

## Optifor Research

ePublications@optifor

Simulation Optimization Lab

Decision-Support Systems

Parallel System Lab

Simulation Models

---

General Technical Report

OR-GTR-725

2024

# Smart Forestry: from observation, prediction, to decision

Proceedings of the 9th National Forestry Conference, Session 42-Smart Forestry

July 26-29, 2024

Yangling, CN

Tianjian Cao, Technical Editor

Northwest A&F University, cao@nwafu.edu.cn

---

### Suggested Citation

Cao, T. tech. ed. 2024, Smart Forestry: from observation, prediction, to decision. Proceedings of the 9th national forestry conference, Session 42-Smart Forestry. Gen. Tech. Rep. OR-GTR-725. Yangling, CN. Simulation Optimization Lab, Optifor Research.

ePublications@optifor is an electronic repository administered by Optifor Research. Its goal is to capture and preserve the intellectual output of applications of AI in natural resources management, and to increase visibility and impact through open access to researchers around the world. For further information please visit [www.optifor.cn](http://www.optifor.cn).

## Contents 目录

- 3 智慧林业分会场专家 Keynote Speakers and Invited Referees
- 6 智慧林业分会场议程 Agenda of Session 42-Smart Forestry
- 9 智慧林业分会场论文 Manuscripts and Abstracts
- 10 智慧林业研究前沿与展望——IUFRO 第 26 届世界大会智慧林业议题综述
- 17 物联网边缘计算在智慧林业上的应用
- 26 高清时序数据驱动下的松材线虫病智能防控解决方案
- 27 基于 Landsat-MODIS 图像填充与时空融合的红树林物候优化提取
- 29 可穿戴的林草消防员险情辨识与定位搜救
- 30 中国南方天然林气候敏感转移矩阵生长模型的建立
- 31 天然林碳汇量计算及监测样地布设支持系统构建
- 32 特征选择和混合效应的加入改善了随机森林模型对单木枯死的预测
- 33 林分密度调控决策支持系统研究
- 34 基于卫星观测与能量平衡模型的森林空间变化对区域气候的影响
- 35 森林树(碳)表和森林树网研制及产业化
- 36 Geospatial assessment of climate and human pressure on Snow Leopard habitat in the Trans-Himalayan region of Pakistan

## 智慧林业分会场特邀专家

### Keynote Speakers and Invited Referees

**周国模**，二级教授，博士生导师，浙江农林大学原党委书记、校长，浙江省特级专家、国务院特殊津贴专家，全国高校黄大年式教师团队“林业碳汇教师团队”带头人。现为国家林业和草原局应对气候变化专家咨询委员会委员，浙江省林业局林业碳汇专家咨询委员会主任，浙江省气候变化专家委员会副主任；亚热带森林培育国家重点实验室主任，国家林业和草原局竹林碳汇工程技术研究中心主任，浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室主任，浙江省重点创新团队“林业碳汇与计量科技创新团队”带头人。长期从事森林固碳机理与增汇技术、碳汇监测与计量及森林对气候变化的响应等方面的研究，获国家科技进步二等奖 3 项，浙江省科学技术一等奖 2 项。作为森林碳汇方面的专家，连续 11 年应邀出席联合国气候变化大会。

**郭新宇**，男，博士，国家农业信息化工程技术研究中心研究员，博士生导师。现任北京市农林科学院数字植物北京市重点实验室主任。为中国图学会学会动漫图学工程专委会副主任委员、林草三维可视化技术应用国家创新联盟理事会副理事长、中国作物学会智慧农业专委会委员、中国生物技术学会作物表型专业委员会委员、中国仿真学会第一届农业建模与仿真专业委员会委员。主要从事作物表型大数据获取解析与多组学研究，作物系统模拟与决策、作物三维可视化技术系统和农业数字孪生与元宇宙系统研发工作。先后主持完成国家和省部级科研项目 20 多项，目前主持 1 项“十四五”国家重点研发计划项目；以第一或通讯作者在 *Plant Biotechnology Journal*、*Crop Journal*、*Agricultural and Forest Meteorology*、*Agricultural Water Management*、*Plant Phenomics*、*Computers and Electronics in Agriculture* 等 SCI 期刊发表学术论文 50 多篇，参与编写专著 4 部；以第一完成人获得国家发明专利授权 42 项，组织获得计算机软件著作权登记 140 多项，获得北京市新技术新产品服务证书 12 项，获得省部级科技奖励 5 项。

**王美丽**，女，工学博士，西北农林科技大学信息学院教授，博士生导师。主要研究方向为计算机图形学、计算机视觉和智慧农业。担任中国虚拟现实技术与产业创新平台专家委员，陕西省图象图形学学会常务理事，《中国图象图形学报》青年编委，《南京林业大学学报》青年编委等。主持国家自然科学基金、重点研发计划子课题等项目 30 余项。以第一作者或通讯作者在《*Transaction on Multimedia*》《*Computer-Aided Design*》《*Computer Graphics Forum*》、AAAI、ECCV 等公开发表论文 60 余篇，授权发明专利 7 项并转化专利 1 项，获得陕西高等学校科学技术研究优秀成果奖 1 项，陕西科技进步三等奖 1 项。

