

廖孟光,陈醒,李猛,等.基于多时相 Sentinel-2 数据的温州市红树林提取及应用[J].湖南科技大学学报(自然科学版), 2024,39(4):37-45.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.04.005

LIAO M G, CHEN X, LI M, et al. Extraction of Mangroves in Wenzhou City Based on Multi-temporal Sentinel-2 Data and Its Application[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024,39(4):37-45.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.04.005

基于多时相 Sentinel-2 数据的 温州市红树林提取及应用

廖孟光*,陈醒,李猛,李朝奎,王韞

(湖南科技大学 三亚研究院,海南 三亚 572024;湖南科技大学 地球科学与空间信息工程学院,湖南 湘潭 411201;
湖南科技大学 地理空间信息技术国家地方联合工程实验室,湖南 湘潭 411201)

摘要:为准确了解红树林在温州市的分布,更好地对该市红树林资源进行调查、维护和利用,选取温州市沿海 4 个区域为研究区,利用 2021 年—2022 年的 Sentinel-2 多光谱影像,通过提取研究区内红树林与互花米草的归一化植被指数(NDVI)构建植被指数时序特征,分别采用随机森林(RF)、支持向量机(SVM)和最大似然法分别对单一时相和加入植被指数时序特征的多时相影像进行红树林识别.结果表明:基于多时相影像的红树林识别精度要高于单一时相影像;相比单一时相,当 Kappa 系数提高 0.1 以上时,NDVI 时间序列能较好地描述红树林的物候特征和提高红树林的提取精度;3 种算法均能准确地识别红树林,且随机森林算法的识别精度最高,其总体精度为 98.02%,Kappa 系数为 0.84;研究区共识别红树林 1.526 9 km²,准确率达 87.26%.研究结果可为温州市红树林的管理和维护提供可靠的数据基础.

关键词:红树林;Sentinel-2 影像;归一化植被指数;多时相

中图分类号:P237

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2024)04-0037-09

Extraction of Mangroves in Wenzhou City Based on Multi-temporal Sentinel-2 Data and Its Application

LIAO Mengguang, CHEN Xing, LI Meng, LI Chaokui, WANG Yun

(Sanya Institute, Hunan University of Science and Technology, Sanya 572024, China; School of Earth Sciences and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; National-Local Joint Engineering Laboratory of Geo-Spatial Information Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: An Accurate understanding of the distribution of mangroves in Wenzhou is helpful for the investigation, maintenance and utilization of mangrove resources in the city. In this paper, four coastal areas of Wenzhou City are selected as the study area, and a total of five Sentinel-2 multispectral images from 2021 to 2022 are used to construct the time series characteristics of vegetation index by extracting the normalized vegetation index of mangroves and *Spartina alterniflora* in the study area. Random forest (RF), support vector machine (SVM) and maximum likelihood method are used to identify mangroves in single phase and multi-phase with vegetation index time series features. Results show that the recognition accuracy of mangroves based on multi-temporal images is higher than that of single-phase images. Compared with single-phase images, the Kappa

收稿日期:2022-08-18

基金项目:湖南省教育厅科研项目资助(22C0254);大学生创新创业训练计划资助项目(S202310534030)

*通信作者,E-mail: liaomengguang@163.com

coefficient is increased by more than 0.1. The study verifies that NDVI time series can better describe the phenological characteristics of mangroves and improve the extraction accuracy of mangroves; all three extraction algorithms can accurately identify mangroves, and the random forest method has the highest recognition accuracy with an overall accuracy of 98.02% and a Kappa coefficient of 0.84, with the identified mangroves in study area of 1.526 9 km², and the accuracy of 87.26%, aiming to provide basic data for the management and maintenance of mangroves in Wenzhou.

Keywords: mangrove; Sentinel-2 image; normalized difference vegetation index; multi-temporal

红树林是生长在热带、亚热带海岸潮间带的木本植物群落,在净化海水、固岸护堤和维护生物多样性等多方面发挥着重要作用^[1].温州市作为我国红树林分布最北的区域,近些年为了推进生态文明建设,改善河口海岸湿地的生态环境,在龙湾树排沙岛、洞头霓屿岛、鳌江沿岸和苍南沿浦湾等多处积极引种、扩种红树林.由于红树林生长在含淤泥的潮间带,传统的地面调查不仅耗时耗力,且在空间和时间尺度上具有很大的局限性,无法满足大面积红树林监测的需求,因此,利用具有覆盖面积广、时效性强、相对成本低和可重复获取等优势遥感技术正确识别红树林,对于保护和维持红树林生长具有重要意义^[2].

