林的文献共 703 篇,其中关于红树林遥感动态监测的文献是 227 篇。此外,还对一些主要的红树林专项调查报告、专著进行了参阅,如中国近海海洋综合调查与评价“专项(908 专项)调查^[17]”,全国红树林资源报告^[12]等,更加详细地了解红树林研究进展。

通过对 227 篇文献进行研究,其中 Web of Science 数据库中的文献数量是 153 篇,载文比较多的期刊有 ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing、Remote Sensing、Estuarine Coastal and Shelf Science、Wetlands Ecology and Management 等^[30-31,34,38,40-43],其中 ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 和 Remote Sensing 期刊的文章数量最多。中国知网数据库中的文献数量是 50 多篇,研究文献多发表在遥感、生态、湿地、林业等研究方向的期刊上,其中生态学报和湿地科学载文较多。其他载文较多的还包括海岸、热

带生物、测绘等类型的期刊,说明随着对红树林生态系统重要性认识的不断深入,更多领域的学者也开始关注红树林研究,相关研究向多样化、学科交叉方向发展。

通过对 Web of Science 数据库中的文献作者进行统计(图 1),可以发现红树林遥感动态监测的研究学者广泛分布于各个大洲,其中亚洲学者主要涉及 7 个国家,最多的是中国和印度(图 1)。北美洲以美国的研究人数最多。总体看,学者呈现不断增长的趋势。由图 2 可以得知,从 2007 年开始,文献数量增加,但在 2012 年有所下降,之后一直呈增长趋势^[32,45]。

3 红树林遥感动态监测数据源和方法

随着遥感和对地观测技术的发展,越来越多的遥感平台、传感器和分类方法运用到红树林遥感动态监测当中。本文从中、高分辨率多光谱数据、高光谱数据、雷达等不同数据源角度,总结常用的红树林提取方法以及它们的应用范围、优势和不足。

3.1 基于中分辨率光学数据的红树林遥感信息提取

红树林遥感监测中最常用的中分辨率光学遥感数据源包括 Landsat MSS/TM/ETM+/OLI^[33,46-48]、SPOT HRV/HRG^[49-50]等,对应的红树林遥感信息提取方法包括目视解译、最大似然法、面向对象分类法、支持向量机方法等。目视解译方法主要是利用研究者的遥感专业知识及经验,根据遥感图像上红

树林及周围的影像特征以及影像上目标的空间组合关系等,经推理、分析来识别红树林。这种方法具有较高的精度,但费时费力^[51]。Giri 等^[49]使用 Landsat 卫星数据绘制了南亚红树林目前的范围,并确定了 2000–2012 年的红树林覆盖变化^[52]。Hamilton 等^[53]合成了全球森林变化数据库,世界陆地生态系统数据库和世界红树林数据库,利用新数据库监测全球,国家和保护区范围内的红树林覆盖,结果显示红树林损失相对较多的国家包括缅甸、马来西亚、柬埔寨、印度尼西亚和危地马拉。印度尼西亚仍是迄今为止最大的红树林国家,占全球红树林库存的 26%~29%,每年的森林砍伐率在 0.26%~0.66%之间。红树林遥感自动分类方法以最大似然法和面向对象方法最为常见,最大似然法建立在像元的统计特征基础上,考虑了不同类别间的方差和协方差矩阵,具有较高的分类精度^[54]。但是它所利用的地物形状、几何信息非常少,当光谱信息相似时,易与周围地物类型相混淆。面向对象的信息提取技术一方面利用红树林的光谱特征,同时将红树林斑块的形状、纹理及结构等信息考虑在内,使得分割后形成若干互不交叠的相对均匀的非空子区域,因而在一定程度上降低了周围相似地类的干扰^[55]。Jia 等^[56]基于 Landsat 影像,运用面向对象的分类对 1973–2010 年中国广西省红树林和周边土地覆盖的动态进行分析,结果显示红树林面积正在减少,面向对象的分类方法适合小区域的红树林信息提取。章恒等^[36]利用 Landsat8、SPOT5 和高分一号影像对海南东北部的东寨港地区的红树林进行监测,结果显示用最大似然法和支持向量机提取

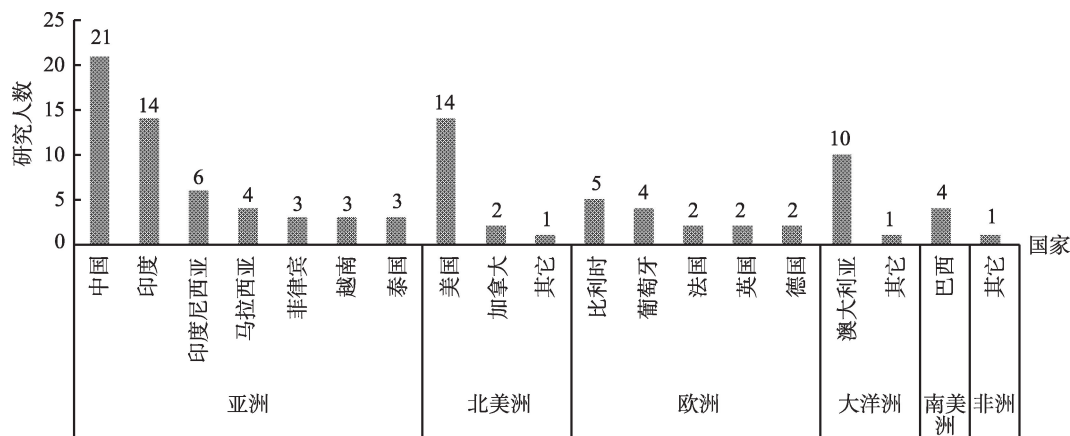


图 1 国内外对红树林遥感动态监测的研究者分布

Fig. 1 Researchers' distribution of remote sensing dynamic monitoring of mangrove in China and Abroad

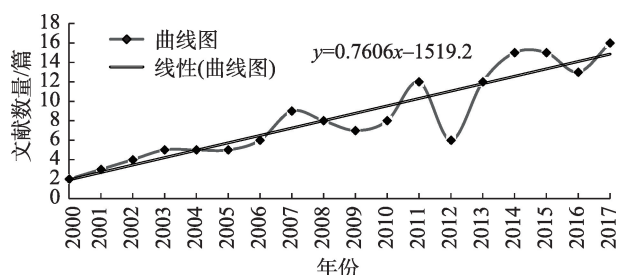


图2 基于Web of Science的各个年份研究数量

Fig. 2 Number of studies in each year based on Web of Science

红树林信息的精度相似,但面向对象方法改善了基于像元分类中斑块破碎的现象,提取红树林边界更加清楚,影像的特征光谱信息量相关性较强^[7]。Chen等^[42]利用Landsat7/8 and Sentinel-1A影像在GEE平台的基础上,分析中国红树林的分布情况,结果显示2015年,中国红树林总面积为 $2.0303 \times 10^8 \text{ hm}^2$,其中约92%位于广西壮族自治区、广东省和海南省^[42]。

