

基于遥感技术的橡胶林监测研究进展

史建敏^{1,2}, 陈桂良^{1,2*}, 鲁连欣^{1,2}, 艾文竹^{1,2}, 黎小清^{1,2}, 蔡志英^{1,2}

(1. 云南省天然橡胶可持续利用研究重点实验室, 云南景洪 666100;

2. 云南省热带作物科学研究所, 云南景洪 666100)

[摘要] 遥感技术凭借其快速、精准的优势, 能够在不同的时空尺度上获取橡胶林的对地观测影像, 从而提取多维度、多层次的信息, 为橡胶林的科学监测提供了强有力的技术支持。随着遥感技术的不断发展, 遥感数据源日益丰富, 多源数据和多平台数据的联合应用, 使得对橡胶林的空间分布、长势动态及病虫害状况的监测更加全面精确, 从而为橡胶生产管理提供科学依据。文章综述遥感技术在橡胶林空间分布、长势监测及自然灾害方面监测的研究现状, 并展望了遥感技术在橡胶林监测中的未来发展趋势。

[关键词] 橡胶林; 遥感; 估测; 监测

中图分类号: S127; S794.1 文献标识码: A 文章编号: 1672-450X(2025)04-0099-08

Research Progress on Rubber Forest Monitoring Based on Remote Sensing Technology

SHI Jianmin^{1,2}, CHEN Guiliang^{1,2*}, LU Lianxin^{1,2}, AI Wenzhu^{1,2}, LI Xiaoqing^{1,2}, CAI Zhiying^{1,2}

1. Yunnan Key Laboratory of Sustainable Utilization Research on Rubber Tree, Jinghong 666100, China;

2. Yunnan Institute of Tropical Crops, Jinghong 666100, China

Abstract: Remote sensing technology, by virtue of its fast and accurate advantages, can obtain ground observation images of rubber forests at different spatial and temporal scales, so as to extract multi-dimensional and multi-level information, and provide strong technical support for the scientific monitoring of rubber forests. With the continuous development of remote sensing technology, remote sensing data sources are becoming more and more abundant, and the joint application of multi-source data and multi-platform data makes the monitoring of spatial distribution, growth dynamics, and pests and diseases of rubber forests more comprehensive and accurate, and provides a scientific basis for rubber production management. This paper systematically analyzes the current research status of remote sensing technology in monitoring spatial distribution, growth dynamics and natural disasters in rubber forests, and looks forward to the future development trend of remote sensing technology in rubber forest monitoring.

Key words: rubber forest; remote sensing; estimate; monitoring

橡胶林的数量、产量和质量直接影响天然橡胶的生产, 对行业发展具有重要意义。通过对橡胶林高频、有效、持续的监测, 可以给经营者在生产管理上提供精准的判断和决策依据。传统的监测方法要到实地大规模取样调查, 需要耗费大量的人力、财力和时间, 且存在面积大不容易开展、准确度不高等问题^[1]。相较之下, 遥感监测

具有空间信息量大、监测范围广、重访周期短等显著优势, 为橡胶林监测提供了一种切实可行的方案^[2]。借助遥感技术可以快速、准确、实时地获取不同空间尺度下的橡胶林影像, 从而直观反映橡胶林的生长状况、动态变化及病虫害分布, 为橡胶林的动态监测和管理提供科学有力的技术支持。遥感监测平台分为地面遥感、航空遥感

收稿日期: 2025-02-26

基金项目: 云南省院士专家工作站项目(202405AF140032); 云南省热带作物科技创新体系建设专项(RF2025-6);

云南省现代农业橡胶产业技术体系(2024KJTX-12-8)

作者简介: 史建敏(1998—), 女, 研究实习员, 硕士, 研究方向为农业遥感。E-mail: shijianmin20212021@163.com

*通信作者: 陈桂良(1984—), 男, 副研究员, 硕士, 研究方向为植物营养与3S技术应用。E-mail: chen_guiliang@163.com

和航天遥感,不同平台搭载不同的传感器可以满足不同尺度和空间橡胶林监测的需求^[3-5]。遥感成像的方式也种类较多,有光学遥感、微波遥感、热红外遥感等,其空间、时间和光谱分辨率也在不断提高,随着遥感技术的发展,橡胶林遥感监测手段和用途也多种多样^[6-7]。本文综述遥感技术在橡胶林空间分布、长势和自然灾害方面监测的研究进展及应用现状,并讨论分析遥感在橡胶林监测中的发展趋势和应用潜力。