目前,红树林监测最常用的中分辨率遥感影像主要包括 Landsat MSS/TM/ETM+/OLI, SPOT 和 ASTER 等^[3-9].随着遥感传感器技术的发展与进步,高分辨率(空间分辨率优于 10 m)的影像越来越多地被应用于红树林的遥感动态监测,主要包括 IKONOS, Quick-Bird, WorldView-2 和 Sentinel-2 等^[10-14].近年来,相关学者对红树林遥感信息的提取主要是利用影像的光谱特征、植被指数及其纹理特征来识别红树林.马云梅等^[15]研究发现基于光谱特征重构数据的分类精度要高于原始数据,并以此开展广西海岸的红树林识别;张雪红^[16]利用归一化差值湿度指数和修正后的归一化差值池塘指数作为分类特征,对红树林进行有效识别;徐芳等^[17]提出一种归一化的潮间红树林指数(NIMI),能有效提取潮间带红树林,其用户精度达到 93.98%;路春燕等^[18]等利用红树林、米草和滩涂在不同时相的光谱特征差异,分别选择枝叶繁茂和少叶落叶这 2 个季相影像进行分类;薛朝辉等^[19]进一步研究基于 Landsat 8 OLI 和 Sentinel-2 MSL 融合后的数据集重建增强型植被指数(EVI)和植被水分含量指数(LSWI)时间序列数据,采用随机森林(RF)进行分类来提取研究区红树林的分布范围.

温州市自 2014 年以来一直积极推进红树林的保护与发展工作,而现有的多种数据集对温州市红树林的识别准确率极低,部分地区甚至不能准确识别.CHEN 等^[20]的研究仅正确识别了部分鳌江南岸的 13 a 树龄的红树林,其他区域基本没有准确识别;ZHANG 等^[21]的研究发现温州市红树林的识别效果很差,很多非红树林被错误地识别成红树林;ZHAO 等^[22]发现树排沙岛、鳌江南岸 20 a 树龄的部分识别效果较好,但仍然有低估,在沿浦湾和霓屿岛的识别效果很差.综上所述,目前针对温州市红树林识别的研究还很少,且已有数据集的识别精度较低,不利于该市政府部门的管理与维护.因此,有必要开展基于高分辨率影像的温州市红树林识别的研究.

本文利用 5 景多时序 Sentinel-2 遥感数据,提取红树林及互花米草的归一化植被指数(NDVI),构建植被指数时序特征,分别采用随机森林、支持向量机(SVM)和最大似然法识别红树林,对比分析基于单一时相与多时相影像的红树林识别精度,并对研究区进行红树林制图,为温州市红树林的管理与保育工作以及进一步向北引种红树林提供数据基础.

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

本文研究区为温州海岸及沿岸红树林分布区,位于我国浙江省东南部,年均气温 18.1 ℃,最冷月平均气温 5.0 ℃,历史最低温-4.5 ℃,年平均降雨量 1 742.4 mm,为我国红树林引种的最北界.本文按照红树林的分布与生长状况从温州市沿岸挑选 4 个红树林分布典型区域,具体情况如图 1 所示.

