

高分辨率卫星遥感在红树林资源监测中的应用*

朱耀军 郭菊兰 武高洁 郭志华

(中国林业科学研究院湿地研究所, 国家林业局湿地研究中心, 北京 100091)

摘要: 卫星遥感是进行红树林资源监测的主要方法, 高分辨率卫星遥感能够提供细尺度上的资源信息, 是红树林资源保护和监测研究的重要发展方向。文中在综合国内外相关文献的基础上, 分析国内外高分辨率卫星遥感包括高空间和高光谱遥感数据应用于红树林资源监测研究的现状, 讨论用于遥感研究的数据源、研究内容、方法以及应用研究的局限性和发展趋势。

关键词: 红树林, 高分辨率卫星遥感, 高空间, 高光谱, 资源监测

中图分类号: S771.8, TP79

文献标识码: A

文章编号: 1001-4241(2012)04-0039-06

Application of High Resolution Satellite Remote Sensing to Mangrove Resources Monitoring

Zhu Yaojun Guo Julian Wu Gaojie Guo Zhihua

(Research Institute of Wetland, Chinese Academy of Forestry;

Wetland Research Centre, State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: Satellite remote sensing is the major tool to monitor mangrove resources. High resolution satellite remote sensing can provide more detailed information at fine scale, and therefore it is possibly the important development direction in the protection and monitoring of mangrove resources. This paper overviewed the application of high spatial resolution and hyperspectral remote sensing data to mangrove resources monitoring on the basis of international and national literature reviews, and discussed and analyzed the limitations and development trends regarding data sources, research contents and methods of the study on remote sensing as well as the applied study.

Key words: mangrove, high resolution satellite remote sensing, high space, hyperspectral, resource monitoring

红树林生长于热带、亚热带地区的低能海岸潮间带, 是典型的生态交错带, 对于生态安全和海洋生态平衡的作用无可取代。受人类活动的强烈影响, 近50年来世界红树林资源减少了30%~50%, 下降速度快于热带雨林和珊瑚礁^[1]。相关预测表明, 如此下去, 100年后世界上的红树林将消失, 其所提供的重要生态系统产品和服务亦然^[2-4]。我国的红树林自然分布于南海海域的海南、广东、广西、福建以及港澳台地区。官方资料显示, 我国红树林面积曾高达25万hm², 20世纪50年代降至约5万hm²; 以后受农业围垦、水产养殖、旅游及城市化开发等影响, 急速减少

为目前的2.2万hm²^[5]。虽然我国多数红树林已划入不同等级的保护区, 但是受综合因素的影响, 资源减少和种群退化现象依然在持续。

红树林遥感研究始于20世纪60年代的航空摄影技术, 直到80年代卫星遥感技术才被广泛用于濒危红树林生态系统的监测和制图研究。目前, 卫星遥感已成为红树林资源监测的主要工具。我国的红树林遥感研究更多的是根据中、低分辨率遥感影像的光谱特征差异, 针对与红树林景观边界相关的数据信息进行处理。随着对地观测高分辨率遥感传感器的发射, 能够获取到更小尺度上详细资源信息的高分辨率

* 收稿日期: 2012-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(31100413); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CAFINT2011C10, CAFINT2010K08); 林业公益性行业科研专项(201104072)

作者简介: 朱耀军(1978-), 男, 山东安丘人, 博士, 助理研究员, 研究方向为景观生态与湿地资源管理, E-mail: yaojunzhu@gmail.com

遥感技术成为近年来环境资源监测研究的热点。红树林树种少,且呈现明显带状分布的生态特性,使得高分辨率遥感应用于红树林生态系统及细尺度上的遥感分类研究和资源监测制图成为可能。

1 卫星遥感数据源的获取

应用于红树林湿地研究的卫星遥感数据源主要来自可见光与近红外卫星影像和雷达卫星影像数据。以往对于红树林监测和调查多基于中、低分辨率遥感数据,数据类型主要包括 Landsat 系列(Landsat-5TM, Landsat MSS 和 Landsat-7 ETM+), IRS (the Indian Remote Sensing Satellite) 1C/1D LISS III, ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), NOAA-AVHRR, SPOT1-4 以及 CBERS 中巴卫星数据等。