1 基于遥感的橡胶林空间分布监测

1.1 橡胶林识别

准确掌握橡胶林的空间区位、分布特征、种植面积等基础信息,可为橡胶园的经营管理提供依据^[8]。遥感技术的不断进步和对橡胶树生长机制认识的深入,推动了对橡胶林特征识别精度的持续提升^[9]。光学遥感在橡胶林识别中应用最广,主要是以像元为基础,利用遥感影像中橡胶林的光谱信息进行分类识别。2003年Suratman^[10]以TM影像为数据源,最大似然法对马来西亚的橡胶园进行识别分类,总体精度达97.2%,成功获得了橡胶园的数量、树龄和面积。随后其优化了分类方法,进一步验证了遥感影像在橡胶林识别分类的可行性^[11]。李亚非等^[12]利用环境一号卫星影像,采用决策树分类方法,精准提取西双版纳地区的橡胶林分布信息。Li等^[13]基于多时相MODIS NDVI数据,采用马氏典型模型处理混合像元,提高了识别精度。随着遥感数据种类越来越丰富,利用多源遥感数据对橡胶林识别可以实现优势互补。被动遥感受云、雨等天气的影响,而主动遥感则可以全天时、全天候观测,多源数据结合能提高橡胶林识别的准确度^[14]。高书鹏等^[15]融合ETM+、OLI、Sentinel-2A影像与MODIS数据,弥补了时间分辨率和空间分辨率不足,对西双版纳的橡胶林实现了较高精度的识别。黄翀等^[16]协同光学数据Sentinel-2和合成孔径雷达(Synthetic aperture Radar, SAR)数据,发现联合多源数据在橡胶林的识别中有巨大的潜力。Zhang等^[17]首先利用Sentinel-1 C波段SAR数据生成林区非林区的基准图,进一步利用GF-1、Landsat8、

Sentinel-2的纹理特征进行橡胶林的识别,进一步验证了源数据联合在橡胶林分类中的应用潜力。

基于像元的分类方法易受“异物同谱”和“同物异谱”问题影响,而面向对象的方法通过将形状、纹理、颜色等相似特征组合成对象,有效规避了这一局限^[18]。Dai等^[19]以Landsat为数据源,对海南的阳江农场进行多尺度图像分割后基于面向对象的分类方法提取橡胶园种植区域取得了较好的精度。李怀霄^[18]利用TM影像对西双版纳进行面向对象的分类,提高了对橡胶林的识别精度。梁守真等^[20]结合多时相数据,通过面向对象的决策树分类方法,成功提取了海南的橡胶林信息。此外,橡胶林显著的季节性落叶特征为多时相遥感数据与物候特征结合提供了有利条件。Dong等^[14]利用多时相Landsat TM影像发现,海南橡胶林在落叶期其归一化植被指数、增强植被指数及陆地地表水指数均低于天然常绿林,而在新叶出芽期其增强植被指数和近红外反射率则高于天然林,基于这一物候规律并结合L波段全极化SAR数据,实现了高精度橡胶林绘图。刘怡媛等^[21]利用Landsat数据计算橡胶林落叶—新叶萌生期内归一化焚烧指数变化率,通过阈值识别橡胶成林,提取的2014和2018年种植信息的总体精度均超90%。Chen等^[22]综合分析橡胶林在落叶期和嫩芽期的植被指数特征,利用随机森林方法构建了2014、2016、2018和2020年10 m分辨率的橡胶林空间分布图。

1.2 橡胶林变化检测

橡胶林变化检测是以遥感识别橡胶林分布信息为基础,利用地理信息系统和空间方法分析来实现的,有助于深入揭示其时空变化特征和地域分布格局^[23]。全球的橡胶林主要集中分布于东南亚和南亚地区,其持续扩张主要源于对天然林的砍伐转化^[24]。何志杰^[25]联合光学与SAR数据对缅甸孟邦地区进行高精度橡胶林识别,对2000—2019年的Landsat影像进行变化监测,结果表明该区域橡胶林种植面积逐步增加,且扩展主要发生在橡胶林地周边。廖湛嫻等^[26]基于物候特征对西双版纳1990—2014年的橡胶林进行遥感监测,研究表明西双版纳的橡胶林种植面积增

