

1991—2011 年廉江红树林分布及变化的遥感分析

刘大召, 韩泽文, 沈春燕

(广东海洋大学, 广东 湛江 524088)

摘要: 利用 1991 年的 1 景 TM 遥感数据, 2000 年的 ETM+ 遥感数据和 2011 年 HJ-1A 遥感数据进行廉江红树林信息的提取。结果表明: 1991, 2000 和 2011 年廉江的红树林分布面积分别为 131.6, 628.7 和 1 056.2 ha。自 1991 年至 2011 年红树林呈增加的趋势, 共增加 924.6 ha, 20 年间研究区域的红树林约增加了 7 倍。湛江红树林国家自然保护区的建立对于红树林湿地生态系统的保护和恢复起到极大的促进作用, 研究区域红树林造林恢复成果显著, 种植了大量的人工红树林。

关键词: 红树林; 植被覆盖指数; 非监督分类

中图分类号: 220.2530

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2019)04-0022-07

DOI: 10.11759/hyxx20180625001

红树林位于热带和亚热带纬度的盐碱海岸环境中, 是世界上生产力最高的陆地生态系统之一, 也是海洋生物的重要栖息地^[1-3], 红树林可以有效地减轻海岸侵蚀^[4-6]。尽管红树林有很好的生态和社会经济价值, 然而红树林的面积正在以惊人的速度下降, 而且目前存在的红树林大部分都处于退化状态^[7]。红树林湿地的减少不仅会导致海岸带生态功能的减退, 而且会破坏野生动物的栖息地, 造成鸟类种类和数量的减少, 威胁生物多样性^[8]。

传统的红树林资源野外调查实践耗时费力, 主要原因在于红树林大多生长于河口等沿岸的沼泽地且长势茂盛, 再加上松软的泥土和涨落潮水的影响, 行人很难进入。近 20 年来快速发展的遥感技术, 具有大范围、无接触的特点, 为红树林资源的监测提供了有效的手段。遥感数据有助于及时发现红树林覆盖的变化, 并可以确定需要进行保护和恢复的重点区域^[9]。研究人员利用遥感数据绘制了红树林在一些区域及至全球的分布^[8, 10-14]。也有些研究人员利用遥感数据分析了红树林资源的动态变化^[7, 9, 15-22]。20 世纪 90 年代以后, 一些高空间分辨率(空间分辨率<10 m)的影像如 Geosy, Quickbird 和 IKONOS 也开始被用于红树种类的识别^[23-27]。总体而言, 高空间分辨率的遥感数据需要购买且花费较大, 适宜于进行红树种类的识别及小范围红树林的遥感监测分析, 而中等分辨率的遥感数据例如 TM, ETM+, HJ 等可以免费获得, 适宜用于红树林资源的动态监测。

我国的红树林资源主要分布在广西、广东、海

南、福建和浙江等地。截至 2009 年中国红树林的面积为 23 081.5 hm², 其中广东省红树林的面积为 9 084 hm², 占全国的 40%^[28], 而广东的红树林有 80% 分布在湛江^[3]。湛江红树林国家自然保护区成立于 1997 年, 保护区成立后, 红树林资源得到了有效的保护, 并有所发展。了解和掌握红树林资源分布的演变过程和现状, 可对红树林资源的保护和修复提供重要的决策依据, 具有重要的意义。

1 研究区域

本文的研究区域为湛江红树林国家自然保护区核心区之一的湛江市下辖廉江市的红树林资源分布区, 如图 1 所示, 研究区域位于雷州半岛, 邻近广西壮族自治区。研究区域内共有 13 个红树种类^[29], 属于亚热带气候, 全年的平均气温为 22.3℃, 最凉爽的月份为 1 月份, 最热的月份为 7 月份, 降雨主要集中的雨季, 即每年的 4—8 月份, 降雨量占全年的降雨量的 80% 以上^[30]。

