

# 基于 Sentinel-1 时序谐波残差分析的八角林病虫害遥感识别研究

刘源澄<sup>1</sup>, 陆月凤<sup>1</sup>, 陈继勇<sup>1</sup>, 易家勇<sup>1</sup>, 李军集<sup>2,3\*</sup>

(1. 广西壮族自治区国有六万林场, 广西玉林 537025; 2. 广西林业实验室/广西壮族自治区林业科学研究院/广西特色经济林培育与利用重点实验室/广西木本香料工程技术研究中心, 南宁 530002;

3. 中国地质大学(北京)信息工程学院, 北京 100083)

**[摘要]** 光学卫星遥感常因云层和气候的干扰而难以实现对八角林病虫害的有效监测, 该研究旨在探索一种基于雷达遥感数据的高效、自动化病虫害识别方法, 为八角病虫害的监测与防控提供新的技术路径。以广西六万林场森林公园作为研究区, 首先利用 2023—2024 年的 Sentinel-1 数据, 提取可反映八角病虫害的 VV、VH 及 VV/VH 极化特征; 然后采用时间序列谐波分析(HANTS), 识别不同程度的病虫害区域以及其时空动态。研究结果显示, VV/VH 极化比值的识别效果优于单一极化通道, 识别精度更高, 有效提升了病虫害信息的提取准确性。该方法能够较为准确区分不同程度的病虫害区域, 表现出稳定的识别能力, 可为其他多云雨地区经济林病虫害的遥感识别与防控提供技术思路和方法支持。

**[关键词]** 八角; 病虫害; 遥感识别; Sentinel-1 数据; 时间序列谐波分析法; 极化方式

中图分类号: S127 文献标识码: A 文章编号: 1672-450X(2026)02-0022-08

## Remote Sensing Identification of Anise Pests and Diseases Based on Sentinel-1 Time-Series Harmonic Residual Analysis

LIU Yuancheng<sup>1</sup>, LU Yuefeng<sup>1</sup>, CHEN Jiyong<sup>1</sup>, YI Jiayong<sup>1</sup>, LI Junji<sup>2,3\*</sup>

1. Guangxi State-owned Liuwan Forest Farm, Yulin 537025, China;

2. Guangxi Laboratory of Forestry, Guangxi Forestry Research Institute, Guangxi Key Laboratory of Special Non-wood Forests Cultivation and Utilization, Guangxi Xylophyta Spices Research Center of Engineering Technology, Nanning 530002, China;

3. School of Information Engineering, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

**Abstract:** Optical satellite remote sensing is frequently limited by cloud cover and climatic conditions, making it difficult to effectively monitor pests and diseases in star anise. This study aims to explore an efficient, automated pest and disease identification method based on radar remote sensing data, providing a novel technical pathway for the monitoring and controlling pests and diseases in star anise. The Liuwan Forest Park in Guangxi was selected as the study area. First, Sentinel-1 data from 2023 to 2024 were utilised to extract VV, VH, and VV/VH polarisation features indicative of pests and diseases in star anise. Subsequently, Harmonic Analysis of Time Series (HANTS) was employed to identify areas affected by varying degrees of infestation and analyze their spatio-temporal dynamics. The Results demonstrated that the VV/VH polarisation ratio outperformed single-polarisation channels in identification accuracy, significantly enhancing the precision of pest and disease information extraction. This method reliably distinguished areas affected by varying degrees of infestation, exhibiting stable recognition capabilities. It offers a viable technical framework and methodological support for remote sensing-based identification and control of pests and diseases in economic forests across other regions frequently af-

收稿日期: 2025-11-14

基金项目: 广西自筹经费林业科技项目(2023GXZCLK20); 广西自筹经费林业科技项目(2023GXZCLK30);

广西创新驱动发展专项资金项目(桂科AA24263019-2)

作者简介: 刘源澄(1981—), 男, 高级工程师, 研究方向为病虫害监测与防控策略研究。E-mail: 783661935@qq.com

\*通信作者: 李军集(1980—), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为森林资源监测与开发利用研究。E-mail: 75113232@qq.com

ected by clouds and rainfall.