加主要来自 800 m 以下的天然热带季雨林。Xiao 等^[27]利用基于物候的多重归一化方法对西双版纳的橡胶林进行识别,发现从 1987—2018 年橡胶林种植面积扩张了 5.9 倍,呈现由集中到分散扩张,尤其是边陲地区变化显著。Zhai 等^[28]利用 Sentinel-2 影像绘制了 2018—2021 年西双版纳的橡胶林种植图,发现橡胶林种植面积总体先上升后下降,其中新增部分主要位于景洪市。

利用遥感数据,不仅能监测橡胶林的时空变化,还能揭示海拔、坡度和坡向等自然因素对橡胶林分布变化的驱动作用^[29]。寇卫利^[29]基于多源遥感数据对西双版纳橡胶林动态变化的研究表明:西双版纳的橡胶林主要分布在海拔 600 ~ 1 200 m,坡度范围 5° ~ 25°,从北坡到南坡依次呈现逐渐增加的态势。李广洋等^[30]利用多时相遥感数据对海南岛近 30 a 的橡胶林空间变化的研究表明:与西双版纳橡胶林空间分布的模式不同,海南岛的橡胶林主要是分布在海拔低于 200 m 和坡度小于 15° 的平原和丘陵地区。李阳阳等^[31]利用 MODIS 数据对老挝北部的橡胶林时空动态变化的研究表明,老挝北部的橡胶林分布特征与西双版纳相似。

1.3 橡胶林树龄监测

橡胶林一般在种植 6 ~ 8 a 后开始割胶,在 20 a 后产量到达顶峰,之后逐渐下降或停滞,在 30 ~ 35 a 后会被砍伐用于木材加工。因此,橡胶树龄信息对产量管理和指导农业生产具有重要意义。利用遥感信息与树龄之间建立统计模型来估测橡胶林树龄的方法具有连续性。陈邦乾等^[1]通过研究发现 TM 影像光谱信息与橡胶林树龄呈负相关。Chen 等^[32]利用 TM 影像的光谱、植被指数及缨帽成分信息建立回归模型,橡胶林年龄估测中精度 R^2 为 0.74 ~ 0.82,但存在高值低估与低值高估的问题。Keawplang 等^[33]利用 Hyperion 高光谱卫星的 4 种常用植被指数建立回归模型估算泰国橡胶林树龄,证明了高光谱数据在橡胶林树龄估算中的潜力。Chen 等^[34]使用 Landsat 的 NDVI 值年度时间序列数据开发了基于像素/对象的橡胶林综合生长模型,稳定地估测中国、缅甸、老挝交界处的橡胶林树龄,为精细化估算橡胶树

树龄提供了一种新思路。

通过遥感影像分类估测橡胶树年龄可将橡胶林划分为幼林、成林、老林,为橡胶生产力评估提供科学依据。廖湛嫻等^[26]结合橡胶林的归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)和野外数据将西双版纳橡胶林划分为幼林($NDVI < 0.3$)、成林($0.3 \leq NDVI < 0.6$)。仅利用 NDVI 无法很好地区分橡胶林林龄,但通过空间叠加分析能提升准确度。刘晓娜等^[35]系统分析了不同树龄橡胶树在遥感光谱、纹理、地形特征的差异,通过面向对象的方法成功划分出了橡胶幼林和成林。李阳阳等^[31]基于遥感特征的差异成功划分了橡胶成林和幼林,分类总精度达 81%。Koedsin 等^[36]利用泰国普吉岛的 Pleiades 高分卫星影像的光谱信息和植被指数,结合实地调查数据进行特征优选,而后进行最大似然分类,将橡胶林按产量划分为 7 a 以下、7—15 a 和 15 a 以上,结果显示特征优选显著提升了分类精度。Somching 等^[37]利用 Landsat 系列卫星的光谱信息和植被指数信息对泰国南部普吉岛塔朗地区橡胶园的树龄进行机器学习分类,对平原和高原的建模数据集实现了 84.45% 和 84.7% 的准确率。

