

# 无人机遥感监测技术在松材线虫病 疫情监测中的应用探讨

刘云鹏<sup>1</sup>, 解春霞<sup>1</sup>, 李 莉<sup>2</sup>, 张林燕<sup>2</sup>

(1. 江苏省林业科学研究院, 江苏 南京 211153; 2. 溧阳市林业站, 江苏 溧阳 213300)

**摘要:**基于无人机遥感的松材线虫病监测技术,能够及时获取多时态、多角度、多光谱和高精度的遥感图像,为决策者提供松材线虫病监测和防控数据支持,在松材线虫病防控上有着较大的发展空间。对松材线虫病无人机遥感监测技术的基本原理、遥感图像的采集、处理与解译研究进展以及应用现状等方面进行了阐述,提出了无人机遥感监测松材线虫病实际应用中存在的问题和不足,并就其在松材线虫病监测中的发展方向和应用前景进行了展望。

**关键词:**松材线虫病;无人机;遥感;疫情;监测技术

**中图分类号:**S763.305;S763.49;V19

**文献标志码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.1001-7380.2022.02.010

## Discussion on the application of UAV remote sensing technology in monitoring of PWD

Liu Yunpeng<sup>1</sup>, Xie Chunxia<sup>1</sup>, Li Li<sup>2</sup>, Zhang Linyan<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Academy of Forestry, Nanjing 211153, China; 2. Liyang Forestry Station, Liyang 213300, China)

**Abstract:** With the development of unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing (RS) technology and pine wilt disease (PWD) RS monitoring, the multi-tense, multi-angle, multiple spectrum, high precision RS image could be timely obtained, and decision makers could be provided with early PWD monitoring and prevention and control basis, which brought huge development space in PWD prevention and control. This paper discussed the basic principles of RS monitoring technology of PWD, the research progress of RS information collection, image processing and interpretation, as well as the application status, and emphasized the practical application in monitoring PWD. The existing problems and deficiencies in the study were also discussed, and the prospect of the application of UAV RS technology in monitoring PWD was prospected.

**Key words:** Pine wilt disease (PWD); Unmanned aerial vehicle (UAV); Remote sensing (RS); Monitoring technology

松材线虫病是森林生态系统中最具毁灭性的森林病害之一,被列为我国林业检疫性有害生物,常被称作松树的“癌症”。自1982年在江苏南京首次发生以来,疫情不断扩展蔓延,已成为我国近几十年来发生最严重、最危险的重大林业病害。据国家林业和草原局公告(2022年第6号)显示,截至2022年,我国松材线虫病已扩展至19个省(区、市)731个县级行政区,发生面积超过180万hm<sup>2</sup>,致死松树数十亿株,造成的直接经济损失和间接经济损

不可估量。目前,疫情发生区域最西端已达四川凉山,最北端到达辽宁抚顺,并已入侵到庐山、黄山、张家界、九华山等多个重要的国家级风景名胜区和生态区。目前,我国松材线虫病县级疫区数量占全国县级行政区的20.5%,但相对于全国6000万hm<sup>2</sup>松林而言,松材线虫病的发生面积还只占现有松林面积的极少部分,还有逾90%的健康松林正面临着松材线虫病传播侵染的威胁<sup>[1]</sup>。鉴于此,加强疫情防控,遏制松材线虫病疫情快速传播和发展,

收稿日期:2022-02-07;修回日期:2022-02-26

**基金项目:**江苏省林业科技创新与推广项目“无人机多光谱遥感在松材线虫病疫情监测中的应用与示范”(LYKJ[2020]10);中央财政林业科技推广示范资金项目“松材线虫病遥感监测与分类治理技术集成示范”(苏[2021]TG05)

**作者简介:**刘云鹏(1978-),男,安徽宿州人,副研究员,博士。研究方向为森林病虫害防治。E-mail:lypsq@yahoo.com.cn

成为当务之急。

松材线虫病防控的4个关键环节为病害检疫、疫情监测、疫木除治和媒介昆虫防治,其中疫情监测最为重要。松材线虫病的疫情监测是一切防控的前提。目前,传统的松材线虫病监测主要依靠人工踏查,由于受森林地势、林间杂灌等影响,人工踏勘的劳动强度大、作业效率低,特别是在山地陡坡、林分茂密、人迹罕至的恶劣区域,全面勘察更加困难。随着无人机技术和多光谱、高光谱信息采集设备的小型化,以及遥感图像分析算法的不断丰富,无人机遥感监测技术能够较好地解决人工踏查效率低、卫星遥感分辨率差的缺点。因此,开展无人机遥感技术研究和应用,对松材线虫病的大面积监测、流行动态研究、防控效果评价和灾害损失评估等均具有重要意义。