**傅隆生**，西北农林科技大学教授、博士生导师，中国农业大学本硕、日本北海道大学博士、美国华盛顿州立大学博士后，中科院一区 Top 期刊 *Computers and Electronics in Agriculture* (IF: 8.3) 主编、中科院基础版一区 Top 期刊 *Precision Agriculture* (IF: 6.2) 副主编、中科院一区 Top 期刊 *Biosystems Engineering* (IF: 5.2) 编委、*International Journal of Agricultural and Biological Engineering* (IF: 2.4) 栏目编辑，国际标准化组织农林拖拉机和机械标准化技术委员会/农业电子分技术委员会 (ISO/TC 23/SC 19) 委员、全国农业机械标准化技术委员会农业电子分技术委员会 (SAC/TC201/SC6) 委员、陕西省标准化专家，入选 *World top 2% scientists* (全球前 2% 科学家榜单)、陕西省高校青年杰出人才、北京优秀毕业生。长期从事智慧农业技术与装备研究，主要围绕果园全程自动化与智能化生产开展创新研究，在果园疏蕾、授粉、疏果、采摘、剪枝等自动作业机器人，智能化测产、高通量自动化表型、智能化振动采收、病害识别方法及 App 等方面取得显著成果。主持国家自然科学基金 3 项、科技部国际合作项目 3 项、陕西省重点研发计划揭榜挂帅项目等省部级项目 7 项，一作/通讯 SCI 论文 34 篇 (ESI 高被引 7 篇)、EI 论文 85 篇，授权国际专利 2 项、中国发明专利 14 项，制定标准 2 项，获陕西省第十五届自然科学优秀学术论文奖、陕西高等学校科学技术研究优秀成果奖、美国农业与生物工程师学会 (ASABE) 2022 年 ITSC Paper Awards、中国科技期刊农林学科 2021 年优秀论文奖、中国农业工程学会 40 周年优秀论文奖等。

**刘金福**，男，理学博士，博士后，教授、博士生导师，福建省 2022 年高层次人才，原福建农林大学计算机与信息学院副院长、统计学科带头人、院教授委员会主任。现任福建农林大学海峡自然保护区研究中心主任、湿地保护研究中心主任，生态与资源统计福建省高校重点实验室主任、野生动植物保护与利用学科带头人、福建省野生动植物保护协会副会长、第二届全国林业和草原信息标准化技术委员会委员、数字福建专家组成员、闽侯县人民检察院专家咨询委员会委员、《林业科学》《森林与环境学报》《武夷科学》等刊物编委。被评为福建省“百千万人才工程”人选培养对象、福建省新长征突击手、福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划。主要从事智慧林业、生物统计学、自然资源调查与统计、空间统计与信息可视化等。主持省一流线下课程《生物统计学》、“统计学”省一流专业，主持《生物统计学》等 3 门省级精品课程，省校级教学成果 15 项；主持国家自然科学基金面上基金、教育部博士点基金、中国博士后科学基金、国家统计局、中央引导地方科技发展专项，省科技厅重大专项等 20 多课题，横向社会课题 30 多项，福建省科技进步二三等奖 7 项，4 项国家发明专利、4 项实用新型专利、6 项软件著作权；在《林业科学》《Journal of Mountain Science》《植物生态学报》等国内外核心刊物发表论文 200 多篇，主持《中国格氏栲》《戴云山自然保护区植物群落生态学研究》《统计学》等 8 部专著。

**董利虎**，男，农学博士，教授，博士生导师，东北林业大学林学院副院长，林草科技创新青年拔尖人才。现任中国林学会青工委副主任委员、中国林学会森林经理分会副秘书长、国务院学位委员会第八届林学学科评议组秘书，《应用生态学报》编委、《林业科学》青年编委。主要从事森林生长模型及模拟、森林生物量和碳储量估算、森林资源调查方面的研究；主持国家重点研发计划青年科学家项目 1 项，子课题 2 项，国家自然科学基金 3 项，省优青项目 1 项，其他省部级项目 3 项；以第一或通讯作者发表论文 80 余篇，其中 SCI 论文 35 篇；作为第一完成人制定地方标准 4 项，参与制定标准 2 项；出版专著 3 部，参编本科、研究生行业规划教材 3 部；获得省部级科技进步二等奖 3 项。

