

基于遥感技术的松材线虫病诊断与监测研究进展

舒敏, 张德婧, 徐倩然, 唐雪海* (安徽农业大学林学与园林学院, 安徽合肥 230000)

摘要 松材线虫病是松树的一种毁灭性流行病, 主要通过松褐天牛等媒介传播。该病害具有传播速度快、范围广等特点, 治理难度极大, 严重破坏生态环境并造成巨大的经济损失。因此, 对于松材线虫病的诊断和监测是生态文明建设背景下林业工作急需解决的问题。总结了松材线虫病的诊断方法, 在此基础上, 重点阐述了国内外利用遥感手段诊断松材线虫病的研究现状, 系统分析了应用不同遥感平台对松材线虫病进行诊断和监测的技术方法, 并深入分析了其中存在的主要问题。提出未来可以利用天空地一体化遥感综合平台获取数据, 并通过建立基础数据库、远程视频监控、预警预报系统等对松材线虫病进行诊断、监测和防治, 以期最大程度遏制松林染疫, 助力生态文明建设。

关键词 变色松树; 松材线虫病; 遥感监测; 光谱特征

中图分类号 S 771.8 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)22-0011-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.22.003



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research Progress in the Diagnosis and Monitoring of *Bursaphelenchus xylophilus* Based on Remote Sensing Technology

SHU Min, ZHANG De-jing, XU Qian-ran et al (School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230000)

Abstract Pinewood nematode disease is a devastating epidemic of pine trees, mainly transmitted by vectors such as pine brown longicorn beetle. The disease has the characteristics of rapid transmission and a wide range. It is challenging to control, which has seriously damaged the ecology and caused substantial economic losses. Therefore, the diagnosis and monitoring of pinewood nematode disease is an urgent problem in modern forestry work. This paper summarizes the diagnostic methods of pinewood nematode disease. This basis focuses on the research status of diagnosing pinewood nematode disease by remote sensing at home and abroad, systematically analyzing the technical methods of diagnosing and monitoring pinewood nematode disease using different remote sensing platforms, and examines the main problems profoundly. We propose obtaining data through the sky earth integrated remote sensing integrated platform and establishing a primary database, remote video monitoring system, and early warning and prediction system to diagnose, monitor, and control pinewood nematode disease. Through this, we hope to curb pine forest infection to the greatest extent and contribute to the construction of ecological civilization.

Key words Discolored pine trees; *Bursaphelenchus xylophilus*; Remote sensing monitoring; Spectral characteristics

松材线虫病又称松树萎蔫病, 是一种由入侵物种松材线虫(*Bursaphelenchus xylophilus*)引起的森林病害, 该病毁灭性强, 松树感染后 40 天即可死亡, 3~5 年即可毁灭一片松林, 因此也被叫做松树的癌症^[1-2]。松树患病后, 症状表现为树脂分泌减少, 蒸腾作用大幅下降, 针叶逐渐变成红褐色或黄褐色, 最终树脂停止分泌, 导致植株干枯死亡^[3]。松材线虫是一种常见的松材寄生虫害, 该病害由北美开始传播, 1970 年在亚洲流行, 1982 年传入我国, 并由此带来了巨大的经济损失^[4-5], 同时也破坏了自然景观和生态环境, 对松林资源构成严重威胁^[6-7]。该病已被我国列入森林植物检疫对象。松材线虫主要以松褐天牛为传播媒介, 在松褐天牛取食松树树皮补充养分时侵入松树的伤口, 接着快速且大量地繁殖, 继而导致松材线虫病的发生^[8]。针对松材线虫病害, 常用生物防治、化学防治、营林防治等方式进行防控, 但是, 该病致病力强, 传播迅速, 一旦发生将难以治理。因此, 加强松材线虫病的检疫和监测力度是现代林业工作中急需解决的问题^[9]。

松材线虫病传播范围广、发病速度快、治理难度大, 在全国各地都普遍存在^[10-12]。我国海拔 1 000 m 以下的地区广泛存在松材线虫, 而且危害程度随着地区海拔的降低而增大。其中危害最为严重的是珠江三角洲和长江中下游地区,