## 1 基于遥感数据监测松材线虫病的基本原理

松树感染松材线虫病后,典型症状就是叶片会转变为黄褐色,严重后转变为红褐色,最后完全枯萎死亡。在这个过程中,松树针叶内部的组织结构、水分含量、叶绿素含量等均会呈现相应的变化<sup>[2-3]</sup>,并在光谱特征中有所体现。无人机遥感监测技术是通过遥感图像信息采集设备采集上述松树针叶的变化信息,并对其进行对应分析和分类识别,即可了解松树的健康状况。人们对感染了松材线虫病的黑松和马尾松针叶进行分析发现,感病后的针叶含水量、叶绿素、类胡萝卜素含量均有显著下降。通过ASD光谱仪测量感病松针的反射光谱也发现,感病松针与健康松针在近红外和中红外波段(波长大于800 nm)的光谱反应有明显差异。进一步对比不同感病阶段光谱反应发现,随发病程度加重,光谱红边位置蓝移,绿峰反射高度逐渐降低<sup>[4-6]</sup>。黄明祥等<sup>[7]</sup>在研究马尾松高光谱时序特征中发现,感病马尾松与健康马尾松的时序光谱差异较大,其近红外平台内最大的一阶微分值、红边内一阶微分的总和与蓝边内一阶微分的总和比值等差异尤其显著。马跃等<sup>[8]</sup>在分析不同发病阶段黑松针叶的反射光谱特征曲线中发现,感病针叶光谱红边位置蓝移、绿峰反射高度、红谷吸收深度均降低,红边斜率也逐渐减小。王震等<sup>[9]</sup>利用波段值为350—1 050 nm的便携式光谱仪测定了不同感病阶段的马尾松特征光谱发现,不同感病阶段的马尾松

针叶在近红外区域(760—900 nm)的光谱反射率差异极显著。这些基于松材线虫病感病植株光谱特征的研究表明,光谱特征上的差异可以用于松材线虫病的动态监测,也为无人机遥感监测奠定了基础。

## 2 无人机遥感图像的采集

无人机遥感图像采集作业流程通常可以概括为以下几个步骤<sup>[10-11]</sup>:首先,根据遥感任务要求,在地面控制系统中进行航迹规划,并依据地形、光照等情况设定航线、航速、航高,以及遥感传感器的采集方式、速度等参数;其次,通过地面控制系统将上述参数载入到无人机系统和遥感传感器系统;再次,无人机系统和遥感传感器系统按照预设的航线和采集方式进行拍摄采集;最后,遥感传感器将拍摄的图像数据进行存储,或利用无线传输通道将数据传输到地面的控制子系统,用于后续图像分析。目前,无人机搭载的传感器多以数字化、重量轻、体积小、探测精度高的设备为主,如:数码相机、多光谱相机、高光谱相机、红外扫描仪、雷达等<sup>[12-14]</sup>。在林业相关应用中,可见光和多光谱、高光谱等3类遥感传感系统应用较为广泛。

可见光遥感一般有红、绿、蓝3个波段。近年来,近地低空无人机平台的快速发展以及数码相机性能的不断提高,使得高空间分辨率的无人机可见光数据获取更加便捷。刘遐龄等<sup>[15]</sup>利用无人机搭载高分可见光传感器采集遥感图像,并通过人工目视和模版匹配2种方法对疫区松材线虫病死木进行识别判读,总体精度逾85%。李卫正等<sup>[16]</sup>利用无人机采集松材线虫病疫区高分辨率遥感图像,采用目视寻找方式,对病死木进行识别,并做出定位标记,实现了病死木位置信息的采集,其位置精度在0.24—2.82 m之间。然而,在疫区病死木识别、定位的实际应用中发现,可见光遥感图像受裸地、彩色树种、变色杂灌等复杂地被情况的影响较大,在图像精度、分类判读模式和识别精度上还有待提高。