**孟京辉**，男，博士，教授，博士生导师。研究领域为森林经营理论与技术、森林资源调查与监测、林业遥感及林业信息技术、森林生长与收获模型。当前主要研究兴趣聚焦为以森林碳汇提升为目标的森林经营技术、森林监测技术、森林生长预测技术。在社会服务方面，主要从事森林经营方案、森林经营规划、林地利用保护规划、国家储备林规划、森林抚育规划设计、山水林田湖草统一规划、碳汇示范林营建、CCER 碳汇项目开发等工作。以第一作者或通讯作者发表论文 40 余篇，其中 SCI 收录 21 篇，以第一作者出版英文专著 1 部。以唯一发明人身份获得发明专利授权 2 项。主持国家自然科学基金、科技部重点研发项目、国家林草局林草规划评估、江西省林业局林业科技创新专项、北京林业大学科技创新项目等科研项目。熟练掌握英语，掌握基础德语。参与北京林业大学承担的亚太网络英文国际课程录制。具有较为丰富的国际交流经历，曾赴美国、德国、印度尼西亚、蒙古国等国家进行学术交流与工作。曾作为中方主要专家参与世界粮农组织 FAO、全球环境基金 GEF、世界银行、德国 GTZ 等多个国际项目。

**赵颖慧**，女，农学博士，教授，博士生导师；主要从事数字林业、林业遥感与地理信息系统；主持国家自然科学基金面上项目 1 项，国家重点研发“十四五”课题 1 项，国家级课题 8 项，中央高校基本科研业务费专项基金项目 3 项，横向课题 1 项，参加省、部级科研项目 10 余项，发表论文 50 余篇，其中 SCI 论文 10 余篇；出版专著 3 部，获黑龙江省科技进步二等奖 2 项，梁希林业学技术二等奖 1 项，计算机软件著作权 5 项，东北林业大学教学质量优秀二等奖 7 项；2020 年易智瑞杯中国大学生 GIS 软件开发竞赛.遥感应用组优秀指导教师奖。

**曹亮**，男，地理信息工程专业硕士，西安三图信息技术有限公司 GIS 高级架构师、技术总监。从事全国产自主 GIS 研发工作 15 年，主持研发了 mattermap GIS 引擎开发平台(MattermapDesktop、MattermapServer 及 MattermapMoblie)，Mattermap GIS 平台均适配了国产信创产品。在此系列平台支撑下，诞生了国内市场占有率第一的“林调通森林资源调查系统”、服务于林业信息化建设的“智慧林业信息管理云平台”、服务于林业遥感的“易图遥感处理与 AI 识别平台”、服务于森林管护的“易巡无人机远程综合管理与智能巡检平台”。同时获得国家发明专利 2 项，实用新型专利 1 项，著作权 5 项；承担国家省科技计划 3 项。使三图公司成为国内少数几个拥有全自主 GIS 及遥感处理技术的林业信息化综合服务企业，国家高新技术企业，西安市大数据企业，科技小巨人企业，也是国内智慧林草行业的先行者；服务 25 个省份，50+智慧林草项目案例，100+合作单位。

**曹田健**，男，教授，博导，赫尔辛基大学理学博士。Board member of IEEE PMA (Plant growth Modelling, simulation, visualization and Applications) committee ; Referee of FiDiPro (Finland Distinguished Professor Programme), Finnish Funding Agency for Innovation (TEKES); Subject Editor of European Journal of Forest Research; 西北农林科技大学森林经理学团队负责人。先后就职于 Finnish Forest Research Institute (METLA), European Forest Institute (EFI), University of Helsinki (UH) 等大学和科研机构，长期从事运筹学、生物统计学和人工智能算法在自然资源决策支持中的应用研究。主持和承担国家自然科学基金, Academy of Finland, Foundation of Natural Resources in Finland 等项目 10 余项。研发了基于仿真优化的森林和自然资源管理系统 OPTIFOR 和林分仿真器 QUASSI，开发了嵌入式 AI 边缘计算盒和 AI 监测预警主机等 OPTIFOR AI 系列软硬件产品。