尤以长江中下游地区的危害更大; 危害中等严重的是珠江中游、长江中游和中国中部高海拔及丘陵地区; 而在云贵高原等海拔约 1 000 m 的地方仅局部发生, 带来的危害相对较小^[13]。南京中山陵首次发现外来的松材线虫, 随后陆续传播至安徽、山东、浙江等地, 并同时向四周扩散。30 多年来, 已先后蔓延至我国 18 个省和 588 个县级行政区^[14-15], 造成数以亿计的松树被感染并随后枯萎, 丰富的松林资源受到了巨大的威胁, 由此也带来了上亿元的经济损失。作为外来物种, 松材线虫表现出高生长速度、强大繁殖能力和快速蔓延能力等特点, 其对环境具有较强的耐受性和适应性。一旦入侵, 致使自然生态系统改变, 生物地理分布的结构和功能也会发生变化, 打破当地的生态平衡, 严重破坏生物多样性^[16]。松材线虫病也正入侵我国多个风景名胜及生态功能区, 对黄山、张家界等风景区的天然松林产生巨大的威胁, 将给当地的生态旅游业带来难以估量的经济损失^[7]。尽管近年来我国投入了大量的人力、物力、财力进行严格的管理和控制, 但是目前仍未形成一套成熟有效的防治措施, 在发病早期也未能提前精准监测。

1 松材线虫病的诊断方法

1.1 传统方法 早期诊断松材线虫病是清除侵染源和控制传播途径至关重要的环节, 可以从林间枯死木、活立木、原木 3 个方面来进行诊断^[17]。

林间枯死木可以通过观察法进行诊断。感病松树的针叶从基部开始萎蔫, 针叶变红不脱落, 直至枯死^[10]。松树感

基金项目 安徽省大学生省级创新训练项目(S202010364094); 国家自然科学基金(32171783)。

作者简介 舒敏(2001—), 女, 安徽池州人, 从事林学研究。* 通信作者, 讲师, 博士, 从事森林资源信息化研究。

收稿日期 2021-12-20

病后树脂分泌减少或停止^[18-19],树干截面的木质部多有蓝变现象^[20-21]。该方法适于普查林间病害,但缺乏准确性。

活立木的诊断包括流胶法和化学法。运用三级流胶诊断松材线虫病具有一定的可靠性,流胶观察的指标需要根据实际情况而定。可通过树脂酸异构化和乙醚抽提物量来粗略定性判断感染情况^[22]。

对于可直接观察的原木,在树干解析后可以判断。无法直接观察得出诊断结果的原木,常用指示剂显色法^[22]进一步定性检验。pH 的变化应考虑生物学与生态学特性^[19],因此,特异性地选择指示剂和显色标准仍需继续研究。

1.2 遥感诊断方法 传统方法存在着时间上的滞后性、空间上的局限性、标准上的歧义性,以及耗费巨大的人、物、财力等不足。遥感手段则具有探测广、更新快、穿透力强等优势,可以弥补传统方法的缺点。松树被松材线虫感染后,内部光合生理参数发生改变,由此引发外部特征显著症状变化,包括明显的针叶变色和松脂变少,其中,遥感图像光谱值参数的差异性可为变色的疫木遥感监测提供基础。疫木的这些变化会导致其在不同病感阶段冠层光谱反射率有明显差异,设置不同波段的传感器能捕捉到相应的重要信息^[23]。

1.2.1 航天遥感。航天遥感是以人造小卫星、航天飞机、火箭、宇宙飞船等航天飞行器为主,分布于大气层外部的飞行器平台^[24-25]。卫星遥感是当前林业使用最广泛的数据源,国外 20 世纪 30 年代首次开展了森林病虫害遥感监测方面的航空试验,但是,成本昂贵的卫星监测制约了 20 世纪国内的发展速度。随着我国信息技术和航天航空技术的迅猛发展,变色松树的监测取得进一步突破。近年来,多型星载激光遥感在技术上的突破和应用,为国内林业有害生物监测提供了有效的数据源^[26]。星载激光雷达系统也在监测林冠高度变化方面具有示范性意义,并能获得精确的森林结构信息^[27-28]。Kaiser^[29]利用陆地卫星 TM 数据研究海岸线和土地覆盖的变化,将航天遥感的尺度性凸显出来。染病松树的内部光和生理参数的变化会引起相应光谱改变,并反应在遥感图像上。但是,大范围监测松材线虫病害使用的影像分辨率较低,且受气候、地形地貌等因素影响,精度难以达到规定的技术要求^[30]。高空间分辨率遥感数据对于监测群树的病虫害效果较好,在识别单株变色松树方面还存在误差和难度。因而,难以构建多源空间数据立体可视图^[31],航天遥感技术更适宜宏观调控和数据收集。