**Key words:** anise; pests and diseases; remote sensing recognition; Sentinel-1 data; time series harmonic analysis; polarization mode

八角作为广西极为重要的经济作物之一,其种植面积和产量均占全球总量的85%以上,在当地农业经济体系乃至全国及全球范围内均展现出无可替代的显著优势<sup>[1-3]</sup>。八角生长过程中极易遭受各类病虫害的侵袭,这些病虫害会严重阻碍八角植株的正常生长,使得其根系发育、枝干延展和叶片生长受到重创,进而影响八角的产量和品质<sup>[4-5]</sup>。因此,构建一种高效、客观、时效性强的八角病虫害识别与监测方法对于保障八角产业的可持续发展和推动区域林业高质量发展具有重要的科学意义与现实价值。

近年来,卫星遥感技术快速发展,在农林领域已拓展至经济林病虫害动态监测、作物/植被类型精细分类、特色经济林产量估算等多元化实际应用<sup>[6-9]</sup>。遥感技术能够快速且精准地锁定病虫害的发生位置与范围,突破传统人工监测耗时费力、效率低下的局限,在短时间内覆盖广袤的种植区域,及时捕捉病虫害的动态变化,实现对种植情况的宏观、及时且准确的监测。这不仅为后续制定科学有效的防治策略赢得了宝贵时间,对产业的高质量发展也具有重要意义<sup>[10-12]</sup>。传统光学遥感技术在病虫害监测中主要依赖植被光谱特征的变化<sup>[10-11]</sup>。八角植株遭受病虫害侵袭后,叶片颜色会从翠绿逐渐变成褐色,冠层结构呈现出稀疏、破损等状况,同时水分含量下降<sup>[13]</sup>,这些变化在光学遥感影像上表现为光谱反射特性的改变。然而,广西全年多云雨,可见光波段难以穿透云层,导致数据缺失而光学特征受限。这种数据滞后性和较低的数据质量,严重削弱了八角林病虫害监测的时效性和准确性。微波遥感技术凭借其穿云透雾的独特优势,能可靠获取地面信息<sup>[14]</sup>,在多云雨地区展现出巨大的应用潜力,有望全面且精准地提取八角病虫害区域,从而助力八角林病虫害的动态监测。

目前,关于 Sentinel-1 数据在农业和森林资源探索方面的研究成果已颇为丰富,可通过不同的

极化方式组合及相应的指数反映农作物或植被的生长状况,进而实现高时间精度的遥感监测<sup>[15-16]</sup>。但该数据仍存在较大的噪声、数据缺失及异常值等问题,一定程度上影响了监测结果的准确性和可靠性。为了更好地利用 Sentinel-1 数据,提高其在农业和森林资源监测中的应用价值,引入时间序列谐波分析法(HANTS)的时序残差分析成为一种可能的解决途径。HANTS 基于傅里叶变换原理,将时间序列分解为多个谐波成分,能够对 Sentinel-1 数据进行平滑重构和异常值校正<sup>[17]</sup>。在处理 Sentinel-1 数据时,HANTS 可以有效剔除高频噪声和异常波动,保留反映农作物或植被生长季节性和长期趋势的低频成分,减少由云遮挡、传感器误差等因素引入的噪声影响,在数据缺失或异常时实现平滑过渡,使得数据更能真实地反映农作物或植被的生长状况。

传统病虫害监测大多属于二分类(健康/病虫害),针对八角病虫害的发生程度尚未有量化评估,本研究旨在探索构建一种适用于多云雨地区的八角林病虫害遥感监测新方法,为八角产业病虫害的科学监测、早期预警和精准防控提供技术支撑与数据基础。研究主要的创新点在于:1)技术路径上,融合 Sentinel-1 雷达数据的全天候优势与 HANTS 时序分析的去噪能力,形成一套克服光学数据缺失问题的、完整的技术流程;2)应用目标上,首次将上述技术体系应用于八角这一特定经济作物的病虫害程度动态监测,突破了传统二分类监测的局限;3)方法适配上,针对八角物候特征及南方林区环境,对 HANTS 核心参数进行优化,并提出基于残差异常频次的病虫害程度量化分级模型,实现监测结果与防治实践的更有效衔接。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

六万林场森林公园位于玉林市福绵区、博白

县、兴业县与钦州市浦北县的交界地带。该区域属亚热带季风气候,年均气温 21.5 ℃,气候温和,雨量充沛,年降水量达 1 650 mm 以上,相对湿度

介于 45% ~ 65%;海拔高度在 400 ~ 1 000 m,土壤主要为黄壤和红壤,具备适宜八角生长的天然地理条件<sup>[18]</sup>。研究区的位置及概况如图 1 所示。