综上,中分辨率影像以其易于访问或订购、数据获取时间序列长(2009年以后,Landsat系列卫星全部存档数据都免费公开)和视场范围大等优点^[57-58],自2000年以来,被广泛应用到红树林遥感动态监测中。但是,光学传感器易受天气状态的影响,这也为提取红树林遥感信息提取带来困难。

3.2 基于高分辨率数据的红树林遥感动态监测

随着遥感传感器技术的不断进步,空间分辨率进一步提升,高分辨率数据源越来越多地应用于红树林遥感动态监测。主要用到的高分辨率(空间分辨率优于10 m)遥感数据源包括IKONOS、QuickBird、RapidEye、GeoEye-1、WorldView-2^[59-65]等(表1)。常用的方法包括目视解译、最大似然法、支持向量机、面向对象方法等。Guebas等^[66]利用IKONOS影像,结合ISODATA算法和目视解译方法对斯里兰卡地区的红树林进行提取,结果显示目视解译结合地面调查信息,可以更好提取红树林遥感信息。Otero等^[60]利用QuickBird和GeoEye数据,运用最大似然法,对西非毛里塔尼亚最北端的红树林进行了监测,结果表明,与神经网络技术相比,最大似然算法可以获得更好的分类结果。Jia等^[67]利用EO-1 HYPERION传感器的高光谱数据和SPOT-5高分辨率数据分析米埔沼泽自然保护区的红树林,结果显示2个地区面积分别为 196.8 hm^2 和 110.8 hm^2 。Suwanprasit等^[50]基于QuickBird和IKONOS数据,利用NDVI、MSAVI、PVI、RDVI、RVI、SAVI和

TNDVI 7种植被指数来识别红树林,结果显示NDVI的精度是最高的。基于高分遥感数据的红树林信息提取方法以面向对象分类法最为常见,面向对象的分类方法不再以像元为基本分类单元,而是以对象为分类的最小单位,减少了红树林语义信息的损失^[30,36]。此外,面向对象的分类方法可以充分利用高分辨率光学数据丰富的图像结构、几何、纹理等信息,以提高红树林信息提取精度^[55,68]。但是,基于面向对象的分类方法也存在一定的不足,例如影像分类的智能化、自动化程度低,影像分割尺度缺乏统一标准,不同尺度的分割往往产生不同精度。

3.3 基于高光谱数据的红树林遥感方法

高光谱数据具有可见光、近红外、短波红外、热红外波段等多而很窄的连续的光谱波段,为提取红树林遥感信息提供了更为丰富的光谱信息^[69]。常用的高光谱数据有ASIA+^[70]、CASI^[71]和EO-1 Hyperion^[72]等(表2)。对于高光谱传感器,红树林遥感信息提取主要方法包括最大似然法、人工神经网络、支持向量机和专家决策树等方法。Kumar等^[72]基于高光谱数据ASIA+的214个波段,对德克萨斯州的2个研究地点,测试了4种分类算法,包括最小距离法、马氏距离、最大似然法和波谱角填图分类法(SAM),结果显示马氏距离和最大似然法的精度明显优于最小距离法和SAM。综合前人研究,高光谱数据提供了许多非常窄的连续波段,具有丰富的空间、辐射和光谱信息,可以获得图像中每个像元的连续光谱数据,反映红树林更加精细光谱差异^[73],然而相对于中、高分辨率光学传感器,高光谱传感器类型少,获得的数据波段多、波带窄,数据量大,数据输出率高、信息冗余较大、处理复杂。因此,高光谱数据在红树林遥感动态监测方面应用仍存在一定的局限性。

3.4 基于雷达数据的红树林遥感监测

虽然光学传感器是目前红树林遥感动态监测的主要传感器,但光学传感器易受天气状况的影响。与之相比,雷达传感器具有全天时全天候而且不受云、雾和雨影响的优势^[72,74],所以雷达传感器一直是红树林遥感动态监测研究的重要组成部分。其中应用于红树林监测中的主要雷达传感器有ALOS、JERS-1、Envisat ASAR、Radarsat-1 SAR和Sentinel-1A SAR等^[73-77](表2)。这些数据可以单独使用或

与传统的光学遥感数据结合使用。Thomas等^[44]利用 JERS-1 SAR 和 ALOS PALSAR 数据对 1996–2010 年全球 9 个地区的红树林进行监测,红树林提取的分类精度均高于 90%。Singh 等^[78]基于 JERS-1(L 波段 HH 极化)和 ERS-1(C 波段 VV 极化)数据,运用专家决策树方法,对加蓬西部地区红树林动态进行了监测,结果显示,采用这 2 个数据的组合,相对于单波段数据,在红树林分类精度上提高了 18%。Bui 等^[74]利用 Landsat 和 ALOS 数据,提取了越南地区的土地分类图,其中红树林面积被大部分的虾池塘所占领,导致面积减少。雷达传感器弥补了光学影像在云、雨、雾等天气受限的不足,具有一定的穿透能力,能够获得稳定的周期性影像,因此在红树林遥感监测中具有独特优势。但相对于光学影像而言,雷达本身受噪声影响严重,信息较弱,重访周期长,且数据成本较高。随着星载雷达传感器的发展,运用全极化/简缩极化雷达能够获得较多的遥感信息,在今后红树林动态监测中将会得到更广泛地应用。

3.5 基于无人机平台的红树林遥感

近年来,无人机平台遥感技术快速发展,在红

树林遥感动态监测中也逐渐开展^[79–80]。Otero 等^[61]利用低空无人机对马来西亚地区的红树林保护区进行监测,结果表明使用无人机获得的数据可以为当地管理层创造有价值的信息和提供指导方针,特别是在发生木材采掘的地区。Cao 等^[40]基于无人机高光谱数据,利用最邻近法和支持向量机 2 种分类法对广东珠海淇澳–担杆岛省级自然保护区的红树林进行分类,总体精度分别为 76.12% 和 82.39%。冯家莉等^[82]通过无人机航拍得到英罗港港湾影像,利用最邻近法进行研究,结果表明红树林物种的总体分类精度达 92%,Kappa 系数为 0.887。