此外,通过多时相的遥感影像进行土地利用变化监测可确定橡胶树定植年份,进而推测橡胶树龄。寇卫利^[29]以 2010 年的橡胶林分布图为本底,基于多时相 Landsat 数据源,监测从天然林变更为橡胶幼林过程中 NDVI、增强植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)、陆表水分指数(Land Surface Water Index, LSWI)产生的扰动信号,以此信号监测橡胶林的种植年份,总精度达 85%。Beck-schafer 等^[38]依据 270 张 1988—2015 年的 Landsat 影像中最小化差异水分指数是否大于 0 来划分植被和非植被,结合土地利用变化来确定橡胶园种植的起始年,确定了西双版纳橡胶林的种植年份。Chen 等^[39]也是利用土地利用变化来确定了海南橡胶林的种植时间。

2 基于遥感的橡胶林长势监测

2.1 橡胶林地上生物量估测

传统的实地测量橡胶林(above ground bio-

mass, AGB)耗时费力,利用遥感技术估测橡胶林地上生物量具有高效、快捷等优势。遥感估测AGB是利用实测数据与遥感特征之间建立回归模型进行估测。为了提升遥感技术估测的橡胶林AGB的准确度,从单一源数据到多源数据、从参数模型到机器学习模型、从多种特征到最优特征组合等方面的研究不断深入。徐万荣等^[40]研究表明橡胶林AGB实测值与TM数据的光谱特征、植被指数之间显著相关,且利用逐步线性回归模型反演了西双版纳地区的橡胶林AGB分布图,但是存在高值低估和低值高估现象。Yasen等^[41]利用Worldview-2影像光谱信息估算泰国普吉府地区的橡胶林AGB,研究表明人工神经网络模型准确度优于多元逐步线性回归模型。罗洪斌等^[42]结合实地调查数据,分别用机载激光雷达数据、Landsat8光学数据和联合数据源估测景洪市部分地区的橡胶林AGB,结果表明联合数据源显著提升了估测精度。Fu等^[43]通过提取西双版纳地区的Sentinel-2影像的光谱、植被指数、纹理特征等信息进行特征优选组合后再进行多种方式的机器学习,来估测橡胶林AGB,结果表明随机森林方法和Boruta优选方法的估测精度较高,表明特征优选可提升精度。

被动遥感在橡胶林AGB估测中的应用较多,但是被动遥感波长较短,对橡胶林AGB的估测的饱和点较低,且橡胶林随着树龄变化其冠层存在差异性,通过加入橡胶林树龄信息能提升遥感估测橡胶林AGB的饱和点,进而提升遥感估测橡胶林AGB的精度。Chen等^[44]利用Landat7/8和Sentinel-2合成影像估测海南省的橡胶林AGB,在随机森林模型中引入树龄变量,显著提升了估测精度,并有效解决饱和点问题。Li等^[45]整合了林龄、冠层高度图、遥感和地理气候等特征数据估测海南岛橡胶林AGB,表明树龄和冠层高度特征的加入明显提高了遥感估测精度。橡胶林AGB与胸径、树高和林龄密切相关,加入树高和林龄信息能提升橡胶林AGB的估测精度。

2.2 橡胶林叶面积指数估测

叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)是单位水平土地面积上植被叶片总面积占土地面积的倍

数,描述了植物的冠层结构和密度^[46]。传统的直接观测法和光学仪器间接观测法难以实现大范围、连续的LAI获取,而遥感技术能够有效弥补这一缺陷。遥感反演方法可以分为物理模型法和统计模型法^[47]。物理模型主要是利用多种参数结合物理机理进行反演估测。罗洪斌等^[48]利用机载激光LiDAR点云数据的平均扫描角、间隙率和消光系数等参数计算得到橡胶林的LAI,并与实测数据对比,结果表明二者高度相关(相关系数 $r=0.82$),估测结果较为准确。

统计模型方法主要是利用遥感数据的光谱和植被指数信息为自变量、实测LAI为因变量建立统计模型。王强等^[49]基于机载LiDAR数据提取特征信息与景洪市橡胶林的LAI实测数据建立支持向量机、BP神经网络和偏最小二乘法的反演模型,结果表明支持向量机模型最优,而结合Landsat8数据进行大区域外推时BP神经网络模型精度较高。戴声佩等^[46]以海南省的橡胶林为研究区,利用Landsat8影像的8种植被指数分别与实测数据进行3种方法建模,结果表明基于EVI的一元线性模型最优,可能由于EVI与橡胶林LAI相关性最强。Keawplang等^[50]利用EO-1 Hyperion高光谱影像的4种植被指数建立偏最小二乘模型,成功估测泰国橡胶林LAI,表明高光谱数据在LAI反演中的巨大潜力。Chen等^[51]利用HJ-1A/1B CCD影像、Landsat影像和MODIS数据的时间和空间分辨率的优势,采用非线性自回归网格外生输入模型预测了海南岛橡胶林的时空LAI,精度 R^2 为0.88, RMSE为0.24。总体而言,利用遥感技术对橡胶林LAI的反演物理模型法建模难度大,参数设置要求高,受限条件多,应用较少;而统计模型法设置较为简单,应用较多。