多光谱遥感除了可见光的红、绿、蓝3个波段外,还包括红外、微波等波谱范围,所获得的遥感图像在每个波段可以单独提取成为1幅灰度图像。Saari等<sup>[17]</sup>开发了无人机搭载珀罗干涉仪的多光谱图像采集系统,其相机光谱波长在500—900 nm之间。褚东花等<sup>[18]</sup>利用无人机平台搭载双光谱相机获取遥感图像,采用加权支持向量分类算法进行受害木识别,得到的遥感识别精度达0.98。黄宝

华<sup>[19]</sup>利用无人机搭载有 450—940 nm 的多光谱相机来获取松材线虫病疫区图像数据,对人工黑松纯林的病死木识别准确率为 100%。多光谱遥感是基于特定光谱波长的图像数据采集,因此,相对可见光遥感图像所获得的信息增加,但依然会有非特定光谱波段的信息缺失。

为了获得更多的遥感图像信息,高光谱遥感技术获得了进一步发展。高光谱遥感实际上是将成像技术和多光谱技术有机结合,对地面目标物空间特征进行成像的技术。图像采集过程中,每个空间像素单元都经过色散处理,而形成几十个甚至几百个较窄的光谱波段,使地物特征形成连续光谱波段信息。这些连续光谱的图像数据,能够为区分变色松树、彩色阔叶树、稀疏植被和裸土等提供更好的数据基础。Fassnacht 等<sup>[20]</sup>对变色松树的高光谱识别进行研究后发现,遥感图像中变色松树的分类精度与特征光谱波段的选择有直接相关性。李嘉祺等<sup>[21]</sup>通过提前对人工标注的枯死病树和正常松树进行高光谱图像采集、分析,获得其特征波段,再利用无人机搭载多光谱相机,采集整个试验区进入遥感图像,并以前期获得特征光谱为标准,对试验区

病死树进行识别与标注,其准确率可达 95.03%。

总体而言,运用高光谱传感器和多光谱传感器能够获得比可见光传感器或卫星遥感更加细致和精准的数据,能够为提高模型的准确率和可靠性提供更好的支持。此外,无人机遥感图像采集过程中的图像重叠率也十分关键,一般航向重叠率要在 60% 以上,旁向重叠率要求在 30% 以上,才能在全景拼接时获得较好的拼接效果。

### 3 无人机遥感图像的拼接

无人机遥感在采集图像过程中,受无人机平台自身稳定性、拍摄时的自然条件、相机传感器曝光时间、天气因素等多方面的影响,可能使遥感图像在一定程度上出现几何形态的平移、旋转、缩放等,同时也会出现亮度和颜色上的差异。此外,无人机传感器还会因 2 次航拍时间上的间隔,造成拍摄的 2 幅图像上出现色差、图像亮度、饱和度不一致等问题。这些均会影响最终的遥感图像质量。因此,就需要对这些图像进行辐射校正、配准等预处理,消除图像中的变形和色差,并融合拼接成高质量的全景图像<sup>[22]</sup>(见图 1)。

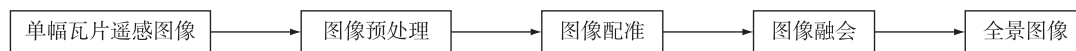


图 1 无人机遥感图像的全景拼接流程

图像预处理的首要任务,是对遥感图像采集过程中产生的各种畸变进行校正,以使单幅瓦片图像处于同一基准投影面上,消除图像之间的偏差,减少对拼接效果的影响。无人机遥感图像几何校正主要包括坐标系统变换、构建共线方程、重采样等过程。王学平<sup>[23]</sup>以广东省从化市 ETM+ 遥感数据和 GIS 数据为基础,通过图像坐标的空间转换、图像像元灰度值重采样等步骤,深入分析遥感图像的几何校正原理和应用,提出了图像几何校正是提高遥感分析精度的有效途径。库向阳等<sup>[24]</sup>在对目标遥感图像进行几何校正处理过程中,对比了近似几何校正算法、神经网络和支持向量机算法等几种处理方法,优化了基于支持向量机算法的遥感图像几何校正方法和实现步骤,为遥感图像定量化和高精度化分析提供了技术支持。