## Agenda of Session 42-Smart Forestry S42 智慧林业创新与应用分会场

分会场主题：大数据时代的智慧林业技术与应用

分会场主席：周国模

分会场秘书长：刘金福 孟京辉 董利虎

学术委员会主席：周国模

学术委员会委员：曹田健 王美丽 傅隆生 郭新宇

7月27日（星期六）下午

时间：13:30-18:00 地点：西北农林科技大学南校区 S3203 室

内容：特邀报告

主持人：曹田健（西北农林科技大学林学院，教授）

王美丽（西北农林科技大学信息学院，教授）

13:30-14:10 1. 高清时序数据驱动下的松材线虫病智能防控解决方案

周国模（浙江农林大学，教授）

14:10-14:50 2. 考虑不同气候情景下的天然栎类林经营决策支持系统研究

孟京辉（北京林业大学林学院，教授）

14:50-15:30 3. 农作物表型大数据获取解析进展

郭新宇（国家信息化农业工程技术研究中心，研究员）

15:30-15:50 茶歇/合影

15:50-16:20 4. 基于轻量级 1D-CNN 模型提高大尺度森林类型制图的效率和准确性

赵颖慧（东北林业大学林学院，教授）

16:20-16:50 5. 信创环境下跨平台高性能智慧林业 GIS 底座的实现

曹亮（西安三图信息技术有限公司，技术总监）

16:50-17:20 6. 秦岭田裕河湿地公园可视化系统构建

王美丽（西北农林科技大学信息学院，教授）

17:20-17:50 7. 基于 AI 和智能手机的猕猴桃行域果实计数与测产研究

傅隆生（西北农林科技大学机电学院，教授）

## 7月28日（星期日）上午

时 间：08:00-12:00 地 点：西北农林科技大学南校区 S3203 室

内 容：专题报告

主持人：孟京辉（北京林业大学林学院，教授）

田相林（西北农林科技大学林学院，副教授）

08:00-08:30 1. 特邀报告：推动“智慧”赋能，提升林业“智治”能力

刘金福（福建农林大学林学院，教授）

08:30-08:50 2. 可穿戴的林草消防员险情辨识与定位搜救

姬淼鑫（河南工业大学测控技术与仪器系，系主任）

08:50-09:10 3. 森林树(碳)表和森林树网研制及产业化

高飞（四川省林业和草原调查规划院，高级工程师）

09:10-09:30 4. **Geospatial assessment of climate and human pressure on Snow Leopard habitat in the Trans-Himalayan region of Pakistan**

Um e Hani（西北农林科技大学，博士生）

09:30-09:50 5. 基于 Landsat-MODIS 图像填充与时空融合的红树林物候优化提取

洪宇（福建农林大学，博士生）

09:50-10:10 6. 智慧林业研究前沿与展望——IUFRO 第 26 届世界大会智慧林业议题综述

张亚芳（东北林业大学，博士生）

10:10-10:20 茶歇

10:20-10:35 7. 天然林碳汇量计算及监测样地布设支持系统构建

梁智胜（北京林业大学，研究生）

10:35-10:50 8. 中国南方天然林气候敏感转移矩阵生长模型的建立

高原（北京林业大学，研究生）

10:50-11:05 9. 物联网边缘计算在智慧林业上的应用

林苗杨（福建农林大学，研究生）

11:05-11:20 **10. 特征选择和混合效应的加入改善了随机森林模型对单木枯死的预测**

马颖皓（北京林业大学，研究生）

11:20-11:35 **11. 林分密度调控决策支持系统研究**

赵卫高（北京林业大学，研究生）

11:35-11:50 **12. 基于卫星观测与能量平衡模型的森林空间变化对区域气候的影响**

曹金洪（南京林业大学，研究生）

## 智慧林业分会场论文及摘要 Manuscripts and Abstracts

2024.07.26-29, 杨凌

1. 智慧林业研究前沿与展望——IUFRO 第 26 届世界大会智慧林业议题综述
2. 物联网边缘计算在智慧林业上的应用
3. 高清时序数据驱动下的松材线虫病智能防控解决方案
4. 基于 Landsat-MODIS 图像填充与时空融合的红树林物候优化提取
5. 可穿戴的林草消防员险情辨识与定位搜救
6. 中国南方天然林气候敏感转移矩阵生长模型的建立
7. 天然林碳汇量计算及监测样地布设支持系统构建
8. 特征选择和混合效应的加入改善了随机森林模型对单木枯死的预测
9. 林分密度调控决策支持系统研究
10. 基于卫星观测与能量平衡模型的森林空间变化对区域气候的影响
11. 森林树(碳)表和森林树网研制及产业化
12. Geospatial assessment of climate and human pressure on Snow Leopard habitat in the Trans-Himalayan region of Pakistan

# 智慧林业研究前沿与展望——IUFRO 第 26 届世界大会 智慧林业议题综述

曹玉昆 张亚芳 任月\*  
(东北林业大学 中国 哈尔滨 150040)

**摘要:** 数字技术和智能技术被视为创新经济和可持续发展的推动力,在改变林业系统未来走向方面隐藏着巨大的发展潜力,智慧林业受到全球学者的广泛关注。本文在收集 IUFRO 第 26 届世界大会智慧林业相关议题文本资料的基础上,利用 python 进行文本分析,总结目前智慧林业领域研究热点前沿问题,以期挖掘未来中国智慧林业的学术研究方向,并为中国智慧林业进一步发展提供指导价值。

**关键词:** 智慧林业; 数字技术; 数字化; 智能化; 第 26 届世界大会

## 1 引言

如今全球林业部门面临着严峻的挑战。随着人口的快速增长,对森林产品和生态系统服务的多样化需求日益增长;全球气候变化加剧了林业系统的风险和不确定性;数字技术和智能技术被视为创新经济和可持续发展的推动力,在改变林业系统未来走向方面隐藏着巨大的发展潜力。智慧林业是指通过集成先进的数字技术和智能技术,实现林业管理的全面智能化和信息化,优化林业资源的利用与保护,提升林业管理效率和决策科学性;智慧林业综合运用物联网(IoT)、大数据分析、人工智能(AI)、遥感技术、区块链技术等现代科技手段,构建一个智能化、数据驱动、生态友好的林业管理体系。