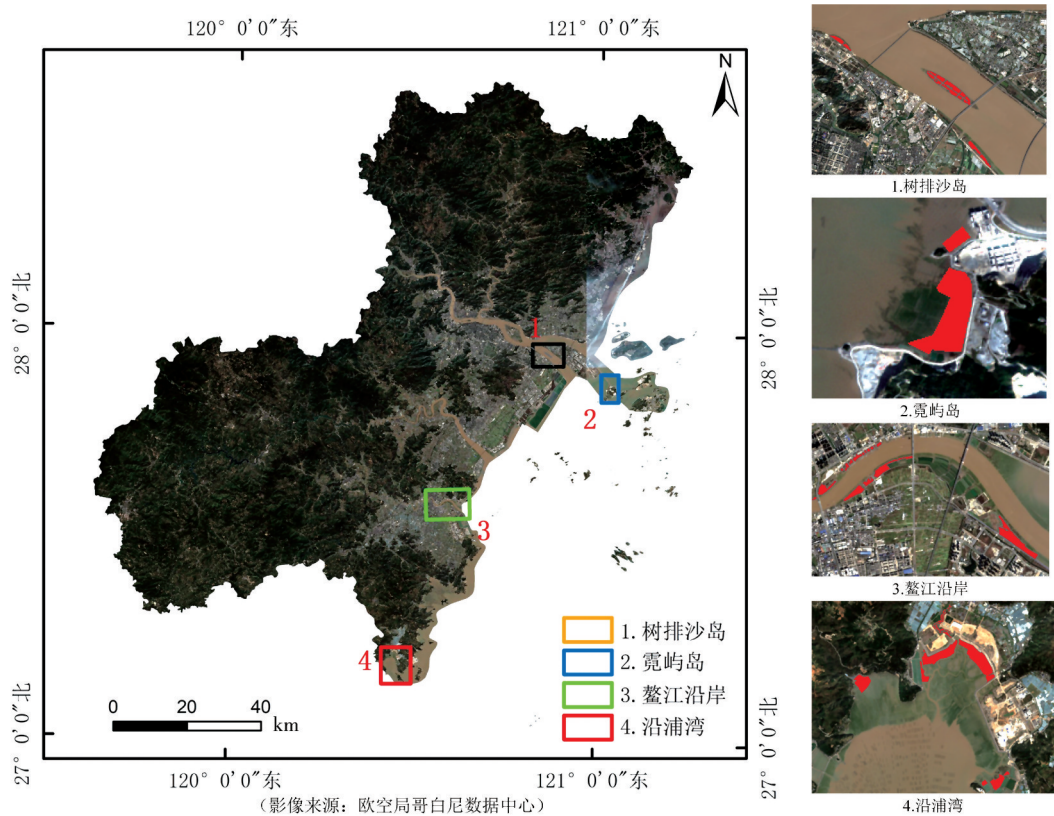


图 1 研究区及红树林实际调查分布

1.2 数据来源

1.2.1 遥感数据

本文以 2021 年 11 月—2022 年 2 月的 5 景 Sentinel-2 遥感影像为数据源,开展温州市红树林的识别研究.Sentinel-2 是高分辨率多光谱成像卫星,其多光谱成像仪可拍摄涵盖可见光、近红外线与短波红外线的 13 个波段影像,引入的近红外波段可使地物光谱信息更加丰富,有利于植被提取,且在时间分辨率、空间分辨率上都要优于 Landsat 卫星.影像数据下载自欧空局官方网站的 L2A 级产品,该产品已完成几何校正、辐射定标和大气校正,在 SNAP 软件中对 Sentinel-2 影像的 1~12 波段以 10 m 分辨率进行重采样,并在 ENVI 中进行波段融合.

1.2.2 地面验证数据

根据政府、媒体等相关部门的红树林相关资料及其分布信息,通过实地踏勘、拍照调查红树林的分布边界及生长状况,具体情况如表 1 所示.在政府、媒体调研数据的基础上,结合实地踏勘情况修正红树林的分布边界,剔除过于年幼无法进行遥感识别的树苗,确定 4 个生长状况好、分布面积较大的研究区,得到红树林的实际调查分布图.

表 1 红树林生长实地踏勘

	树排沙岛	霓屿岛	鳌江沿岸		沿浦湾
			鳌江北岸	鳌江南岸	
简介	2012 年引种,种植密度高,维护状况良好,株高在 60 cm 左右,面积 0.684 7 km ²	2016 年引种,种植密度较高,株高在 50 cm 左右,面积 0.221 3 km ²	2015 年引种,种植面积较大,长势很好,株高 2 m 以上,面积 0.075 3 km ²	2002 年引种,各引种区域差别较大,种植密度不一,有些还是幼苗,面积 0.361 8 km ²	2015 引种,温州规模最大的红树林,部分区域为幼苗,面积 0.626 0 km ²
现场照片					

2 技术路线与研究方法

2.1 技术路线

通过政府部门以及媒体相关资料得到红树林的分布范围,并结合实地踏勘确定红树林的实际情况,获取地面验证数据.利用中国海事服务网(<https://www.cnss.com.cn/html/tide.html>)的潮位数据,选取低潮位影像进行研究.计算区域内的归一化植被指数并作为特征与影像叠加,分别选取单一时相影像(2022 年 2 月,1 景)与加入归一化植被指数时序特征的多时相影像(2021 年—2022 年,5 景),采用随机森林、支持向量机和最大似然法进行温州市红树林的提取,并进行对比试验,探讨研究区红树林提取的有效性,并利用遥感混淆矩阵和 Kappa 系数评价其提取精度.技术路线如图 2 所示.