图像配准是决定图像拼接质量的关键。对于无人机航拍获取的序列图像来说,由于无人机自身重量轻,受到气流影响较大,易造成遥感图像中出

现偏移、挤压、扭曲等畸变现象,使得基于单一变换域或灰度信息的图像配准方法很难达到理想的匹配效果。基于特征的图像配准方法更适用于无人机图像配准。基于特征的图像配准方法:首先是采用人工或自动的方法提取图像的各类特征,如转角、边界线或轮廓线、曲线等,再按序列图像的空间关系,匹配所提取特征,估算图像间的变换关系,最后再利用得到的变换关系对图像进行处理,得出多幅图像在同一坐标系下的配准图像。基于特征的图像配准方法因具有压缩信息量、算法灵活、处理速度快、精度高等优点,是近年来研究较多的方法。由 Lowe<sup>[25]</sup>在 1999 年提出的尺度不变特征变换匹配算法(SIFT),是经典的基于特征的图像配准算法。近年来,在 SIFT 算法基础之上又衍生出一些其他算法,如 ASIFT, CSIFT, PCA-SIFT, SURF 算法等<sup>[26-28]</sup>。周佳欣等<sup>[29]</sup>在 SIFT 算法的基础上,通过多尺度空间极值点提取,曲线拟合确定特征点的位置,再根据确定的特征点来完成匹配。改进后的 SIFT 算法



在运行时间上减少了 0.47 s, 运算速度则提高了 10.7%。

图像融合的目的是将配准后的图像基于一定的变换模型合并成 1 幅全景图像。图像融合不仅仅是遥感图像的简单复合, 而是采用一定的算法来对信息进行优化、突出特征信息、减少冗余信息, 从而增加图像解译可靠性和准确性<sup>[30]</sup>。从信息表征层次上来看, 图像融合方法可分为 3 个层次: 像元级融合、特征级融合和决策级融合。像元级融合是在原始数据层上的直接融合, 获得的全景图像清晰度更符合人或机器的视觉性要求, 但相对的特征信息量较少, 属于低层次的融合技术。特征级的融合是在对各种数据源进行识别目标特征提取、分析的基础上, 再进行融合处理。其较像元级融合技术不仅突出了图像中目标特征信息, 同时还可以大幅减少数据量。决策级的融合是最高层次的融合技术, 是在对原始图像进行特征提取和分析的基础上, 通过引入一些辅助识别的信息对数据决策判别之后, 再将这些有价值的信息进行融合。融合后的图像能够为决策分析提供更多的信息。

#### 4 无人机遥感图像分析

遥感图像分析是依据图像中每个像元的空间结构、特征光谱信息或其他分类特征信息, 按照一定的分类规则或算法, 划分成不同的类别。目前, 基于无人机航拍遥感图像的分类大体可分为非监督分类和监督分类 2 种。2 种分类最本质的区别是有没有训练样本的存在: 非监督分类不需要训练样本, 只使用某个单一的光谱信息进行分类, 因其原理相对简单, 存在“同谱异物”“同物异谱”的现象, 易造成分类上的混淆和错误; 而监督分类则是在利用遥感软件进行分类前, 需要人工辅助从遥感图像上选择若干个典型目标物或目标区域作为分类的训练样本, 再通过不同的软件分类器和算法, 对比遥感图像中的像元和训练样本中的像元, 并将图像中与之最相近的像元都归为同一类, 从而实现对整个全景遥感图像的分类。监督分类研究是遥感图像分类的热点, 其分类方法也相对较多, 其中, 决策树分类法和支撑向量机分类法因具有较好的分类精度, 在遥感图像的分类过程中被广泛的应用。

决策树分类法<sup>[31]</sup>是基于图像数据库中拥有最大信息量的属性字段, 建立决策树的根节点, 再依据指定规则对遥感图像进行运算, 根据计算逻辑值

(是或否)生成 2 分支或多分支。按此步骤再向下进行拓展, 直至将图像分出目标类别(叶节点)。决策树分类法除能够利用光谱特性以外, 还可以利用几何、纹理、地形等特征信息, 可以提取多维度的、多目标属性信息进行分类, 其分类结果也更加直观、清晰, 计算效率更高。常见的决策树算法有 ID3, C4.5, CART 这 3 种<sup>[32]</sup>。基于决策树分类法的松材线虫病监测分类研究较少。黄芳芳等<sup>[33]</sup>利用 Landsat-8 遥感图像中 7 个波段原始光谱值作为自变量, 采用决策树 CART 算法对湖北省宜昌市马尾松松材线虫病进行遥感监测分类, 平均分类精度在 76% 以上, 对松材线虫病的大面积监测具有一定的指导意义。