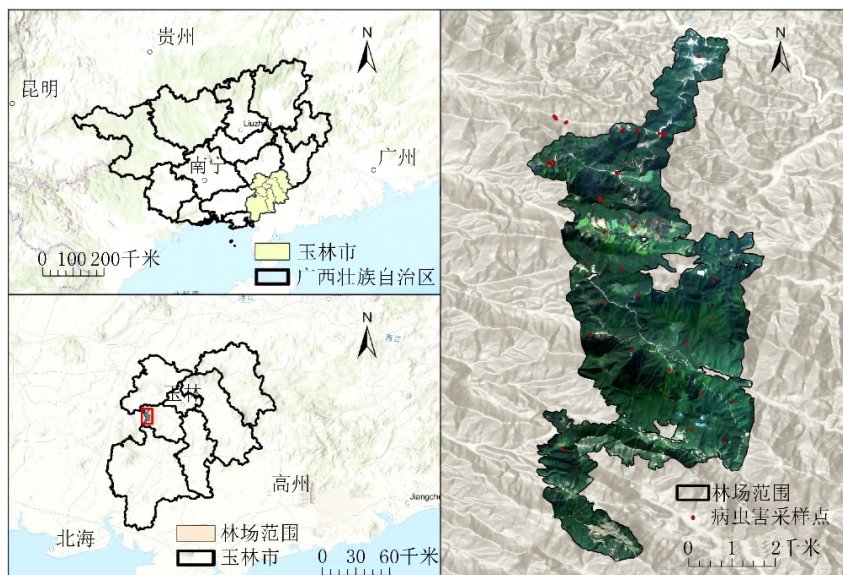


图 1 研究区概况

## 1.2 数据来源

采用的 Sentinel-1 微波遥感数据来源于欧洲航天局 (ESA),属于合成孔径雷达 (SAR) 地面分辨率数据集 (GRD),因具备全天候成像能力,成为开展植被监测与地表变化研究的理想数据。在多云雨的气象条件下,此数据集可保障时序计算的连续可用性<sup>[19-20]</sup>。研究选取了 2023—2024 年的 48 景影像,每景影像均覆盖研究区。

基于谷歌地球引擎 (GEE) 平台对 VV 和 VH 极化通道进行边界噪声修正、散斑滤波以及辐射地形归一化预处理<sup>[21]</sup>,并去除研究区内的水源与建筑区域,获取八角种植区,然后计算后向散射系数 ( $\sigma^{\circ}$ )。

## 1.3 研究方法

首先选取 GEE 平台上的 Sentinel-1GRD 数据建立时序数据集。由于病虫害侵袭会导致八角树冠层结构破坏、叶片含水量下降及表面粗糙度改变,这些变化在 SAR 信号中表现为后向散射系数的系统性偏移,为此研究对 VV 极化和 VH 极化数据进行数据预处理,获取其后向散射系数  $\sigma^{\circ}$ -VV 和  $\sigma^{\circ}$ -VH,并计算了 VV/VH 比值,生成密集

的时间序列影像集合。然后,利用 HANTS 谐波分析进行密集时间序列的拟合重构。通过计算其中的时序特征来体现作物的生长情况。

### 1.3.1 HANTS 谐波分析

时间序列谐波分析法 (Harmonic Analysis of Time Series, HANTS) 以傅里叶变换原理为基石,通过把时间序列拆解为多个谐波成分,达成对数据的平滑重构以及异常值校正,被广泛应用于重构归一化植被指数 (NDVI)、地表温度 (LST) 等呈现出显著周期性变化的遥感数据<sup>[22-24]</sup>。其核心思想在于剔除高频噪声及异常波动,保留反映季节性和长期趋势的低频成分。该方法能有效抑制由云遮挡、传感器误差等因素引起的噪声<sup>[25]</sup>干扰,通过数据平滑处理,弥补数据缺失或异常情况,从而为后续的数据分析和研究提供更加可靠且稳定的数据基础<sup>[26]</sup>。具体计算如公式 (1) 所示:

$$y(t) = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \cos(\omega_i t - \theta_i) \quad (1)$$

式中:  $y(t)$  是时间序列的拟合值;  $a_0$  是时间序列的平均值;  $N$  是谐波的数量;  $a_i$  是第  $i$  个谐波的振幅,反映该谐波对时序变化的贡献强度;  $\omega_i$  是第  $i$

个谐波的角频率;  $\theta_i$  是第  $i$  个谐波的相位, 决定了谐波波形在时间轴上的位置, 刻画植被生长的周期性模式。

为能够保留反应八角植株生长与病虫害胁迫的低频趋势与季节性信号, 同时有效抑制由云、传感器等引起的高频噪声, 经过实验优化, 拟合时设置谐波数量  $N=3$ , 以捕捉年度、半年以及季度变化;  $\omega$  设置为年度频率, 取值为  $2\pi/T$ ,  $T=365$  天。此外, 算法迭代中的用以控制拟合收敛速度的阻尼因子设为 0.5, 拟合容差(可接受的数据点与拟合曲线的最大偏差阈值)设为 0.05。

谐波拟合序列可以反映植被生长的物候信息<sup>[27]</sup>。病虫害对八角植株的侵染会引发多方面的物理变化, 这些变化可通过 Sentinel-1 双极化

