

森林病虫害遥感监测与智能预警系统设计

李乔昕 陈艳梅

沙坡头区林业技术推广服务中心 宁夏 中卫 755000

摘要：森林是地球生态系统的核心，其健康关乎全球生态安全、生物多样性及碳汇功能稳定。但森林病虫害频发与蔓延对森林资源有严重威胁。传统地面调查方法应对大范围、突发性病虫害时，存在效率低、成本高、时效性差等缺陷。为此，本文设计一套融合多源遥感数据与人工智能技术的“森林病虫害遥感监测与智能预警系统”。该系统基于“空-天-地”一体化观测体系，整合卫星、无人机及地面传感器数据，构建全流程技术框架。核心创新是引入深度学习模型精细分割早期受害林分，结合时间序列分析与生态学模型建立动态、可解释的智能预警机制。本文详述系统架构、关键技术模块与工作流程，该系统可提升监测精度、广度和时效性，为林业部门提供决策支持，具有重要理论与实践意义。

关键词：森林病虫害；遥感监测；智能预警；多源数据融合；“空-天-地”一体化

引言：森林是“地球之肺”，在碳循环、气候调节等方面有关键作用。但近年受气候变化、极端天气及人类活动影响，森林病虫害范围扩大、危害程度加重，我国重大林业有害生物每年造成的损失巨大，威胁生态安全。传统的森林病虫害监测主要依赖人工地面踏查，专业技术人员深入林区，通过目视观察、样地调查等方式进行。这种方法虽直观准确，但面对广袤复杂的森林区域，局限性愈发凸显。人力成本高昂，难以全面覆盖大面积区域；调查周期长，无法满足病虫害早期发现、快速响应的需求；在地形复杂、交通不便或危险区域，人工调查更是难以开展。在此背景下，遥感技术凭借其宏观、快速、非接触、周期性重复观测的独特优势，为森林病虫害监测带来了革命性的变革。高分辨率光学卫星、合成孔径雷达、激光雷达以及无人机平台的迅猛发展，让我们能够以前所未有的时空分辨率获取森林冠层的光谱、纹理、结构等多维信息，为病虫害早期诊断提供可能^[1]。同时，以深度学习为代表的人工智能技术在图像识别等领域取得突破。将AI技术与遥感大数据深度融合，构建集“感知-认知-决策”于一体的智能系统，成为实现森林病虫害精准防控的关键路径。因此，设计高效可靠的“森林病虫害遥感监测与智能预警系统”是林业现代化和数字生态文明建设的重要举措。

1 系统总体设计

本系统采用模块化、分层式的设计思想，确保各功能组件的高内聚、低耦合，便于系统的开发、维护与升级。整体架构可分为四个层次。

1.1 感知层

感知层是系统的数据源头，负责采集多维度、多尺

度的原始观测数据，构成“空-天-地”一体化的立体监测网络。天基层主要利用免费、开放的中高分辨率卫星数据，如欧洲航天局的Sentinel-2、美国NASA的Landsat 8/9以及我国的高分系列，这些数据提供大范围、周期性的宏观监测能力。空基层则部署无人机搭载多光谱、高光谱或热红外相机，在重点区域或疑似疫点进行厘米级分辨率的精细化、应急性观测，有效弥补卫星数据在空间分辨率和时效性上的不足。地基层在关键林区布设物联网传感器网络，实时采集温度、湿度、土壤水分、虫情测报灯数据等环境因子和虫口密度信息，这些地面实况数据对于模型训练、验证和预警至关重要。

1.2 数据层

数据层是系统的“心脏”，负责对来自感知层的海量、异构数据进行统一存储、管理和预处理。系统采用分布式文件系统或对象存储构建数据湖，以原始格式存储所有接入的数据，保留其最大信息量；同时使用关系型数据库存储结构化元数据和矢量化的监测成果。在此基础上，建立自动化的数据处理流水线，执行辐射定标、大气校正、几何精校正、影像配准、云/阴影掩膜、镶嵌裁剪等标准化操作，生成可供算法层直接使用的高质量分析就绪数据（Analysis Ready Data, ARD），为上层智能分析奠定坚实的数据基础。

1.3 算法层

算法层是系统的核心智能引擎，包含两大核心功能模块。智能识别模块接收预处理后的遥感影像，利用深度学习模型自动检测并精确分割出受害林分的空间范围，这是实现精准监测的基础。智能预警模块则综合智能识别结果、历史病虫害发生数据、实时气象预报、寄