支撑向量机(SVM)分类法是机器学习中非常重要的分类算法之一。它通过将特征向量映射到高维特征空间, 并在这个特征空间中构建出一个最优超平面, 使 2 类图像单元无错误地区分开, 并使它们的分类间隙最大化, 最终实现对遥感图像的分类。它在解决小样本数据、非线性映射和高维模式识别方面具有较强优势。随着大量学者的不断深入研究, SVM 分类法衍生出许多改进和扩展算法, 如模糊支撑向量机(FSVM)、加权支撑向量机(WSVM)、最小二乘支撑向量机(LSSVM)、孪生支撑向量机(TSVM)等。胡根生等<sup>[34]</sup>利用改进的加权支撑向量多分类算法, 实现感病松树的精确识别, 分类精度为 0.949 2。张学敏<sup>[35]</sup>将特征稀疏表示和 WWSVDD 多分类相结合, 提出了一种基于加权支撑向量数据描述的感病松树遥感图像分类算法, 分类精度达到 0.947 0。

#### 5 松材线虫病的无人机遥感监测技术应用

随着多光谱、高光谱采集设备和无人机技术的飞速发展, 基于无人机航拍遥感的松材线虫病监测的应用案例也越来越多。武红敢等<sup>[36]</sup>利用无人机遥感监测技术在重庆市沙坪坝区对松材线虫病进行监测应用, 监测准确率为 94%, 定位精度在 10 m 以内。黄华毅等<sup>[37]</sup>利用固定翼无人机搭载可见光数码相机和多光谱数码相机, 采集了试验区可见光和多光谱图像, 采用植被指数(NDVI)对图像进行了分类, 获得了试验区疫木的分布位置图和 GPS 坐标点, 验证监测准确率超 80%, 坐标点精度达到 2—3 m。黄华毅等<sup>[37]</sup>利用 Faster R-CNN 深度学习框

架对无人机航拍获得的可见光和多光谱遥感图像中的病枯死松树进行判别,正确率分别达到 90% 和 82%。李嘉祺等<sup>[21]</sup>运用无人机光谱遥感和卷积神经网络分类模型,进行林区松材线虫病疫木自动识别和标注,准确率超 95%。这些案例均为大面积松材线虫病发生现状和流行动态的监测、防控效果和灾害损失的评估提供了技术支撑与应用示范。

基于无人机可见光、多光谱、高光谱的低空遥感监测技术逐渐成熟,2016 年,安徽省质量技术监督局发布了《基于无人机平台的松材线虫病枯死松树监测技术规程》地方标准。2018 年,中国林学会发布了《无人机遥感监测异常变色木操作规程》行业标准。这些标准对无人机遥感监测作业中的航拍系统、航拍计划与设计方案、图像质量、信息处理等应用技术环节进行了规范,为大面积松材线虫病疫木的快速识别和定位提供了新的途径和方法,也为松材线虫病的治理效果核查与灾害评估等工作提供了支持。

## 6 问题与展望

随着无人机遥感技术的不断发展,其及时获取多时态、多角度、多光谱、高精度遥感图像的优势,能够为决策者提供及时的松材线虫病监测信息,逐渐在研究和生产中得到重视。然而,无人机在稳定性、续航时间、可操控性及遥感图像获取和处理、枯死松树识别的准确率等方面依然存在一些问题,从而限制了松材线虫病无人机遥感监测技术的应用与推广:

(1) 无人机及遥感数据采集终端研发依然有待加强。无人机受自身重量、电池续航、天气(风力)以及载荷量、稳定平台的影响较大,飞行获取的图像数据质量不高,从而影响后期数据的分析精度,距离生产上的实际应用还存在一定差距。今后应加强无人机硬件设备和飞行控制系统研究,开发具有高稳定性的无人机机型和飞控技术,以及信息无线快速传输技术,提高遥感数据的精度和准确度。此外,专业的飞手必不可少。只有飞手对飞行参数进行科学、专业的规划、设计和操控,才能确保获得高质量的遥感数据。