SAR 信号进行有效探测。其中, VV 极化对垂直结构变化和表面散射敏感, 病虫害引起的叶片大量脱落会减少垂直方向的散射体, 导致 VV 后向散射系数下降; VH 极化对体散射与多次散射更敏感, 病虫害引起的冠层内部结构破坏(如叶片排列紊乱、虫洞增多)会增强体散射, 可能导致 VH 后向散射短期上升, 但随着植被退化加剧, VH 信号最终会下降; VV/VH 比值可有效放大冠层结构变化信息, 从而增强病虫害识别的特征可分性。通过比较拟合值序列和原始 SAR 时间序列计算出残差, 可以有效捕捉时序中的异常值, 在多次出现残差异常值的像元中判定病虫害侵染情况。对于 2023—2024 年 Sentinel-1 遥感影像进行谐波拟合, 如图 2 所示。

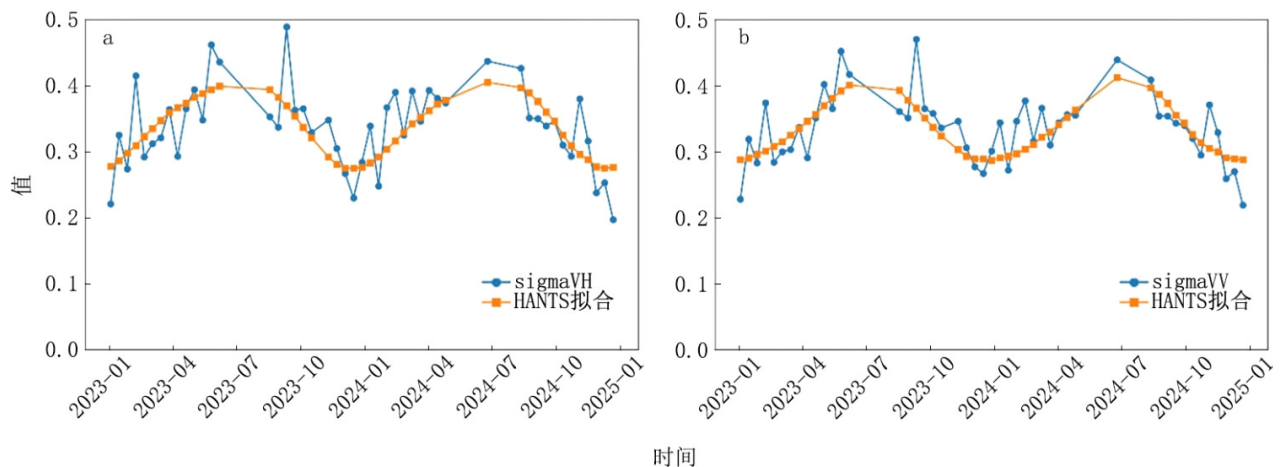


图 2 Sentinel-1 时序与 HANTS 拟合

### 1.3.2 病虫害残差分析

本次研究选定 Sentinel-1 影像 VV 和 VH 序列以及比值 VV/VH 序列进行谐波分析。通过计算每一像元原始值与谐波拟合值的残差, 对残差序列进行 z-score 标准化处理, 见公式(2), 增强数据可比性, 并以  $|z|$  作为衡量病虫害的指标。

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (2)$$

式(2)中,  $x$  为原始像元值,  $\mu$  是残差序列数据的均值,  $\sigma$  是残差数据的标准差。

由于地形起伏、传感器噪声以及极端气象事件导致的临时性冠层变化等因素会导致 SAR 后向散射信号在时序特征上存在短暂、孤立和非持

续性的异常值, 与病虫害引起的系统性、持续性冠层结构变化存在差异。基于此, 结合研究区历史 Sentinel-1 数据分布特征, 设定  $|z| > 3$  作为噪声剔除阈值, 以有效区分由非病虫害因素引起的异常波动。此外, 当  $3 > |z| > 2$  时, 残差满足在正常范围内但超出周期生长范围, 判定该像元为发生病虫害异常扰动。

八角炭疽病、尺蠖、象甲等常见八角病虫害具有间歇性爆发与季节性迁移的特征, 其侵染过程常表现为多次、间断性的冠层结构扰动, 在 SAR 时序上呈现为周期性或偶发性的后向散射异常。因此, 本研究中病虫害程度判定采用“病虫

害发生次数”作为依据(表1)。病虫害发生次数基于时序残差异常脉冲的频次统计,本质上捕捉了病虫害发生对冠层结构的持续性影响累积效应。对所有像元进行 HANTS 拟合并计算其残差。针对 2023—2024 年时间段,逐像元统计发生病虫害异常的次数作为全时段内病虫害程度的指标。