收稿日期: 2018-06-25; 修回日期: 2018-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41340049); 广东省科技计划项目(2016A020222016); 广东海洋大学创新强校项目(Q16147); 广东海洋大学项目(C14152, C15403, C17077)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41340049; Science and Technology Foundation of Guangdong, No.2016A020222016; Innovation and Strong School Foundation of Guangdong Ocean University, No.Q16147; Natural Science Foundation of Guangdong Ocean University, No.C14152, No.C15403 and No.C17077]

作者简介: 刘大召(1972-), 男, 河南平顶山人, 副教授, 博士, 研究方向: 海洋遥感及应用, 电话: 13692301496, E-mail: llddz@163.com; 沈春燕, 通信作者, 女, 博士, 主要从事海洋遥感应用方面的研究, E-mail: cyshen101@163.com

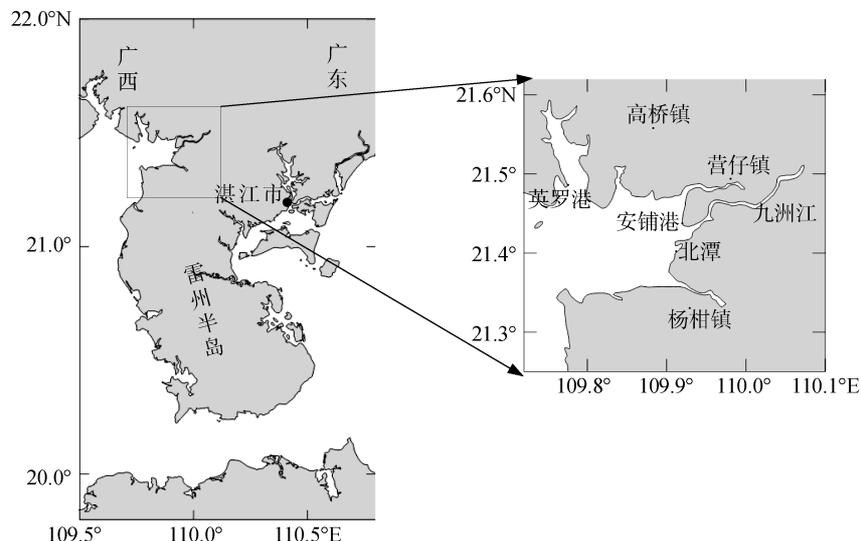


图1 研究区域
Fig. 1 Study area

2 数据和方法

2.1 遥感数据

研究区域面临北部湾，遥感数据受云的影响比较严重，我们最终选择1991年的1景TM影像，2000年的1景ETM+影像和2011年的1景HJ-1A影像用于分析红树林资源的分布。

遥感数据的几何校正是在envi5.4下进行。由于没有经过几何精校正研究区域的遥感数据，本研究通过选取控制点的方法先对其中1991年的TM影像进行几何精校正。先建立控制点文件，然后通过工具箱中的(Registration>>Select GCPs: Image to Map)进行几何校正。结合湛江地区1:10 000的地形图进行控制点的选择，控制点尽量选择相对稳定的相同区域，如道路交叉口、建筑物的底部边角等，避免在建筑物的顶部选点，以减少拍摄角度不同造成的影响；另外，控制点尽量均匀地分布在几何校正的影像上。本研究选择的几何校正的计算模型为3次多项式模型，选择的控制点的个数为43个，采用双线性内插法进行图像的重采样，几何校正的误差为0.5个像元以内。另外两景遥感数据以校正后的遥感数据为基准数据，通过选择工具箱中的Registration>>Select GCPs: Image to Image功能，由系统自动完成几何校正。校正后的三景遥感数据，在ENVI中用按同一区域功能进行裁剪，裁剪出研究区域不同时相的遥感数据。

利用envi自带的FLAASH大气校正模块，分别对裁剪后的三景遥感数据进行大气校正。根据成像时的气象数据及遥感数据本身记录的相关信息，输入影像中心像元的经纬度、遥感器的类型、高度、遥感数据的成像时间、像元的大小、大气模型和气溶胶类型等相关参数后，执行程序，才自动计算完成系统即可以自动完成。