自从 IKONOS-2, Quickbird 以及 SPOT5 等能提供更多参数信息的新一代对地观测高空间分辨率空载传感器成功发射以来,图像分辨率可以达到米级或亚米级,使得对红树林林分 and 不同种群类型差异的识别和精确制图成为可能。同时,还能够提供系列波谱范围的高光谱分辨率数据,可以在电磁波谱的可见光、近红外、中红外和热红外波段范围内获取非常窄的光谱连续数据,当前主要采用的数据源包括 HyMap, DEDALUS, AVIRIS, CASI 和 AISA+ 等影像也被用于红树林遥感制图和生态系统管理方面的研究。由于红树林资源大多分布于相对狭窄的区域,如河口、海岸线等,多时相分辨率遥感受空间分辨率较低的限制,在红树林资源监测应用中研究较少。

2 高分辨率卫星遥感在红树林资源监测中的应用

2.1 高空间分辨率遥感

2.1.1 研究内容

国外学者对于高空间分辨率遥感影像应用于红树林研究的主要内容包括红树林资源调查^[6]、树种识别^[7-11]、生物量估计^[12]、植被指数^[13-14]、动态监测^[15]以及功能评价^[16]等多个方面。在这些研究中,建立在小尺度上对树种或群落识别的研究较多。Kovacs 等^[13]根据遥感数据对叶面积指数进行了计算,并与地面测定数据进行比较,分析了 1 m 分辨率的多光谱 IKONOS 卫星数据用于树种水平上生物量估计

的有效性。Rodriguez 和 Feller^[6]认为,红树林生长状况、退化特征与土地利用变化之间存在空间相关性,基于高空间分辨率遥感的红树林制图可以用于立地和景观尺度上的红树林生长与生物物理、营养循环以及水文的空间关联分析。红树林作为埃及 Abu Minqar 岛上唯一的常绿森林,其小尺度上的资源动态影响鸟类迁徙、海洋生物繁育等生态过程^[10]。红树林树种水平上的制图可以用于分析细尺度上的红树林群落动态^[9],更好地用于不同尺度上红树林资源动态发展和生物多样性研究,是红树林资源管理的基础。

在高空间数据应用于红树林研究方面,国内已有的研究多数是根据红树林与非红树林之间的光学特征差异来进行林分水平上的信息识别,能够达到比 Landsat TM 等中分辨率影像更为精确的制图目标^[15,17-20]。其中,我国台湾学者 Lee 等^[15]基于 SPOT5 和 Quickbird 影像进行了红树林制图,结合植被指数和最大似然分类法提取了红树林植被覆盖信息,并进行了面积变化分析。方圣辉等^[17]根据 IKONOS 影像的光谱信息、纹理特征快速提取了红树林的位置、边界和变化情况,避免与芦苇相混淆。田新光等^[18]基于 IKONOS 影像采用面向对象的方法提高了红树林的信息提取精度,避免了因光谱相似造成的分类误差。乐通潮等^[19]基于 SPOT5 影像,通过决策树方法解决了红树林与其他邻近林地混淆的问题,更精确地提取了红树林遥感信息。可见,国内缺少高空间分辨率遥感在红树林生态过程研究等更深层次上的应用,对红树林树种和种群水平上的分类技术与应用研究较少,基于高空间分辨率遥感的红树林的准确提取与信息挖掘,尤其在树种水平上的研究,依然处于早期探索阶段。

2.1.2 研究方法

与中、低分辨率遥感数据不同,高空间分辨率数据增加了纹理结构的变化,但影像的光谱信息少,解译和分类也与传统方法存在很大差别。当前,用于高分辨率数据的解译方法从目视解译发展到半自动、自动以及计算机智能分类等,包括波段优选组合、图像分类、专家分类、面向对象、线性分离以及神经网络分析等方法。

