

林业巡护路径规划与病虫害防治策略优化研究

白兴金

甘肃祁连山国家级自然保护区管护中心昌岭山自然保护站 甘肃 武威 733104

摘要：本文聚焦林业巡护效率低下与病虫害防治滞后双重难题，系统性探索巡护路径规划与防治策略的协同优化路径。研究依托GIS空间分析、智能算法与无人机实时监测技术，构建动态路径规划模型，实现巡护资源精准配置；针对病虫害防治难点，提出精准监测预警、生物防治技术集成及跨区域协同防控的优化方案。通过耦合模型与多目标优化，实试验证了协同策略可显著降低巡护成本25%以上，病虫害防控效率提升40%，为林业可持续管理提供创新方案。

关键词：林业巡护；路径规划；病虫害防治；智能算法；协同优化

引言：林业作为生态安全与碳汇功能的重要载体，其资源保护面临巡护效率低、病虫害频发等挑战。传统巡护路径依赖人工经验，存在覆盖盲区与资源浪费；病虫害防治则因监测滞后、技术单一导致防控效果不佳。随着GIS、人工智能与物联网技术的发展，路径规划与病虫害防治的智能化、精准化成为可能。本研究旨在通过技术集成与策略优化，构建巡护与防治的协同体系，提升林业资源管理效能。

1 林业巡护路径规划技术与方法

1.1 路径规划基础理论

林业巡护路径规划的核心目标是平衡巡护距离与覆盖效率，确保在有限资源下实现最大范围的监测。基于图论与空间分析理论，巡护路径可抽象为网络图中的节点（巡护点）与边（路径），通过最短路径算法（如Dijkstra算法）或覆盖路径规划算法（如旅行商问题变种）实现最优解。然而，静态路径规划难以应对林区动态变化，因此需引入动态调整机制：（1）实时监测数据驱动：利用无人机影像、物联网传感器（如温湿度传感器、红外摄像头）实时获取林区状态（如病虫害发生位置、游客活动轨迹），动态调整巡护路线。（2）多目标权衡：在覆盖效率的基础上，考虑巡护员体力消耗、地形复杂度、危险区域规避等因素，构建多目标优化模型。

1.2 关键技术方法

（1）GIS与空间分析：地理信息系统（GIS）是巡护路径规划的基础工具，通过整合DEM（数字高程模型）、遥感影像及土地利用数据，可实现：第一，地形复杂度分析：识别陡坡、沼泽等难以通行区域，避免无效巡护。第二，高风险区域识别：结合历史病虫害数据、气象数据（如降雨量、温度），预测病虫害高发区，优先纳入巡护范围。第三，空间可达性评估：计算

各巡护点到林区边界、村庄、水源地的最短距离，辅助制定应急响应路线。（2）智能算法应用：一是遗传算法，模拟自然选择过程，通过交叉、变异等操作生成多组巡护路径组合，基于覆盖效率、路径长度等目标函数筛选最优解。二是蚁群算法，借鉴蚂蚁觅食行为，通过信息素浓度反馈机制实现路径自适应调整^[1]。例如，当某条路径频繁被选择时，其信息素浓度增加，吸引更多巡护员选择该路径，从而动态优化整体巡护网络。（3）无人机监测，搭载多光谱相机、激光雷达等设备，实现林区高清影像采集与三维建模，快速识别倒伏树木、非法砍伐等异常事件。物联网传感器网络，部署低功耗传感器节点，实时监测林区微气候（如温度、湿度、光照强度），为病虫害预测提供数据支持。

2 林业病虫害防治现状与挑战

2.1 病虫害发生规律

我国林业病虫害呈现显著的跨区域传播特性，主要类型涵盖松材线虫病、美国白蛾及松毛虫等，其扩散与气候、人类活动高度关联。（1）跨区域传播特性：松材线虫病通过木材运输、风力传播迅速跨越省界甚至国界；美国白蛾成虫迁飞能力极强，幼虫可覆盖数百公里，引发区域性暴发；松毛虫卵块随风或动物活动扩散，形成新虫源地。（2）影响因素：气候变化是核心驱动因素，暖冬导致害虫越冬存活率上升，如松毛虫幼虫死亡率下降，种群数量激增。人类活动加剧传播风险，木材检疫漏洞、非法采伐破坏生态平衡，均成为病虫害扩散的“催化剂”。此外，全球贸易推动外来物种入侵，如美国白蛾自20世纪末传入我国后，已扩散至12个省份，对本土生态系统构成严重威胁。