主树种分布、地形地貌等多源信息,通过机器学习模型预测未来一段时间内病虫害的发生概率、扩散趋势和潜在风险等级,生成预警信息,从而完成从状态感知到未来预判的跨越。

1.4 应用层

应用层是系统与用户的交互界面,负责将算法层的分析结果以直观、易用的方式呈现给林业管理者和决策者。系统基于WebGIS技术构建交互式地图,动态展示受害林分分布、历史变化、预警热力图等空间信息^[2]。同时,通过短信、邮件、APP推送等方式,将分级预警信息及时发送给相关责任人,确保信息传递的时效性。此外,系统还提供统计报表、扩散模拟、防治方案建议等功能,为制定科学的防控策略提供全方位的数据支撑和决策辅助。

2 多源遥感数据协同获取与预处理

高质量的数据是系统成功的前提。本节将详细介绍多源数据的获取策略与标准化预处理流程。

2.1 “空-天-地”协同观测策略

系统采用“宏观普查+微观详查+地面验证”的协同策略,以实现监测效率与精度的最优平衡。宏观普查利用Sentinel-2数据对整个管辖区域进行常态化扫描,通过计算植被指数的时间序列,初步圈定植被活力异常的“嫌疑区”。一旦发现嫌疑区,立即调度无人机对该区域进行高分辨率航拍,利用多光谱或高光谱相机捕捉更细微的生理生化变化,实现微观详查。与此同时,同步派遣地面调查队伍,对遥感识别出的受害区域进行实地核查,采集样本,记录受害程度、虫种等信息,形成“黄金标准”数据集,用于模型训练和精度验证,从而完成从宏观筛查到微观确认再到地面实证的完整闭环。

2.2 标准化数据预处理流程

为了确保不同来源、不同时相的数据具有可比性,必须进行严格的预处理。首先,将卫星或无人机影像的DN值通过辐射定标与大气校正转换为地表真实反射率,消除传感器和大气的影响。接着,利用地面控制点或高精度DEM,将影像校正到统一的地理坐标系下,并将不同时相、不同传感器的影像精确对齐,确保空间位置的一致性。随后,采用Fmask等算法生成云/阴影掩膜,并通过插值或同区域无云影像替代的方法进行修复,以保证数据的完整性^[3]。最后,在原始波段的基础上,计算一系列衍生特征,包括反映植被生长状况的光谱指数(如NDVI、EVI)、描述林冠结构均匀性的纹理特征(如GLCM熵、对比度)以及刻画植被活力动态变化趋势的时间序列特征(如斜率、季节性振幅)。经过上述一系列

标准化处理,最终得到一个包含多波段、多特征、时空对齐的高质量数据立方体,为后续的智能算法提供可靠输入。

3 核心算法设计

3.1 基于深度学习的受害林分智能识别

病虫害早期,受害树木的叶绿素含量、叶片含水量、冠层结构会发生改变,导致其光谱反射特性偏离健康状态。深度学习模型能够自动从海量像素中学习这些复杂的、非线性的模式。本文提出一种混合深度学习架构,结合U-Net++的精细分割能力和Vision Transformer(ViT)的全局上下文感知能力。具体而言,输入影像首先经过一个共享的卷积骨干网络进行初步特征提取,然后被送入两个并行分支:一个分支接入U-Net++进行像素级分割,以捕捉受害区域的局部细节和精确轮廓;另一个分支将特征图重塑为序列,输入ViT以获取全局语义信息,理解受害区域在整个林班中的空间分布模式。最终,将U-Net++的输出与ViT的全局特征进行融合,得到最终的受害概率图。该模型不仅能给出“哪里受害”,还能在一定程度上解释“为何是这里受害”。在训练过程中,利用地面验证获取的标注数据集对模型进行端到端训练,采用Dice Loss和Focal Loss的组合损失函数以应对正负样本极度不平衡的问题,并通过数据增强来提升模型的泛化能力。

