

基于 GF-2 影像的广西茅尾海红树林物种分类及盖度估算分析

马云梅^{1,2}, 吴培强², 潘良浩³, 王锦锦⁴, 王建步², 任广波², 马毅^{2,1}

(1. 内蒙古师范大学 地理科学学院, 内蒙古自治区 呼和浩特 010010; 2. 自然资源部第一海洋研究所, 山东青岛 266061; 3. 广西科学院广西红树林研究中心, 广西 北海 536000; 4. 上海欧比特航天科技有限公司, 上海 200000)

摘要: 为了掌握茅尾海红树林种类和盖度情况, 基于 GF-2 PMS1 高分辨率卫星遥感影像数据, 使用支持向量机(support vector machine, SVM)和回归模型方法开展了茅尾海红树林物种分类和植被盖度估算研究, 并对其分布特征展开了详细分析。研究表明: (1)广西茅尾海红树林共有 4 个种类, 分别是桐花树(*Aegiceras corniculatum*)、无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)、秋茄(*Kandelia candel*)和茳芩(*Cyperus malaccensis*)。桐花树作为茅尾海红树林的优势种, 面积为 1228.612 ha, 占总面积 72.5%, 散布在茅尾海潮间带。秋茄面积最少, 仅有 1.976 ha, 零星分布于茅岭乡和尖山镇沿岸, 多数与无瓣海桑和桐花树混生。(2)基于 GF-2 PMS1 卫星影像的 NDVI 植被指数建立的二次多项式盖度回归模型效果最好, 决定系数最大为 0.7644, 均方根误差 RMSE 最小为 0.068。(3)植被盖度分布状况与植被类型有密切关系, 植被种类纯生区的盖度要明显大于植被混生区的盖度。本研究结果为茅尾海国家海洋公园和自治区级自然保护区管理部门的决策提供理论基础。

关键词: 红树林; 茅尾海; GF-2 PMS1 影像; 支持向量机(support vector machine, SVM); 植被盖度

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2019)06-0060-11

DOI: 10.11759/hyhx20190212001

红树林是生长在热带和亚热带海岸潮间带盐碱环境中的耐盐木本植物, 是世界上四大海洋典型生态系统之一^[1]。红树林具有重要的经济、社会和环境价值, 为当地居民提供食品、药品、燃料、建筑材料和水产养殖机会的同时, 也起到防风消浪、防灾减灾、固岸护堤、净化水质、稳固海岸线的作用^[2-4]。红树林生态系统结构简单种类单一, 对来自自然因素和人为活动的影响非常敏感, 因此, 红树林生态系统越来越受到陆地和海洋管理者、保护社区和学术界的重视^[5-6]。

红树林与盐沼环境受潮汐影响明显^[7], 环境比较复杂, 常规的野外测量方法难以准确测量, 并且实地调查工作量大、效率低、费用高^[8]。而遥感监测具有快速、大范围、精确、宏观性和受地面限制少等特点, 能够满足传统野外调查的不足之处, 已被广泛用于红树林湿地变迁和分类监测中^[9]。中低分辨率遥感影像由于其覆盖面积大, 常被用于红树林变迁监测; 随着 IKONOS、QuickBird、WorldView、资源三号卫星等高分辨率遥感影像的出现, 提供了更加详细的纹理和光谱特征信息, 为学者进一步对红树林种间分类创造了条件^[10-11]; 最近几年也有些学

者将卫星和无人机高光谱数据用于红树林监测^[12-14], 但很少有学者用高分影像开展红树林研究。

对于红树林的提取与分类方法, 很多学者作了大量研究工作, 主要有最大似然法、植被指数、目视解译、决策树分类和支持向量机分类等, 其中支持向量机监督分类方法在红树林信息提取中应用已非常成熟^[15-18]。森林盖度作为描述森林生长状况、茂密程度和环境状况的重要定量指标^[19], 已有大量学者利用植被指数、回归模型、像元分解、光谱分解、神经网络和随机森林等植被盖度遥感估算方法对草场、森林作过相关研究^[20-23]。对于红树林识别与监测已有的研究大多关注的重点在于红树林面积的提取、动态变化监测、生物量估算和种间分类, 采用红树林种类分布与盖度相结合的方法对红树林-盐

收稿日期: 2019-02-12; 修回日期: 2019-04-04

基金项目: 国家重点研究开发项目(2017YFC1405100)

[Foundation: National Key Research and Development Program of China, No.2017YFC1405100]

作者简介: 马云梅 (1995-), 女, 内蒙古乌兰察布人, 硕士研究生, 主要从事湿地监测研究, E-mail: maymself@163.com; 吴培强(1984-), 通信作者, 男, 山东潍坊人, 研究实习生, 硕士, 主要从事海岛海岸带遥感应用方面研究, E-mail: wu1416@163.com

沼混生群落这一独特生境展开研究到目前为止没有见到。

因此,本研究以 GF-2 PMS1 高分辨率卫星遥感影像为数据源结合现场种类和盖度数据,利用植被指数和支持向量机(support vector machine, SVM)分类方法以及回归模型方法开展了广西茅尾海红树林种类分布和植被盖度估算研究。为茅尾海国家海洋公园和自治区级自然保护区管理部门的决策提供理论基础。

1 研究区域概况

茅尾海位于广西壮族自治区钦州湾顶部,面积约 135 km²(108°28'~108°37'E, 21°46'~21°54'N),是以钦江、茅岭江为主要入湾径流的共同河口海滨区,属亚热带海洋性季风气候,年均气温 22.1℃,年均降雨量 2170.9 mm^[24]。作为广西茅尾海红树林自治区级

自然保护区和国家级海洋公园,拥有 53.36 km²的浅海滩涂和 66.7 km²的潮间带,内有连片的红树林—盐沼草本植物群落,景观独特,在我国较为罕见,具有非常重要的研究价值(图 1)。