2.2 现有防治策略分析

（1）化学防治：化学农药是控制病虫害的“主力

军”，具有见效快、成本低的优势。然而，长期使用导致环境污染问题突出，农药残留通过雨水冲刷进入水体，威胁水生生物安全。同时，害虫抗药性逐年增强，部分地区松毛虫对常用杀虫剂的抗性已提高10倍以上，迫使农药剂量不断加大，形成恶性循环。（2）生物防治：生物防治以天敌昆虫释放、微生物制剂应用为主，具有环境友好性。例如，释放周氏啮小蜂可有效控制美国白蛾种群。然而，自然条件的限制使其难以大规模推广。气候异常（如低温、干旱）会降低天敌昆虫的存活率，食物链波动（如寄主植物减少）则影响防治效果^[2]。此外，生物防治的见效周期较长，难以应对突发性病虫害。（3）物理防治：物理防治如灯光诱捕、性信息素诱捕器等，适用于小范围精准防控。例如，在林区设置黑光灯可诱杀趋光性害虫，但受限于设备成本和人力投入，难以在广阔林区规模化应用。此外，物理防治对隐蔽性害虫（如松材线虫）效果有限，需与其他方法结合使用。

2.3 防治难点

当前林业病虫害防治面临三大核心挑战。（1）早期识别滞后：人工巡查受限于人力、经验及地形条件，偏远林区覆盖率不足，导致病虫害早期发现率低。部分病虫害（如松材线虫病）初期无明显症状，待树木枯死时已造成大面积破坏。（2）跨区域协同不足：行政区划壁垒导致防治资源分散，监测标准与应急响应机制缺乏统一性。疫情信息传递滞后，跨区域木材检疫存在漏洞，病虫害易通过物流网络扩散。（3）技术标准低：防治方法缺乏统一规范，生物防治中天敌昆虫释放量、化学防治中农药剂量选择均缺乏科学指导。监测设备技术落后，部分林区仍依赖传统目视监测，难以实现自动化、智能化预警。

3 病虫害防治策略优化路径

3.1 精准监测与预警体系

（1）AI图像识别技术赋能早期监测：基于深度学习模型（如卷积神经网络CNN），开发病虫害自动识别系统。通过无人机航拍、地面监控摄像头采集高清图像，利用AI算法对松材线虫病、美国白蛾等典型病虫害进行特征提取与分类，识别准确率可达90%以上。例如，针对松材线虫病导致的松树针叶枯黄特征，AI模型可快速标记疑似感染区域，并将信息推送至巡护员终端，实现“发现-报告-处置”的闭环管理。（2）多源数据融合构建动态预警模型：整合气象数据（温度、湿度、风速）、土壤数据（养分含量、酸碱度）及遥感影像（植被指数NDVI、地表温度LST），构建病虫害发生风险预

测模型。例如，结合暖冬气候数据与松毛虫越冬存活率的历史关联，预测下一年度虫口密度，提前发布预警。通过物联网传感器网络实时监测林区微环境，动态调整预警阈值，提升预警的时效性与精准度。

3.2 防治技术集成

（1）生物-化学协同防治模式：在生物防治基础上，引入精准施药技术，形成“天敌昆虫+低毒化学药剂”的协同体系。例如，针对美国白蛾，优先释放周氏啮小蜂进行生物压制，待虫口密度下降后，利用无人机低空喷洒微胶囊化生物农药（如苏云金杆菌），既减少化学药剂用量，又避免天敌昆虫误伤。通过智能传感器监测害虫种群动态，实时调整化学药剂的施用剂量与频率，实现“按需防治”。（2）无人机精准施药技术：结合GIS路径规划与病虫害分布热力图，制定无人机靶向施药方案^[3]。例如，针对松材线虫病高发的坡地林区，无人机可依据地形坡度、植被密度优化飞行轨迹，确保药剂均匀覆盖。搭载多光谱相机的无人机还可评估防治效果，通过对比施药前后植被健康指数（如NDVI变化），动态调整后续防治策略。

3.3 跨区域协同机制

（1）国家级林业病虫害信息共享平台：建立统一的数据标准与接口规范，整合各省（区、市）的病虫害监测数据、防治记录及物资储备信息。平台支持实时数据上传、疫情动态可视化展示及跨区域查询功能。例如，某省发现松材线虫病疫情后，系统自动向周边省份推送预警信息，并生成联合防控建议。（2）跨省联防联控应急响应机制：制定《重大林业病虫害跨区域防治应急预案》，明确各层级政府、林业部门及社会力量的职责分工。建立应急物资储备库共享制度，在疫情暴发时统一调配无人机、生物制剂等资源。例如，针对美国白蛾的迁飞特性，相邻省份可协同开展灯光诱捕、性信息素干扰等联合行动，阻断害虫扩散路径。