2.2 现场调查

2011年5月，我们对研究区域的红树林资源进行了一次现场调查。主要记录研究区域红树林分布的区域，红树的种类，不同红树种类的光谱，利用GPS记录红树林分布的边界信息，红树的覆盖度，拍摄红树分布的照片，并于当地居民以及红树林国家自然保护区的工作人员交流，以了解记录红树林资源的变化情况，人工植林情况。这些数据有助于遥感数据的后期的解译及分类精度的分析。

2.3 红树林信息的提取

为了保证红树林资源的提取的精度，首先生成红树林的宜生长区域。北部湾红树林分布在海岸(堤)向外延伸50~1 000 m领域内^[12]，并结合现场调查的数据，研究区域的红树林主要分布在湾汊地区，根据这个特点在envi通过手动的方法生成红树林的宜生长区域的感兴趣区域，对影像进行裁剪，除去大部分的水域和陆地，只保留自然岸线向陆向水两侧各2 km的区域，以便增加分类的精度和提高图像处理的效率。

在遥感的应用研究中,植被指数是植被生长状态及植被覆盖度的最佳指示因子^[30]。本研究中采用归一化植被指数 NDVI(normalized difference vegetation index)来突出植被的信息。归一化植被指数采用如下的公式:

$$I_{NDVI}=(R_{TM4}-R_{TM3})/(R_{TM4}+R_{TM3}), \quad (1)$$

式中, I_{NDVI} 表示植被指数, R_{TM3} , R_{TM4} 为大气校正后 TM 影像波段 3 和波段 4 的反射率数据。

非监督分类可以用来有效的提取红树林的分布信息^[9,31],在亚热带海岸带遥感中有比较多的应用^[32]。本研究中采用 ISODATA(iterative selforganizing data analysis)分类器对 NDVI 数据进行非监督分类。ISODATA 是一种重复自组织数据分析技术,计算数据空间中均匀分布的类均值,然后用最小距离技术将剩余像元进行迭代聚合,每次迭代都重新计算均值,且根据所得的新均值,对像元进行再分类^[33]。在工具箱中选择分类工具(Classification>>Unsupervised>>IsoData),输入生成的 NDVI 图像,单击确定按钮,打开分类器参数设置的对话框。结合相关的参考文献,以及软件的参数设置的说明,分类数量范围的最小值设置为 5,最大值设置为 15,最大迭代次数设置为 15,变换的阈值设置为 5,每类所包含的像元设置为 1 000,最大分类标准差设置为 1,类别均值间的最小距离设置为 5,合并类别最大值设置为 2。

利用分类编辑工具,结合目视解译,并根据红树林的生长环境(主要分布在海岸潮间带地区)、几何特征(条带状或片状)、现场调查数据、研究区域的地形图、土地利用及变化图、以及原始图像数据的纹理(纹理密度均匀)、色调(红树林图像色调为深红色)等将最终的类别合并为红树林,陆地和水体 3 大类。

2.4 分类结果的验证

利用 2011 年研究区域空间分辨为 0.5 m 的航空遥感数据对分类的结果进行验证。从最终的分类图像上随机选取 211 个点进行数据的验证,验证点均匀的分布在图像上,其中红树林 95 个,陆地 66 个,水体 50 个。

3 结果与分析

3.1 分类的精度评价

对分类结果进行评价,确定分类的精度和可靠性。利用分类的混淆矩阵来评价 2011 年遥感数据分类的精度,结果如表 1 所示。其中总体分类精度为

92.4%,分类的 Kappa 系数为 88.1%,红树林的错分误差为 3.3%,红树林的漏分误差为 6.5%。经过分析,将红树林错分为陆地的原因是,这些红树林主要位于红树林斑块的靠近陆地的边缘,属于红树林与陆地的混合像元,还有一部分是属于人工种植的稀疏红树林,红树林没有完全覆盖土地,从而导致 NDVI 较小而错分为陆地。漏分的红树林主要为红树林斑块边缘且地势略低的红树林,这些红树林很容易被潮水淹没。根据中国海事网提供的潮汐表,2011 年获取遥感数据时,临近研究区域的北海港的潮位约为 234 cm,这将导致部分临近海水的红树林被淹没,或成为红树林与海水的混合像元,导致错分为水体。