2 数据与方法

2.1 数据

2.1.1 遥感数据

本研究使用 2017 年 12 月 19 日获取的 GF-2 PMS1 高分辨率卫星遥感影像作为数据源开展茅尾海湿地红树林种类分布及盖度研究分析。本文使用的多光谱影像空间分辨率为 4 m、幅宽 45 km、覆盖周期 5 d,包括 4 个波段分别是蓝(0.45~0.52 μm)、绿(0.52~0.59 μm)、红(0.63~0.69 μm)和近红外(0.77~0.89 μm)波段。

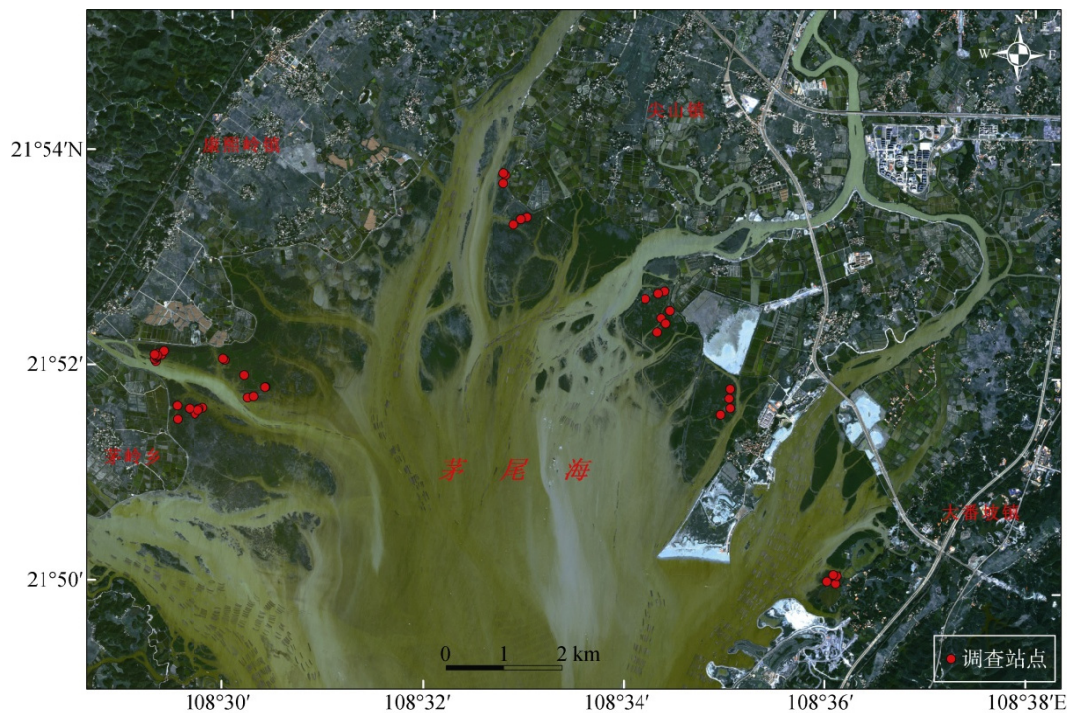


图 1 研究区地理位置及调查站点

Fig. 1 The location of the study area and survey site

经查阅中国海事服务网(<http://ocean.cnss.com.cn/>)潮汐表信息,本文所用影像数据成像时刻潮高为 260 cm,由现场经验发现潮高在 255 cm 及以下时不会影响红树林监测。因此,用此影像数据监测红树林几乎不会受潮汐影响,只需对影像做简单预处理。首先在图像处理软件中对影像做正射校正,接着采用定标工具将 DN 值转换为辐射亮度值,然后利用

FLAASH 大气校正模型做大气校正。

2.1.2 现场数据

项目组于 2018 年 12 月 3 日至 12 日赴广西茅尾海开展红树林典型植被种类及盖度现场数据获取工作(图 2)。根据现场调查发现,茅尾海东部尖山镇的东南面和大番坡镇沿岸基本上全为桐花树分布区,植被单一,站点设置相对稀少,在西部和北部环境比较复杂

的区域站点较密,共设置了45个站点。由于茅尾海红树林整体盖度比较大,所以多数站点设置的样方大小为5 m×5 m,对于样方内植被覆盖不均匀和植被盖度

较小的将样方设为10 m×10 m。用30个站点的植被盖度数据用于建立植被盖度回归模型估算,15个站点植被盖度数据用于植被盖度回归模型精度验证。

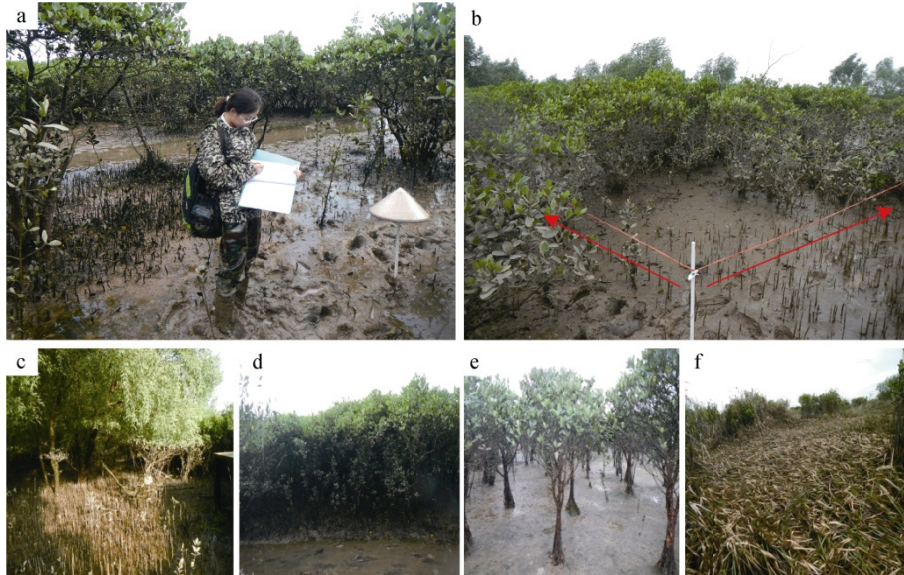


图2 茅尾海湿地现场调查

Fig. 2 Field survey in the Maowei Hai wetland

注: a: 现场记录; b: 样方; c: 无瓣海桑(*Sonneratia apetala*); d: 桐花树(*Aegiceras corniculatum*); e: 秋茄(*Kandelia candel*); f: 荻茳(*Cyperus malaccensis*)