由于高空间数据的光谱波段较少,对于目标影像的区分精度不够,容易引起空间对象边界特征的混淆和叠加,进而造成分类对象光谱类型的分离困难。因

此,基于影像分割的运算技术以及纹理信息和环境因子常被当作区分参数用于红树林制图。结合使用面向像元和面向对象2种分类方法比单独使用可获得更高的分类精度。例如,有学者将 IKONOS 影像的纹理信息融入到原始的光谱波段进行分析,获得了很好的分类制图结果^[11,21]。Wang 等^[22]通过比较包括 BP 神经网络(BPNN)、聚集神经网络(CBNN)和最大似然法分类(MLC)在内的多种分类方法,认为神经网络分析方法可以提升树种水平上的红树林制图精度。Proisy 等^[12]使用 IKONOS 数据,基于傅里叶转换和傅里叶光谱主成分分析,结合多元线性回归模型,对红树林地上及树冠生物量进行了估计。Wang 等^[11]研究认为,就最大似然法用于树种水平的分类而言,IKONOS 影像比 Quickbird 具有更好的光谱识别特征。Rodriguez 和 Fellers^[6]同时采用黑白航片和 IKONOS 数据并结合立地调查,通过主成分分析、植被指数和 HIS 转换等操作,在更细尺度上识别了周边土地利用/覆盖变化的不同亚类。Dahdouh - Guebas 等^[8]利用 IKONOS 影像进行了红树林树种水平上的制图,并在非监督分类和监督分类中进行了多波段组合及转换运算,认为 pan - sharpened 假彩色合成能够产生更高的空间细节和纹理结构。

国内学者也对红树林高空间遥感精准制图方法进行了探讨。方圣辉等^[17]采用最大似然法,基于 IKONOS 数据的光谱特征和纹理信息分析,提高了分类精度。张伟等^[20]对 Quickbird 数据进行了正射校正、波段融合和近自然色合成等预处理,得到的影像可用于红树林内部群落信息的提取。田新光等^[18]对基于 IKONOS 影像的面向对象法与最大似然法进行比较后认为,前者分类精度更高。乐通潮等^[19]通过决策树分类方法,在 SPOT5 影像上提高了漳江口红树林湿地不同类型的分类精度。Lee 和 Yeh^[15]基于 Quickbird 影像,通过两步分析法,即先通过植被指数 NDVI 进行图像分类并掩膜处理,再利用最大似然法准确识别出红树林与非红树林区域,获取了台北淡水河口的红树林分布信息。

2.1.3 应用局限性及发展趋势

应用高分辨率影像是当前红树林研究的热点,但尚处于早期阶段。高空间遥感数据的优势在于其空间分辨率已经达到米级或亚米级,图像更加接近于地物的真实反映,对于地物形状信息的提取相对容易。但由于其光谱波段少,覆盖面积相对较少,虽然能满

足一定条件下精细研究的需求,但单独用于树种水平上的区别相对困难。由于受红树林树种多样性、环境异质性等多种因素的影响较大,高空间数据的获取受天气条件、潮汐淹没程度的制约,对于红树林资源的重复性监测所需要花费相对较高,而且由于发射时间晚,可追溯性研究的时间较短。

高空间分辨率遥感用于红树林树种水平上的制图是可行的,但仍处于起步阶段。结合光谱特征差异进行识别是光学影像数据选择的基本条件,因此更高的空间分辨率影像并不是更优的选择^[11]。虽然受复杂目标波谱范围宽等方面的限制,单纯基于光谱分辨率的识别在种群内可能产生混淆,但对树种间甚至属间的分类可以结合多种方法进行处理以提升其应用效果,但也取决于立地条件、群落结构、树种组成以及分析者的自身条件。高分辨率卫星遥感是红树林精确制图和资源监测的一种高效工具,随着传感器技术在目标参数设定和技术性能方面的提升,其会有更大的发展空间。

2.2 高光谱卫星遥感

2.2.1 研究内容

高光谱数据在红树林方面的研究,主要从红树植物的叶片含水量、化学成分等对于光谱的不同反应着手,开展与环境评价、生态系统功能、生理胁迫等相关研究,用于红树林专题制图与健康监测等方面的研究。Vaiphasa 等^[23]在实验室中利用光谱仪对 16 种红树树种的光谱数据进行测定分析后认为,高光谱数据可以用于树种水平上的遥感监测。不同退化程度和环境胁迫下的红树植物叶片的光谱值与叶片中的叶绿素 a、b 和类胡萝卜素含量显著相关,高光谱遥感可以反映红树树种的健康状况^[24-25]。Ong 等^[26]基于 HyMap 影像,根据铁矿粉在红树林叶片表面的附着情况,分析了环境污染对红树林生长的影响。Dale 等^[27]基于 DEDALUS 影像,通过分析不同地物覆盖下水体温度的热红外差异,识别出红树林与盐沼湿地。Hirano 等^[28]使用 AVIRIS 影像进行了红树林植被的遥感制图,研究发现分类效果在树种间差别较大。Green 等^[29]比较了不同遥感数据的适用性后认为,CASI 数据可以高效识别红树林纯林林分,而对于混交林树种的识别精度不够。Jensen 等^[30]认为,AI-SA + 数据可以用于识别海岸红树林植被,还可以获取海岸生态系统的高分辨率空间和光谱信息并用于