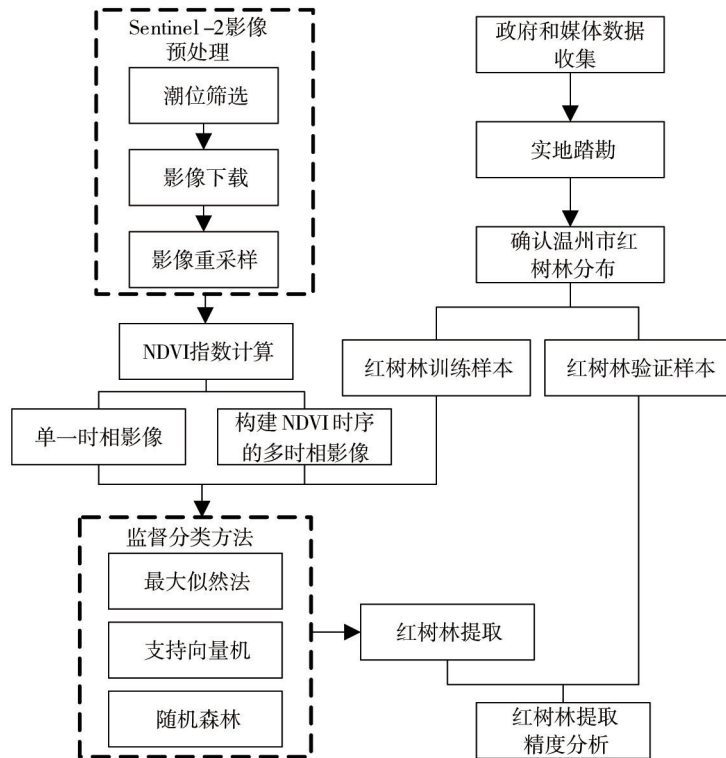


图 2 技术路线

2.2 研究方法

2.2.1 遥感影像特征提取

随着遥感数据源的发展,遥感数据时间序列尤其是 NDVI 时间序列已成为植被分类研究的热点,NDVI 时间序列能够反映植被的物候变化特征,有效消除同谱异物和同物异谱的干扰^[23].NDVI 是一种反映植被种类与长势的指数,在植被监测与评估领域已有广泛应用,其时间序列变化曲线可以很好地描述研究区植被的动态过程^[24],计算公式如式(1)所示.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (1)$$

式中: ρ_{NIR} 为近红外波段的反射率; ρ_R 为红光波段的反射率.NDVI 的取值范围为-1~1,数值越大则植被越茂盛.

2.2.2 遥感分类方法

1) 随机森林

随机森林算法是在 21 世纪初提出的一种多决策树分类方法,作为新兴的机器学习算法,其优点是稳定性好、分类精度较高^[25].该算法主要包括 2 个步骤:(1)模型训练,即使用 Bootstrap 方法随机有放回地从训练样本集中抽取 m 个样本,然后在样本特征集中有放回地选择 n 个特征变量($n \leq$ 样本集中的总特征个

数),使用这 m 个样本和 n 个特征变量对决策树模型进行训练并将此过程重复多次构成多棵决策树;
(2)对于新数据,由所有的决策树进行分类,最后获得的分类结果由所有树分类结果的众数决定,该方法的具体公式如式(2)所示,分类流程如图3所示。

$$Y_{(x)} = \arg \max_Z \sum_{i=1}^k I[y_i(x) = Z]. \quad (2)$$

式中: $Y_{(x)}$ 为模型输出结果; $y_i(x)$ 为单棵决策树模型; Z 为输出变量; $y_i(x) = Z$ 为使用变量 x 的第 i 棵树对变量 Z 的预测; $I(\cdot)$ 为一个显式函数。

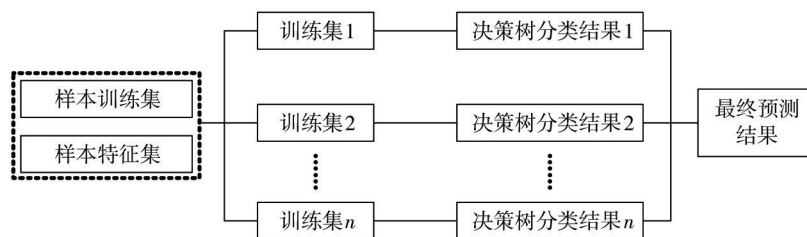


图3 随机森林分类流程

2)最大似然法

最大似然法分类又称贝叶斯(Bayes)分类,是根据贝叶斯准则对遥感图像进行分类的典型监督法,该算法的起源较早,具有计算方便且运行速度快的优点^[26]。最大似然法的基本原理是通过对遥感影像多波段像元进行统计分析,假定各类样本服从正态分布,根据判别准则构建非线性判别函数,通过计算样本属于各类别的概率将该样本归于最大概率的一组进行分类。

3)支持向量机

支持向量机是基于统计学习理论发展起来的新的机器学习方法,通过计算待分离样本间的最佳分离超平面对样本进行分类。与传统学习方法相比,该方法以结构风险最小化为准则,实现样本误差最小化,具有泛化能力最佳、受样本影响较小等优点^[27]。