2.2 研究方法

2.2.1 红树林遥感信息分类方法

使用植被指数法提取茅尾海红树林,并参考现场调查数据对提取结果进行修正(图3)。由于茅尾海比较特殊,红树林分布于坝外,所以很容易确定红树林生长区,提取红树林唯一要去掉水体信息。水体在蓝绿光波段有强反射,到近红外波段几乎全吸收,而植被在绿光波段有个小的反射峰,在近红外波段形成强反射。因此,采用归一化差异水体指数NDWI(normalized difference water index)^[25]可以有效提取水体信息。NDWI的计算公式如下:

$$NDWI = \frac{\rho_G - \rho_{NIR}}{\rho_G + \rho_{NIR}}, \quad (1)$$

其中: ρ_G 和 ρ_{NIR} 分别代表绿光波段和近红外波段反射率。

将遥感影像与现场红树林种类调查数据相结合建立的影像解译标志集,将茅尾海红树林分为无瓣海桑、桐花树、秋茄和荻茳4种类型(表1)。本文基于支持向量机方法进行精细红树林分类,所用SVM分类选用径向基核函数,控制样本错误与分类刚性延伸之间平衡的惩罚参数为100。结合现场调查数据,

使用图像处理软件选取了1005个像元作为训练样本用于SVM分类,分类后将分类结果在ArcGIS中转为矢量数据统计各种类面积。

2.2.2 植被盖度估算模型

本文用5种植被指数与现场获取的植被盖度数据相结合进行多种回归分析,建立基于植被指数的茅尾海红树林植被盖度估算模型并进行精度评价,确定最优回归模型。所用到的5种植被指数包括:归一化植被指数(normalized differential vegetation index, NDVI)^[18]、比值植被指数(ratio vegetation index, RVI)、差值植被指数(difference vegetation index, DVI)^[26]、优化土壤调整植被指数(optimize soil and adjust vegetation index, OSAVI)和修正土壤调节植被指数(modify the soil adjustment vegetation index, MSAVI)^[23]。归一化植被指数是研究植被最常用的植被指数;比值植被指数又称为绿度,能较好地反映植被覆盖度和生长状况的差异,特别适用于植被生长旺盛、具有高覆盖度的植被监测,非常适用于红树林研究;差值植被指数能较好地识别植被和水体,适合用于红树林盖度研究;由于海岸潮间带环境复杂,为了减小土壤背景对结果造成的影响,同时选用两个能够削弱

土壤背景对植被反射率影响的土壤调节植被指数，分别是 OSAVI 和 MSAVI。3 种回归模型包括一元线

性回归函数、二次多项式线性回归函数和指数回归函数。表 2 给出了 5 种植被指数及其计算公式。

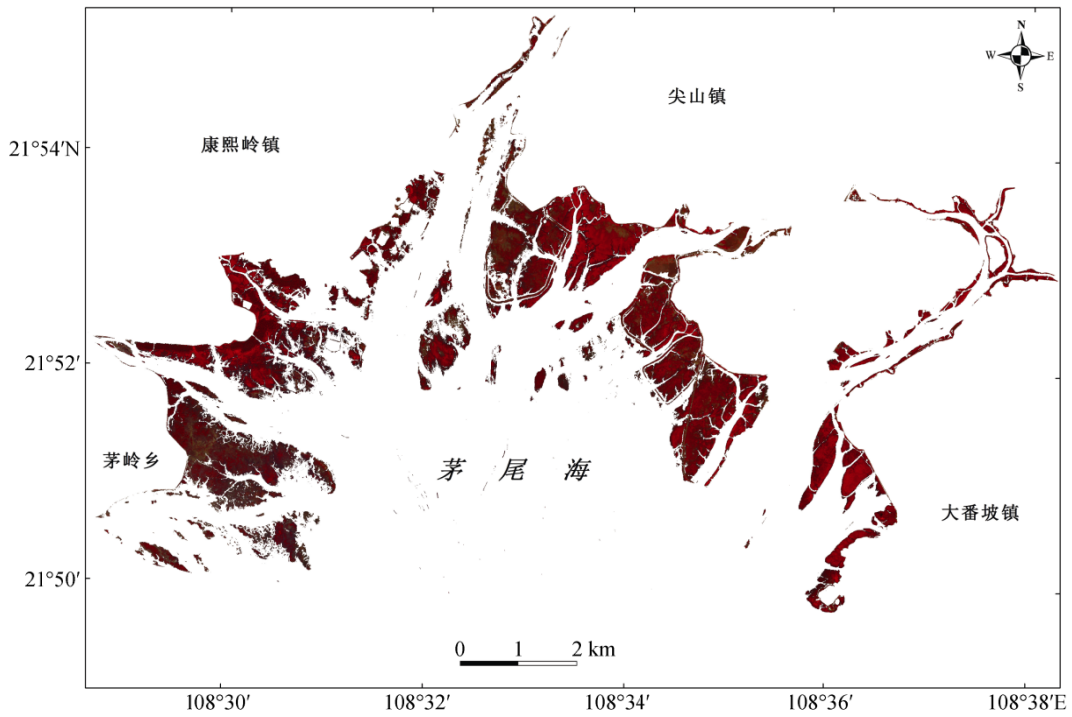


图 3 茅尾海红树林提取结果

Fig. 3 Extraction results of mangrove trees from the Maowei Hai Sea

表 1 影像解译标志

Tab. 1 Image interpretation marks

地物类型	影像实例	说明
无瓣海桑		颜色为暗红色，色调杂乱，纹理特征明显粗糙，植被盖度高，多成条带状分布于沿岸附近，少数向海方向延伸与桐花树、秋茄和荳苳混生。
桐花树		颜色特征明显，为亮红色，色调平滑较细腻均一，纹理较平滑，植被盖度较高，成面状分布于整个研究区。
秋茄		颜色为深红色，色调较均一，纹理较粗糙，盖度较小，零星分布于无瓣海桑、桐花树生长区，分布范围很小
荳苳		颜色为深灰枣红色，色调均一，纹理平滑细腻，分布范围较广，多分布于河口附近的浅滩，与桐花树和无瓣海桑混生的面积较大。