与传统的遥感技术相比,无人机有诸多优势:① 高空间分辨率。无人机可以从地面之上几米到几百米高处获取厘米级分辨率的影像,可在物种尺度上对红树林进行监测。② 经济高效。红树林分布在沿海岸线狭长地带,导致单景影像中只有极少部分数据被利用;而红树林空间分布零散的特点也使得对于大区域红树林资源进行监测所需的遥感数据多,费用高。无人机平台通常设备体积小、轻便、移动性高,在运输、保管上节省费用,同时,可以针对红树林区域精准成像,大大降低了费用。③ 多次重复成像。传统卫星平台受重访周期限制,成像

表 1 红树林遥感动态监测运用的光学传感器和方法

Tab. 1 Overview of optical sensors and methods for dynamic monitoring mangrove remote sensing information

数据源	卫星传感器	目视解译	基于像元的分类法		智能化分类方法				面向对象 分类法	综合 提取法
			波段 组合法	像元 分解法	专家 决策树	人工神经 网络	支持 向量机	随机 森林		
中分辨率 影像	Landsat MSS	6	2	5	1			1	4	3
	Landsat-5 TM	8	6	21	5	2	1	1	10	4
	Landsat-7 ETM+	5	4	12	3		2	1	6	3
	Landsat-8 OLI		5	9	2		4	1	6	2
	SPOT2-4	6	1	5					1	2
	Sentia1-2	1	1							
	THEOS		1				1			1
	SPOT5	4	3	3			2		2	
	IRS 1C/1D LISS III/IV	2	1	1	1		1			
高分辨率 影像	ASTER	1								
	RapidEye	2	1	1						
	IKONOS	1		4		1			1	
	QuickBird			5		2			1	1
	Worldview	3	1	3	1		2		1	1
航空摄影	GeoEye		1	5		2	2		2	
	CIR videography/ photography								2	1
		1	1	1			3		2	1

时间不易调整,同时卫星平台的光学传感器容易受云、雾、雨等恶劣天气的影响^[83],大大降低了数据获取的可能性。而低空无人机平台可根据需要随时成像,而且受天气影响程度也较小,可在第一时间获取红树林影像数据,并可对同一区域重复多次成像。④可搭载多种传感器。当前,受限于无人机平台载重、续航、空中控制能力等,以搭载轻型光学相机、多光谱相机为主。随着无人机技术的飞速发展,进一步搭载更为复杂的高光谱、激光雷达等传感器也将更为普遍,可以获取红树林生态系统更多参数特征。

4 红树林动态变化监测

4.1 全球红树林分布与动态

基于遥感技术,红树林分布的大多数历史估计是使用来自区域或国家研究的汇总数据的资料。例如,联合国粮食及农业组织(粮农组织)定期编制红树林覆盖全国范围的报告。这些报告中的许多数据是对每个后续报告和报告中传播的国家红树林覆盖率的单一估计。这些报告已被证明对红树林研究界描绘历史红树林覆盖和损失很重要,但不符合当前红树林研究议程的要求,因此需要具有高精度、高分辨率的全球红树林数据库^[53]。例如,在

对马来西亚红树林覆盖率的历史估计进行文献检索时,Friess和Webb^[84]指出红树林数据估计变化很大,在绘制红树林损失的情况会随时间推移的趋势时会产生大量不确定性。不同研究人员对全球红树林总面积的估计,范围大致在 $1.1\times 10^8\sim 2.4\times 10^8\text{ hm}^2$ ^[85]。Hamilton等^[53]评估全球的红树林面积,面积为 $8.3495\times 10^5\text{ hm}^2$ 。Giri等^[51]利用1000幅Landsat数据,绘制了全球红树林分布图,结果显示全世界红树林的面积为 $1.3776\times 10^6\text{ hm}^2$,占全球森林总面积的0.7%,其中亚洲拥有42%的红树林面积,非洲占20%,北美和中美洲占15%,大洋洲占12%和南美洲占11%,比Hamilton研究的面积增加了 $5.436\times 10^5\text{ hm}^2$,对于各个国家的红树林分布(图3),印度尼西亚的红树林面积为 $3.11\times 10^6\text{ hm}^2$,占全球22.6%的红树林面积,澳大利亚占据第二的位置,为 $9.8\times 10^5\text{ hm}^2$,占全球红树林面积的7.1%^[16,84,85],巴西、墨西哥、孟加拉国、古巴等地区也存在大量红树林(图3)。在Giri之前,有联合国粮农组织基于统计数据对全球红树林面积进行监测,其值是 $1.5\times 10^7\text{ hm}^2$,比Giri估计的面积大12%,这主要是因为Giri等^[51]使用的Landsat中分辨数据虽能够包含部分的细节来监测大范围红树林的分布和动态信息,但这些数据不能发现沿海的非常小斑块的红树林区域。

针对典型区域的红树林动态研究,Giri等^[52]利

表2 红树林遥感动态监测运用高光谱数据和方法
Tab. 2 Overview of hyperspectral data and methods for extracting mangrove remote sensing information

数据源	卫星传感器	目视解译	基于像元的分类法		智能化分类方法				面向对象分类法	综合提取法
			波段组合法	像元分解法	专家决策树	人工神经网络	支持向量机	随机森林		
机载	AISA+			2	1					
	CASI			1	1					
星载	EO-1 Hyperion		2	2	3	1	1			

表3 红树林遥感动态监测运用雷达数据和方法
Tab. 3 Overview of RADAR data and methods for extracting mangrove remote sensing information

数据源	卫星传感器	目视解译	基于像元的分类法		智能化分类方法				面向对象分类法	综合提取法
			波段组合法	像元分解法	专家决策树	人工神经网络	支持向量机	随机森林		
机载	AIRSAR			1	1		1		1	
	ALOS PALSAR	2		5			3		4	1
	ALOS AVNIR	1		3	3	1			1	1
	JERS-1			1	2	1			1	
星载	Envisat ASAR				1					
	Radarsat-1 SAR		1	2			1			
	Sentinal-1A SAR		1	2						