表 1 分类的混淆矩阵

Tab. 1 Confusion matrix of classification

分类类型	非监督分类验证结果/%			
	红树林	水体	陆地	合计
红树林	92	0	3	95
水体	5	41	4	50
陆地	1	3	62	66
合计	98	44	69	211

3.2 红树林的分布

经过对卫星遥感图像解译分类,获得研究区域 1991—2011 年红树林分布图,如图 2 所示。由图像可以看到红树林主要分布在廉江的高桥镇和营仔镇。高桥镇红树林区内潮沟纵横交错,土壤肥沃,盐分大,由于潮位、土壤和海水盐度等生长条件的差异和变化,形成了复杂的红树林生态系统,是我国大陆现存连片面积最大的红树林带^[34]。营仔红树林位于九洲江出海口,这里的湿地面积在湛江市是最大的,达 2000 ha 多,拥有红海榄、秋茄、木榄、海桑等多种珍贵红树林品种^[35]。经过测算,1991 年廉江的红树林分布面积为 131.6 ha,2000 年廉江的红树林分布面积为 628.7 ha,2011 年廉江的红树林分布面积为 1056.2 ha。1991 年廉江高桥的红树林分布面积为 69 ha,廉江营仔的红树林分布面积为 47 ha^[3]。根据影像估算的红树林的面积比文献的红树林的面积略大,主要原因在于文献中统计红树林的范围比本研究中的范围要小一些,本研究中除了高桥镇与营仔镇的红树林外,还包括了北潭镇和杨柑镇的红树林。这两个镇的红树林呈零星的分布状态,没有形成比较大的连片分布。