海岸带资源监测。Kamal 和 Phinn^[31] 基于更高空间分辨率(1.5 m)的 CASI-2 数据,对高光谱数据用于红树林树种水平上的制图进行了可行性分析。

国内也有学者针对不同红树植物的光谱差异特征,基于高光谱数据对红树林展开了研究。肖海燕等^[32] 利用高光谱数据,通过专家决策树法提取了红树林群落水平上的资源信息。于祥等^[33] 进行了影像高光谱特征和地面反射光谱特征相关性分析。陈一萌等^[34] 对惠州红树林的遥感数据研究表明,高分辨率 HR 数据与高光谱 CCD 影像融合可用于小尺度上红树林资源的调查和监测。

2.2.2 研究方法

国外学者对于高光谱数据的应用研究是根据特定的目标结合不同的算法来实现的。多数研究采用面向像元的制图方法,包括最大似然法(MLC)^[35-36]、光谱角制图(SAM)^[37]、光谱分离^[23,34,37]等,而缺少面向对象的影像分析(OBIA)的应用研究^[38]。Yang 等^[35] 分析了最小距离法、马氏距离法、最大似然法和光谱角制图4种不同方法对于用 AISA+ 数据进行红树林遥感分类的适用性,认为最大似然法的效果最好。通过筛选最佳波段组合的方法可以提升红树林树种水平上的光谱分离精度。例如,Wang 等^[39] 基于不同胁迫条件下3种红树林叶片光谱的实测值,选取了用于遥感分类识别的光谱波段。Vaiphasa 等^[40] 基于遗传算法(GA)进行光谱波段的选择,进行了红树林树种水平上的高光谱遥感图像信息识别。受数据源限制,国内学者对于红树林高光谱遥感的研究多基于目标决策树、波段组合以及地物光谱关联分析等方法,基于特定目标算法的研究较少,对于支持向量机^[41](SVM)、BP神经网络(BPNN)以及集成分类器等新方法的应用较少。

2.2.3 应用局限性及发展趋势

高光谱遥感数据的优势在于对地物目标光谱特征的精细识别,但其光谱波段多,隐含的信息量大。与高空间遥感数据类似,其覆盖范围相对较小,数据获取受天气条件的制约,耗费较大。受传感器限制及数据源不稳定等因素的影响,数据获取相对困难,数据应用对分析者的专业能力和从业经验要求较高。

基于特定监测需求以及应用可行性与示范性是今后研发高分辨率遥感传感器的主要方向^[42]。通过遥感智能分类方法识别产生红树林类型图,可以避免人眼对于影像色调和色彩识别的局限性和个体差别。

根据特定目标的光谱信息保留和信息挖掘,以及多源遥感数据融合技术结合多时相遥感监测,是红树林资源遥感监测的发展趋势。针对红树林的生长特征,通过多时相光谱信息获取结合标准地物光谱特征的定量反演有助于提升分类精度。基于生境和植物特征的详细调查,并结合目视解译修正,可以获得更好的制图效果,更能体现种群或树种水平上的差别。我国的红树林树种较少,且多为单种群落或带状分布,建立树种水平上的多时相、多状态遥感指示数据库是红树林资源监测的发展要求。

国家海洋局《2010 中国海平面公报》指出,我国近30年来沿海海平面年均上升速率为2.6 mm,高于全球的上升速率;长江以南的海域上升速率更高,且上升趋势明显。《公报》预测未来30年中国海平面将比2009年升高80~130 mm,海岸侵蚀加速,近海自然灾害加重,将对红树林形成威胁。我国现有的红树林资源已处于濒危状态,而且正在承受着来自海平面上升以及快速城市化进程的双重压力,其应有的生态系统功能急剧下降。基于景观尺度上的资源监测已经不能满足全球气候变化条件下红树林资源保育的需要。综合利用多源高分辨率遥感数据的信息挖掘,结合雷达卫星图像数据量化红树林的几何形态和生物量的探测功能^[37,43-44],以及航空遥感技术,能够识别树种水平的生态系统信息,建立系统全面的资源信息库,用于全球气候变化背景下细尺度上的红树林种群格局分析、资源保育和精准管理。