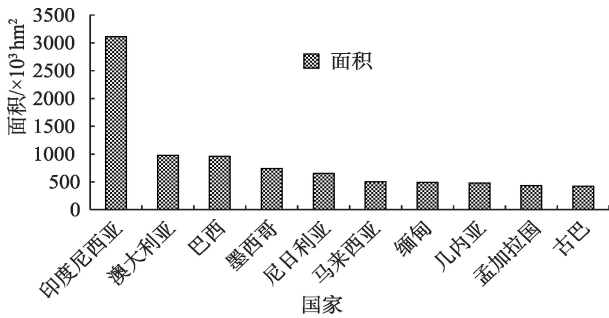


图3 全球10个红树林面积丰富的国家

Fig. 3 The 10 most mangrove-rich countries from global

用Landsat ETM+数据对南亚的印度河三角洲、果阿邦和孙德尔本斯3个地区进行监测,结果表明,南亚地区的红树林面积约为 $1.19 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占全球红树林面积的7%,从2000年到2012年,红树林损失了 $9 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 其主要原因是海平面上升导致的。Nardin等^[68]基于Landsat MSS/TM/ETM+/OLI数据,对印度尼西亚塔纳凯克岛的红树林进行提取,结果表明,1927–2013年间,受水产养殖、居民地增加和火烧等人为因素的影响,红树林面积减少64%。Ibharim等^[55]利用Landsat TM/ETM+数据对马来西亚半岛最大的红树林区域—马当红树林保护区进行监测,得出1993–2011年该区域的红树林受农业开垦、水产养殖和居民地增加等影响,面积损失 $0.8 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 。Quader等^[86]利用Landsat MSS/TM/ETM+数据对世界上最大面积的红树林地区—孙德尔本斯地区的红树林进行监测,结果显示在1975–2010年红树林面积减少约1.2%,即 $1 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 的红树林面积,主要因为印度洋海啸和海岸侵蚀等影响。

4.2 中国红树林动态变化

中国红树林主要分布在东南沿海地区,涉及广西、广东、海南、福建、浙江以及港澳台地区^[58]。在全国尺度上,国家林业局于2001年组织开展了全国红树林资源调查工作,初步查清了2001年全国红树林分布状况,其成果可作为全国红树林基线数据^[17]。2009–2013年国家林业局组织完成第二次全国湿地资源调查(未包括海南省三沙市和港澳台地区)工作是在三家中央技术支撑单位以及广东、广西、海南、福建、浙江省级调查组和各级林业主管部门中开展的^[14],通过这次调查对全国红树林资源进一步摸底和核实(表4、图4)。此次调查不仅完成了斑块性质的全国湿地资源调查,而且还形成了全国

湿地红树林数据库。2001年调查结果显示,中国红树林面积 $2.2025 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。第二次全国湿地调查红树林面积为 $34\,472 \text{ hm}^2$ ^[14],面积增加显著。除国家林业局系统性的调查外,不同的研究人员也进行了全国红树林遥感监测研究。吴培强等^[8]利用Landsat系列和HJ-1卫星数据对全国红树林进行监测,结果显示2000年和2010年,全国红树林面积分别为 $1.6054 \times 10^4 \sim 2.4578 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。Jia等^[39]利用Landsat数据进行的全国红树林监测结果表明,2010年红树林面积为 $20\,778 \text{ hm}^2$ 。由于这些研究所用的数据源、时相、分类方法、解译尺度等方面的差异,研究结果之间差异较大(表4)。相比于国家林业局普查数据,研究人员得到的红树林面积通常偏小。这可能是因为国家林业局在调查中包含了更多的野外调查,从而获取了许多低潮间带红树林数据;研究人员通常依赖遥感数据进行信息提取,所用遥感数据受成像时潮位影响,低潮间带这部分红树林提取会有一定的误差。

在区域尺度上,不同省份红树林面积分布及变化也表现出不同特征(表5)。国家林业局第二次湿

表4 基于不同研究的中国红树林面积对比及运用数据源
Tab. 4 The changes of mangrove area in China and application data sources

资料出处	总面积/ $\times 10^4 \text{ hm}^2$	数据源
国家林业局2001年调查	2.2025	Aerial photography
吴培强(2010)	2.4579	Landsat TM/ETM+/HJ-1 CCD
Jia(2013)	3.2996	Landsat MSS/TM/ETM+/OLI
国家林业局2013年调查	3.4472	CBERS-CCD

地调查结果表明,广东和广西地区的红树林分别为 $1.9751 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 和 $8.78 \times 10^3 \text{ hm}^2$ (图4),分别占全国面积的57.3%和25.5%,二者之和占中国红树林面积的80%以上。海南和福建的红树林面积分别为 $4.736 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 和 $1.184 \times 10^3 \text{ hm}^2$,分别占全国面积的13.7%和3.4%。浙江省红树林面积很小,所占比例不

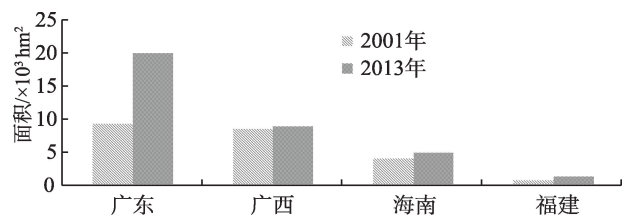


图4 国家林业局普查中各省份红树林面积对比

Fig. 4 The Changes of mangrove area in all provinces of the country

到1%^[89-90]。相比于2001年调查结果,广东省红树林面积近10年大幅度增长,增加了约 $1.0667\times 10^4\text{ hm}^2$,而广西增幅不大,约 $4.06\times 10^2\text{ hm}^2$ 。福建和海南的红树林面积则分别增长了 $5.69\times 10^2\text{ hm}^2$ 和 $8.06\times 10^2\text{ hm}^2$ 。

不同研究人员针对各省区的红树林调查结果则差异很大。吴培强等^[8]研究表明,2000-2010年,广东和广西红树林面积都有较大程度的增加,分别增加了约3409 hm^2 和3347 hm^2 ,而福建和海南则分别增加了 $6.73\times 10^2\text{ hm}^2$ 和 $1.096\times 10^3\text{ hm}^2$ 。李春干等^[5]监测广西2001、2010年红树林面积分别为 $6.679\times 10^3\text{ hm}^2$ 和 $6.758\times 10^3\text{ hm}^2$,面积基本稳定。

综上,相比较全球红树林面积减少的现象,2000年以来,中国红树林面积总体呈现增长的趋势,增加了1.2万多 hm^2 ,这是因为中国自80年代以来建立了多个国家级、省级的红树林保护区,起到了较好的保护效果^[91];而且人们对红树林的保护意识逐步增强,大规模的毁林造塘行为、污染、围垦、过渡捕捞和挖财、城市建筑等行为正在慢慢^[14];此外,政府还采取人工造林的方式使得红树林面积稳步增长^[15, 92-97]。

5 红树林遥感动态监测展望

综上所述,2000年以来,红树林遥感动态监测研究取得了长足发展。随着遥感平台及传感器技术的快速发展,未来红树林遥感监测数据来源也将更为多样,技术方法研究也会更为深入。以下4个

方面值得关注:

(1)在卫星遥感方面,高时空分辨率数据将成为大尺度红树林遥感监测的重要数据源。红树林通常斑块面积不大,低空间分辨率遥感数据限制了其对红树林斑块识别及变化检测能力。因此,高空间分辨率卫星数据在红树林遥感监测中已成为趋势。而传统的高空间分辨率数据由于卫星重访周期长,时间分辨率较低,在动态监测的时效性方面仍有不足。近年来,高时空分辨率的卫星遥感数据已成为可能。欧盟于2015年和2017年发射了哨兵-2A和哨兵-2B卫星,重访周期5 d,空间分辨率10-60 m。这两颗卫星都携带了覆盖13个波段的多光谱成像仪,包含3个红边波段,有助于对红树林信息进行遥感识别。此外,2016年6月,中国首颗地球静止轨道对地观测卫星高分四号(GF-4)正式投入使用,其成像采用面阵凝视方式,具备可见光、多光谱和红外成像能力,通过与此前发射的运行于低轨的高分一号、高分二号卫星组成星座,可为红树林动态监测提供同时具备高时间分辨率和较高空间分辨率的卫星遥感数据。另一方面,卫星雷达数据可以弥补光学传感器易受恶劣天气的影响的不足,而且具有一定的穿透能力,将雷达数据和光学遥感数据进行融合,有助于进一步提升红树林卫星遥感监测能力。当前雷达传感器的时间分辨率比较低,欧盟在2014年发射首颗哨兵-1A雷达卫星,时间分辨率可达5 d,为红树林遥感动态监测提供了新的雷达数据源。

表5 各省份红树林面积监测研究状况的对比

Tab. 5 Status of remote sensing monitoring of mangrove forests in each province

省份	各个年份红树林的面积/ hm^2							参考文献
	2000	2001	2007	2008	2010	2012	2013	
广西		6.679×10^3	6.448×10^3		6.758×10^3			[98]
							8.781×10^3	[78]
							7.243×10^3	[99]
		7.015×10^3	6.743×10^3		7.054×10^3			[87]
							1.9714×10^4	[78]
广东		1.0065×10^4		9.5×10^1				[9]
	8.722×10^3			9.9×10^1				[5]
海南						4.891×10^3		[79]
							4.736×10^3	[78]
		3.3×10^3						[88]
福建							1.184×10^3	[78]
浙江							2×10^1	[78]

(2)基于无人机平台的多传感器数据将得到广泛应用。基于无人机平台的多光谱、高光谱或激光雷达传感器可以提供信息更丰富的遥感数据,能够从多方面对红树林生态系统进行监测。然而,这些先进传感器的应用也面临挑战,它们需要有效载荷容量更大的无人机系统,这对无人机的空中飞行控制、影像几何校正及高分数据后处理技术也提出更高的要求。GEE(Google Earth Engine)是全球大尺度卫星数据平台,可以批量处理卫星影像数据的工具,是Google Earth的系列工具,相比于ENVI等传统的处理影像工具,GEE可以快速、批量处理数量“巨大”的影像,是未来红树林大尺度数据分析的有力平台。

(3)在红树林遥感信息提取方法上,针对日益丰富的高时空分辨率数据,基于机器学习的遥感分类方法将会获得更大发展。传统的分类方法受红树林特殊生长环境和人为因素的影响,大量的信息噪声往往使分类精度降低。近年来自动化程度较高的智能分类算法成为遥感信息提取新的热点。基于机器学习的方法采用推理及样本学习等方式从大量数据中获得相应的分类规则,具有更好的泛化能力,尤其适于处理“噪声”模式及大规模数据集等问题,有助于提供红树林遥感信息提取精度。此外,高时空分辨率遥感数据的应用,还需要发展更加有效的时间序列遥感分析方法,从而实现红树林动态变化的智能化、高精度识别。

(4)在研究区域上,虽然现今研究涉及了全球红树林的大部分区域,但对于非洲尼日利亚和北美洲古巴等地区(全球红树林面积前十的国家)的红树林研究鲜有报道,相应地,这些区域的红树林资料也非常缺乏,有待进一步加强。

参考文献(References):

- [1] 林鹏.红树林的种类及其分布[J].林业科学,1987(4):481-490. [Lin P. Distribution of mangrove species[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1987(4):481-490.]
- [2] 刘俊霞,任广波,高宁,等.基于SPOT5影像的红树林种类图谱特征分析和制图[J].激光生物学报,2014(6):609-613. [Liu J X, Ren G B, Gao N, et al. The type of mangrove features analysis and mapping based on SPOT-5 image[J]. Acta Laser Biology Sinica, 2014(6):609-613.]
- [3] 苏岫,赵冬至,黄凤荣,等.基于高空间分辨率的红树林卫星遥感监测技术进展[J].热带海洋学报,2011(3):38-45. [Su X, Zhao D Z, Huang F R, et al. Development of mangrove monitoring technology using high spatial-resolution satellite images[J]. Journal of tropical oceanography, 2014(6):609-613.]
- [4] 苏岫,赵冬至,王祥,等.基于SPOT5的红树林遥感分类[J].热带海洋学报,2012(6):128-134. [Su X, Zhao D Z, Wang X, et al. Remote sensing classification of mangrove based on SPOT5 image[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2012(6):128-134.]
- [5] 李春干,代华兵.1960-2010年广西红树林空间分布演变机制[J].生态学报,2015,35(18):5992-6006. [Li C G, Dai H B. The spatial spatial distribution evolution mechanism of mangroves in Guangxi from 1960 to 2010[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(18):5992-6006.]
- [6] 何斌源,范航清,王琨,等.中国红树林湿地物种多样性及其形成[J].生态学报,2007,27(11):4859-4870. [He B Y, Fan H Q, Wang M, et al. Species diversity in mangrove wetlands of China and its causation analyses[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007,27(11):4859-4890.]
- [7] FAO. Status and trends in mangrove area extent world wide[R]. Rome: Forest resources assessment programme, 2003.
- [8] 吴培强,马毅,李晓敏,等.广东省红树林资源变化遥感监测[J].海洋学研究,2011(4):16-24. [Wu P Q, Zhang J, Ma Y, et al. Remote sensing monitoring and analysis of the changes of mangrove resource in China in the pasts 20 years[J]. Advances in Marine Science, 2011(4):16-24.]
- [9] 林鹏,红树林[M].北京:海洋出版社,1984. [Lin P. Mangrove[M]. Beijing: Ocean Press, 1984.]
- [10] 林鹏,傅勤.中国红树林的环境生态及经济利用[M].北京:高等教育出版社,1997. [Lin P, Fu Q. Environmental ecology and economic utilization of mangroves in China [M]. Beijing: Higher Education Press, 1997.]
- [11] 范航清.红树林海岸环保卫士[M].南宁:广西科学技术出版社,2000:32-37. [Fan H Q. Mangrove-environmental protection Guard at the coastal zone[M]. Nanning: Guangxi Science and Technology Press, 2000:32-37.]
- [12] 国家林业局森林资源管理司.全国红树林资源报告[R], 2002. [Forest Resources Management Division, State Forestry Administration. National Mangrove Resources Report [R]. 2002.]
- [13] 王玉图.中国红树林生态系统健康评价指标体系研究[D].北京:中国科学院,2010:7-10. [Wang Y T. Research on the health assessing system of Chinese mangrove ecosystems[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2010: 7-70.]
- [14] 但新球,廖宝文,吴照柏,等.中国红树林湿地资源、保护现状和主要威胁[J].生态环境学报,2016(7):237-1243. [Dan X Q, Liao B W, Wu Z B, et al. Resources, conservation status and main threats of mangrove wetlands in Chi-