表 2 植被指数定义

Tab. 2 Definition of vegetation index

植被指数	计算公式	说明
NDVI	$\frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}}$	归一化植被指数
SRI	$\frac{\rho_{Red}}{\rho_{NIR}}$	比值植被指数
DVI	$\rho_{NIR} - \rho_{Red}$	差值植被指数
OSAVI	$\frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red} + 0.16}$	优化土壤调整植被指数
MSAVI	$0.5 \left[(2\rho_{NIR} + 1) - \sqrt{(2\rho_{NIR} + 1)^2 - 8(\rho_{NIR} - \rho_{Red})} \right]$	修正土壤调教植被指数

注: ρ_{NIR} 和 ρ_{Red} 分别为 GF2_PMS1 卫星数据近红外和红波段的反射率。

建模后用实测值与估测值之间的均方根误差 RMSE 和决定系数 R^2 验证植被盖度估算模型精度。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2}, \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}, \quad (3)$$

其中 y_i 、 \bar{y} 、 \hat{y}_i 分别表示实测值、实测值的平均值和估测值, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

3 结果与分析

3.1 分类结果与精度评价

基于 SVM 方法完成了茅尾海红树林精细分

类(图 4)。总体而言, 分类结果与现场调查数据分布范围基本一致, 分类效果良好。桐花树作为茅尾海红树林优势种面积为 1228.612 ha 占总面积 72.5%, 在茅尾海西部茅岭乡沿岸和北部康熙岭镇沿岸边缘区与无瓣海桑和荇菜混生比较明显, 在东部尖山镇和大番坡镇大面积的连片均一生长。无瓣海桑多数为人工种植主要分布在茅尾海西部茅岭乡沿岸和西北部康熙岭镇的河口、沿岸边缘区, 面积为 159.675 ha 仅占总面积 9.4%, 从海岸线向海方向逐渐由纯无瓣海桑生长区向无瓣海桑与桐花树混生区过度, 混生区有明显分层结构, 通过野外调查发现分层结构下的桐花树由于被无瓣海桑遮挡光照条件不足, 因此

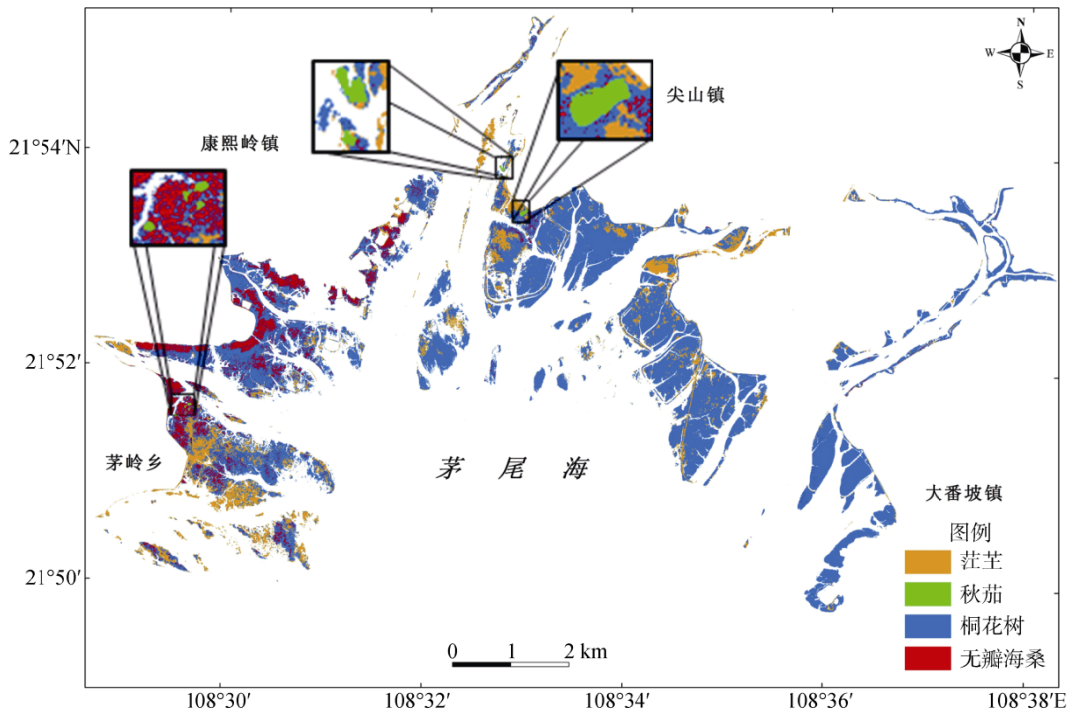


图 4 茅尾海红树林分类结果

Fig. 4 Results of mangrove classification in the Maowei Hai Sea

生长状况与桐花树单一生长区相比较差。茳芏作为一种盐沼植物在茅尾海分布范围较广，面积为304.392 ha 占总面积 17.9%，茅岭乡、康熙岭镇和尖山镇河口、沿岸均有分布，茅岭乡沿岸分布最为集中，大番坡镇沿岸几乎没有。秋茄为人工种植，面积很少仅有 1.976 ha，零星分布于茅岭乡和尖山镇沿岸，多数与无瓣海桑和桐花树混生，根据现场调查发现与无瓣海桑混生区的秋茄，由于被无瓣海桑高大的形态遮挡，光照不足，几乎只剩顶部有些叶子，下面的叶子大部分枯死。