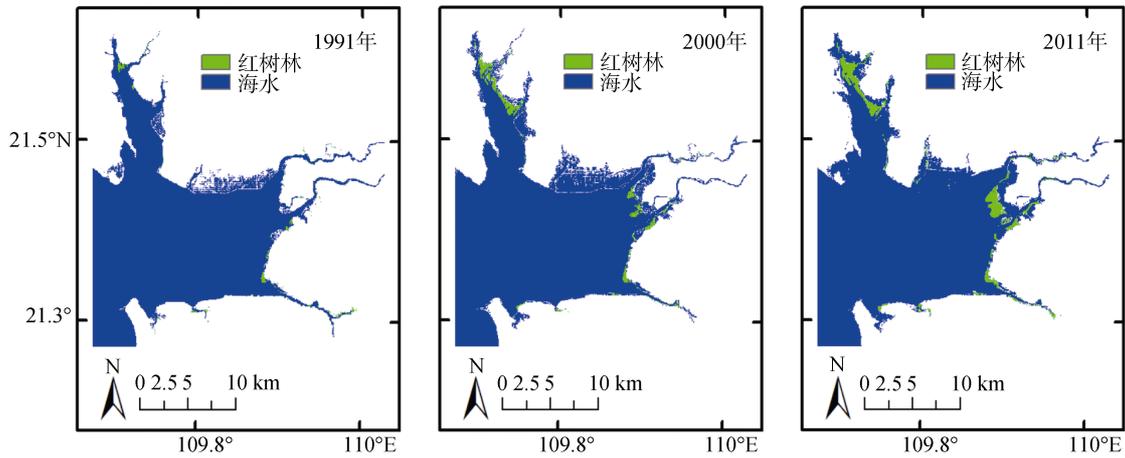


图2 廉江红树林分布图

Fig. 2 Distribution of mangrove forests in Lianjiang

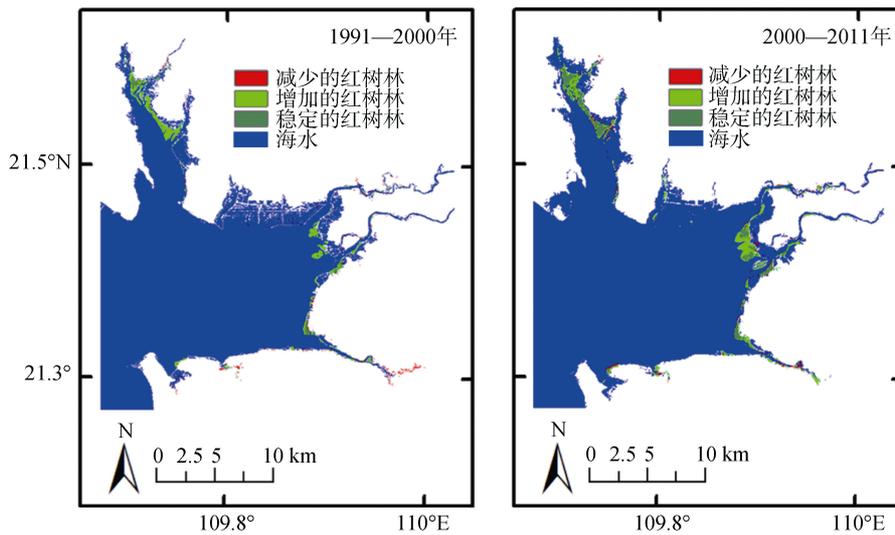


图3 廉江红树林变化示意图

Fig. 3 Change of mangrove forests in Lianjiang

3.3 红树林分布的变化分析

根据 1991, 2000, 2011 年 3 个时相影像解译的红树林分布, 可以分析从 1991 年到 2011 年湛江红树林的变化情况, 如图 3 所示。廉江红树林 1991 年的面积为 131.6 ha, 2000 年的面积为 628.7 ha, 自 1991 年至 2000 年红树林呈增加的趋势, 共增加 497.1 ha, 约增加 3.8 倍, 年增加率为 37.8%。2011 年的面积为 1056.2 ha, 自 2000 年至 2011 年红树林也呈增加的趋势, 共增加 427.5 ha, 增长 68%。总体上, 自 1991 年至 2011 年红树林呈增加的趋势, 共增加 924.6 ha, 20 年间研究区域的红树林约增加了 7 倍。

表 2 是廉江红树林分布区地物变化矩阵。结合地物变化矩阵, 自 1991 年至 2011 年红树林处于剧烈

的变化过程中, 只有 47.5% 的红树林保持稳定, 而 15.0% 的红树林变成了水体, 37.5% 的红树林变成了陆地。新增加的红树林主要来自水体, 占水体总面积的 3.7%。需要注意的是近 20 年, 红树林转为水体和水体转化为红树林的比例都较高。这与红树林的生长环境有密切的关系, 表 3 是遥感数据成像时的潮位数据, 可以看到, 获取遥感数据时, 研究区域的潮位都超过了 2 m, 尤其是 2000 年的潮位接近 3 m, 这将导致部分红树林被淹没, 而成像时的潮位数据不一致也导致了红树林与水体之间较高的转化率。各地物之间的转化比较剧烈, 也与 20 世纪 90 年代后研究区域大力发展水产养殖有关, 1991 年到 2000 年, 高桥镇的水产养殖达到 490 ha, 占该区总面积的 25%, 营仔区水产养殖面积为 2438.8 ha, 占该区总面积的

37.8%^[31], 原有大量的滩涂被开挖成养殖区, 期间部分的红树林被毁掉, 围海造田是红树林减少的主要原因^[34]。

表 2 1991—2011 年廉江红树林分布区地物变化矩阵
Tab. 2 Ground change matrix for mangrove area from 1991 to 2011

时间	分类类型	地物变化矩阵/%		
		转化为红树林	转化为水体	转化为陆地
1991—	红树林	41.0	16.5	42.5
2000 年	水体	2.4	94.5	3.1
	陆地	0.1	2.7	97.2
2000—	红树林	81.5	11.0	7.5
2011 年	水体	1.5	96.2	2.3
	陆地	0.4	2.5	97.1
1991—	红树林	47.5	15.0	37.5
2011 年	水体	3.7	93.5	2.7
	陆地	0.2	4.2	95.5

表 3 遥感数据成像时的潮汐数据
Tab. 3 Tide data while capturing remote sensing data

潮高/cm	日期/年-月-日	数据类型
204	1991-10-30	Landsat-5 TM
286	2000-10-30	Landsat-7 ETM
234	2011-12-25	Hj-1A