表 1 病虫害严重程度判定原则

病虫害发生次数	病虫害严重程度
0~1	无病虫害
2~3	少量病虫害
>3	严重病虫害

## 2 结果与分析

### 2.1 精度验证

为了评估基于 Sentinel-1 时序谐波残差分析的八角病虫害遥感识别方法的准确性,本研究采用对比研究区内部实际病虫害情况与遥感识别

结果的方式进行精度验证。从研究区域内随机选取 285 个涵盖无病虫害、少量病虫害和严重病虫害区域的样本点,病虫害种类包括常见的八角炭疽病、八角烟煤病、八角象甲、八角尺蠖、八角金花虫等。对其实际病虫害情况和通过该方法得到的遥感识别结果进行对比,研究区内部实际病虫害情况分布如图 3 所示,图 a 为病虫害采样点分布及对应的病虫害程度,图 b、c、d 分别为健康林无病虫害情况、少量病虫害和严重病虫害情况的实地照片。

从表 2 中结果精度可知,在不同极化方式及组合(VV、VH、VV/VH)下,无病虫害、少量病虫害和严重病虫害区域的 UA(用户精度)、PA(生产者精度)和 F1 值均表现良好,各指标精度数值集中在 0.75~0.91,表明该方法可以完成对病虫害区域的识别。整体上,该方法对不同病虫害程度区域的识别均有较高的精度,但各精度指标在不同病虫害程度和极化方式下仍存在差异。

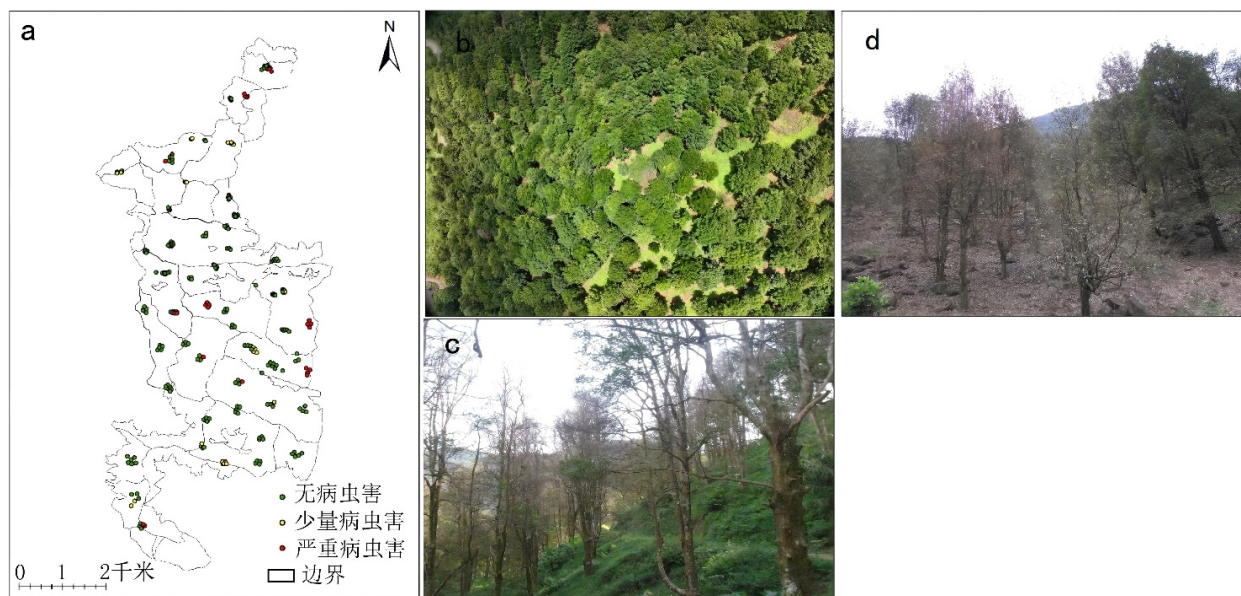


图 3 病虫害采样点分布及实地情况

表 2 结果精度验证

项目	VV			VH			VV/VH		
	UA	PA	F1	UA	PA	F1	UA	PA	F1
无病虫害	0.85	0.83	0.84	0.84	0.82	0.83	0.91	0.88	0.89
少量病虫害	0.78	0.76	0.77	0.77	0.75	0.76	0.85	0.83	0.84
严重病虫害	0.82	0.79	0.81	0.81	0.78	0.79	0.88	0.86	0.87