2.3 精度评价指标

遥感分类精度评价指标中,通常使用混淆矩阵和 Kappa 系数计算图像的分类精度。混淆矩阵是用于表示遥感提取的某一个类别的像元个数与地面检验为该类别像元数的比较阵列,其制图精度(PA)指某类地物正确分类像元数占实际此地物像元数的百分比,由该类别所在列对角线上的像元个数除以该列总像元数;用户精度(UA)指某类地物正确分类像元数占分类结果中此地物的百分比,由该类别所在行对角线上的像元个数除以该行总像元数;总体精度(OA)指某类地物正确分类像元占总像元的百分比,为混淆矩阵对角线上所有像元之和与总像元之比。Kappa 系数表示分类结果与验证样本的匹配程度,取值范围为[0, 1],Kappa 系数越大表示分类精度越高。相应的计算公式如式(3)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} PA = \frac{P_{i,i}}{P_{+i}}; \\ UA = \frac{P_{i,i}}{P_{i+}}; \\ OA = \frac{\sum_1^t P_{i,i}}{N}; \\ Kappa = \frac{N \sum_1^t P_{i,i} - \sum_1^t (P_{i+} P_{+i})}{N^2 - \sum_1^t (P_{i+} P_{+i})}. \end{array} \right. \quad (3)$$

式中: $P_{i,i}$ 为某类正确分类的像元数; P_{+i} 为第 i 列的验证样本像元总数; P_{i+} 为第 i 行的验证样本像元总数; N 为验证样本总像元数。

3 试验与结果分析

3.1 归一化植被指数时序特征

由现场踏勘数据结合裁剪得到的 4 个测区影像图发现:研究区包括植被、滩涂和水体等地物,其中植被主要以红树林为主,且为人工引种秋茄;其次,在红树林中还分布着以互花米草为主的杂草.本文基于 2021 年 9 月、11 月和 2022 年 2 月、3 月、6 月共 5 景影像,计算测区地物的归一化植被指数均值,构建 NDVI 时间序列曲线如图 4 所示.由图 4 可知:红树林的归一化植被指数在 6 月、9 月、11 月较大,分别为 0.53, 0.65, 0.69,而后逐渐降低,至来年 3 月下降到 0.39;互花米草的 NDVI 时间序列曲线与红树林的变化趋势很接近,在 6 月、9 月、11 月较大,分别为 0.53, 0.63, 0.62,随着秋冬季的来临,NDVI 均值逐渐下降,在来年 3 月下降到 0.2,说明在秋冬季互花米草的叶子逐渐掉落,导致 NDVI 值逐渐减小,因此在 2 月、3 月,红树林与互花米草的差异较大;水体、滩涂与红树林的 NDVI 时间序列曲线的差别较大.因此,基于归一化植被指数特征对识别红树林有很大帮助.

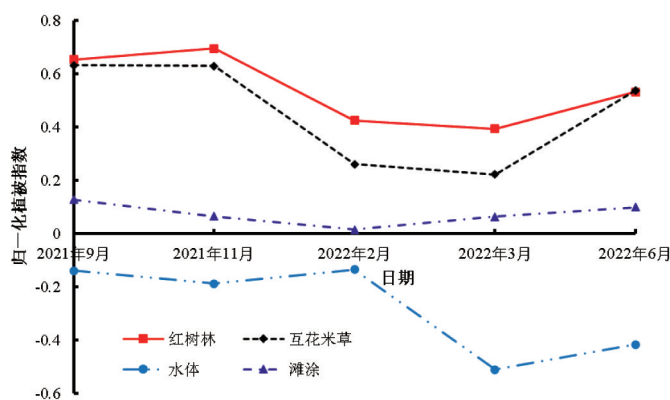


图 4 归一化植被指数时间序列曲线

3.2 红树林提取试验

为了探讨基于归一化植被指数时序特征对红树林提取结果的影响,本文提出 2 种试验方案:方案 1 采用 2022 年 2 月的单一时相影像;方案 2 采用加入归一化植被指数时序特征的 2021 年 9 月、11 月和 2022 年 2 月、3 月、6 月这 5 景的多时相影像,采用随机森林、支持向量机和最大似然法结合训练样本识别红树林(图 5),最后利用地面验证数据对红树林识别结果进行比较.