3.2 动态智能预警模型

识别出当前受害区域只是第一步,更重要的是预测其未来的发展态势。预警模型是一个多因子、动态的系统。首先,需要构建一个全面的预警因子体系,该体系不仅包含遥感监测所得的当前受害面积、强度和斑块形态特征,还应整合未来气象预报数据、寄主树种的空间分布、林龄结构、历史病虫害记录乃至道路网络等人为活动因子。在此基础上,预警模型的构建分为三个步骤:首先,利用长短期记忆网络(LSTM)处理关键指标的时间序列数据,捕捉其内在的动态演化规律;其次,结合元胞自动机(CA)等方法模拟病虫害在空间上的潜在扩散路径,扩散概率受距离、风向、寄主连通性等因素影响;最后,将所有因子作为输入,训练一个梯度提升树或全连接神经网络,输出未来T天内每个像元或林班的病虫害发生风险概率。该模型的优势在于其可解释性较强,可以通过特征重要性分析,明确告知管理者哪些因素是当前风险的主要驱动因子^[4]。最终,根据风险概率的高低,将预警等级划分为四级,并通过应用层进行发布,为林业部门的主动防控提供科学依据。

4 标准化业务应用流程

系统的业务应用遵循一个闭环、动态的标准化流程，该流程始于常态化的数据获取，终于科学的防控决策，并持续迭代优化。首先，在常态化监测阶段，系统后台自动调度天基卫星（如Sentinel-2）按固定周期对管辖区域进行扫描，生成植被指数时间序列。算法层持续分析这些序列，一旦检测到某区域的植被活力出现显著且持续的异常下降，系统会自动将其标记为“初步嫌疑区”。其次，进入精细化核查阶段，系统会根据预设规则（如嫌疑区面积、变化速率等）或人工指令，自动生成无人机飞行任务。无人机随即对嫌疑区进行高分辨率航拍，获取厘米级的多光谱影像。智能识别模块立即处理这些影像，精确勾绘出受害林分的边界和受害程度，并将结果推送至应用层。与此同时，系统会向基层护林员的移动终端发送核查任务，要求其携带智能设备前往现场进行地面验证，补充虫种、树种、受害等级等关键信息，并上传照片和定位。这一“空-天-地”协同的核查机制，确保了监测结果的准确性。再次，在智能预警与决策阶段，系统整合遥感识别结果、地面验证数据、未来气象预报、寄主分布图等多源信息，由预警模型计算出未来7-15天内各区域的风险概率，并生成蓝、黄、橙、红四级预警地图。林业管理者可以通过WebGIS平台直观查看风险态势，系统还会自动向相关责任人推送预警信息。基于这些信息，管理者可以科学地制定和下达防治指令，例如划定疫木采伐范围、部署诱捕器、安排生物农药喷洒等。最后，在效果评估与反馈阶段，在防治措施实施后，系统会再次调度遥感观测，对防治区域进行跟踪监测，评估受害面积是否缩小、植被活力是否恢复，从而量化防治效果。这些评估结果和新的地面调查

数据又会作为反馈，用于优化和校准识别与预警模型，形成一个“监测-预警-决策-评估-优化”的完整业务闭环，不断提升系统的智能化水平。

结语

本文针对森林病虫害防控需求，设计并初步建成“森林病虫害遥感监测与智能预警系统”。该系统构建“空-天-地”一体化感知网络，协同获取多源数据；研发U-Net++与Vision Transformer结合的深度学习模型，提高受害林分识别精度，尤其对早期受害敏感；融合多维驱动因子，建立动态可解释的智能预警模型，助林业部门主动防控。主要贡献是形成完整技术闭环，推动监测从“被动响应”转向“主动预警”。不过，系统有完善空间：当前模型主要针对松材线虫病，未来要引入更多病虫害数据构建通用模型；处理流程有延迟，需用边缘计算和模型轻量化提升近实时响应能力；还应深化AI与病虫害机理融合，为绿色防控提供更精准指导。

参考文献

- [1]李洪波.基于遥感图像识别技术的森林病虫害监测研究[J].乡村科技,2025,16(22):120-123.
- [2]杨慧,王芊,陈国锐,等.人工智能在森林病虫害自动识别和监测技术中的应用[J].甘肃科技,2025,41(11):94-98.
- [3]蒋凯薇.森林病虫害智能监测预警系统的构建与应用[C]//郑州市社会学学会.2025年社会学研讨会人文与发展分论坛论文集(下册).诸暨宏枫林业勘察设计有限公司,2025:198-200.
- [4]安康,秦伟.智能监测系统对森林病虫害早期预警的实现路径[J].新农民,2025,(17):99-101.