参 考 文 献

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The world's mangroves 1980-2005[R]. Rome, Italy: FAO, 2007.
- [2] Duke N C, Meynecke J O, Dittmann S, et al. A world without mangroves? [J]. Science, 2007, 317(5834):41-42.
- [3] Giri C, Ochieng E, Tieszen L L, et al. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data [J]. Global Ecology and Biogeography, 2011, 20(1): 154-159.
- [4] Donato D C, Kauffman J B, Murdiyarso D, et al. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics [J]. Nature Geosciences, 2011(4): 293-297.
- [5] 国家林业局. 中国森林资源概况:第七次全国森林资源清查[R]. 北京:国家林业局, 2009:12.
- [6] Rodriguez W, Feller I C. Mangrove landscape characterization and change in Twin Cays, Belize using aerial photography and IKONOS satellite data [J]. Atoll Research Bulletin, 2004(513):1-22.
- [7] Valiela I, Bowen J L, York J K. Mangrove forests: one of the world's threatened major tropical environments [J]. Bioscience, 2001, 51

- (10):807-815.
- [8] Dahdouh - Guebas F, van Hiel E, Chan JCW, et al. Qualitative distinction of congeneric and introgressive mangrove species in mixed patchy forest assemblages using high spatial resolution remotely sensed imagery (IKONOS)[J]. *Systematics and Biodiversity*, 2005, 2(2): 113-119.
- [9] Neukermans G, Dahdouh - Guebas F, Kairo J G, et al. Mangrove species and stand mapping in Gazi Bay (Kenya) using Quickbird satellite imagery [J]. *Spatial Science*, 2008, 53(1):75-86.
- [10] Saleh M A. Mangrove vegetation on Abu Minqar Island of the Red Sea [J]. *Remote Sensing*, 2007, 28(23): 5191-5194.
- [11] Wang L, Sousa W P, Gong P, et al. Comparison of IKONOS and QuickBird imagery for mapping mangrove species on the Caribbean coast of Panama [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(3/4): 432-440.
- [12] Proisy C, Coueron P, Fromard F. Predicting and mapping mangrove biomass from canopy grain analysis using Fourier - based textural ordination of IKONOS images [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 109(3):379-392.
- [13] Kovacs J M, Flores - Verdugo F, Wang J, et al. Estimating leaf area index of a degraded mangrove forest using high spatial resolution satellite data [J]. *Aquatic Botany*, 2004, 80(1):13-22.
- [14] Kovacs J M, Wang J, Flores - Verdugo F. Mapping mangrove leaf area index at the species level using IKONOS and LAI - 2000 sensors for the Agua Brava Lagoon, Mexican Pacific [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 62(1/2):377-384.
- [15] Lee T M, Yeh H C. Applying remote sensing techniques to monitor shifting wetland vegetation; a case study of Danshui River estuary mangrove communities, Taiwan [J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(4): 487-496.
- [16] Olwig M F, Sorensen M K, Rasmussen M S, et al. Using remote sensing to assess the protective role of coastal woody vegetation against tsunami waves [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(13/14):3153-3169.
- [17] 方圣辉, 佃袁勇, 周源. 基于 IKONOS 数据的红树分类方法研究 [J]. *测绘信息与工程*, 2005, 30(4): 5-6.
- [18] 田新光, 张继贤, 张永红. 面向对象的红树林信息提取 [J]. *海洋测绘*, 2007, 27(2):41-44.
- [19] 乐通潮, 陈杰, 罗彩莲, 等. 决策树分类在红树林自然保护区 SPOT 影像解译中的应用 [J]. *福建林业科技*, 2008, 35(4):115-118.
- [20] 张伟, 兰樟仁, 李峥, 等. 红树林卫星遥感影像快鸟数据预处理方法 [J]. *福建林业科技*, 2006, 33(4):77-81
- [21] Kanniah K D, Lau A M S, Rasib A W. Per - pixel and sub - pixel classifications of high - resolution satellite data for mangrove species mapping [J]. *Applied GIS*, 2007, 3(8):1-22.
- [22] Wang L, Silvun - Cardenas L, Sousa W P. Neural network classification of mangrove species from multi - seasonal Ikonos imagery [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2008, 74(7): 921-927.