- na[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016(7):237-1243.]
- [15] 冯家莉,刘凯,朱远辉,等.无人机遥感在红树林资源调查中的应用[J].热带地理,2015(1):35-42. [Feng J L, Liu K, Zhu Y H, et al. Application of unmanned aerial vehicles to mangrove resources monitoring[J]. Tropical Geography, 2015(1):35-42.]
- [16] 胡健波,张健.无人机遥感在生态学中的应用进展[J].生态学报,2018(1):20-30. [Hu J B, Zhang J. Unmanned aerial vehicle remote sensing in ecology: Advances and prospects[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018(1):20-30.]
- [17] 国家海洋局908专项办公室.海岸带调查技术规程[M].北京:海洋出版社,2012. [National Oceanic Administration 908 Special Office. Coastal Zone Survey Technical Regulations[M]. Beijing: Ocean Publishing House, 2012.]
- [18] 黄星,辛琨,李秀珍,等.基于斑块的东寨港红树林湿地景观格局变化及其驱动力[J].应用生态学报,2015(5):1510-1518. [Huang X, Xin K, Li X Z, et al. Landscape pattern change of Dongzhai Harbour mangrove, South China analyzed with a patch-based method and its driving forces Chinese[J]. Journal of Applied Ecology, 2015(5):1510-1518.]
- [19] 李姗姗,田庆久.基于 Geoeye-1 影像光谱特性的红树林冠层种类识别[J].光谱学与光谱,2013(1):136-141. [Li S S, Tian Q J. Mangrove canopy species discrimination based on spectral features Geoeye-1 Imagery[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013(1):136-141.]
- [20] 王友绍.海洋生态系统多样性研究[J].中国科学院院刊,2011,26(2):184-189. [Wang Y S. Study on diversity of marine ecosystems[J]. Proceedings of the Chinese Academy of Sciences, 2011,26(2):184-189.]
- [21] 廖宝文,张乔民.中国红树林的分布、面积和树种组成[J].湿地科学,2014(4):435-440. [Liao B W, Zhang Q M. Area, distribution and species composition of mangroves in China[J]. Wetland Science, 2014(4):435-440.]
- [22] 林鹏.中国红树林研究进展[J].厦门大学学报(自然科学版),2001(2):592-603. [Lin P. A Review on the Mangrove Research in China[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2001(2):592-603.]
- [23] 刘春燕,张雪红,陈健.基于决策树的角度指数方法 EO-1 ALI 影像的红树林遥感识别[J].湿地科学,2015(4):451-455. [Liu C Y, Zhang X H, Chen J. Identifying mangrove forest with EO-1 1 ALI imagery combining decision tree with angle indices[J]. Wetland Science, 2015(4):451-455.]
- [24] Giri C, Pengra B, Long J. Next generation of global land cover characterization, mapping, and monitoring[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013(25):30-37.
- [25] 刘凯,黎夏,王树功,等.珠江口近20年红树林湿地的遥感动态监测[J].热带地理,2005(2):111-116. [Liu K, Li X, Wang S G, et al. Monitoring of the changes of the changes of mangrove wetland around the Zhujiang estuary in the past two decades by remote sensing[J]. Tropical Geography, 2005(2):111-116.]
- [26] 刘凯,朱远辉,李骞,等.基于多源遥感的广东镇海湾红树林演变分析[J].热带地理,2015(5):850-859. [Liu K, Zhu Y H, Li Q, et al. Analysis on mangrove resources changes of Zhenhai Bay in Guangdong based on multi source remote sensing images[J]. Tropical Geography, 2015(5):850-859.]
- [27] 孙永光,赵冬至,郭文永,等.红树林生态系统遥感监测研究进展[J].生态学报,2013(15):4523-4538. [Sun Y, Zhao D Z, Guo W Y, et al. A review on the application of remote sensing in mangrove ecosystem monitoring[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013(15):4523-4538.]
- [28] 吴培强,张杰,马毅,等.近20a来我国红树林资源变化遥感监测与分析[J].海洋科学进展,2013(3):406-414. [Wu P Q, Zhang J, Ma Y, et al. Remote Sensing monitoring and analysis of the changes of mangrove resource in China in the pasts 20 years[J]. Advances in Marine Science, 2013(3):406-414.]
- [29] 张怀清,赵峰,崔丽娟.红树林湿地恢复遥感动态监测技术研究[J].林业科学研究,2008(S1):32-36. [Zhang H, Zhao F, Cui L. A study on dynamic monitoring of mangrove wetland restoration using remote sensing techniques [J]. Forestry research, 2008(S1):32-36.]
- [30] Wang C, Chen J, et al. A snow-free vegetation index for improved monitoring of vegetation spring green-up date in deciduous ecosystems[J]. Remote Sensing of Environment, 2017,196:1-12.
- [31] Abdul Aziz A, Phinn S, Dargusch P. Nvestigating the decline of ecosystem services in a production mangrove forest using Landsat and object-based image analysis[J]. Estuar Coast Shelf S, 2015,164:353-366.
- [32] 张雪红.基于决策树方法的 Landsat8 OLI 影像红树林信息自动提取[J].国土资源遥感,2016(2):182-187. [Zhang X H. Decision tree algorithm of automatically extracting mangrove forests information from Landsat 8 OLI imagery[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2016(2):182-187.]
- [33] 张雪红,田庆久.利用温湿度指数提高红树林遥感识别精度[J].国土资源遥感,2012,23(3):65-70. [Zhang X H, Tian Q J. Application of the temperature-moisture index to the improvement of remote sensing identification accuracy of mangrove[J]. Remote Sensing of Land and Resources, 2012,23(3):65-70.]