从 1991 年到 2011 年, 20 年间研究区域红树林的分布呈净增长的趋势主要归功于湛江红树林国家自然保护区的建立。湛江红树林自然保护区始建于 1991 年, 1997 年升级为湛江红树林国家自然保护区^[3]。研究区域正是湛江红树林国家自然保护区中的两个核心区域, 一方面保护区内的红树林禁止被砍伐, 或转化为其他的用途, 另一方面在保护区内的适宜红树林生长的区域进行大量的人工红树林种植。湛江红树林国家级自然保护区的建立对于当地红树林湿地生态系统的保护和恢复起到极大的促进作用, 1991 年以后湛江红树林造林恢复成果显著^[34]。高桥镇在原有红树林区域的东南方向沿海岸滩涂种植了带状红树林, 营仔区也人工种植了大量的红树林^[34]。自 1990 年到 2000 年, 广东省的红树林增加了 988.8 ha, 10 年间增长了 12.8%, 同时, 红树林由沿岸分散分布趋于红树林自然保护区集中分布, 天然林减少, 人工林增加^[35], 而同一时间中国境内的红树林增加了 25 344 ha, 增长了 18.7%^[19]。

4 结论

本研究中我们利用多时相的卫星遥感数据分析了近 20 年来湛江廉江地区的分布及变化情况。结果表明: 1991 年廉江的红树林分布面积为 131.6 ha, 2000 年廉江的红树林分布面积为 628.7 ha, 2011 年廉江的红树林分布面积为 1056.2 ha。自 1991 年至 2000 年红树林呈增加的趋势, 共增加 497.1 ha, 约增加 3.8 倍, 年增加率为 37.8%。自 2000 年至 2011 年红树林也呈增加的趋势, 共增加 427.5 ha, 增长 68%。总体上, 自 1991 年至 2011 年红树林呈增加的趋势, 共增加 924.6 ha, 20 年期间研究区域的红树林约增加了 7 倍。湛江国家红树林的自然保护区的建立是红树林增加的主要原因, 红树林增加的来源是人工种植了大量的红树林, 而围海造田是红树林减少的主要原因, 20 世纪 90 年代后海水养殖业得到了极大的发展, 大量的滩涂被用于开挖成池塘, 部分红树林被毁掉。

自 1991 年至 2011 年红树林处于剧烈的变化过程中, 只有 47.5% 的红树林保持稳定, 而 15.0% 的红树林变成了水体, 37.5% 的经树林变成了陆地。新增加的红树林主要来自水体, 占水体总面积的 3.7%。遥感数据成像时的潮位数据不一致, 并且都位于较高的潮位是导致红树林与水体之间有较大转化率的主要原因, 高潮时部分的红树林会被淹没, 会对遥感影像的解译造成的影响, 产生一定的误差。

参考文献:

- [1] Amarasinghe M D, Balasubramaniam S. Net primary productivity of two mangrove forest stands on the northwestern coast of Sri-Lanka[J]. *Hydrobiologia*, 1992, 247: 37-47.
- [2] Myint S W, Giri C, Wang Le, et al. Identifying mangrove species and their surrounding land use and land cover classes using an object-oriented approach with a Lacunarity spatial measure[J]. *Remote Sensing*, 2008, 45: 188-208.
- [3] Li M S, Mao L J, Shen W J, et al. Change and fragmentation trends of Zhanjiang mangrove forests in southern China using multi-temporal Landsat imagery (1977-2010)[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2013, 130: 111-120.
- [4] Kathiresan K, Rajendran N. Coastal mangrove forests mitigated tsunami[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 65: 601-606.
- [5] Souza-Filho P W M, Martins E S F, Costa F R. Using mangroves as a geological indicator of coastal changes

