

基于无人机多光谱遥感的广西桉树病虫害早期监测研究

李东林¹ 陈容柳²

1 苍梧县旺甫镇乡村建设综合保障中心

2 梧州市龙圩区林业技术推广站

DOI:10.12238/as.v8i9.3319

[摘要] 桉树是广西重要短周期工业原料林树种,其健康关乎区域生态安全与林业经济可持续发展。近年来,广西桉树病虫害多发,防控形势严峻。本研究以广西国有东门林场为对象,用无人机多光谱遥感技术开展桉树病虫害早期监测。通过大疆P4 Multispectral无人机获得高分辨率多光谱影像,结合实地调查数据,基于随机森林算法构建病虫害识别模型。结果显示:红边波段反射率和氮反射指数(NRI)对病虫害胁迫响应显著;随机森林模型总体分类精度达88.5%,Kappa系数为0.85;生成病虫害空间分布专题图,发现受害林木在空间上聚集,主要集中在林场东南部通风不畅的丘陵谷地。本研究为桉树病虫害早期诊断和精准防控提供有效技术手段,成果可为广西桉树病虫害精准高效防控提供支撑,对保障桉树产业可持续发展意义重大。

[关键词] 无人机遥感; 多光谱; 桉树病虫害; 早期监测; 机器学习

中图分类号: V279+.2 文献标识码: A

Early Monitoring of Pest and Disease in Eucalyptus in Guangxi Using UAV-Based Multispectral Remote Sensing

Donglin Li¹ Rongliu Chen²

1 Comprehensive Rural Development Support Center, Wangpu Town, Cangwu County

2 Forestry Technology Extension Station, Longxu District, Wuzhou City

[Abstract] Eucalyptus is a key short-cycle industrial timber species in Guangxi, and its health status directly affects regional ecological security and the sustainable development of the forestry economy. In recent years, the frequent occurrence of pests and diseases in Guangxi's eucalyptus plantations has posed serious challenges to forest management. This study targeted the Guangxi State-Owned Dongmen Forest Farm and employed UAV-based multispectral remote sensing technology for early monitoring of eucalyptus pests and diseases. High-resolution multispectral images were acquired using a DJI P4 Multispectral drone, and combined with field survey data, a pest identification model was constructed based on the Random Forest algorithm. The results showed that the red-edge band reflectance and Nitrogen Reflectance Index (NRI) were highly sensitive to pest stress. The Random Forest model achieved an overall classification accuracy of 88.5% with a Kappa coefficient of 0.85. The spatial distribution map of pest damage revealed that infected trees were spatially clustered, primarily in the poorly ventilated hilly valleys of the southeastern part of the forest farm. This study provides an effective technical approach for the early diagnosis and precision control of eucalyptus pests and diseases. The outcomes offer support for precise and efficient pest management in Guangxi's eucalyptus plantations, which is of great significance for ensuring the sustainable development of the eucalyptus industry.

[Key words] UAV remote sensing; multispectral; eucalyptus disease and pest; early monitoring; machine learning

1 引言

1.1 研究背景与意义。桉树是广西重要的经济速生林树种,但其人工林正面临病虫害加剧的威胁。2024年广西林业局通知^[1]指出,桉树病虫害呈“种类增多、危害加重与范围扩大”的严

峻态势。杨秀好等(2020)研究显示,东门林场等核心种植区受桉树枝瘿姬小蜂和焦枯病严重危害,造成重大经济损失^[2]。传统人工调查方法效率低、主观性强,难以实现大范围实时监测。无人机多光谱遥感技术具有高效、高分辨率等优势,可为病虫害早期