- [34] Nascimento W R, Souza-Filho P W, et al. Mapping changes in the largest continuous Amazonian mangrove belt using object-based classification of multisensor satellite imagery. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2013,117:83-93.
- [35] 章恒,王世新,周艺,等.多源遥感影像红树林信息提取方法比较[J].*湿地科学*,2015(2):145-152. [Zhang H, Wang S X, Zhou Y, et al. 2015. Comparison of different methods of mangrove extraction from multi-source remote sensing images[J]. *Wetland Science*, 2015(2):145-152.]
- [36] Fei S X, Shan C H, Hua G Z. Remote sensing of mangrove wetlands identification[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011,10(1):2287-2293.
- [37] 朱耀军,郭菊兰,武高洁,等.高分辨率卫星遥感在红树林资源监测中的应用[J].*世界林业研究*,2012(4):39-44. [Zhu Y J, Guo J L, Wu G J, et al. Application of high resolution satellite remote sensing to mangrove resources monitoring[J]. *World Forestry Research*, 2012(4):39-44.]
- [38] Abdul Aziz A, Phinn S, Dargusch P. Investigating the decline of ecosystem services in a production mangrove forest using Landsat and object-based image analysis[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2015(164):353-366.
- [39] 贾明明.1973-2013 年中国红树林动态变化遥感分析[D]. 沈阳:中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2014. [Jia M M. Remote sensing analysis of dynamic changes of Chinese mangroves from 1973 to 2013[D]. Shenyang: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology), 2014.]
- [40] Cao J, Leng W, Liu K, Liu L, et al. Object-based mangrove species classification using unmanned aerial vehicle hyperspectral images and digital surface models[J]. *Remote Sensing*, 2015,10(2):89-96.
- [41] Chellamani P, Singh C P, Panigrahy S. Assessment of the health status of Indian mangrove ecosystems using multi temporal remote sensing data[J]. *Tropical Ecology*, 2014, 55(2):245-253.
- [42] Chen B, Xiao X, Li X, et al. A mangrove forest map of China in 2015: Analysis of time series Landsat 7/8 and Sentinel-1A imagery in Google Earth Engine cloud computing platform[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017,131(1):104-120.
- [43] Chen C, Son N, Chang N, et al. Multi-Decadal mangrove forest change detection and Prediction in Honduras, Central America, with Landsat imagery and a Markov Chain model[J]. *Remote Sensing*, 2013,5(12):6408-6426.
- [44] Thomas N, Lucas R, Itoh T, et al. An approach to monitoring mangrove extents through time-series comparison of JERS-1 SAR and ALOS PALSAR data[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2015,23(1):3-17.
- [45] Connette G, Oswald P, Songer M, et al. Mapping distinct forest types improves overall forest identification based on multi-spectral landsat imagery for Myanmar's Tanintharyi Region[J]. *Remote Sensing*, 2016,8(11):882.
- [46] FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). The world's mangroves 1980-2005[R]. Rome: 2007: 153-157.
- [47] FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations)[R]. The State of World Fisheries and Aquaculture. Food and Agriculture Organization, Rome, 2012.
- [48] Ghosh M K, Kumar, Roy C. Mapping long-term changes in mangrove species composition and distribution in the Sundarbans[J]. *Forests*, 2016,7(3):512-520.
- [49] Giri C, Long J, Abbas S, et al. Distribution and dynamics of mangrove forests of South Asia[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015,148:101-111.
- [50] Suwanpravit C. Effects of near shore land-use dynamic on coastal erosion in Phuket, Thailand[C]// *Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE*, 2015(2):4832-4835.
- [51] Giri C, Pengra B, Long J, et al. Next generation of global land cover characterization, mapping, and monitoring[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geo-information*, 2013,25:30-37.
- [52] Giri C, Long J, Abbas S, et al. Distribution and dynamics of mangrove forests of South Asia[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015,148:101-111.
- [53] Hamilton S E, Casey D. Creation of a high spatio-temporal resolution global database of continuous mangrove forest cover for the 21st century (CGMFC-21)[J]. *Global Ecology & Biogeography*, 2016,25(6):729-738.
- [54] Heumann B W. An object-based classification of mangroves using a hybrid decision tree: Support vector machine approach[J]. *Remote Sensing*, 2011(11):2440-2460.
- [55] Ibrahim N A, Mustapha M A, Lihan T, et al. Determination of mangrove change in Matang Mangrove Forest using multi temporal satellite imageries[J]. *Ocean and Coastal Management*, 2011,114(1):64-76.
- [56] Jia M, Wang Z, Zhang Y, et al. Landsat-based estimation of mangrove forest loss and restoration in Guangxi Province, China, influenced by human and natural factors[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2015,8(1):311-323.
- [57] Malik A, Mertz O, Fensholt R. Mangrove forest decline: Consequences for livelihoods and environment in South Sulawesi[J]. *Regional Environmental Change*, 2017,17(1):157-169.
- [58] Juman R A, Ramsewak D. Land cover changes in the