- in the Braganca macrotidal flat, Brazilian Amazon: A remote sensing data approach[J]. *Ocean Coast Manage*, 2006, 49: 462-475.
- [6] Wilson R N J, Pedro W M S, Christophe P, et al. Mapping changes in the largest continuous Amazonian mangrove belt using object-based classification of multisensor satellite imagery[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2013, 117: 83-89.
- [7] Giri C, Pengra B, Zhu Zhiliang, et al. Monitoring mangrove forest dynamics of the Sundarbans in Bangladesh and India using multi-temporal satellite data from 1973 to 2000[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 73: 91-100.
- [8] Li Tianhong, Han Peng, Zhao Zhijie. Impact analysis of coastal engineering projects on mangrove wetland area change with remote sensing[J]. *China Ocean Engineer*, 2007, 22: 347-358.
- [9] Judith C, Thomas W G, Richard R. Assessing forest change in a priority West African mangrove ecosystem: 1986–2010[J]. *Geoforum*, 2014, 53: 126-135.
- [10] Karen C S, Michail F. Mangrove conversion and aquaculture development in Vietnam: A remote sensing-based approach for evaluating the Ramsar Convention on Wetlands[J]. *Global Environment Change*, 2007, 17: 486-500.
- [11] 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: 154-159.
- [12] 李姗姗, 田庆久. 北部湾红树林的 HJ 星多光谱遥感提取模式[J]. *中国科学: 信息科学*, 2011, 41(s1): 158-170.
Li Shanshan, Tian Qingjiu. Mangrove extraction mode based on HJ multispectral remote sensing in Beibu Gulf[J]. *Science China: Information Science*, 2011, 41(s1): 158-170.
- [13] 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, 28(2): 182-187.
Zhang Xuehong. Decision tree algorithm of automatically extracting mangrove forests information from Landsat 8 OLI imagery[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2016, 28(2): 182-187.
- [14] 李学杰, 万荣胜. 应用遥感方法分析北部湾红树林的分布[J]. *南海地质研究*, 2012(1): 26-38.
Li Xuejie, Wan Rongsheng. Distribution of mangrove in the Beibu Bay by remote sensing[J]. *Geological Research of South China Sea*, 2012(1): 26-38.
- [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: 487-496.
- [16] Wilson R N J, Pedro W M S, Christophe P, et al. Mapping changes in the largest continuous Amazonian mangrove belt using object-based classification of multisensor satellite imagery[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2013, 117: 83-89.
- [17] Giri C, Long J, Abbas S, et al. Distribution and dynamics of mangrove forests of South Asia[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 40: 1-11.
- [18] 黎夏, 刘凯, 王树功. 珠江口红树林湿地演变的遥感分析[J]. *地理学报*, 2006, 61(1): 26-34.
Li Xia, Liu Kai, Wang Shugong. Mangrove wetland changes in the Pearl River Estuary using remote sensing[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(1): 26-34.
- [19] 吴培强, 张杰, 马毅, 等. 近 20 年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, 31(3): 406-414.
Wu Peiqiang, Zhang Jie, Ma Yi, et al. Remote sensing monitoring and analysis of the changes of mangrove resources in China in the past 20 years[J]. *Advances in Marine Science*, 2013, 31(3): 406-414.
- [20] 赵玉灵. 近 40 年来伶仃洋海岸线与红树林遥感调查与演变分析[J]. *国土资源遥感*, 2017, 29(1): 136-142.
Zhao Yuling. Remote sensing dynamic monitoring of the shoreline and the mangrove wetland in the Lingdingyang Estuary in the past 40 years[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2017, 29(1): 136-142.
- [21] Lu Zhai, Bo Zhang, Shouraseni S R, et al. Remote sensing of unhelpful resilience to sea level rise caused by mangrove expansion: A case study of islands in Florida Bay, USA[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 97: 51-58.
- [22] Matthew I B, Tristan P, Javier L, et al. Using remote sensing and traditional ecological knowledge (TEK) to understand mangrove change on the Maroochy River, Queensland, Australia[J]. *Applied Geography*, 2018, 94: 71-83.
- [23] Wang L, Sousa W P, Gong P, et al. Comparison of IKONOS and QuickBird images for mapping mangrove species on the Caribbean coast of Panama[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91: 432-440.
- [24] Kovacs J M, Wang J F, 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: 377-384.
- [25] Proisy C, Coutron 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: 379-392.
- [26] Satapathy D R, Krupadam R J, Kumar L P, et al. The application of satellite data for the quantification of mangrove loss and coastal management in the Godavari estuary, East Coast of India[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, 134: 453-469.
- [27] Maartje O, Maria J S, Dennis W, et al. Assessing reha-