1.2.2 航空遥感。航空遥感是一种运载工具搭载传感器模式的多功能综合性探测技术,运载工具包括飞机、飞艇、气球等^[32]。目前,无人机遥感技术在林业中的应用已成为一种趋势,不仅可在短时间内收集高分辨率数据^[33],并且有望与人工智能结合^[34]诊断松材线虫病害。此手段可以快速、准确找到感染树木的空间分布,使前期的普查工作更具时效性^[35]。此外,如何提高染病树木的定位精度也是一个需要探索的问题。徐信罗等^[36]将无人机遥感与目标检测算法结合,提高了受害木的精确定位效果。Syifa 等^[37]利用采集到

的无人机图像制作了一份土地覆盖(land cover, LC)图,并使用支持向量机(support vector machine, SVM)和人工神经网络(artificial neural network, ANN)2 种方法进行分类,发现 SVM 区分感染树木精确度高于 ANN。胡馨月等^[38]利用 Mean Shift 算法充分挖掘无人机图像,有效地获取单木信息。Nansen 等^[39]提出,在机载遥感应用中,太阳高度角、云量、大气成分日变化和季节性变化等对获取高质量的机载遥感数据存在相当大的挑战,也对虫害的识别精度造成了一定影响。而 Essery 等^[40]也提到了森林冠层下的太阳辐射可能具有较大的空间变化,从而影响科罗拉多州的黑松树林中树的位置、高度和冠幅的航空摄影和机载激光扫描图像。且无人机在续航时间、载荷大小等方面存在明显的限制,急需得到校正和优化^[41]。

1.2.3 地面遥感。地面遥感是各种移动终端传感器支撑平台的统称,既能测量各种地物波谱,也能探测和采集地物目标信息。随着我国自主研发的北斗等全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)服务的应用,基于此信号的移动终端设备更新速度较快。这种实时定位的地面遥感广泛应用于林业数据源的获取与分析中,并为松材线虫的监测提供技术支持^[42]。该方法具有范围小、活动性高的特点,在松材线虫的诊断中常作为人工辅助手段进行精细化实地定位核查。

2 松材线虫病多源遥感监测体系构建

松材线虫感染区疫木的监测包括星载普查、机载详查、地面核查 3 部分,可根据调查目的选择相应的调查方法,通过选择不同的数据源匹配相应的数据类型,有利于提高分类精度^[43]。Wei 等^[44]利用多源遥感数据探索多维城市化对非洲 PM2.5 浓度的驱动影响,取得了一定的成效。因此,研发联动性的平台体系,并使之具体化,就显得尤为重要。

2.1 天空地一体化 为保障我国松林生态安全,徐培林等^[45]提出“天空地一体化立体监测技术”方案,即结合航天遥感、航空遥感和地面遥感技术对松林进行病虫害监测作业,提高监测效率。但是,由于松材线虫病传染性高、入侵性广、根治性难,具有显著的复杂性;同时,单一的卫星遥感监测本身具有局限性,影像纹理信息没有被充分挖掘。此外,遥感数据受到云层的影响极大,因此,卫星遥感监测松材线虫依旧面临很大的挑战。在无人机遥感监测方面,刘金沧等^[46]以小型无人机航拍获取可见光 RGB 影像,识别出相应的感染松树,可操作性强。但是,目前多数疫木的影像解读工作仍然是人工目视判读方法,其对判读方面要求很高,且掺杂主观性,难以达到统一标准。这些不可避免地延迟了疫木的除治,错过最佳治理时期,增加疫情恶化程度。因此,利用多种数据源,各取所长,优势互补,才能达到最佳的预警预报、防治减灾效果。

2.2 点线面多角度 近年来,随着遥感平台的发展及载荷技术的优化,多平台、宽维度、广模式的综合应用呼之欲出。Chen 等^[47]在野外调查基础上,通过 MODIS 卫星获得遥感图像数值,将其与遥感数学模型结合,采用了从点对点延伸至