2024 年 6 月 23 日至 29 日,国际林联(IUFRO)第 26 届世界大会在瑞典斯德哥尔摩举行。IUFRO 世界大会 5 年举办一次,是全球规模最大、最具影响力的林业学术盛会。此次会议是有史以来规模最大的世界大会,为时一周吸引 4300 余名代表参会,涵盖 3500+场演讲、200+场会议和 70+场展览,代表了林业领域学界、业界的前沿热点。据统计,此次世界大会涵盖智慧林业主题会议 19 场,专题报告、口头报告、海报展出等 297 场,智慧林业主题在诸多林业热点前沿领域中占有一席之地。

本文希望通过系统地收集、梳理和分析此次世界大会关于智慧林业主题的最新研究成果,一是识别智慧林业研究趋势,包括最新的研究方向、热点议题和技术进展;二是综合智慧林业已有的研究成果,促进知识的积累和传播,帮助新加入的研究者迅速了解领域概况;三是探索智慧林业研究空白领域,分析和比较目前不同的研究设计和方法,找到未被充分探索的领域;四是总结智慧林业研究成果的实际应用价值,理论联系实际,为中国智慧林业进一步发展提供指导价值。

## 2 世界林业大会智慧林业研究概况

根据智慧林业的概念、特征、内涵和外延等内容,从会议日程中筛选出智慧林业关联议题,提取信息构建文本数据集作为本文的研究基础,具体包含:①大会发布的专题会议介绍资料;② 19 个专题会议的 297 篇文章信息,主要包含文章题目、摘要、海报和作者所属的国家或地区信息等。在此基础上,以 python 作为主要工具分析文本数据集,过程如下:①导入必要的库;②预处理文本数据,去除停用词、标点符号,并结合研究主题剔除“森林”、“林业”、“树木”等频次过高且分析价值过低的词汇;③计算文本 TF-IDF 值,取最高值生成词云图或使用 heatmap 函数绘制热力图。

---

基金项目: 数字赋能国有林区生态保护修复效率提升路径研究, 国社科青年项目(23CGL063)

\* 通讯作者

## 2.1 智慧林业：全球学者的广泛关注点

智慧林业是全球林业领域学术研究的热点问题之一，受到全球学者的广泛关注。根据作者所属的国家或地区信息生成国家频次热力图（详见图 1）和词云图（详见图 2），可以直观地看出一智慧林业研究分布范围广泛，涉及六大洲 40 个国家；二学者参与智慧林业研究活跃度排名前十的国家有瑞典、美国、奥地利、芬兰、意大利、中国、西班牙、德国、巴西和加拿大。这些高活跃度国家一方面由于自身森林资源丰富，智慧林业实践处于世界领先地位，另一方面可能受到会议城市地缘位置的影响，距离近的学者参会积极性更高。