本文采用混淆矩阵法对红树林分类精度进行定量评价。利用 ENVI5.3 软件从图像上随机选取 5180 个像元作为验证样本，构建混淆矩阵并计算红树林分类精度和 Kappa 系数(表 3)。用户精度(user accuracy, UA)表示从分类结果中任取一个随机样本，其所具有的类型与地面实际类型相同的概率；制图精度(producer accuracy, PA)表示相对于参考数据中的任意一个随机样本，分类图像上同一地点的分类结果与其相一致的条件概率；总体精度(overall accuracy, OA)是具有概率意义的一个统计量，表述的是对每

一个随机样本，所分类的结果与参考数据对应区域的实际类型相一致的概率；Kappa 系数是一种定量评价遥感分类图与参考数据之间一致性的方法^[8]。表中可以看出各红树林种类的用户精度和制图精度几乎都达到 80%以上，只有桐花树的制图精度略低一些，且总体精度为 90.73%，Kappa 系数为 0.8640。各计算公式如下：

$$UA = \frac{x_{ii}}{x_{i+}} \quad (4)$$

$$PA = \frac{x_{ii}}{x_{+i}} \quad (5)$$

$$OA = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ii}}{N} \quad (6)$$

$$K_{hat} = \frac{N \sum_{i=1}^n x_{ii} - \sum_{i=1}^n (x_{i+} x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^n (x_{i+} x_{+i})} \quad (7)$$

其中 K_{hat} 为 Kappa 系数， x_{ii} 为第*i*行*i*列的样本数， x_{i+} 为分类结果中第*i*类总和， x_{+i} 为地表真实数据中第*i*类的总和，*n*为类别的数量，*N*为样本总数。

表 3 红树林分类误差矩阵及分类精度

Tab. 3 Error matrix and classification accuracy of mangrove species

	无瓣海桑	桐花树	茳芏	秋茄	像元小计	UA /%
无瓣海桑	1735	389	35	3	2162	80.24
桐花树	40	1184	0	1	1225	96.65
茳芏	4	2	1752	0	1758	99.65
秋茄	2	4	0	29	35	82.85
像元小计	1781	1579	1787	33	5180	-
PA /%	97.42	74.98	98.04	87.88	-	-
OA = 90.73%, $K_{hat} = 0.8640$						

注：表中整数为像元数，“-”代表空值。

3.2 盖度回归模型与精度评价

基于一元线性、二次多项式和指数 3 种单变量回归模型分别对每一个植被指数进行回归，发现每一个植被指数在二次多项式回归模型中的决定系数 R^2 都较大，其次是一元线性回归模型，指数函数回归模型得到的结果最差。NDVI、SRI、DVI、OSAVI 和 MSAVI 5 种植被指数，在二次多项式回归模型中 NDVI 决定系数 R^2 最大(表 4)。最后随机选择独立于模型的 15 个实测盖度数据，以均方根误差 RMSE 和决定系数 R^2 来分析二次多项式植被盖度估算模型的精度，最优模型和精度验证结果展现在表 5。由表 5 可发现，基于 5 种植被指数建立的二次多项式回归模型中，NDVI 的决定系数 R^2 最大为 0.7644，其他

4 个植被指数的决定系数由大到小依次是 SRI、OSAVI、MSAVI 和 DVI，且 NDVI 和 SRI 的均方根误差最小为 0.068。

图 5 给出了，分别基于 NDVI、SRI、DVI、OSAVI 和 MSAVI 5 种植被指数的二次多项式回归模型所得的估测盖度值与现场实测盖度值之间的对比。方形点表示模型估测盖度值与现场实测盖度值之间的位置关系，斜线表示估测盖度值与实测盖度值相等时的位置，即方形点与斜线距离越近，则估测值与实测值越接近，表明预测效果越好。由图 5 可以看出，基于 NDVI 植被指数的二次多项式植被盖度估算模型估测效果较好。

最后选择决定系数最大且均方根误差最小的植被盖度回归模型，即基于 NDVI 植被指数建立的二

次多项式回归模型,对 GF-2 PMS1 高分辨率卫星遥感影像数据进行广西茅尾海植被盖度反演,反演结果见图 6,可以看出本研究区整体植被盖度较高,最

低为 0.3 最高为 1.0,将茅尾海研究区植被盖度划为 3 个等级,分别是中覆盖度区(0.3~0.5)、中高覆盖度区(0.5~0.8)和高覆盖度区(0.8~1.0)^[27]。

表 4 决定系数 R^2

Tab. 4 Determination coefficient R^2

回归函数	R^2				
	NDVI	SRI	DVI	OSAVI	MSAVI
一元线性	0.7435	0.7616	0.6529	0.7196	0.6704
二次多项式	0.7644	0.7636	0.7324	0.7582	0.7442
指数	0.6604	0.6955	0.5425	0.6247	0.5631

表 5 植被盖度模型估测表

Tab. 5 Estimation table of VFC model

植被指数	回归模型	R^2	P	RMSE
NDVI	$y = -1.1922x^2 + 2.0196x + 0.1533$	0.7644	<0.001	0.068
SRI	$y = -0.3205x^2 - 0.7314x + 1.1415$	0.7636	<0.001	0.068
DVI	$y = -8.8942x^2 + 4.9513x + 0.2479$	0.7324	<0.001	0.071
OSAVI	$y = -2.7409x^2 + 2.9406x + 0.1702$	0.7582	<0.001	0.069
MSAVI	$y = -3.7454x^2 + 6.9822x - 2.3178$	0.7442	<0.001	0.070