3 基于遥感的橡胶林自然灾害监测

及时掌握病虫害动态对生产管理至关重要,遥感技术主要是依据病虫害前后橡胶林叶片颜色、密度和形态等的变化所导致的光谱信息差异来监测橡胶林病虫害^[52]。Pradeep等^[53]利用橡胶树落叶病发病特征,通过遥感数据获取LAI的变化来监测季风性落叶病。Ranganath等^[54]依

据橡胶树炭疽病导致幼叶和芽有深褐色斑点且周围有黄色晕圈,与正常的橡胶树光谱信息不同来监测橡胶树的炭疽病害,对健康、感染、严重感染阶段的光谱信息和植被指数进行分析,发现染病的橡胶林在红光中反射率最高,在近红外中反射率最低,健康橡胶林的NDVI值大于患病橡胶林。Ali等^[55]通过手持辐射计和无人机测定白粉病前后叶片光谱变化,结果显示健康叶子在近红外区域反射能量多于红光,而患白粉病的叶子则是红光反射能量高于近红外,且健康的橡胶林NDVI值较稳定(为0.77),患白粉病的橡胶树NDVI值不稳定且均值为0.20。Zeng等^[56]利用无人机影像,通过光谱、植被指数、纹理及颜色特征构建模型,实现对橡胶树白粉病无症状、健康、早期、中期和严重阶段的精准识别,SVM模型表现最佳,且对早期白粉病识别率最高。此外,Zeng等^[57]还研究了3.4、7、14、30 cm等不同分辨率的无人机遥感数据对白粉病的识别效果,结果表明无人机分辨率越高,其识别准确度越高。

台风、寒害等都是对橡胶树破坏性极大的自然灾害,遥感主要是利用风暴登录前后橡胶林状态差异来判断受损区域和损失程度。张明洁等^[58]利用FY-3A数据通过比较NDVI变化值及其标准方差对海南橡胶林的台风损失等级进行评估,结果与实际调查结果趋势一致。陈帮乾等^[4]则结合Landsat和Sentinel-2时序影像,指出灾害前后60 d内EVI、LSWI和短波红外(Shortwave Infrared, SWIR2)变化最为显著,适用于风灾估测。应用遥感技术可及时、准确地评估橡胶林风害损失,为制定合理的救灾措施提供科学依据。此外,在寒害监测方面,高书鹏^[59]基于Landsat和MODIS数据,依据植被指数扰动特征对云南近20 a橡胶林寒害频次进行研究,发现河口地区寒害频发,而西双版纳最少。

4 展望

遥感技术不仅能够大区域、全方位、多角度连续动态地监测橡胶林状态,还能分析追溯近40 a的历史遥感影像,从而对橡胶林的生长全过程持

续监测。在橡胶林的遥感监测应用中,随着数据源的不断丰富,遥感技术经历了从单一Landsat系列卫星数据到多平台、多传感器数据的演进;遥感特征由单纯的光谱信息、植被指数拓展至纹理特征、物候特征等多角度信息;算法模型也从传统的参数模型发展到机器学习和深度学习等智能模型;监测应用则从最初的分布信息提取深入到林龄估算、AGB估测、LAI反演、病虫害监测等精细化生产管理领域。尽管遥感技术在橡胶林监测中的应用不断拓展和深化,但仍面临诸多挑战,包括数据源获取处理、算法优化及应用深化等方面。

1)数据源方面:橡胶树主要生长在热带地区,受常年多雨和云层覆盖影响,光学影像获取易受到干扰而无法获取完整的遥感数据。而微波遥感不受天气条件限制,具备全天时、全天候监测能力,因此,在橡胶林监测中应充分融合光学遥感与微波遥感的优势,提高数据的可获取性和完整性。此外,品种、割龄、种植地区等因素会导致相同树龄橡胶树的形态、养分、性状等方面差异较明显,物候特征变异性高,因此有必要提高遥感数据混合像元的分解精度,综合高空间分辨率和高时间分辨率的优势。