(2) 基于无人机获取遥感数据的解译方法依然有待改进。目前,松材线虫病无人机遥感图像的解译工作仍然是以人工目视判读或人机结合的方式为主,这种方式对判读人员专业技术要求很高,存

在主观性强、效率低的弊端,难以满足大面积快速识别、判读的应用需求。今后应积累更全面的松材线虫病疫木症状样本、变色树种样本及其他非松材线虫病枯死树特征样本,形成更加全面的样本库,并分析其在图像上的区别特征,及时调整特征因子,优化图像拼接、配准、融合、解译分类算法及模型,挖掘更深层次的大数据相关性,从而提高系统对无人机遥感数据的利用率和工作效率。

(3) 无人机遥感监测松材线虫病的技术标准依然有待规范。松材线虫病疫木监测的主要标志是松树针叶感病后的变色特性,而松材线虫病的发生是一个渐进的过程,不同发病阶段和不同发病程度的症状是不尽相同的。此外,彩叶树种的变色期和阔叶树的枯死木等均会影响系统的判读。因此,今后还应不断完善松材线虫病无人机遥感监测技术的应用研究,优化、规范航拍高度、航速、航向重叠率和旁向重叠率等参数,确保遥感数据的全覆盖和图像空间分辨率的一致性。进一步规范监测数据采集时间节点,秋季遥感监测宜选择在 9 月下旬至 10 月上旬,春季则应在 4 月下旬至 5 月初。一方面,这 2 个时间段内健康植被生长旺盛,有利于对遥感图像中感病变色松树的识别和定位;另一方面,也可以有效降低乌饭树、枫香树、山胡椒等许多树种叶片变色带来的干扰。

综上所述,利用无人机遥感技术对松材线虫病危害的病枯死树进行自动化识别、定位,能显著提高松材线虫病监测的效率和客观性,能够为松材线虫病的发生规律研究和应急除治提供数据依据,在松材线虫病监测、预警、防控等方面均有着巨大的发展潜力。

### 参考文献:

- [1] 叶建仁.松材线虫病在中国的流行现状、防治技术与对策分析[J].林业科学,2019,55(9):1-10.
- [2] 徐华潮,骆有庆,张琴,等.松材线虫自然侵染对黑松、马尾松针叶含水量、色素及抗氧化酶活性的影响[J].林业科学,2012,48(11):140-143.
- [3] 徐华潮,骆有庆,邹力骏,等.松材线虫自然侵染后对不同松树组织结构的影响[J].植物病理学报,2013,43(1):35-41.
- [4] LIU J M, FENG Z X. On the pathology of pine wilt disease caused by *Bursaphelenchus xylophilus* (in Chinese) [J]. Acta Phytopathologica Sinica, 1995, 25(2): 171-174.
- [5] 徐华潮,骆有庆,张廷廷,等.松材线虫自然侵染后松树不同感病阶段针叶光谱特征变化[J].光谱学与光谱分析,2011,31(5):1352-1356.