## 2.2 病虫害情况分析

采用上述方法对六万林场进行计算分析得出

结果如图4所示,图4a为VV极化结果,b为VH极化结果,c为VV/VH结果。

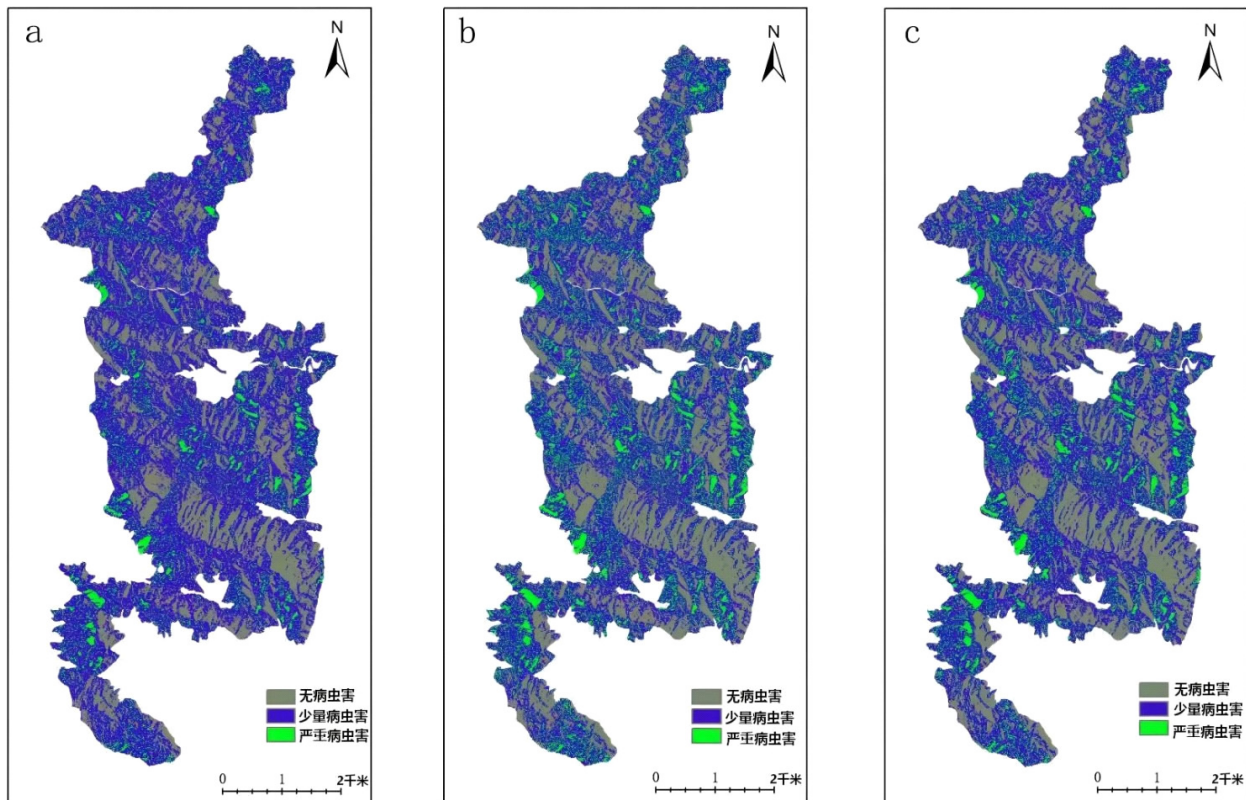


图4 六万林场病虫害遥感监测结果图

通过对 Sentinel-1 时序谐波拟合残差分析得出的六万林场 2023—2024 期间病虫害情况可知,在不同极化分类方式下,少量病虫害区域的像元数量占比最大,表明研究区域内大部分地区在 2023—2024 年受到病虫害侵害,但由于人为管控等,并未造成大范围损害,仅在短期内发生。严重病虫害发生范围相对较小且分布零散,主要集中在研究区的中部与东部,具体位于博白县交界的低山缓坡地带。该区域属于六万大山外围破碎的丘陵地形,山峦起伏、坡度较陡,部分地块沿河谷分布,一方面人工施药、修剪等管护措施难以高效开展,病虫害初期易错失防控时机;另一方面,亚热带季风气候带来的雨季降水在此形成局部高湿环境,搭配八角林较高的冠层郁闭度,为炭疽病、烟煤病的孢子萌发与传播提供了有利条件。同时,该区域枝干害虫(如八角象甲)的越冬基数较高,春季展叶期幼虫集中危害,且地形复杂导致害虫扩散后难以彻底清除,进一步加重

了危害程度。

## 3 结论

本研究基于 Sentinel-1 时序谐波残差分析构建了八角病虫害遥感识别方法,并在广西六万林场森林公园进行了实践验证,取得了一系列有价值的成果。

从研究结果来看,该方法在八角病虫害识别方面具备一定的可行性和有效性。通过对样本点的精度验证发现,不同极化方式及组合(VV、VH、VV/VH)在识别不同病虫害程度区域时均有一定表现。其中,VV/VH极化比值的各项精度指标在3种情况下均高于单一的VV和VH极化方式,这表明通过极化比值运算能够增强不同病虫害程度之间的特征差异,进而显著提高遥感识别的精度。VH极化整体精度略低于VV极化,但趋势类似,即无病虫害样本精度相对较高。这显示VV极化方式对不同病虫害程度的识别效果在一