2)算法模型方面:遥感技术在橡胶林监测中主要应用于分类和估测等任务,在进一步提升监测精度上具有很大的潜力。因此,使用更先进、更稳定和普适性强的算法模型,并结合橡胶林独特的生长机理,将机理模型与遥感数据相结合有助于提高橡胶林监测的准确度。此外,随着遥感数据源的丰富,与橡胶林相关的遥感特征也逐渐丰富,但信息冗余和维度灾难的问题随之而来,从海量特征中筛选最优特征组合至关重要。因此,引入和完善特征优选模型,不仅能有效降低数据维度,还能提升监测效率和计算稳定性。

3)应用方面:遥感技术在橡胶林的识别、变化监测方面已取得一定的进展,但在橡胶林AGB估算、病虫害监测、LAI估测等方面的研究应用还未深入。随着橡胶林制图研究的不断深入,目前已经能绘制更精确、更详细的橡胶林区位分布图,也为病虫害防治、AGB估测等研究奠定了基

础。进一步深入 AGB 估测、LAI 估测和病虫害监测等方面的综合应用,精细刻画橡胶林生长过程,构建预测与预警机制,对提高橡胶生产管理的智能化水平大有裨益。

参考文献:

- [1] 陈帮乾,谢贵水,王纪坤,等. 基于多元回归与人工神经网络的橡胶园树龄遥感反演研究[J]. 热带作物学报,2012,33(1):182-188.
- [2] 庄家煜,包维嘉,苏武峥. 农业遥感应用现状与展望[J]. 农业展望,2024,20(4):68-74.
- [3] 包栎炀,王祥军,李少达,等. 基于无人机LiDAR的橡胶树单木地上生物量估测[J]. 热带作物学报,2023,44(6):1266-1275.
- [4] 陈帮乾,云挺,安锋,等. 基于Landsat和Sentinel-2时间序列影像的海南西部橡胶林龙卷风灾情评估[J]. 遥感学报,2021,25(3):816-829.
- [5] 罗洪斌,舒清态,王强,等. 多源遥感数据协同的景洪橡胶林叶面积指数光饱和特征研究[J]. 西南林业大学学报,2019,39(6):123-129.
- [6] 陈小敏,陈汇林,李伟光,等. 海南岛天然橡胶林春季物候期的遥感监测[J]. 中国农业气象,2016,37(1):111-116.
- [7] 丁竹嫻,周立军,樊江川,等. 基于深度学习与激光点云的橡胶林枝干重建及参数反演[J]. 农业工程学报,2022,38(8):187-199.
- [8] 张佳琦,薛达元. 西双版纳橡胶林种植的生态环境影响研究[J]. 中国人口·资源与环境,2013,23(增刊2):304-307.
- [9] 苗苗,岳彩荣. 橡胶林信息提取技术研究综述[J]. 林业调查规划,2017,42(1):11-15,20.
- [10] SURATMAN MN. Applicability of Landsat TM data for inventorying and monitoring of rubber (*Hevea brasiliensis*) plantations in Selangor, Malaysia: Linkages to policies [D]. Vancouver, Canada: University of British Columbia, 2003.
- [11] SURATMAN MN, LEMAY V, BULL G. Logistic regression modelling of thematic mapper data for rubber (*Hevea brasiliensis*) area mapping[J]. Science Letters, 2005, 2:79-85.
- [12] 李亚飞,刘高焕,黄翀. 基于HJ-1CCD数据的西双版纳地区橡胶林分布特征[J]. 中国科学(信息科学),2011(增刊1):166-176.
- [13] LI Z, FOX J. Mapping rubber tree growth in mainland Southeast Asia using time-series MODIS 250 m NDVI and statistical data[J]. Applied geography, 2012, 32(2):420-432.
- [14] DONG J, XIAO X, CHEN B, et al. Mapping deciduous rubber plantations through integration of PALSAR and multi-temporal Landsat imagery[J]. Remote sensing of environment, 2013, 134:392-402.
- [15] 高书鹏,史正涛,刘晓龙,等. 基于高时空分辨率可见光遥感数据的热带山地橡胶林识别[J]. 遥感技术与应用,2018,33(6):1122-1131.
- [16] 黄翀,张晨晨,刘庆生,等. 结合光学与雷达影像多特征的热带典型人工林树种精细识别[J]. 林业科学,2021,57(7):80-91.
- [17] ZHANG C, HUANG C, LI H, et al. Effect of textural features in remote sensed data on rubber plantation extraction at different levels of spatial resolution[J]. Forests, 2020, 11(4):399.
- [18] 李怀霄. 基于面向对象的西双版纳橡胶林提取[J]. 江西农业学报,2014(8):96-100.
- [19] DAI SP, LUO HX, FANG JH, et al. Object-oriented classification of rubber plantations from Landsat satellite imagery[C]//In Proceedings of the 2014 3rd International Conference on Agro-Geoinformatics, Beijing, 2014.
- [20] 梁守真,陈劲松,吴炳方,等. 应用面向对象的决策树模型提取橡胶林信息[J]. 遥感学报,2015,19(3):485-494.
- [21] 刘怡媛,肖池伟,李鹏,等. 基于CR_(NBR)物候算法的西双版纳橡胶成林提取及时空变化研究[J]. 地球信息科学学报,2019,21(3):467-474.
- [22] CHEN G, LIU Z, WEN Q, et al. Identification of Rubber Plantations in Southwestern China Based on Multi-Source Remote Sensing Data and Phenology Windows[J]. Remote sensing (Basel, Switzerland), 2023, 15(5):1228.
- [23] 李贺,何志杰,黄翀,等. 2000—2019年缅甸南部橡胶林时空演变[J]. 资源科学,2021,43(12):2403-2415.
- [24] 翟佳豪. 基于Sentinel-2影像的中老缅边境地区橡胶林动态监测及其时空特征研究[D]. 南昌:江西师范大学,2023.
- [25] 何志杰. 基于遥感数据的缅甸孟邦橡胶林变化检测[D]. 北京:中国地质大学(北京),2021.
- [26] 廖谔姘,李鹏,封志明,等. 西双版纳橡胶林面积遥感监测和时空变化[J]. 农业工程学报,2014,30(22):170-180.
- [27] XIAO C, LI P, FENG Z. Monitoring annual dynamics of mature rubber plantations in Xishuangbanna during 1987-2018 using Landsat time series data: A multiple nor-