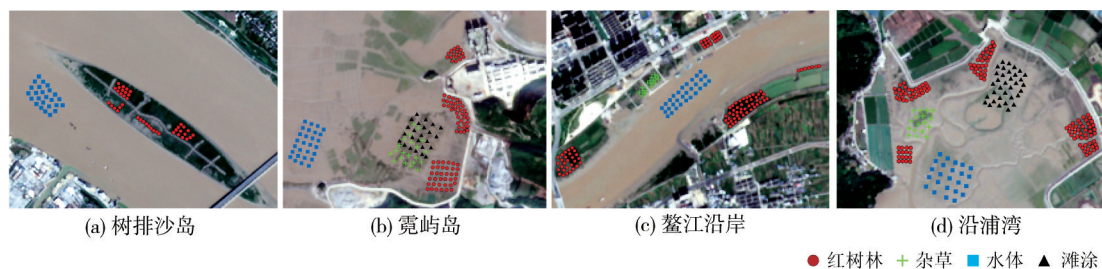


图 5 遥感分类训练样本

3.2.1 红树林识别结果

树排沙岛、霓屿岛、鳌江沿岸和沿浦湾是温州市最主要的红树林分布区,对红树林识别具有重要的意义.图 6 为采用不同分类方法基于单一时相影像和多时相影像识别红树林的结果.由图 6 可知:不同分类方法对树排沙岛的红树林识别结果几乎一致,且基于多时相影像的红树林识别结果比单一时相影像没有多大提升,主要原因是树排沙岛为江中沙洲,红树林的种植年份相对较早,维护状况良好且周边没有其他滩涂;其他 3 个研究区中,基于多时相影像的红树林识别结果相比单一时相影像有较大提升,主要原因是红

树林与互花米草的归一化植被指数的差异较明显,尤其在 2 月—3 月,多时相影像能根据时相信息有效区分红树林和互花米草,提高红树林的识别精度.