定程度上优于VH极化方式,可能是因为VV极化更能捕捉到不同病虫害状态下八角植株的后向散射特征差异。通过极化比值运算,能够增强不同病虫害程度之间的特征差异,从而提高遥感识别的精度。VV极化下少量病虫害的精度低于严重病虫害,可能是因为轻度病虫害对植株的影响相对较小,导致其在遥感信号上的特征变化不如重度病虫害明显,增加了识别难度。在实际的病虫害监测中,利用以上特性可以更精准地定位病虫害区域,为后续防治工作提供有力支持。

在研究区域内,通过对Sentinel-1时序谐波拟合残差的分析可知,2023—2024年少量病虫害区域的像元数量占比最大,严重病虫害发生范围相对较小且分布零散,主要集中在研究区的中部与东部,且严重病虫害区域大多被少量病虫害区域所包围。这一结果为六万林场及类似区域的病虫害防治提供了重要的参考依据,相关部门可以根据病虫害的分布特点,有针对性地制定防治策略,优先对严重病虫害区域进行重点治理,同时加强对少量病虫害区域的监测和预防,防止病虫

害进一步扩散。

## 4 讨论

本研究提出的方法在八角林病虫害识别中展现出潜力,然而一个主要的局限性在于未能与现有光学遥感方法或其他SAR时序分析方法进行系统的定量对比。这主要是由于研究区长期多云覆盖,无法获得与SAR数据同期、高质量的光学影像序列以及在现有条件下构建对比算法存在技术障碍。因此,本研究结论目前主要体现为在特定气候条件下的可行技术路线的验证。通过系统地比较本研究方法与光学遥感、传统SAR阈值法以及机器学习分类方法在原理、数据依赖性、适用场景及输出结果等方面的差异,本研究方法在解决多云雨地区八角林病虫害动态监测问题上具有的独特优势和合理性(表3)。为弥补定量对比的不足,未来的工作将聚焦于:1)在晴空条件下,获取同步的光学与SAR数据,进行直接的精度与时效性对比;2)尝试与其他方法(如基于机器学习的SAR分类方法)对比,以进一步评估本方法的效能与效率。

表3 与不同病虫害遥感监测方法的比较

对比维度	传统光学遥感方法	SAR时序简单阈值法	机器学习分类方法	本研究方法
核心原理	基于病虫害引发的光谱反射率变化	基于后向散射系数绝对值的经验阈值	从数据中自动学习特征与分类边界	基于时序谐波模型,检测信号对生长基线的偏离(残差)
数据依赖性	依赖无云光学影像,在多云雨区可用性极低	依赖SAR数据,但易受噪声和瞬时干扰影响	需要大量标注样本,模型可解释性弱	依赖SAR时序,无需光学影像,对样本量要求较低
抗干扰能力	受天气、物候变化影响大	对斑点噪声、湿度变化敏感,虚警率高	依赖于训练样本的质量和代表性	通过HANTS有效抑制高频噪声,聚焦于与物候周期不符的异常
输出信息	通常为病虫害“有/无”二分类图	通常为瞬时异常检测图	可输出分类图,但分类逻辑不透明	输出病虫害程度图,反映动态累积过程
主要优势	机理直观,光谱特征丰富	计算简单,实时性强	能挖掘复杂、非线性模式	全天候工作,抑制噪声,结果具有明确的物候学解释性
主要局限	受天气制约严重	精度和稳定性不足	为“黑箱”模型,依赖大量标注数据	对持续性毁灭病害的时序模式捕捉有待优化

在精度验证环节,虽然本方法对不同病虫害程度区域的识别有一定效果,但各精度指标在不同病虫害程度和极化方式下存在差异。VV极化下少量病虫害的精度较低,这说明对于少量病虫害的识别还存在一定难度,可能是因为少量病虫害对植株的影响相对较小,在遥感信号上的特征变化不够明显。未来的研究可以着重优化对少

量病虫害的识别方法,探索更有效的特征提取和分析手段,以提高整体的识别精度。

此外,由于研究区的环境特殊性,本研究仅使用了Sentinel-1卫星数据,尽管微波遥感具有穿透雾的优势,但单一数据源可能无法全面反映八角病虫害的所有特征。在后续研究中,可以考虑融合多源遥感数据,如时序重建后的光学遥感数

据、高光谱遥感数据等,利用不同数据源的优势互补,获取更丰富的信息,进一步提升病虫害识别的准确性和可靠性。同时,研究中所采用的 HANTS 谐波分析方法虽然能够对数据进行平滑重构和异常值校正,但在面对复杂的生态环境和多变的病虫害情况时,参数选择和模型优化还有待进一步研究,以更好地适应不同的应用场景。

综上,本研究为八角林病虫害的遥感识别提供了新的思路和方法,具有一定的理论和实践价值,但在实际应用中仍需不断完善和优化,以满足八角产业病虫害监测和防治的实际需求,推动八角产业的高质量发展。