- malization approach[J]. International journal of applied earth observation and geoinformation, 2019, 77: 30-41.
- [28] ZHAI J, XIAO C, LIU X, et al. Analysis of 10-m Sentinel-2 imagery and a re-normalization approach reveals a declining trend in the latest rubber plantations in Xishuangbanna[J]. Advances in space research, 2024, 73 (12): 5910-5924.
- [29] 寇卫利. 基于多源遥感的橡胶林时空演变研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- [30] 李广洋, 寇卫利, 陈帮乾, 等. 近30年海南岛橡胶林时空变化分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(1): 189-198.
- [31] 李阳阳, 张军, 刘陈立, 等. 老挝北部5省橡胶林提取及时空扩张研究[J]. 林业科学研究, 2017, 30(5): 709-717.
- [32] CHEN B, CAO J, WANG J, et al. Estimation of rubber stand age in typhoon and chilling injury afflicted area with Landsat TM data: a case study in Hainan Island, China [J]. Forest ecology and management, 2012, 274: 222-230.
- [33] KAEWPLANG S, SRIHANU N. An evaluation of eo-1 hyperion data for estimating age of rubber plantation[J]. Engineering Access, 2017, 3(2): 5-9.
- [34] CHEN G, THILL J, Anantsuksomsri S, et al. Stand age estimation of rubber (*Hevea brasiliensis*) plantations using an integrated pixel- and object-based tree growth model and annual Landsat time series[J]. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 2018, 144: 94-104.
- [35] 刘晓娜, 封志明, 姜鲁光, 等. 西双版纳橡胶林地的遥感识别与数字制图[J]. 资源科学, 2012, 34(9): 1769-1780.
- [36] KOEDSIN W, HUETE A. Mapping rubber tree stand age using pléiades satellite imagery: a case study in Thalang district, Phuket, Thailand[J]. Engineering Journal, 2015, 19: 45-56.
- [37] SOMCHING N, WONGSAI S, WONGSAI N, et al. Using machine learning algorithm and landsat time series to identify establishment year of para rubber plantations: a case study in Thalang district, Phuket Island, Thailand [J]. International journal of remote sensing, 2020, 41 (23): 9075-9100.
- [38] BECKSCHÄFER P. Obtaining rubber plantation age information from very dense Landsat TM & ETM+ time series data and pixel-based image compositing[J]. Remote sensing of environment, 2017, 196: 89-100.
- [39] CHEN B, XIAO X, WU Z, et al. Identifying establishment year and pre-conversion land cover of rubber plantations on Hainan Island, China using Landsat data during 1987—2015[J]. Remote Sensing, 2018, 10(8): 1240.
- [40] 徐万荣, 马友鑫, 李红梅, 等. 西双版纳地区橡胶林生物量的遥感估算[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2011(增刊1): 317-323.
- [41] YASEN K, KOEDSIN W. Estimating aboveground biomass of rubber tree using remote sensing in Phuket province, Thailand[J]. Journal of Medical and Bioengineering, 2015, 4(6): 451-456.
- [42] 罗洪斌, 舒清态, 王强, 等. 运用机载激光雷达和陆地卫星数据对橡胶林地上生物量的估测[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(7): 56-61.
- [43] FU Y, TAN H, KOU W, et al. Estimation of rubber plantation biomass based on variable optimization from sentinel-2 remote sensing imagery[J]. Forests, 2024, 15(6): 900.
- [44] CHEN B, TING Y, JUN M, et al. High-precision stand age data facilitate the estimation of rubber plantation biomass: a case study of Hainan Island, China[J]. Remote Sensing, 12(23): 3853.
- [45] LI X, WANG X, GAO Y, et al. Comparison of different important predictors and models for estimating large-scale biomass of rubber plantations in Hainan Island, China [J]. remote Sensing, 2023, 15(3): 3447.
- [46] 戴声佩, 罗红霞, 郑倩, 等. 海南岛橡胶林叶面积指数遥感估算模型比较研究[J]. 智慧农业(中英文), 2021, 3(2): 45-54.
- [47] 柳艺博, 居为民, 朱高龙, 等. 内蒙古不同类型草地叶面积指数遥感估算[J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5159-5170.
- [48] 罗洪斌, 舒清态, 王强, 等. 多源遥感数据结合的橡胶林有效叶面积指数升尺度估测[J]. 江西农业大学学报, 2020, 42(2): 349-357.
- [49] 王强, 舒清态, 罗洪斌, 等. 基于机载LiDAR和光学遥感数据的热带橡胶林叶面积指数反演[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(4): 132-139.
- [50] KAEWPLANG S, VAIPHASA C. An evaluation of eo-1 hyperion data to estimating leaf area index of rubber plantations[J]. International Journal of Geoinformatics, 2014, 10(3): 13-21.
- [51] CHEN B, WU Z, WANG J, et al. Spatio-temporal prediction of leaf area index of rubber plantation using HJ-1A/1B CCD images and recurrent neural network[J]. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 2015, 102: 148-160.
- [52] 蒋雪松, 戎子凡, 黄林峰, 等. 现代化技术在森林病虫