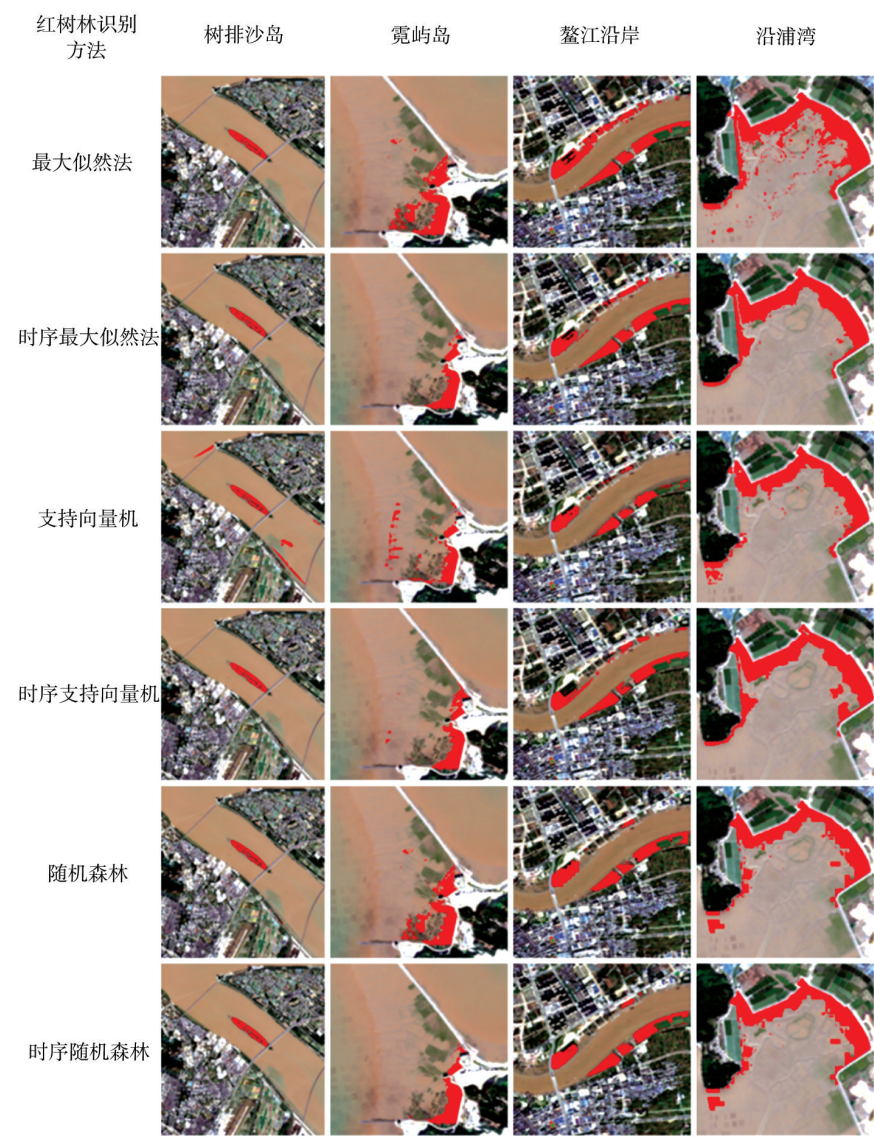


图 6 不同分类方法的红树林识别结果

3.2.2 不同分类方法精度分析

为了定量分析不同分类方法对红树林识别结果的影响,本文结合地面验证数据采用混淆矩阵计算红树林的总体精度、制图精度、用户精度和 Kappa 系数,结果如表 2 所示.由表 2 可知:基于多时相影像的红树林提取精度要明显高于单一时相影像;3 种分类方法对于研究区的红树林提取都能取得较好的结果;3 种分类方法的总体精度都高于 90%,Kappa 系数都在 80%左右,总体提取结果由低到高分别是支持向量机、最大似然法、随机森林,对应的总体精度为 97.49%, 97.93%, 98.02%,Kappa 系数为 0.80, 0.83, 0.84.

表 2 红树林识别精度统计

精度指标	单一时相影像			多时相影像		
	最大似然法	支持向量机	随机森林	最大似然法	支持向量机	随机森林
用户精度/%	91.89	79.51	85.28	92.80	90.44	92.24
制图精度/%	61.64	61.44	68.36	76.89	73.28	78.13
总体精度/%	96.15	95.85	96.80	97.93	97.49	98.02
Kappa 系数	0.72	0.67	0.74	0.83	0.80	0.84

总的来看,随机森林算法识别红树林的总体精度和 Kappa 系数相比其他 2 种分类方法都较高,因此,本文基于加入归一化植被指数时序特征的多时相影像,采用随机森林算法对 4 个研究区开展红树林识别,结果如图 7 所示.由图 7 可知:研究区的树排沙岛位于我国分布位置最北的成片红树林区域,岛上红树林的种植密度大,且政府部门每年都组织人员对红树林进行维护,定期清理互花米草,所以红树林的识别结果与实际调查相符,精度较高;研究区霓屿岛、沿浦湾的红树林大多分布在潮间带,虽然获取影像数据时筛选的是低潮位影像,但测区内红树林的引种时间晚、生长速度缓慢,且沿浦湾大部分的红树林都是幼苗,导致水体和红树林的混合部分不能很好地提取,错分现象较明显,红树林的识别结果较差;研究区的鳌江沿岸红树林的识别情况与实际现场调查结果相符,与政府及媒体提供的红树林分布差异相对较大,考虑其主要原因是部分区域红树林的种植密度较低,维护工作较差,导致杂草十分茂盛,降低了红树林的识别精度.

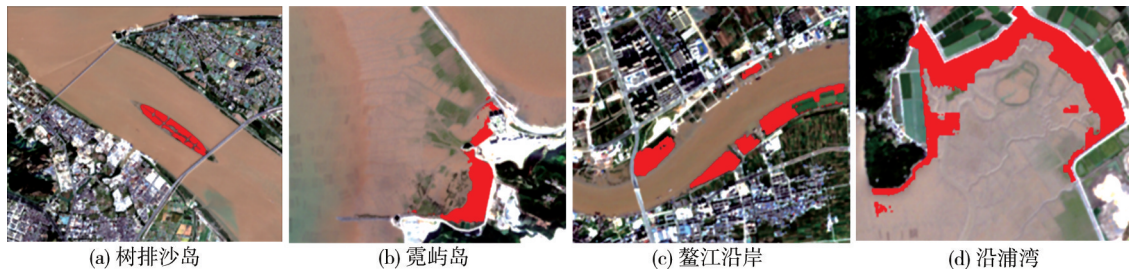


图 7 研究区红树林识别结果

通过统计研究区域识别的红树林像元个数以及影像像元大小,计算得到树排沙岛识别红树林 $0.440\ 0\ \text{km}^2$,霓屿岛 $0.255\ 6\ \text{km}^2$,鳌江沿岸 $0.290\ 4\ \text{km}^2$,沿浦湾 $0.580\ 9\ \text{km}^2$,共 $1.566\ 9\ \text{km}^2$,与政府部门的数据相比,准确率达 87.26%.从整体上看,4 个区域红树林的面积相差较大,分布相对集中,结果可为相关管理部门对红树林的管理和维护工作提供基础数据.

4 结论

1) 红树林与互花米草在秋冬季的差异较大,可以作为红树林的影像分类特征.基于多时相影像的红树林分类精度相比单一时相影像显著提高,说明归一化植被指数时序特征可以有效区分红树林和互花米草,提高红树林的识别率.

2) 基于多时相影像采用随机森林、最大似然法、支持向量机提取红树林的总体精度分别为 98.02%, 97.93%, 97.49%, Kappa 系数为 0.84, 0.83, 0.80,说明这 3 种分类方法都能取得较好的结果,相较单一时相影像识别红树林要更有优势,能提高红树林的识别精度.