- Caroni Swamp Ramsar Site, Trinidad (1942 and 2007) implications for management[J]. *Journal of Coastal Conservation*, 2013,17(1):133-141.
- [59] Viennois G, Proisy C, Féret J B, et al. Multitemporal analysis of high-spatial-resolution optical satellite imagery for mangrove species mapping in Bali, Indonesia[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2016,9(8):3680-3686.
- [60] Wang T, Zhang H, Lin H, et al. Textural-Spectral feature-based species classification of mangroves in Mai Po Nature reserve from worldview-3 imagery[J]. *Remote Sensing*, 2015,8(1):24-32.
- [61] Otero V, Quisthoudt K, Koedam N, et al. Mangroves at their limits: Detection and area estimation of mangroves along the Sahara desert coast[J]. *Remote Sensing*, 2016,8(6):512-520.
- [62] Upadhyay A, Shetty A, Singh S K, et al. Land use and land cover classification of LISS-III satellite image using KNN and decision tree[C]// *International Conference on Computing for Sustainable Global Development*. IEEE, 2016.
- [63] Azian M, Ismail Adnan A M, Mohd Hasmadi I. The use of remote sensing for monitoring spatial and temporal changes in mangrove management[J]. *Malaysian Forester*, 2009,6:100-120.
- [64] Singh S K, Srivastava P K, Gupta M, et al. Appraisal of land use/land cover of mangrove forest ecosystem using support vector machine[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014,71(5):2245-2255.
- [65] Zhang D S, Cong L X, Wang Z Q, et al. Object-oriented Zhangjiangkou mangrove communities classification Using quickbird imagery[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 05-607(1):2274-2278.
- [66] Malik A, Mertz O, Fensholt R. Mangrove forest decline: Consequences for livelihoods and environment in South Sulawesi[J]. *Regional Environmental Change*, 2017,17(1):157-169.
- [67] Jia M, Zhang Y, Wang Z, et al. Mapping the distribution of mangrove species in the Core Zone of Mai Po Marshes Nature Reserve, Hong Kong, using hyperspectral data and high-resolution data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2014,33(1):226-231.
- [68] Nardin W, Woodcock C E, Fagherazzi S. Bottom sediments affect Sonneratia mangrove forests in the prograding Mekong delta, Vietnam[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2016,177:60-70.
- [69] Nascimento W R, Souza-Filho P W M, Proisy C, et al. Mapping changes in the largest continuous Amazonian mangrove belt using object-based classification of multi-sensor satellite imagery[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2013,117:83-93.
- [70] Cubillas J E, Japitana M. The application of support vector machine using cielab color model, color intensity and color constancy as features for ortho image classification of benthic habitats in Hinatuan, Surigao del Sur, Philippines[J]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, XLI-B7:189-194.
- [71] Wong F K K, Fung T. Combining EO-1 hyperion and enviroSAT ASAR data for mangrove species classification in Mai Po Ramsar Site, Hong Kong[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014,35(23):7828-7856.
- [72] Kumar, Tanumi, Panigrahy, et al. Classification of floristic composition of mangrove forests using, hyperspectral data: Case study of Bhitarkanika National Park, India[J]. *Journal of Coastal Conservation*, 2013,17(1):121-132.
- [73] Pastorguzman J, Dash J, Atkinson P M. Remote sensing of mangrove forest phenology and its environmental drivers[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017,4:205.
- [74] Bui T D, Maier S W, Austin C M. Land cover and land use change related to shrimp farming in coastal areas of Quang Ninh, Vietnam using remotely sensed data[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014,72(2):441-455.
- [75] Quoc T V, Oppelt N, Leinenkugel P, et al. Remote sensing in mapping mangrove ecosystems: An Object-Based approach[J]. *Remote Sensing*, 2013,5(1):183-201.
- [76] Rodriguez W, Feller I C, Cavanaugh K C. Spatio-temporal changes of a mangrove-saltmarsh ecotone in the north-eastern coast of Florida, USA[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2016,7:245-261.
- [77] Sabel D, Bartalis Z, Wagner W. Development of a Global Backscatter Model in support to the Sentinel-1 mission design[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012,120(SI):102-112.
- [78] Singh I J, Singh S K, Kushwaha S. Assessment and monitoring of estuarine mangrove forests of Goa using satellite remote sensing[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2004,32(2):167-174.
- [79] 韩维栋. 雷州半岛红树林及其保护策略研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2002. [Han W D. Study on mangrove and its conservation strategy of Leizhou Peninsula, China[D]. Xiamen: Xiamen university, 2002.]
- [80] 邓才龙. 无人机遥感在海岛海岸带监测中的应用研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2015. [Deng C L. Application of UAV remote sensing in island coastal

- zone monitoring[D]. Qingdao: First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2015.]
- [81] Chen Q, Ma K M. Research overview and trend on biological invasion in mangrove forests[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015,39(3):283-299.
- [82] Son N, Chen C, Chang N, et al. Mangrove mapping and change detection in Ca Mau Peninsula, Vietnam, Using Landsat data and Object-Based image analysis[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015,8(2):503-510.
- [83] Srinivasa Kumar T, Mahendra R S, Nayak S, et al. Identification of hot spots and well managed areas of Pichavaram mangrove using Landsat TM and Resourcesat: 1 LISS IV: An example of coastal resource conservation along Tamil Nadu Coast, India[J]. Journal of Coastal Conservation, 2015,16(1):1-12.
- [84] Friess D, Webb. Bad data equals bad policy: How to trust estimates of ecosystem loss when there is so much uncertainty? Environmental Conservation, 2011,38:1-5.
- [85] Chen J, Chen J, Liao A, et al. Global land cover mapping at 30 m resolution: A POK- based operational approach [J]. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015,103(6):7-27.
- [86] Quader M A, Agrawal S, Kervyn M. Multi-decadal land cover evolution in the Sundarban, the largest mangrove forest in the world[J]. Ocean & Coastal Management, 2017,139(2):113-124.
- [87] Tran L X, Fischer A. Spatiotemporal changes and fragmentation of mangroves and its effects on fish diversity in Ca Mau Province (Vietnam)[J]. Journal of Coastal Conservation, 2017,21(3):355-368.
- [88] Turkar V, Rao, Deo R. Fusion of multi-frequency polarimetric SAR and LISS-3 optical data for classification of various land covers[J]. AIP Conference Proceedings, 2014,157(1):487-492.
- [89] Umroh, Adi W, Sari S P. Detection of mangrove distribution in Pongok Island[C]//Setiawan Y, Prasetyo L B, Siregar I Z, et al. Procedia Environmental Sciences, 2016: 253-257.
- [90] 廖宝文,张乔民.中国红树林的分布、面积和树种组成[J]. 湿地科学,2014(4):25-29. [Liao B W, Zhang Q M. Area, distribution and species composition of mangroves in China[J]. Wetland Science, 2014(4):25-29.]
- [91] Wang D, Lin H, Chen J S, et al. Application of multi-temporal ENVISAT ASAR data to agricultural area mapping in the Pearl River Delta[J]. International Journal of Remote Sensing, 2010,31(6):1555-1572.
- [92] Wang T, Zhang H, Lin H, et al. Textural-spectral feature-based species classification of mangroves in Mai Po Nature Reserve from Worldview-3 imagery[J]. Remote Sensing, 2016,8(241):100-109.
- [93] Wilkie M L, Fortune. Status and trends of mangrove area worldwide[R]. Forest Resources Assessment Working Paper No. 63. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2013.
- [94] Wong F K K, Fung T. Combining EO-1 Hyperion and Envisat ASAR data for mangrove species classification in Mai Po Ramsar Site, Hong Kong[J]. International Journal of Remote Sensing, 2014,35(23):7828-7856.
- [95] Yang C H, Everitt J H, Fletcher R S, et al. Evaluating AISA hyperspectral imagery for mapping black mangrove along the South Texas Gulf coast[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2017,75(4):425-435.
- [96] Zeng T, Zhang Z, Zhao X, et al. Evaluation of the 2010 MODIS collection 5.1 land cover type product over China [J]. Remote Sensing, 2012,7(2):1981-2006
- [97] Ren C, Wang Z, Zhang B, et al. Remote monitoring of expansion of aquaculture ponds along coastal region of the Yellow River Delta from 1983 to 2015[J]. Chinese Geographical Science, 2018,28(3):430-442.
- [98] Zhang X, Tian Q. A mangrove recognition index for remote sensing of mangrove forest from space[J]. Current Science, 2013,105(8):1149-1155.
- [99] Zhang X, Treitz P M, Chen D, et al. Mapping mangrove forests using multi-tidal remotely-sensed data and a decision-tree-based procedure[J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2017,62:201-214.