- 害监测与预警中的研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2024, 27(1): 1-16.
- [53] PRADEEP B, METI S, JAMES J. Satellite based remote sensing technique as a tool for real time monitoring of leaf retention in natural rubber plantations affected by abnormal leaf fall disease[J]. The International Archives Of The Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2014, XL-8(8): 885-889.
- [54] RANGANATH BK, PRADEEP N, MANJULA VB, et al. Detection of diseased rubber plantations using satellite remote sensing[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2004, 32(1): 49-58.
- [55] ALI HM, RASIB AW, ABD HAMID NR, et al. Determination of rubber-tree clones leaf diseases spectral using Unmanned Aerial Vehicle compact sensor[J]. IOP conference series. Earth and environmental science, 2018, 169(1): 12059.
- [56] ZENG T, ZHANG H, LI Y, et al. Monitoring the severity of rubber tree infected with powdery mildew based on UAV multispectral remote sensing[J]. Forests, 2023, 14(4): 717.
- [57] ZENG T, FANG J, YIN C, et al. Recognition of rubber tree powdery mildew based on UAV remote sensing with different spatial resolutions[J]. Drones (Basel), 2023, 7(8): 533.
- [58] 张明洁, 张京红, 刘少军, 等. 基于FY-3A的海南岛橡胶林台风灾害遥感监测——以“纳沙”台风为例[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(3): 86-92.
- [59] 高书鹏. 集成多源遥感数据的云南橡胶林识别及寒害监测研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2022.