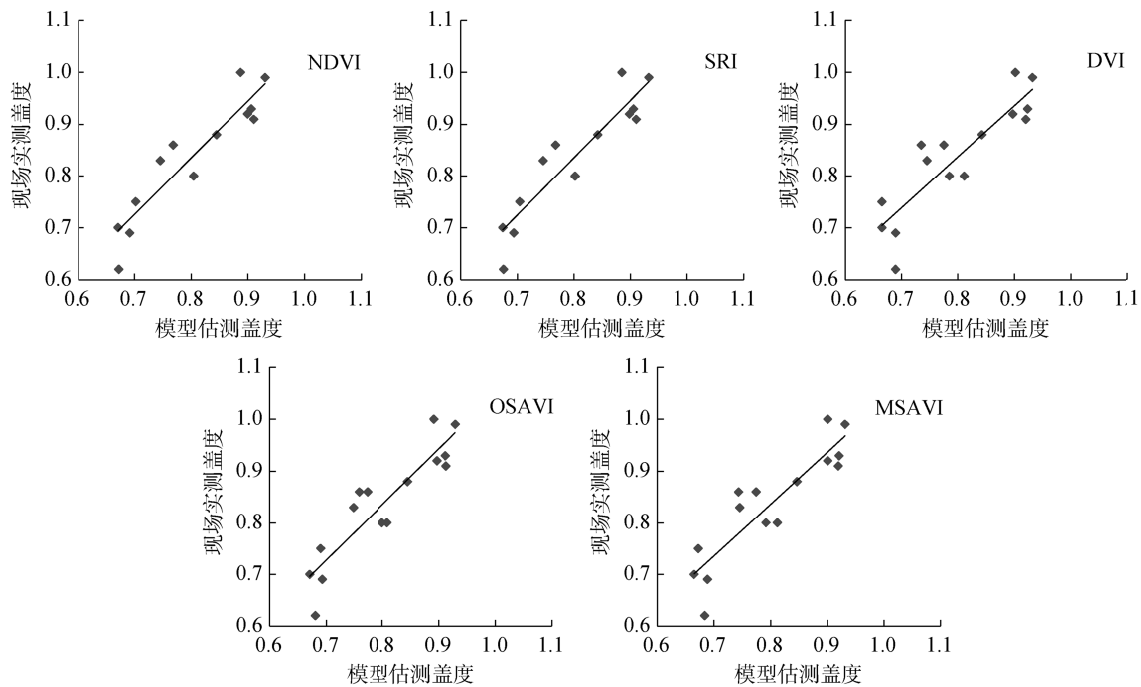


图 5 二次多项式植被盖度估测模型精度验证

Fig. 5 Verification of accuracy of the quadratic polynomial VFC estimation model

3.3 植被类型与盖度分布特征分析

为了更加全面的分析广西茅尾海红树林状况,本文结合植被类型空间分布特征,开展了植被盖度分布状况分析(具体见图 4 和图 6)。广西茅尾海红树林区整体属于高植被盖度区,植被盖度在 0.3~1.0,

盖度在 0.5 以下的植被覆盖区很少。康熙岭镇沿岸无瓣海桑属于高植被盖度区,尖山镇东部沿岸和大番坡镇沿岸大部分属于高植被盖度区,尖山镇西北部沿岸区域和茅岭乡河口、沿岸边缘区植被相对稀疏属于低植被覆盖区。结合茅尾海红树林分类结果(图 4)和植被盖度等级分布结果(图 6)不难发现,植

被盖度的分布于植被类型本身有很大关系, 植被纯生区, 如康熙岭镇沿岸边缘区的无瓣海桑生长区和尖山镇、大番坡镇沿岸的桐花树生长区几乎都为高植被覆盖区, 盖度位于 0.8~1.0。混生区植被覆盖度

相对较小, 如茅岭乡沿岸区域为无瓣海桑、桐花树、荳苳和秋茄四种植被混生区盖度相对最小。也可发现有荳苳分布的区域属于低植被盖度区, 盖度在 0.3~0.8。

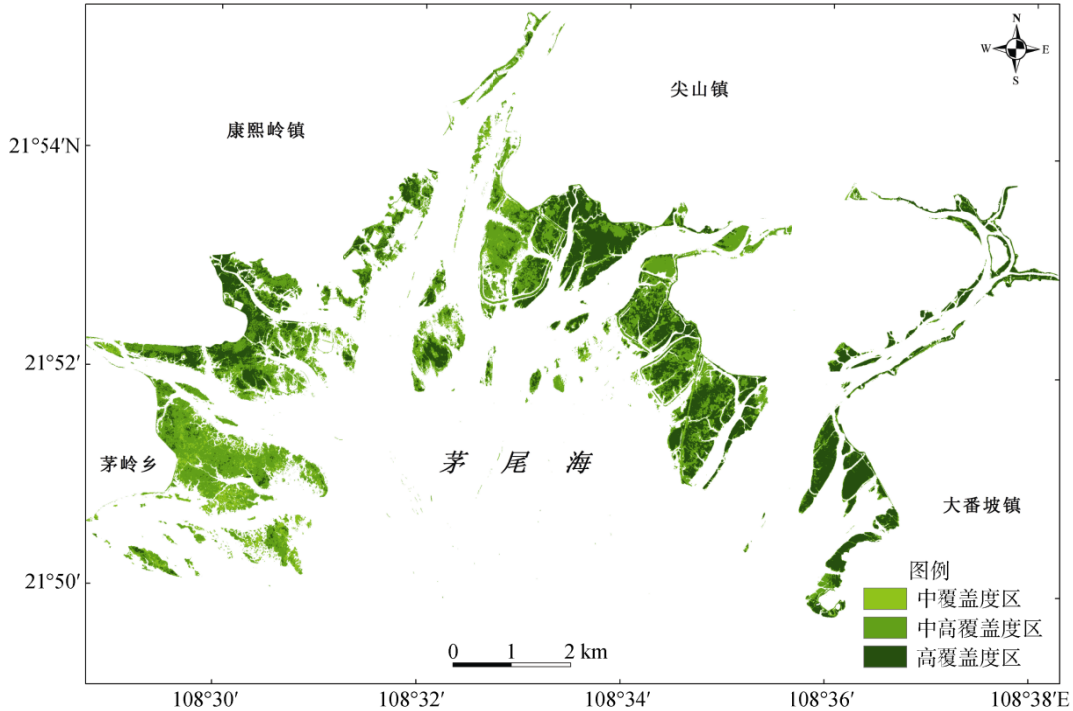


图 6 茅尾海植被盖度分布
Fig. 6 Vegetation coverage distribution in the Maowei Hai Sea

4 结论与讨论

准确的红树林物种分类是红树林清查和湿地生态系统管理等工作的重要组成部分, 植被盖度作为保护区管理部门做决策的理论基础。本文将利用植被指数和SVM分类方法提取得到的红树林种类分布特征与基于植被指数建立的回归模型相结合, 开展了广西茅尾海红树林种类空间分布和植被盖度估算研究, 结论如下:

1) 桐花树是茅尾海红树林的优势种, 面积为 1228.612 ha 占总面积 72.5%, 分布范围广。无瓣海桑主要分布在茅尾海西部茅岭乡沿岸和西北部康熙岭镇的河口、沿岸边缘区, 面积为 159.675 ha 仅占总面积 9.4%。荳苳作为一种盐沼植物在茅尾海分布范围较广, 面积为 304.392ha 占总面积 17.9%。秋茄为人工种植, 面积很少仅有 1.976ha。

2) 基于 GF-2 卫星影像的 NDVI、SRI、DVI、OSAVI 和 MSAVI 5 个植被指数建立的多元线性盖度

回归模型效果最好, 决定系数最大为 0.7708, 均方根误差 RMSE 最小为 0.068, *P* 均小于 0.001。对接下来研究广西茅尾海植被盖度、生态保护、植被修复和人工扩种等有重要意义。

3) 植被盖度分布状况与植被类型有密切关系, 植被种类纯生区的植被盖度要明显大于植被混生区。尤其与无瓣海桑混生的桐花树和秋茄生长状况均欠佳, 因此从植被长势来看, 不建议提倡分层结构式混种。

红树林生长在潮间带上, 受湿润土壤和水体的复杂环境影响, 卫星影像的光谱特征受到干扰, 且研究区内人工栽种的红树林, 林分尚未郁闭, 由此导致红树林精细分类和盖度估测可能存在一定误差。在今后工作中将尝试使用高光谱和更高空间分辨率的遥感影像数据来进一步提高红树林种间分类与盖度估测精度。由于红树林生长环境复杂导致现场勘测工作困难, 因此现场数据样本较少, 希望在后续研究中获得更多的现场实测数据来优化模型。

参考文献:

- [1] 林鹏. 中国红树林生态系[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
Lin Peng. Chinese Mangrove Ecosystem[M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [2] 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.
- [3] Roy A K D. Determinants of participation of mangrove-dependent communities in mangrove conservation practices[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2014, 98: 70-78.
- [4] Conchedda G, Durieux L, Mayaux P. An object-based method for mapping and change analysis in mangrove ecosystems[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2008, 63(5): 578-589.
- [5] 吴培强, 张杰, 马毅, 等. 1980—2015年间泰国红树林资源变化的遥感监测与分析[J]. *海洋科学进展*, 2018, 36(3): 412-422.
Wu Peiqiang, Zhang Jie, Ma Yi, et al. Remote sensing monitoring and analysis of mangrove resources change in Thailand from 1980 to 2015 [J]. *Progress in Marine Science*, 2018, 36 (3): 412-422.
- [6] Kumar A, Ramanathan A, Prasad M B K, et al. Distribution, enrichment, and potential toxicity of trace metals in the surface sediments of Sundarban mangrove ecosystem, Bangladesh: A baseline study before Sundarban oil spill of December, 2014.[J]. *Environment Science and Pollution Research*, 2016, 23(9): 8985-8999.
- [7] 王武霞, 苏奋振, 冯雪, 等. 中越北部湾红树林差异性研究[J]. *地球信息科学学报*, 2017(2): 264-272.
Wang Wuxia, Su Fenzhen, Feng Xue, et al. A study on the difference of mangroves in Beibu Gulf between China and Vietnam[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2017 (2): 264-272.
- [8] 贾明明. 1973—2013年中国红树林动态变化遥感分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
Jia Mingming. Remote sensing analysis of mangrove dynamic change in China from 1973 to 2013 [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [9] 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. Mangrove information automatic extraction from Landsat 8 OLI image based on decision tree method[J]. *Land and Resources Remote Sensing*, 2016, 28 (2): 182-187.
- [10] Benjamin W H. Satellite remote sensing of mangrove forests: Recent advances and future opportunities.[J]. *Progress in Physical Geography*, 2011, 35(1): 87-108.
- [11] 王俊杰, 刘珏, 石铁柱, 等. 1990-2015年广西廉州湾红树林遥感动态监测[J]. *森林与环境学报*, 2016, 36(4): 455-460.
Wang Junjie, Liu Jue, Shi Tiezhu, et al. Remote sensing dynamic monitoring of mangroves in Lianzhou Bay, Guangxi, 1990-2015[J]. *Journal of Forestry and Environment*, 2016, 36(4): 455-460.
- [12] Vidhya R, Vijayasekaran D, Farook M A, et al. Improved classification of mangroves health status using hyperspectral remote sensing data[J]. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2014, XL-8(1): 667-670.
- [13] Salghuna N N, Pillutla R C P. Mapping mangrove species using hyperspectral data: A case study of Pichavaram mangrove ecosystem, Tamil Nadu[J]. *Earth Systems and Environment*, 2017, 1(2): 24.
- [14] Cao Jingjing, Leng Wanchun, Liu Kai, et al. Object-based mangrove species classification using unmanned aerial vehicle hyperspectral images and digital surface models[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(1): 89-109.
- [15] 闫静, 张彩云, 骆炎民, 等. 福建九龙江口红树林变化的遥感监测[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2012, 51(3): 426-433.
Yan Jing, Zhang Caiyun, Luo Yanmin, et al. Remote sensing monitoring of mangrove changes in Jiulong Estuary, Fujian[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science Edition)*, 2012, 51(3): 426-433.
- [16] Muditha H, Karen J, Stefan M, et al. Mangrove species identification: comparing WorldView-2 with aerial photographs[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(7): 6064-6088.
- [17] 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(4): 531-537.
Xiao Haiyan, Zeng Hui, Zan Qijie, et al. Mangrove community type information was extracted based on hyperspectral data and expert decision-making method[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007 (4): 531-537.
- [18] 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, 13(4): 451-455.
Liu Chunyan, Zhang Xuehong, Chen Jian. Mangrove remote sensing recognition based on EO-1 ALI image using angle index method of decision tree[J]. *Wetland Science*, 2015, 13(4): 451-455.
- [19] 王海宾, 黄国胜, 程志楚, 等. 基于多源遥感数据森林盖度的尺度转换[J]. *东北林业大学学报*, 2014, 42(9): 58-61.
Wang Haibin, Huang Guosheng, Cheng Zhichu, et al. Scale conversion of forest coverage based on multi-