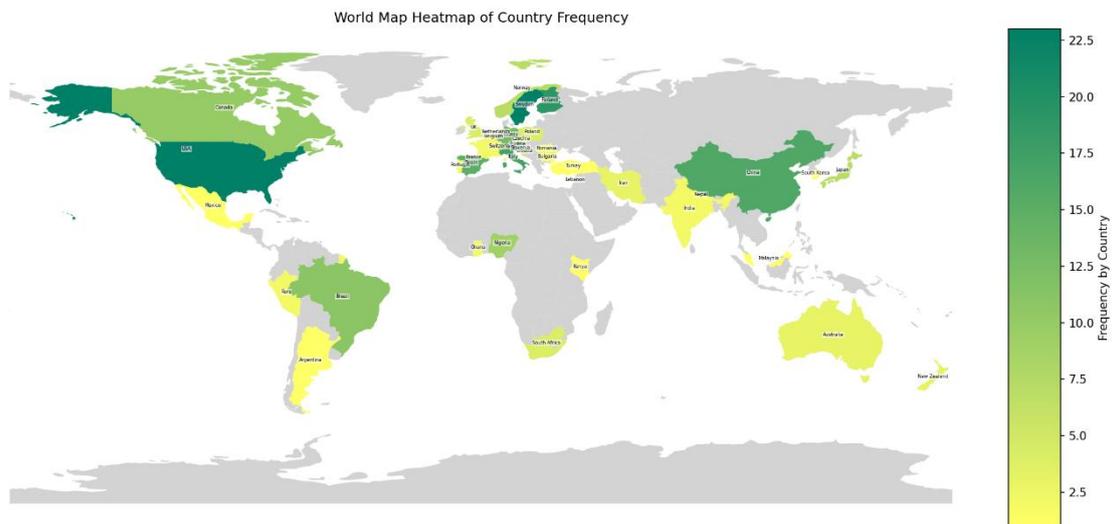


图 1 全球智慧林业研究分布概况



图 2 各国学者参与智慧林业研究的活跃程度

## 2.2 智慧林业：“数据”触发的多领域研究

“数据”作为数字经济的核心三要素之一，在智慧林业研究领域占据着不可或缺的地位。根据文本数据绘制词云图，图 3 456 分别是本次会议智慧林业 19 个议题总体和热度前三议题的高频词云图，热度前三的议题分别是“复杂遥感辅助森林调查的发展，以支持森林生态系统的监测和评估”、“可持续森林经理数字化”和“迈向数字森林实现可持续未来”。从四幅词云图可以直观地看出，“数据”一词在每份文本中都处于首要地位。其他重要词汇涉及多学科领域专业词汇，包括树种、遥感监测、森林经理、评估、土地、映射、生物量、激光扫描、无人机图像、机器学习、动态等，主要集中在计算机科学、生物科学等自然科学领域。目前关于智慧林业，国际层面的学术研究涉及多角度、多学科和多领域，学者们更多地关注数字技术的开发与应用、数据的采集与分析，以解决林业可持续发展的现实难题。



图 3 智慧林业 19 个议题高频词



图 4 复杂遥感辅助森林调查发展高频词



图 5 可持续森林经理数字化高频词



图 6 迈向数字森林实现可持续未来高频词

### 3 自然科学研究视角下的智慧林业

自然科学研究视角下的智慧林业主要集中在两个方面：一是数字化，通过遥感等数字技术应用，实现对森林近实时、多尺度、全方位的监测；二是智能化，智慧决策支持系统帮助解决多目标管理决策、复杂决策和多利益主体决策等森林资源管理经营问题。

#### 3.1 遥感技术与森林监测

遥感技术通过对多时相卫星影像、无人机影像和激光雷达数据的分析，为森林生态系统的监测和评估提供了重要支持。目前这些研究主要集中在利用各种遥感数据和方法评估森林生物量、碳储量、树木健康、林分结构等方面。

其一，森林生物多样性监测。森林生物多样性的监测一直是一个巨大的挑战，特别是在全球范围内。实地生物多样性数据与遥感数据可以提供更全面的生物多样性度量方法，实地数据虽然

在确定生物多样性组成、状态和趋势上具有无可替代的价值，但却需要长期的财务和后勤投入，遥感数据为提升森林生物多样性度量提供了新的路径<sup>[1]</sup>。通过整合多传感器地球观测数据、综合实地数据和下一代生态模型，可以有效预测森林生物多样性的变化及其直接和间接驱动因素。这种方法有助于实现对森林生态系统范围和生物多样性变化的全面监测<sup>[2]</sup>。

其二，森林健康评估。遥感技术在森林健康监测中的应用显著发展。例如，通过分析波兰图赫拉森林的植被指数和分割方法，研究了森林破碎化模式。类似地，结合历史和当前的光谱行为变量，研究人员能够区分大西洋森林中恢复方法的有效性。在瑞典南部，利用多光谱和高光谱无人机影像监测欧洲云杉树皮甲虫的早期入侵。研究表明，通过多光谱和高光谱传感器可以有效检测树木在入侵前的压力，并提出了早期检测方法。这些方法显著提高了入侵早期的检测能力，有助于及时采取防治措施。

其三，生态系统服务监测。研究提出了一种新的方法，基于人类活动地方森林生态文化服务供需监测系统，从个体尺度的供需角度估算文化环境服务得分（ES），基于代理的建模（ABM）来模拟个人远足活动，量化个体层面的供需匹配，为制定有效政策，平衡现实世界中文化服务的供需提供启示<sup>[3]</sup>。研究探讨了树木和森林管理中的成功和失败案例，强调了科学知识在公众和政策制定中的重要性，理解森林生态系统服务的复杂性有助于更好地进行森林管理和保护<sup>[4]</sup>。

其四，森林碳存储评估。森林碳汇的增强是实现碳中和目标的有效途径。数字技术可以帮助评估森林生态系统的碳储存能力。例如，在秘鲁亚马逊地区，通过长期监测和碳储量评估，发现湿地森林的碳密度极高，这对全球碳循环具有重要意义。类似的研究在日本山毛榉森林中，通过沿海海拔梯度的长期监测，揭示了气候变化对树木生长和呼吸作用的影响。NASA的 GEDI（全球生态系统动态调查）和 Landsat 任务结合的分层模型为森林地上生物量的推断提供了新的方法，通过分解方差和引入自举估计算法，大大提高了生物量估计的精度。GEDI 与多角度光学传感器的结合，进一步提高了森林碳储量的估算能力。中国首颗陆地生态系统碳盘点卫星“句芒”，利用大数据和新激光雷达生物量指数开发的空基激光雷达脚印水平的森林碳储量测量，基于深度学习框架开发的使用主动和被动数据的森林碳储量协同估计方法系统在中国北部和南部进行了测试。