点对多的方式。首先,利用卫星遥感实施大范围的疫区变色松树的广泛普查,并通过数据处理分级图像,指导无人机作业局部范围;其次,基于无人机进行单位化精细核查,使用单株松木变色的智能识别;最后人工实地清查清理,建立松材线虫遥感监测模式化流程,进行松木疫区全覆盖监测,实施精准化预警预报,最大程度做好疫情防控,减小损失和保护生态。通过一体化遥感系统,可观测、获取物种和生态的综合信息,有机结合生态模型,刻画多样时空图像,提高监测的信息化水平^[48]。在图像处理中,已大量采用分水岭算法划分区域的图像,从而更好地在复杂地物下提取相关信息^[49]。林业和遥感由两个不同领域细化联结到一起,用现代化遥感监测武装传统式虫害防控,从点延伸到线,进而推广到面。

2.3 预联防相结合 实施有效防控可从搭建模拟化推演平台着手,提前将可能会导致松材线虫病感染的因素进行预演化介入分析。如引入坡度、坡向、坡位、郁闭度、立地质量等环境因子作为遥感监测对象,通过回归分析建立估测模型,并设为重点关注区域^[50]。在后期采取动态监测,定期进行数据提取,实时比对排查信息。经历周期性训练和模拟可逐步提高系统的定位和预测能力,同时达到防患于未然以及缩减大规模排查成本的目的。

3 展望

该研究从遥感平台的角度讨论了目前遥感技术在松材线虫病诊断和监测中的应用。航天遥感感测面积大,多用于监测大面积树群;航空遥感的图像分辨率高,有较大的灵活性,在普查工作中发挥重要作用;地面遥感活动性高,但范围小,多作为辅助手段对松林进行精细化核查。3种方法各有优势,因此该研究强调了天空地一体化的重要性,此方法能最大程度上提高病虫害监测力度。为了及时对松材线虫病进行预警并快速有效制定防治措施,针对当前遥感技术在松材线虫病诊断与监测研究中存在的主要问题,从以下几个方面进行展望。

3.1 建立松材线虫病遥感诊断与监测数据库 运用遥感技术对松材线虫进行诊断与监测,首先需要有效的数据支持。但是,当前我国林业遥感监测数据库不足、标准不统一,且缺乏兼容性^[51]。因此,建立遥感监测数据库,对数据进行分类存储并建立管理系统,是应用遥感技术对松材线虫病进行监测的必要条件。建立松材线虫遥感诊断与监测数据库,统一储存、管理空间数据和属性数据,方便各类资源及成果共享,提高数据利用率,增强数据可视化能力,为松材线虫的防治提供有力的数据支撑,也为其发生发展过程的模拟和预测奠定基础。

3.2 建立远程视频监控 我国现有林业病虫害调查模式存在不足,人工地面调查缺乏全面性和时效性,航空航天遥感技术的准确性目前也无法满足应用需求。为了最大限度地降低病虫害带来的损失,有效遏制松材线虫病的发生和扩散,利用科学有效的监测方法和技术,及时、准确、全面地掌握灾害信息,是对松材线虫病进行有效治理和科学预测的关键。利用远程视频监控技术可实现对松木叶片、树冠等的

变化进行有效监测,节省地面调查人员的工作量^[52]。

3.3 建立病虫害预测系统 当虫害发生时,松材线虫的虫卵已分布于松树林中,并对树木造成了一定损害,这时用遥感技术监测出虫害时,病虫害已经部分爆发,并对松树林造成了破坏^[53]。这体现出遥感技术对松材线虫病的监测存在滞后性。Qi 等^[54]采用无人驾驶飞行器(unmanned aerial vehicle, UAV)监控叶面积指数(leaf area index, LAI)的新方法,来预测作物产量,建立了相应模型。创建松材线虫病虫害预测系统,建立基于生态位因子模型对松材线虫侵入风险进行预测,可以大大弥补遥感监测的滞后问题,实现松材线虫病管理智能化、线上线下信息互联化、资源共享化,有效解决松材线虫管理和防治上的信息共享困难、预测预警时效性差的问题,为松材线虫病虫害的有效防治、科学预测提供有效帮助。

3.4 培养专业的林业遥感技术团队 遥感技术尤其是当今流行的无人机遥感技术专业性强,需要进行专业培养,建立专业化人才服务团队。一方面,要规范遥感技术的操作流程,提高标准化作业水平^[55];另一方面,要提供专业操作的人才队伍,培养专业化、高水平的诊断与监测人才,以提高松材线虫诊断及监测的作业水平和效率,降低人力、物力投入,更加高效地维护我国松林生态安全。