- [6] 张素兰,覃菊,唐晓东,等.松材线虫危害下马尾松光谱特征与估测模型研究[J].光谱学与光谱分析,2019,39(3):865-871.
- [7] 黄明祥,龚建华,李顺,等.松材线虫病高光谱时序与敏感特征研究[J].遥感技术与应用,2012,27(6):954-960.
- [8] 马跃,吕全,赵相涛,等.接种不同浓度松材线虫的黑松光谱学特征分析[J].山东农业科学,2012,44(11):12-16.
- [9] 王震,张晓丽,安树杰.松材线虫病危害的马尾松林木光谱特征分析[J].遥感技术与应用,2007,22(3):367-370.
- [10] 孔鹏飞.无人机低空遥感测绘作业流程及主要质量控制要点探析[J].低碳世界,2016(35):132-133.
- [11] 洪宇,龚建华,胡社荣,等.无人机遥感影像获取及后续处理探讨[J].遥感技术与应用,2008,23(4):462-466.
- [12] 李华玉,陈永富,陈巧,等.基于遥感技术的森林树种识别研究进展[J].西北林学院学报,2021,36(6):220-229.
- [13] ZHANG K W, HU B X. Individual urban tree species classification using very high spatial resolution airborne multi-spectral imagery using longitudinal profiles [J]. Remote Sensing, 2012, 4(6):1741-1757.
- [14] TUOMINEN S, NASI R, HONKAVAARA E, et al. Tree species recognition in species rich area using UAV-borne hyperspectral imagery and stereo-photogrammetric point cloud [J]. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2017(XLII-3/W3):185-194.
- [15] 刘崴龄,程多祥,李涛,等.无人机遥感影像的松材线虫病危害木自动监测技术初探[J].中国森林病虫,2018,37(5):16-21.
- [16] 李卫正,申世广,何鹏,等.低成本小型无人机遥感定位病死木方法[J].林业科技开发,2014,28(6):102-106.
- [17] SAARI H, PELLIKKA I, PESONEN L, et al. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) operated spectral camera system for forest and agriculture applications [C]//Conference on Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XIII/18th International Symposium On Remote Sensing. Prague, Czech Republic, 2011:19-21.
- [18] 褚东花,李德峰,宋西强.基于多光谱遥感的松材线虫病受害木识别方法[J].绿色科技,2021,23(9):178-180.
- [19] 黄宝华.无人机搭载多光谱相机监测松材线虫病的研究[J].广西林业科学,2020,49(3):380-384.
- [20] FASSNACHT F E, LATIFI H, GHOSH A, et al. Assessing the potential of hyperspectral imagery to map bark beetle-induced tree mortality [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 140(1):533-548.
- [21] 李嘉祺,吴开华,张垚,等.基于无人机光谱遥感和 AI 技术建立松材线虫害监测模型[J].电子技术与软件工程,2021(8):91-94.
- [22] 王雪晶,魏仲慧,孙文军,等.彩色遥感图像的几何校正[J].系统工程与电子技术,2002,24(12):126-128.
- [23] 王学平.遥感图像几何校正原理及效果分析[J].计算机应用与软件,2008,25(9):102-105.
- [24] 库向阳,李崇贵,姚顽强.遥感图像几何校正的支持向量机算法研究[J].西安电子科技大学学报(自然科学版),2011,38(5):144-153.
- [25] LOWE D G. Object recognition from local scale-invariant features [C]// International Conference on Computer Vision, Kerkyra, Greece. 1999:1150-1157.
- [26] MOREL J M, YU G S. ASIFT: A new framework for fully affine invariant image comparison [J]. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2009,2(2):438-469.
- [27] ABDEL-HAKIM A E, FARAG A A. CSIFT: A SIFT descriptor with color invariant characteristics [C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2006:1978-1983.
- [28] LUO J, GWUN O. SURF applied in panorama image stitching [C]//2nd International Conference on Image Processing Theory Tools and Applications. 2010:495-499.
- [29] 周佳欣,徐梦云,刘建全.基于改进的 SIFT 算法的图像配准方法[J].工业控制计算机,2019,32(5):97-101.
- [30] 贡培东,曾永年,历华.多尺度遥感影像融合技术及其算法研究进展[J].遥感信息,2006(6):67-71.
- [31] DURKIN J,蔡竞峰,蔡自兴.决策树技术及其当前研究方向[J].控制工程,2005,12(1):15-19.
- [32] 戴艳丽.分析数据挖掘中决策树算法及其应用[J].科技传播,2015(12):33-34.
- [33] 黄芳芳,雷鸣,张力,等.基于随机森林和决策树的马尾松松材线虫病监测方法[J].信息通信,2019(12):32-35.
- [34] 胡根生,张学敏,梁栋.基于 WWSVDD 多分类的遥感图像病害松树识别[J].北京邮电大学学报,2014,37(2):23-27.
- [35] 张学敏.基于支持向量数据描述的遥感图像病害松树识别研究[D].合肥:安徽大学,2014.
- [36] 武红敢,牟晓伟,杨清钰,等.无人机遥感技术在重庆市沙坪坝区松材线虫病监测中的应用[J].林业资源管理,2019(2):109-115.
- [37] 黄华毅,马晓航,扈丽丽,等.Fast R-CNN 深度学习和无人机遥感相结合在松材线虫病监测中的初步应用研究[J].环境昆虫学报,2021,43(5):1295-1303.