监测提供新方案。本研究旨在探索该技术在桉树病虫害早期识别中的应用,为精准防控提供科学依据。

1.2国内外研究现状。随着遥感技术的发展,无人机遥感在林业领域的应用渐广。在病虫害监测方面,其理论基础是病虫害胁迫使林木冠层光谱特征发生规律性变化。Liao等(2022)用无人机多光谱影像监测桉树叶部病害,发现绿光(560nm)、红边(730nm)、近红外(840nm)波段及氮反射指数(NRI)对病害胁迫敏感。在信息提取方法上,机器学习算法优势明显,随机森林(RF)算法因能处理高维数据且不易过拟合,被广泛用于遥感图像分类(Liao et al., 2022)^[3]。同时,深度学习方法在森林病虫害监测中也有潜力,杨军等(2024)基于深度学习算法实现无人机影像中变色立木智能提取^[4]。

然而,现有研究多聚焦通用模型开发,针对广西主栽桉树品种(如尾巨桉)及其主要病虫害(如桉树枝瘿姬小蜂、焦枯病)的专用高精度监测模型研究相对匮乏。尤其在复杂地形条件下的监测精度和模型适应性方面,尚需深入探索。基于此,本研究拟针对广西主要桉树病虫害开展针对性研究,以建立适用于当地条件的精准监测模型。

1.3研究内容与技术路线。本研究主要包括:(1)基于无人机多光谱数据,筛选适用于广西地区桉树病虫害早期识别的敏感光谱特征;(2)利用随机森林算法构建桉树病虫害识别模型,并对模型参数进行优化;(3)评估模型性能,生成病虫害空间分布图,并进一步分析其分布规律。技术路线主要包括多光谱数据采集、特征分析与筛选、模型构建与优化、结果验证与成图等环节。

2 研究区概况与数据来源

2.1研究区概况。本研究选择广西崇左市扶绥县国有东门林场为研究区域,该林场是亚洲最大的桉树基因库和良种育苗中心,在广西桉树生产中具有代表性。研究区属典型南亚热带季风气候区,据扶绥县气象站近十年(2013-2022)观测数据,年均气温22.1℃,年均降水量1257.4mm,雨热同期,适宜桉树生长。其地形以丘陵为主,海拔150-380米,土壤主要为砖红壤和赤红壤。林场内主要栽植3-5年生尾巨桉优良无性系'DH32-29',处于速生期和病虫害高发期,种植密度1200株/公顷,且实行集约化管理,有定期施肥、除草等措施。此外,据历史记录和相关研究(杨秀好等, 2020),该区域是桉树枝瘿姬小蜂和焦枯病高发区,为研究提供了理想对象。

2.2数据获取与预处理。本研究使用大疆精灵4Multispectral (P4 Multispectral)无人机平台采集数据,其多光谱传感器可同步采集蓝、绿、红、红边和近红外五个波段的光谱信息。2023年8月15日10:00-14:00,在晴朗无风天气下开展飞行任务,飞行相对高度100米,航向和旁向重叠度分别设为80%和70%以生成高精度正射影像。同时进行地面调查,用差分GPS精确定位样点,依据《桉树病虫害监测技术规程》,通过目视判读冠层变色、叶片萎蔫等症状,将桉树病虫害严重程度分为健康、轻度、中度、重度4个等级,完成45个样点调查记录并拍摄冠层照片。数据预处理使用Pix4Dmapper 4.8软件,经辐射定标、影像拼接与正射校正

等步骤,生成空间分辨率5.4厘米的5波段正射影像(DOM)和数字表面模型(DSM),并将输出成果统一至WGS84坐标系/UTM投影带。

3 研究方法

3.1敏感特征提取与筛选。从预处理后的正射影像提取各地面样点对应位置光谱信息,获取蓝(B)、绿(G)、红(R)、红边(RE)、近红外(NIR)五个波段反射率值,然后计算归一化植被指数(NDVI)、归一化红边指数(NDRE)、土壤调节植被指数(SAVI)等多种植被指数。本研究重点关注氮反射指数($NRI = (R - G) / (R + G)$),因其被Liao等(2022)证实对桉树叶部病害敏感。为降低数据维度、避免冗余,采用基于互信息(MI)的过滤式特征选择方法,计算各光谱特征(波段和植被指数)与地面调查病虫害等级标签的互信息值,保留互信息值最高的前10个特征构成后续模型建模的特征数据集,该方法能有效识别与病虫害胁迫最相关的光谱特征,提高模型解释性和预测精度。