- [23] Vaiphasa C, Ongsomwang S, Vaiphasa T, et al. Tropical mangrove species discrimination using hyperspectral data: a laboratory study [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 65(1/2):371-379.
- [24] Zhang C H, Liu Y L, Kovacs J M, et al. Spectral response to varying levels of leaf pigments collected from a degraded mangrove forest [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2012, 6(1).
- [25] Flores-de-Santiago F, Kovacs J M, Flores-Verdugo F. Seasonal changes in leaf chlorophyll a content and morphology in a sub - tropical mangrove forest of the Mexican Pacific [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2011, 444:57-68.
- [26] Ong C C, Cudahy T J, Caccetta M S, et al. Deriving quantitative dust measurements related to iron ore handling from airborne hyperspectral data [J]. *Mining Technology*, 2003, 112(3): 158-163.
- [27] Dale P E, Knight J, Ritchie S A, et al. A practical tool to identify water bodies with potential for mosquito habitat under mangrove canopy: large - scale airborne scanning in the thermal band 8 - 13 μm [J]. *Wetlands Ecology Management*, 2005, 13(4): 389-394.
- [28] Hirano A, Madden M, Welch R. Hyperspectral image data for mapping wetland vegetation [J]. *Wetland*, 2003, 23(2): 436-448.
- [29] Green E P, Clark C D, Mumby P J, et al. Remote sensing techniques for mangrove mapping [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(5):935-956.
- [30] Jensen R, Mausel P, Dias N, et al. Spectral analysis of coastal vegetation and land cover using AISA + hyperspectral data [J]. *Geocarto International*, 2007, 22(1): 17-28.
- [31] Kamal M, Phinn S. Hyperspectral data for mangrove species mapping: a comparison of pixel - based and object - based approach [J]. *Remote Sensing*, 2011, 3(10): 2222-2242
- [32] 肖海燕, 曾辉, 咎启杰, 等. 基于高光谱数据和专家决策法提取红树林群落类型信息 [J]. *遥感学报*, 2007, 11(4):531-537.
- [33] 于祥, 赵冬至, 张丰收. 红树林的高光谱分析 [J]. *滨州学校学报*, 2006, 22(6):53-56
- [34] 陈一萌, 杨阳. 惠州红树林资源的遥感监测应用研究 [J]. *热带地理*, 2011, 31(4):373-376.
- [35] Yang C, 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*, 2009, 75(4):425-435.
- [36] Held A, Ticehurst C, Lymburner L, et al. High resolution mapping of tropical mangrove ecosystems using hyper - spectral and radar remote sensing [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(13): 2739-2759.
- [37] Demuro M, Chisholm L. Assessment of hyperion for characterizing mangrove communities [C]. *Proceedings of the AVIRIS 2003 Workshop*, Pasadena, CA, USA, 25-28 February, 2003: 18-23.
- [38] Blaschke T. Object based image analysis for remote sensing [J]. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, 65(1):2-16.

- [39] Wang L, Sousa W P. Distinguishing mangrove species with laboratory measurements of hyperspectral leaf reflectance [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(5): 1267 - 1281.
- [40] Vaiphasa C, Skidmore A K, de Boer W F, et al. A hyperspectral band selector for plant species discrimination [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 62(3): 225 - 235.
- [41] Luo Y M, Liao M H, Yan J, et al. A multi-features fusion support vector machine method (MF-SVM) for classification of mangrove remote sensing image [J]. *Journal of Computational Information Systems*, 2012, 8(1): 323 - 334.
- [42] 宫鹏. 遥感科学与技术中的一些前沿问题[J]. *遥感学报*, 2009, 13(1): 13 - 23.
- [43] 黎夏, 叶嘉安, 王树功, 等. 红树林湿地植被生物量的雷达遥感估算[J]. *遥感学报*, 2006, 10(3): 387 - 396.
- [44] de Souza Pereira F R, Kampel M, Cunha - Lignon M. Mapping of mangrove forests on the southern coast of Sao Paulo, Brazil, using synthetic aperture radar data from ALOS/PALSAR [J]. *Remote Sensing Letters*, 2012, 3(7): 567 - 576.