- bilitation of managed mangrove ecosystems using high resolution remote sensing[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 211: 238-247.
- [28] 傅秀梅, 王亚楠, 邵长伦, 等. 中国红树林资源状况及其药用研究调查 II. 资源现状、保护与管理[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*自然科学版, 2009, 39(4): 705-711.
Fu Xiumei, Wang Yanan, Shao Changlun, et al. Investigation on the status of mangrove resources and medicinal research in China II. Resources Status, Protection and Management[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2009, 39(4): 705-711.
- [29] Gao Xiumei, Han Weidong, Liu Shuqing. The mangrove and its conservation in Leizhou Peninsula, China[J]. *Journal of Forestry Research*, 2009, 20(2): 174-178.
- [30] 赵玉灵. 珠江口地区近 30 年海岸线与红树林湿地遥感动态监测[J]. *国土资源遥感*, 2010, 22(b11): 178-184.
Zhao Yuling. The remote sensing dynamic monitoring of the evolution of shoreline and mangrove wetlands in the Zhujiang River Estuary in the past 30 years[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2010, 22(b11): 178-184.
- [31] 邓书斌. 遥感图像处理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 65-66.
Deng Shubin. *Remote Sensing Image Processing Method*[M]. Beijing: Science Press, 2010: 65-66.
- [32] 毛丽君. 基于遥感的广东湛江红树林湿地动态变化研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2010: 9-10.
Mao Lijun. *Assessment of changes in mangrove forest patterns from multitemporal remotely sensed imagery over Zhanjiang City*[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2010: 9-10.
- [33] 何章莉, 史合印, 邢前国, 等. 遥感技术在大亚湾区域土地利用类型监测中的应用[J]. *生态科学*, 2006, 25(4): 371-374.
He Zhangli, Shiheyin, Xingqianguo, et al. Application of remote sensing technology in monitoring land use types in Daya Bay[J]. *Ecological Science*, 2006, 25(4): 371-374.
- [34] 湛江政府. 湛江廉江营仔镇红树林[EB/OL]. [2017-08-04]. <http://www.zhanjiang.gov.cn/fileserver/statichtml/2012-09/3a93ad51-ebe2-490f-9bd5-61e916718d6e.htm>.
Zhanjiang Government Network. Zhanjiang city lianjiang county yingzai mangrove town[EB/OL]. [2017-08-04]. <http://www.zhanjiang.gov.cn/fileserver/statichtml/2012-09/3a93ad51-ebe2-490f-9bd5-61e916718d6e.htm>.
- [35] 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, 29(4): 16-25.
Wu Peiqiang, Ma Yi, Li Xiaomin, et al. Remote sensing monitoring of the mangrove forests resources of Guangdong Province[J]. *Journal of the Marine Sciences*, 2011, 29(4): 16-25.

Remote sensing analysis of the distribution and change of mangrove forest in Lianjiang from 1991 to 2001

LIU Da-zhao, HAN Ze-wen, SHEN Chun-yan
(Guang dong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Received: Jun.25, 2018

Key words: mangrove; normalized difference vegetation index; unsupervised classification

Abstract: Mangrove forests provide valuable societal and ecological goods and services. However, they have been experiencing high annual rates of loss in numerous parts of the world. There are one TM in 1991, one TEM+ in 2000 and one HJ-1A in 2011 remote sensing data were used to analyze the mangrove distribution and change in the study area. The results showed that the mangrove areas in Lianjiang in 1991, 2000, and 2011 were 131.6 ha, 628.7 ha, and 1 056.2 ha, respectively, which indicate that between 1991 and 2011, the mangrove area presented a continuous increasing trend, with an increase of about 924.6 ha, and the mangrove forests in the study area have increased about seven times since the past 20 years. The establishment of Zhanjiang Mangrove Forest National Nature Reserve has promoted the protection and restoration of mangroves in the study area, and many mangroves have been artificially planted.

(本文编辑: 刘珊珊)