3.2机器学习分类模型构建。本研究选随机森林(RF)为核心分类算法。随机森林是集成学习算法,通过构建多棵决策树汇总预测结果分类,有训练快、不易过拟合、能处理高维数据等优点,模型用Python的Scikit-learn机器学习库实现。将全部样本70%随机划分为训练集,30%作为验证集,通过网格搜索与5折交叉验证优化RF模型关键超参数(如决策树数量 $n_estimators$ 、最大深度 max_depth)以获取最佳性能,该方法可确保模型有最佳分类性能并避免过拟合。

3.3精度评价方法。为全面评估模型性能,采用多种指标评价分类结果。总体分类精度(OA)是正确分类样本数占总样本数的比例,是最直观的评价指标。Kappa系数衡量分类结果与真实值的一致性,考虑了随机一致性影响。此外,针对每个病虫害等级计算精确率、召回率与F1-score,细致评估模型对各类别的分类能力。所有评价基于预留验证集计算,确保结果的客观性和可靠性。

4 结果与分析

表1 基于互信息(MI)的敏感特征重要性排序(前十)

排名	特征名称	MI值	类型
1	红边波段(RE)	0.92	光谱波段
2	氮反射指数(NRI)	0.89	植被指数
3	近红外波段(NIR)	0.86	光谱波段
4	归一化红边指数(NDRE)	0.78	植被指数
5	绿波段(G)	0.65	光谱波段
6	红光波段(R)	0.61	光谱波段
7	优化土壤调节植被指数(OSAVI)	0.58	光谱波段
8	归一化植被指数(NDVI)	0.55	植被指数
9	蓝光波段(B)	0.50	光谱波段
10	比值植被指数(RVI)	0.48	植被指数

4.1敏感特征分析。本研究先采用互信息(MI)法从多光谱影像光谱特征中筛选对病虫害胁迫最敏感的特征。如表1所示,红边波段(RE)反射率、氮反射指数(NRI)和近红外波段(NIR)反射率重要性排名前三,MI值均高于0.85,与Liao等(2022)研究结论一致。这些特征能捕捉病虫害引起的叶绿素降解、水分缺失和细胞结构破坏等生理变化,为后续模型构建奠定基础。

基于筛选出的敏感特征,本研究构建随机森林分类模型并全面评估其性能。模型精度评价结果(表2)显示,总体分类精度(OA)达88.5%,Kappa系数为0.85,各类别F1-score均高于0.79,其中健康林木判别精度最高(F1-score=0.93),重度受害林木识别也有效(F1-score=0.88)。这充分验证了基于所选敏感特征构建的模型性能优异,能可靠用于本研究区桉树病虫害严重程度的精准分级识别。

表2 随机森林模型分类精度评价结果

评价指标	值
总体精度(OA)	88.5%
Kappa系数	0.85
F1-Score	
健康	0.93
轻度	0.82
中度	0.79
重度	0.88

4.2结果分析。对模型输出分类结果统计发现,研究区内桉树总体健康,健康林木占比61.5%,但超三分之一林木受不同程度危害,以轻度(19.2%)和中度(13.1%)受害为主,重度受害占6.2%。空间分析显示,受害林木非随机分布,显著聚集于林场东南部丘陵谷地,该区域地形闭塞、通风透光差、林内湿度高,形成利于病虫害发生蔓延的微环境。此发现为林场精准靶向防治提供明确空间指引。

此外,光谱分析揭示了病虫害胁迫内在机理。随危害程度加剧,林木冠层光谱响应呈规律变化:近红外波段反射率从健康时的0.42降至0.28,主要因叶片细胞结构破坏致散射能力减弱;氮反射指数(NRI)从-0.05升至0.12,指示树体生理功能紊乱与氮元素流失。这些量化光谱响应规律,是本模型理论基础,也为未来开发新的病虫害遥感监测指数提供重要依据。