### 3.2 智慧决策支持系统与经营管理

森林生态系统面临的压力越来越大不仅需要为生物多样性、木材生产、娱乐和其他重要的生态系统服务提供有利条件，还需要适应气候变化。因此，森林管理决策变得非常复杂，需要处理不同管理目标之间的冲突和日益增加的不确定性。森林决策支持系统（DSS）是森林经理和治理决策的重要工具，帮助决策者和利益相关者评估不同管理选项的后果，并找到实现各种管理目标的管理替代方案。

其一，支持多目标管理决策。目前的研究中，智慧决策支持系统不仅可以实现单一目标，而且能够处理多重目标。可持续森林管理涉及具有多个相互冲突的目标函数、多个时期和不同不确定性来源的决策问题，研究设计了一个多情景、多目标、交互式决策支持工具，用于在多个时期进行可持续、稳健的森林采伐调度<sup>[5]</sup>；在两段式运输案例中，研究提出一种决策支持工具，平衡经济、社会、环境和安全等多方面需求，优化采伐运输和道路决策，以及考虑木材供应链中的多重因素，提出了最佳采伐地点的确定方案<sup>[6]</sup>。

其二，解决复杂决策问题。可持续森林经理决策面临时间和空间双重的风险和不确定性以及各种现实限制性因素，是一项复杂的决策问题。新一代决策支持系统 PixSim 提供了一个增强森林管理策略和决策过程的强大工具，能够在像素级别上进行高分辨率的大规模森林模拟，捕捉到传统模拟器难以察觉的森林内部变异性，通过改进空间分辨率为森林管理策略提供了更精确的数据支持，有效应对气候变化等复杂问题<sup>[7]</sup>；战略措施实施面临诸多限制，例如保护生物多样性丰富的地区、人口减少导致的人力资源枯竭、基础设施老化导致交通受限等，研究设计出在一个在未

来不确定条件下实施适应措施的最佳时机和不可逆临界点，以及预测战略措施实施的效果，以实现日本九州北部的森林资源保护和利用的可持续<sup>[8]</sup>。

其三，平衡诸多利益相关者的利益。森林经理涉及诸多利益相关者，决策过程中需要综合平衡他们之间的利益诉求。决策支持系统还强调了利益相关者的广泛参与。例如，气候智慧型林业的群体决策支持工具，通过支持森林所有者在气候智慧型林业规划中的协作和权衡分析，促进了共识解决方案的制定。类似地，整合决策支持系统（DSS4ES）通过涵盖森林、森林景观管理和相关利益相关者之间的关系，支持全景规划，增强可持续森林经理，并推动政策实施<sup>[9]</sup>。

## 4 社会科学视角下的智慧林业研究

效率和公平问题是社会科学研究领域永恒的话题，社会科学研究视角下的智慧林业也不例外。政策是效率和公平之间的平衡木，以实现特定的社会、经济和环境目标。社会科学视角下的智慧林业研究主要涵盖效率、公平和政策三个方面。

### 4.1 效率

#### 4.1.1 智慧林业与未来劳动力

美国以森林为生的农村社区面临巨大挑战，研究探讨了如何实现林业生产系统现代化，其中包括利用尖端技术为林业劳动力，通过采用先进技术推动可持续增长、经济振兴和下一代林业劳动力发展的潜力<sup>[10]</sup>。

数字扫盲被视为可持续发展的助推器，具备数字素养的林业业主有望在推广可持续管理方面发挥重要作用，他们可以更好地将在线提供的最新信息纳入其管理计划，或利用不断发展的人工智能工具，研究探讨了如何提高森林所有者的数字素养，以及如何加强数字素养与可持续管理之间的联系<sup>[11]</sup>。

#### 4.1.2 智慧林业中的现代化作业

要实现可持续的林业运营，就必须解决安全和劳动力方面的挑战，前进过程中的自动驾驶是林业自动化的一个关键主题，沿规划路径安全导航是成功实现自动驾驶的关键，研究提出了一种易于准备数据集的支线道路分割方法，为林业机械自动驾驶的发展做出了贡献<sup>[12]</sup>。

在葡萄牙，研究开发了用于植被管理操作的技术解决方案，利用激光雷达数据和机器学习算法优化机械设备的选择，这种自动化技术提高了生产力和环境效益。

#### 4.1.3 智慧林业中的人工智能

其一，人工智能和可视化不断与林草产业深度融合，推动林草产业高质量发展。阐述了人工智能生成内容（AIGC）与林业和草原元宇宙的融合，特别是在林业和草原虚拟环境和场景生成、林业和草原数字内容创建和生成、实时交互和自然交互生成、林业和草原仿真、预测和决策生成等方面，可以为森林结构优化、质量提升、生态保护、产业发展提供内容生成，实现智能分析、比较、优化，提高决策能力<sup>1</sup>。

其二，人工智能技术应用于木材产业，提高效率。人工智能具有变革潜力，研究探讨人工智能在森林生长和产量方面的潜在应用以及在森林基因组学中实施人工智能技术的相关挑战和机遇，包括数据可用性、模型可解释性以及跨学科合作的必要性<sup>[13]</sup>。研究智能森林物流策略应对气候变化和森林灾害带来的供应链风险，应用离散事件仿真模型在，通过虚拟环境进行决策测试和评估，推动协作供应链管理，实现环境、经济和社会的可持续发展<sup>[14]</sup>。