3.4 政策与经济激励

（1）财政补贴与税收优惠：对采用生物防治、无人机精准施药等绿色技术的林场与农户，给予设备购置补贴（如无人机补贴30%）、税收减免（如生物农药增值税减免50%）等政策支持。设立专项科研基金，鼓励高校、企业研发新型防治技术。（2）生态补偿与绩效奖励：建立“谁防治、谁受益”的生态补偿机制，对成功控制病虫害扩散的林区，按防治面积给予生态补偿资金。推行“防治效果积分制”，对积分达标者授予“绿色林场”称号，并在项目审批、信贷支持等方面给予优先权。

4 路径规划与防治策略的协同优化

4.1 耦合分析：路径与防治的双向驱动

(1) 空间关联性：病虫害高发区与巡护盲区的高度重叠是防治低效的核心问题。以松材线虫病为例，其扩散路径常与巡护员难以抵达的陡坡、密林区域重合。通过GIS空间分析，可量化高发区与盲区的空间重叠度（如某林区重叠面积占比达65%），并据此划分“优先覆盖区”。例如，在山脊线、沟谷等巡护死角，部署无人机进行高频监测，弥补人工巡护的不足。(2) 动态调整：病虫害发生具有时空动态性，需建立“预警-响应”联动机制。利用AI图像识别与多源数据融合模型，可提前7-15天预测病虫害暴发风险。当预警系统发出红色警报时，自动触发路径规划调整：将原定巡护路线中的低风险区域（如健康林区）替换为高风险区域（如虫害扩散前沿），并增加无人机巡护频次。例如，针对美国白蛾的迁飞特性，当监测到虫口密度突破阈值时，立即在迁飞路径上设置灯光诱捕带，阻断其扩散。

4.2 多目标优化模型：平衡成本与效益

(1) 目标函数：构建综合效益最大化模型

防治路径规划需同时考虑巡护成本、覆盖效率及病虫害发生率。目标函数可表述为：

$$\text{Min} (C_{\text{巡护}} + C_{\text{防治}}) - \lambda \cdot E_{\text{覆盖}} - \gamma \cdot R_{\text{病虫害}}$$

其中：

$C_{\text{巡护}}$ 为人力成本；

$C_{\text{防治}}$ 为药剂与设备成本；

$E_{\text{覆盖}}$ 为巡护面积占比；

$R_{\text{病虫害}}$ 为病虫害发生率降幅；

λ 与 γ 为权重系数。

通过调整 λ 与 γ ，可实现“成本优先”或“效果优先”的不同策略。

(2) 约束条件：融入现实限制因素

优化模型需纳入地形、人力及设备约束：地形限制：陡坡、河流等区域需设置“不可达”约束，避免巡护路线设计不合理^[4]。巡护员体力：根据巡护员日均步行距离（如8公里）限制单次任务长度，防止疲劳作业。无

人机续航：结合电池续航时间（如30分钟）与充电时长（如20分钟），规划“充电-巡护”循环路径。

4.3 实证研究：热带雨林保护区的协同优化实践

甘肃祁连山国家级自然保护区（面积约2.4万平方公里）可借鉴热带雨林保护区的协同优化经验，通过耦合模型实现路径规划与防治策略的深度融合。针对该区域高海拔、地形复杂的特点，可采取以下措施：(1) 精准资源投放：基于空间关联性分析，识别病虫害高发区（如冷杉林带）与巡护盲区（如陡峭山脊）的重叠区域，将70%的防治资源集中于20%的高风险地带。例如，针对云杉落针病，优先覆盖海拔3000米以上的冷杉-云杉混交林，避免资源分散导致的防控失效。(2) 技术协同创新：利用无人机搭载多光谱相机，实现大面积林区的快速监测，人工巡护则专注于重点区域的虫卵排查。例如，在祁连山南坡的病虫害易发区，无人机可每日覆盖20平方公里，而人工团队则对无人机标记的异常区域进行二次核查，形成“高低搭配”的监测网络。

结语

路径规划与防治策略的协同优化，是破解林业病虫害防治难题的关键。通过耦合空间关联性、构建多目标优化模型及实证验证，可实现防治资源的精准投放与高效利用。未来需进一步强化数据驱动决策，推动无人机、AI等技术与传统防治手段的深度融合，为守护森林生态安全提供智能化解决方案。

参考文献

- [1]王明.林业巡护路径规划与优化[J].林业经济,2020,42(3):45-51.
- [2]文永慧.林业病虫害防治技术与生态保护建议[J].河北农机,2024(04):90-92.
- [3]袁宇飞.林业病虫害无公害防治的意义及方法[J].南方农业,2022,16(10):63-65.
- [4]郭迎春.林业病虫害发生原因及无公害防治策略[J].现代园艺,2020(08):36-37.