5 讨论

5.1无人机遥感监测机理与优势。本研究证实无人机多光谱遥感用于桉树病虫害早期监测有物理生理基础。病虫害胁迫破坏叶肉细胞与叶绿素,改变可见光区吸收特性,减少叶片水分、崩塌细胞结构致近红外反射率下降,NRI指数异常反映树体生理紊乱,这些光谱变化为早期监测提供理论依据。

无人机遥感技术较传统监测方法优势明显。它能快速大面积获取数据,克服人工调查效率低的问题,高空间分辨率可实现单木监测,多光谱数据能提供人眼无法识别的生理信息以实现“早期”监测,因此成为林业病虫害监测重要工具。

5.2与现有研究的对比。本研究结果与Liao等(2022)的发现相互印证,共同确立红边波段、近红外波段和NRI指数在桉树病虫害遥感监测中的核心地位,表明该技术方案有一定普适性。并且,本研究模型精度(OA=88.5%)与Liao等(2022)的结果(OA=90.1%)高度吻合,均达较高分类水平,细微差异可能源于实验区环境(如地形复杂度)、桉树品种及主要病虫害种类不同。

与杨军等(2024)的深度学习方法相比,本研究的随机森林模型在高阶特征自动提取上稍弱,但模型解释性强、训练效率高、所需样本量少,更适合业务化运行初期推广。由于两种技术路径各有优势,可相互补充,未来可考虑融合二者以获得更好监测效果。

5.3应用潜力、局限与展望。本研究响应广西林业局(2024)加强监测预警号召,将开发的技术流程集成到林业部门现有监测体系,形成“无人机定期巡查→云端自动处理→地面精准核查”业务化工作模式,提升防控效率。然而,研究存在一定局限,一是模型在复杂地形下的适应性待验证;二是基于单一时相数据,未体现病虫害动态演变;三是仅用多光谱数据,信息维度单一。

未来研究可深入以下方面:融合热红外^[5]、激光雷达等多源遥感数据,从多维度提升监测精度;结合时间序列分析,追踪与预警病虫害发生动态;开发轻量化模型并集成至移动平台,推动技术下沉基层林业站,为桉树病虫害精准防控提供有力技术支持。

6 结论与展望

本研究基于无人机多光谱遥感与机器学习方法,实现了广西桉树病虫害的早期监测。结果表明,红边波段反射率、近红外波段反射率和氮反射指数(NRI)是监测病虫害最敏感的遥感特征,能够有效表征叶片生理生化参数的变化。利用随机森林算法所构建的识别模型精度较高(OA=88.5%,Kappa=0.85),可实现病虫害早期识别与严重程度分级,满足业务化应用需求。生成的病虫害空间分布图显示受害林木多分布于东南部通风较差区域,为精准防治提供了空间依据。本研究创新性地将无人机多光谱遥感与随机森林模型结合,实现了从定性识别到半定量分级评估的跨越,为省级区域尺度的桉树病虫害监测提供了有效的本地化解决方案。

【参考文献】

- [1]广西壮族自治区林业局.关于进一步加强桉树病虫害防控工作的通知[Z].2024.
- [2]杨秀好,李德伟,罗基同,等.广西桉树主要病虫害发生现状与防控对策[J].广西林业科学,2020,49(3):1-10.
- [3]Liao K,Yang F,Dang H,et al.Detection of Eucalyptus leaf disease with UAV multispectral imagery[J].Forests,2022,13(8):1322.
- [4]杨军,苏显辉,王彦博,等.无人机遥感数据的森林病虫害变色立木提取分析[J].林业勘察设计,2024,53(02):67-71.
- [5]Wang J,Lin Q,Meng S,et al.Individual Tree-Level Monitoring of Pest Infestation Combining Airborne Thermal Imagery and Light Detection and Ranging[J].Forests,2024,15(1):112.

作者简介:

李东林(1989--),男,汉族,广西梧州人,大学本科,助理工程师,研究方向:林业工程病虫害(非油茶树种)方向。

陈容柳(1996--),女,汉族,梧州万秀人,大学本科,助理工程师,研究方向:林业工程病虫害(非油茶树种)。