- source remote sensing data[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42(9): 58-61.
- [20] 陈妍, 宋豫秦, 王伟. 基于随机森林回归的草场植被盖度反演模型研究: 以新疆阿勒泰地区布尔津县为例[J]. 生态学报, 2018, 38(7): 143-153.
Chen Yan, Song Yuqin, Wang Wei. Study on the inversion model of grassland vegetation coverage based on random forest regression: Taking Buerjin county in Altay region of Xinjiang as an example[J]. Journal of Ecology, 2018, 38 (7): 143-153.
- [21] 高邦权, 张光富, 王剑伟. 测度森林群落乔木层盖度的一种新方法[J]. 广西植物, 2006, 26(6): 636-637.
Gao Bangquan, Zhang Guangfu, Wang Jianwei. A new method for measuring tree cover in forest communities[J]. Guangxi Plant, 2006, 26 (6): 636-637.
- [22] 汪明霞, 王卫东. 植被覆盖度的提取方法研究综述[J]. 黄河水利职业技术学院学报, 2013, 25(2): 23-26.
Wang Mingxia, Wang Weidong. Summary of research on extraction methods of vegetation coverage[J]. Journal of Yellow River Water Conservancy Vocational and Technical College, 2013, 25(2): 23-26.
- [23] 王建步, 张杰, 马毅, 等. 基于 GF-1 WFV 影像的黄河口湿地植被盖度估测及分析[J]. 海洋学报, 2018, 40(6): 43-53.
Wang Jianbu, Zhang Jie, Ma Yi, et al. Estimation and analysis of wetland vegetation coverage in the Yellow River Estuary based on GF-1 WFV images[J]. Journal of Oceanography, 2018, 40(6): 43-53.
- [24] 潘良浩. 广西茅尾海荻茆生物量研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(22): 13481-13483.
Pan Lianghao. Study on the biomass of *Cyperus malaccensis* Lam in the Maowei Hai Sea, Guangxi[J]. Anhui Agricultural Science, 2011, 39 (22): 13481-13483.
- [25] 李想, 刘凯, 朱远辉, 等. 基于资源三号影像的红树林物种分类研究[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(2): 360-369.
Li Xiang, Liu Kai, Zhu Yuanhui, et al. Mangrove species classification based on ZY-3 image[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(2): 360-369.
- [26] 苏岫, 耿杰, 马晓瑞, 等. 基于多种植被指数信息与联合稀疏表示的红树林种类识别[J]. 海洋环境科学, 2017(1): 117-123.
Su Xiu, Geng Jie, Ma Xiaorui, et al. Mangrove species identification based on multiple vegetation index information and joint sparse representation [J]. Marine Environmental Science, 2017 (1): 117-123.
- [27] 盖永芹, 李晓兵. 土地利用/覆盖变化与植被盖度的遥感监测: 以北京市密云县为例[J]. 资源科学, 2009, 31(3): 523-529.
Ge Yongqin, Li Xiaobing. Remote sensing monitoring of land use/cover change and vegetation coverage: A case study of Miyun county, Beijing[J]. Resources Science, 2009, 31(3): 523-529.

Classification and coverage estimation of mangrove species at the Maowehai Sea in Guangxi based on GF-2 images

MA Yun-mei^{1, 2}, WU Pei-qiang², PAN Liang-hao³, WANG Jin-jin⁴, WANG Jian-bu², REN Guang-bo², MA Yi^{2, 1}

(1. College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010010, China; 2. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 3. Guangxi Mangrove Research Center, Guangxi Academy of Sciences, Beihai 536000, China; 4. Shanghai Aubit Aerospace Technology Co., Ltd., Shanghai 200000, China)

Received: Feb. 12, 2019

Key words: mangrove; the Maowehai Sea; GF-2 PMS1 satellite image; support vector machine (SVM); vegetation fraction coverage

Abstract: To understand the species and coverage of mangrove in the Maowehai Sea, based on GF-2 PMS1 high-resolution satellite remote sensing image data, support vector machine (SVM) classification and regression model method were used to carry out research on species classification and vegetation coverage estimation of mangrove in the Maowehai Sea, and the distribution characteristics of mangrove were analyzed in detail. The conclusions are as follows: (1) The Maowehai Sea mangrove consists of four species: *Sonneratia apetala*, *Aegiceras corniculatum*, *Kandelia candel*, and *Cyperus malaccensis*. As the dominant species of the mangrove in the Maowehai Sea, *Aegiceras corniculatum* covers an area of 1228.612 ha, accounting for 72.5% of the total area and is found throughout the intertidal zone of the Maowehai Sea. *Kandelia candel* has the least area, only 1.976 ha, and is scattered in Maolin rural area and Jianshan town along the coast; moreover, it is mostly mixed with the *S. apetala* and *A. corniculatum*. (2) The quadratic polynomial coverage regression model established based on the normalized differential vegetation index (NDVI) of GF-2 PMS1 satellite images had the best effect, with the maximum determination coefficient of 0.7644 and the minimum root mean square error (RMSE) of 0.068. (3) The distribution of vegetation coverage is closely related to the vegetation type, and the coverage of pure vegetation is significantly greater than that of mixed vegetation. Based on the above research results, this paper provides a theoretical basis for the decision-making of the management departments of the Maowehai Sea national Marine park and autonomous region-level nature reserves.

(本文编辑: 刘珊珊)