3) 计算得到树排沙岛红树林 $0.440\ 0\ \text{km}^2$,霓屿岛 $0.255\ 6\ \text{km}^2$,鳌江沿岸 $0.290\ 4\ \text{km}^2$,沿浦湾 $0.580\ 9\ \text{km}^2$,共 $1.566\ 9\ \text{km}^2$,与地面验证数据相比,准确率达 87.26%.

参考文献:

- [1] 陈映霞.红树林的环境生态效应[J].海洋环境科学,1995,14(4):51-56.
- [2] 沈小雪,张志,翟朝阳,等.海岸带红树林范围与种类识别精度的荟萃分析[J].北京大学学报(自然科学版),2022,58(1):135-146.
- [3] 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,2012,24(3):65-70.
- [4] 孙飒梅.三都湾互花米草的遥感监测[J].台湾海峡,2005,24(2):223-227.
- [5] 莫权芳,钟仕全.基于 Landsat 数据的铁山港区红树林变迁及其驱动力分析研究[J].科学技术与工程,2014,14(23):8-14.
- [6] GHOSH M J, KUMAR L, ROY C. Mapping Long-Term Changes in Mangrove Species Composition and Distribution in the Sundarbans[J]. Forests, 2016, 7(12):305.
- [7] GIRI C, PENGRA B, ZHU Z L, 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(1/2): 91–100.
- [8] 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.
- [9] VAIPHASA C, SKIDMORE A K, DE BOER W F. A post-classifier for mangrove mapping using ecological data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2006, 61(1): 1–10.
- [10] VIENNOIS G, PROISY C, FERET 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 and Remote Sensing*, 2016, 9(8): 3680–3686.
- [11] NEUKERMANS G, KOEDAM N, KAIRO J G, et al. Mapping Kenyan mangroves with very high resolution QuickBird satellite imagery[C]//International Symposium on Aquatic Vascular Plants. 11–13 January, 2006, Brussels, Belgium.
- [12] 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*,2015,13(2):145–152.
- [13] ZHU Y H, LIU K, LIU L, et al. Retrieval of mangrove aboveground biomass at the individual species level with WorldView-2 images[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(9): 12192–12214.
- [14] 徐芳.基于 Sentinel-2 的红树林提取及碳储量估算研究[D].兰州:兰州交通大学,2020.
- [15] 马云梅,吴培强,任广波.基于高分影像光谱特征的广西海岸带红树林精细分类与制图[J].*地球信息科学学报*,2021, 23(12):2292–2304.
- [16] 张雪红.基于决策树方法的 Landsat8OLI 影像红树林信息自动提取[J].*国土资源遥感*,2016,28(2):182–187.
- [17] 徐芳,张英,翟亮,等.基于 Sentinel-2 的潮间红树林提取方法[J].*测绘通报*,2020(2):49–54.
- [18] 路春燕,高弋斌,陈远丽,等.基于 RS/GIS 的泉州湾红树林湿地时空动态变化分析[J].*森林与环境学报*,2019,39(2): 143–152.
- [19] 薛朝辉,钱思羽.融合 Landsat 8 与 Sentinel-2 数据的红树林物候信息提取与分类[J].*遥感学报*,2022,26(6): 1121–1142.
- [20] CHEN B Q, XIAO X M, LI X P, 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: 104–120.
- [21] ZHANG T, HU S S, HE Y, et al. A fine-scale mangrove map of China derived from 2-meter resolution satellite observations and field data[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2021, 10(2): 92.
- [22] ZHAO C P, QIN C Z. 10-m-resolution mangrove maps of China derived from multi-source and multi-temporal satellite observations[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 169: 389–405.
- [23] 江东,王乃斌,杨小唤,等.NDVI 曲线与农作物长势的时序互动规律[J].*生态学报*,2002(2):247–252.
- [24] FAN J L, WU B F. A methodology for retrieving cropping index from NDVI profile[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2004(6): 628–636.
- [25] 董灵波,梁凯富,张一帆,等.基于 Landsat 8 时间序列数据的翠岗林场森林类型划分[J].*应用生态学报*, 2022, 33(9): 2339–2346.
- [26] 郑迪,沈国春,王舶鉴,等.基于无人机高光谱影像和深度学习算法的长白山针阔混交林优势树种分类[J].*生态学杂志*,2022,41(5):1024–1032.
- [27] 张锦水,何春阳,潘耀忠,等.基于 SVM 的多源信息复合的高空间分辨率遥感数据分类研究[J].*遥感学报*,2006,10(1):49–57.