参考文献

- [1] 伊敏.松树的“癌症”——松材线虫病[J].内蒙古林业,2021(1):42-43.
- [2] 石娟,骆有庆,武海卫,等.松材线虫入侵对马尾松林植物群落功能的影响[J].北京林业大学学报,2007,29(5):114-120.
- [3] REVA V, FONSECA L, LOUSADA J L, et al. Basic density, extractive content and moisture sorption properties of *Pinus pinaster* wood infected with the pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* [J]. Journal of forestry research, 2015, 26(1): 233-240.
- [4] 潘佳亮,姚翰文,董薰谦,等.2019年全国松材线虫病疫情分析[J].中国森林病虫,2021,40(1):32-37.
- [5] 何龙喜,吉静,邱秀文,等.世界松材线虫病发生概况及防治措施[J].林业科技开发,2014,28(3):8-13.
- [6] 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.
- [7] 赵翔潇,杨丽元.浅谈松材线虫病的发生及防治措施[J].生物灾害科学,2019,42(3):186-190.
- [8] MYERS R F. Cambium destruction in conifers caused by pinewood nematodes [J]. Journal of nematology, 1986, 18(3): 398-402.
- [9] 王曦茜,曹业凡,汪来发,等.松材线虫病发生及防控现状[J].环境昆虫学报,2018,40(2):256-267.
- [10] KONG Q Q, DING X L, CHEN Y F, et al. Comparison of Morphological Indices and the Pathogenicity of *Bursaphelenchus xylophilus* in northern and southern China [J]. Forests, 2021, 12(3): 1-14.
- [11] 马菁,刘维,张晓丽.遥感在松材线虫病早期监测预测上的研究进展[J].林业调查规划,2011,36(5):75-80.
- [12] 刘遐龄,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.
- [13] 王宏毅.中国松材线虫的生物地理学与经济地理学[J].南京林业大学学报(自然科学版),2011,35(1):144-145.
- [14] ZHAO J J, HUANG J X, YAN J F, et al. Economic loss of pine wood nematode disease in mainland China from 1998 to 2017 [J]. Forests, 2020, 11(10): 1-19.
- [15] 于兰忱.松材线虫病的危害与综合防治对策研究[J].农业开发与装备,2020(7):233.
- [16] 刘伶利,刘争,蔡东章,等.豫南地区松材线虫病风险分析及防控对策研究[J].中国林副特产,2020(5):103-106.
- [17] 叶秀萍.松材线虫病的危害及防治措施分析[J].农村实用技术,2019(11):46-47.
- [18] 陈玉惠,叶建仁,魏初奖.松材线虫病诊断方法研究进展[J].南京林业