### 参考文献:

- [1] 陈嫚,黄智刚,蒲春燕. 广西八角产业发展综述[J]. 智慧农业导刊,2024,4(21):107-110.
- [2] 余兴华,杨艳梅,李玉祥,等. 云南八角林地土壤重金属含量特征及潜在风险评价[J]. 广东农业科学,2022,49(7):72-80.
- [3] 陈海云,陈少瑜,宁德鲁,等. 23个云南八角品种的指纹图谱构建[J]. 广东农业科学,2012,39(21):157-159.
- [4] LAI JL, BAI CH, PAN JM, et al. *Colletotrichum horii* and *Colletotrichum fiorinia* causing anthracnose on star anise (*Illicium verum*) in China[J]. Plant Disease, 2023, 107(10):3294.
- [5] 张梦茹,何宇豪,倪乐欢,等. 八角病虫害及其综合防治研究进展[J]. 热带农业科学,2024,44(10):155-161.
- [6] 邓继忠,刘其得,王长委,等. 基于多时相 Sentinel-2 卫星数据的农作物分类研究[J]. 广东农业科学,2020,47(4):129-138.
- [7] 王卫,李敬,陈晓远,等. 基于高分二号卫星影像的粤北地区香芋遥感识别研究[J]. 广东农业科学,2020,47(6):126-133.
- [8] 孙雪莲,舒清态,欧光龙,等. 基于随机森林回归的不同龄组思茅松人工林生物量遥感估测[J]. 广东农业科学,2015,42(15):148-153,193.
- [9] 李进,饶裕平. 遥感技术在森林生态系统中的应用概述[J]. 广东农业科学,2010,37(4):240-242.
- [10] 张凝,杨贵军,赵春江,等. 作物病虫害高光谱遥感进展与展望[J]. 遥感学报,2021,25(1):403-422.
- [11] 廖娟,陶婉琰,臧英,等. 农作物病虫害遥感监测关键技术研究进展与展望[J]. 农业机械学报,2023,54(11):1-19.
- [12] 丁鑫辉,徐乾斌,廖小飞. 林业病虫害的传播途径与防控策略研究[J]. 农业灾害研究,2023,13(8):47-49.
- [13] 阙衍超,王英. 八角的栽培技术及管理措施[J]. 农村科学实验,2022(23):174-176.
- [14] WOUDE SVD, REICHE J, STERCK F, et al. Sensitivity of Sentinel-1 backscatter to management-related disturbances in temperate forests[J]. Remote Sensing, 2024, 16(9):1553.
- [15] DEY S, BHOGAPURAPU N, HOMAYOUNI S, et al. Unsupervised classification of crop growth stages with scattering parameters from dual-pol Sentinel-1 SAR data[J]. Remote Sensing, 2021, 13(21):4412.
- [16] 朱凤敏,吴迪,杨佳琪. 基于 Sentinel-1/SAR 数据的农作物分类方法研究[J]. 测绘与空间地理信息,2020,43(5):105-108.
- [17] ROERINK GJ, MENENTI M, VERHOEF W. Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series[J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(9):1911-1918.
- [18] 何福梅. 广西国有六万林场八角产业发展对策思考[J]. 南方农业,2024,18(12):118-120.
- [19] 黄翀,许照鑫,张晨晨,等. 基于 Sentinel-1 数据时序特征的热带地区水稻种植结构提取方法[J]. 农业工程学报,2020,36(9):177-184.
- [20] 黄春波,佃袁勇,周志翔,等. 基于时间序列统计特性的森林变化监测[J]. 遥感学报,2015,19(4):657-668.
- [21] MULLISSA A. Sentinel-1 SAR backscatter analysis ready data preparation in google earth engine[J]. Remote Sensing, 2021, 13(10):1954.
- [22] 于文涛. 复杂地表时空连续植被参数遥感反演方法研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院空天信息创新研究院),2021.
- [23] 张晗,任志远. 多种时序 NDVI 重建方法比较与应用分析[J]. 中国农业科学,2014,47(15):2998-3008.
- [24] SONG S, YANG JX, LIU LJ, et al. Lake surface water temperature in China from 2001 to 2021 based on GEE and HANTS[J]. Ecological Informatics, 2024, 84:102903.
- [25] 邹明亮,周妍妍,曾建军,等. 基于 HANTS 算法的疏勒河流域荒漠化时空动态监测[J]. 西北师范大学学报(自然科学版),2018,54(2):88-94.
- [26] 王碧晴,韩文泉,许驰. 基于图像分割和 NDVI 时间序列曲线分类模型的冬小麦种植区域识别与提取[J]. 国土资源遥感,2020,32(2):219-225.
- [27] 刘明月,郑浩,陈星彤,等. GEE 支持下联合植被物候特征与机器学习的入侵植物互花米草提取[J]. 测绘通报,2023(6):36-43.