- 大学学报(自然科学版),2001,25(6):83-87.
- [19] 付甫永,王健,司徒春南.松材线虫病早期诊断实用技术[J].林业科技,2009,34(4):36-37.
- [20] 马跃.松材线虫病早期诊断技术研究[D].泰安:山东农业大学,2012.
- [21] SON J A,KOMATSU M,MATSUSHITA N,et al.Migration of pine wood nematodes in the tissues of *Pinus thunbergii* [J].Journal of forest research,2010,15(3):186-193.
- [22] 徐刚,栗子安.黑松感染线虫后树干中萜类成分的变化[J].林产化学与工业,1994,14(3):49-54.
- [23] 高永刚,刘丹,张福娟,等.卫星遥感在森林病虫害监测上的研究进展[J].中国农学通报,2006,22(2):113-117.
- [24] 陶欢,李存军,程成,等.松材线虫病变色松树遥感监测研究进展[J].林业科学研究,2020,33(3):172-183.
- [25] 巩盾.空间遥感测绘光学系统研究综述[J].中国光学,2015,8(5):714-724.
- [26] 岳春宇,郑永超,邢艳秋,等.车载激光遥感林业应用发展研究[J].红外与激光工程,2020,49(11):105-114.
- [27] SUN T,QI J B,HUANG H G. Discovering forest height changes based on spaceborne lidar data of ICESat-1 in 2005 and ICESat-2 in 2019; A case study in the Beijing-Tianjin-Hebei region of China[J].Forest ecosystems,2020,7(4):704-715.
- [28] WANG C,LUO S Z,XI X H,et al. Influence of voxel size on forest canopy height estimates using full-waveform airborne LiDAR data[J].Forest ecosystems,2020,7(3):392-403.
- [29] KAISER M F.Environmental changes,remote sensing,and infrastructure development: The case of Egypt's East Port Said harbour[J].Applied geography,2009,29(2):280-288.
- [30] 刘小龙.基于无人机遥感平台图像采集处理系统的研究[D].杭州:浙江大学,2013.
- [31] 唐新明,刘银,王界,等.卫星遥感应急监测信息服务框架设计与应用:以四川木里森林火灾为例[J].测绘通报,2020(12):110-113,154.
- [32] 李功权,沈鹏,袁杰祺.一种基于生态位因子模型的松材线虫侵入风险预测方法:CN202010083550.X[P].2020-06-09.
- [33] BANU T P,BORLEA G F,BANU C.The use of drones in forestry[J].Journal of environmental science and engineering B,2016,5:557-562.
- [34] WANG J R,WANG S Q,ZOU D X,et al.Social network and bibliometric analysis of unmanned aerial vehicle remote sensing applications from 2010 to 2021[J].Remote sensing,2021,13(15):1-16.
- [35] 王娟,陈永富,陈巧,等.基于无人机遥感的森林参数信息提取研究进展[J].林业资源管理,2020(5):144-151.
- [36] 徐信罗,陶欢,李存军,等.基于 Faster R-CNN 的松材线虫病受害木识别与定位[J].农业机械学报,2020,51(7):228-236.
- [37] SYIFA M,PARK S J,LEE C W.Detection of the pine wilt disease tree candidates for drone remote sensing using artificial intelligence techniques [J].Engineering,2020,6(8):919-926.
- [38] 胡馨月,倪海明,戚大伟.基于无人机影像的树木株数提取[J].森林工程,2021,37(1):6-12.
- [39] NANSEN C,ELLIOTT N.Remote sensing and reflectance profiling in entomology[J].Annual review of entomology,2016,61:139-158.
- [40] ESSERY R,BUNTING P,ROWLANDS A,et al.Radiative transfer modeling of a coniferous canopy characterized by airborne remote sensing[J].Journal of hydrometeorology,2008,9(2):228-241.
- [41] 黄耀欢,李中华,朱海涛.作物胁迫无人机遥感监测研究评述[J].地球信息科学学报,2019,21(4):512-523.
- [42] 武红敢,王晗,常原飞,等.鸟议枯死松树的天空地协同监测技术体系建设[J].中国森林病虫害,2020,39(3):35-39.
- [43] GHASSEMIAN H.A review of remote sensing image fusion methods[J].Information fusion,2016,32:75-89.
- [44] WEI G E,SUN P J,JIANG S N,et al.The driving influence of multi-dimensional urbanization on PM_{2.5} concentrations in Africa; New evidence from multi-source remote sensing data,2000-2018[J].International journal of environmental research and public health,2021,18(17):9389.
- [45] 徐培林,周兴霞,余安平.松材线虫病天空地一体化立体监测技术[J].测绘,2020,43(3):104-108.
- [46] 刘金沧,王成波,常原飞.基于多特征 CRF 的无人机影像松材线虫病监测方法[J].测绘通报,2019(7):78-82.
- [47] CHEN S M,HUO A D,GUAN W K.Remote sensing monitoring method for groundwater level on aeolian desertification area [J].Journal of water chemistry and technology,2020,42(6):522-529.
- [48] 李爱农,尹高飞,张正健,等.基于站点的生物多样性星空地一体化遥感监测[J].生物多样性,2018,26(8):819-827.
- [49] LIU C,LIU W B,XING W W.An improved edge-based level set method combining local regional fitting information for noisy image segmentation [J].Signal processing,2017,130:12-21.
- [50] 元兴兰,曹祖宁,刘健,等.基于卫星遥感影像的森林病虫害监测研究进展[J].林业资源管理,2020(2):181-186.
- [51] 褚龙现,张琳.基于 GIS 的森林资源数据库系统的设计[J].中南林业科技大学学报,2012,32(6):48-54.
- [52] 王志宝,赵飞飞,赵仁辉,等.基于 2D/3D GIS 的林业病虫害灾害远程视频监控[J].东北林业大学学报,2013,41(4):66-70,75.
- [53] 王晓巍.森林病虫害遥感监测技术研究的现状与问题[J].吉林农业,2014(7):81.
- [54] QI H X,ZHU B Y,WU Z Y,et al.Estimation of peanut leaf area index from unmanned aerial vehicle multispectral images[J].Sensors,2020,20(23):1-15.
- [55] 曹静.智能无人机遥感技术在农业植保中的应用[J].乡村科技,2020,11(31):112-113.