## 4.2 公平

### 4.2.1 林业部门的性别平等

性别平等是实现林业可持续发展的关键因素之一。国际林研联林业性别平等工作组开发并提供了第一门关于林业相关领域性别平等和多样性的大规模在线开放课程（MOOC），是促进平

---

<sup>1</sup> HUIQING ZHANG, TINGDONG YANG. The development of artificial intelligence and visualization technology promotes the application of smart forestry

等、多样性和包容性的实用工具<sup>[16]</sup>。女性在林业中的网络化也逐渐增强，国际林业妇女组织（WOFO）成立，旨在国际范围内促进妇女在森林和木材领域的利益、促进交流与合作，增加女性在林业领域的影响力<sup>[17]</sup>。

#### 4.2.2 数字平台上的森林话语权

数字平台为不同利益相关者参与森林话语提供新机遇和挑战，增加森林治理的公众参与和透明度。一方面，林业数字内容的创作和传播影响森林治理公众参与。芬兰学者通过在线调查和访谈，研究了林业机械操作员在线创作短视频、参与直播等活动的体验和动机，分析了数字化平台如何促使林业交流民主化，探讨了实时对话如何影响围绕森林治理冲突的社会讨论，以及“游戏化劳动”方式如何影响林业工作者的身份认同、社会地位和民生福祉<sup>[18]</sup>。另一方面，数字化混合媒体提高了信息传播的速度和广度，改变了社会公众关于林业和保护之间冲突争论的表现方式，从而增加了森林治理的透明度。德国“森林消亡 2.0”事件中，引发了公众对森林健康的关注，Philipp Mack 实证分析不同形式社交媒体上的公共和政治信息传播，结果显示森林危机这一问题是由于林业和自然保护之间结构性两极对立，而数字媒体为两极对立观点提供了缓冲平台<sup>[19]</sup>；波罗的海地区是欧盟生物经济发展的关键地区也是森林治理冲突的热点地区，通过分析波罗的海三国混合媒体如何影响信息传播和森林话语权，研究数字媒体在森林治理可持续转型的作用<sup>[20]</sup>。

#### 4.2.3 森林治理中的数字鸿沟

数据公正性是森林治理中的重要挑战，在大数据和人工智能技术的应用方面尤为突出，数据获取能力差异、偏见和访问权限不平等可能会加剧社会不公，需采取措施识别和减轻这些风险<sup>[21]</sup>。

### 4.3 政策

全球治理与国际合作。欧洲 MoniFun 将通过跨学科、多行为体的方法，共同创建一个统一的欧洲森林多功能性监测系统（EFMMS）蓝图，EFMMS 致力于提升欧洲森林监测的整体效能，支持一系列欧盟政策，包括新森林战略、欧洲绿色协议、生物多样性战略、生物经济战略和可再生能源指令<sup>[22]</sup>。数字技术智能技术为全球范围数据库提供支持，全球和地方之间的数字鸿沟加剧科学领域的不平等，影响全球政策和法规的制定。在《生物多样性公约》缔约方的助推下，全球范围内公平公正地获取和互惠共享数字序列信息（DIS），成为政策焦点，Bob Kreiken 探讨全球性和多中心治理系统，提出制度设计应该遵循以价值为中心的基本原则，全球治理耦合系统中的环境正义关系和责任划分，以实现国际合作的公平公正<sup>[23]</sup>。

## 5 结论与展望

智慧林业受到全球学者的广泛关注，相关研究涉及到多角度、多学科和多领域，是现代林业发展的重要方向。本文基于 IUFRO 第 26 届世界大会的文本资料，深入分析了遥感技术、智慧决策支持系统、林业经营管理，以及社会科学视角下的效率、公平和政策等方面的最新进展。这些分析有助于构建一个全面的智慧林业研究框架，为中国乃至全球的智慧林业发展提供指导和启示。

### 5.1 主要结论

（1）从自然科学的视角来看，遥感技术在自然科学领域的应用已成为智慧林业研究的核心，尤其在森林资源监测和环境变化评估方面表现出显著的优势。通过整合多源数据和应用先进的数据分析技术，这些系统能够为林业管理提供科学、系统的决策支持，从而优化资源分配和提高经济效益。

（2）从社会科学的视角来看，智慧林业不仅仅是技术的应用，更关注于技术如何在提高效率、确保公平和制定合理政策中发挥作用。这要求我们在技术推广和应用过程中，充分考虑社会经济因素和政策环境的适应性，以及技术发展对不同群体的影响。

### 5.2 研究展望

未来，智慧林业的研究和实践应更加重视跨学科的合作。通过融合自然科学和社会科学的研究成果，可以更全面地理解和应对林业面临的复杂问题。中国在推进智慧林业发展的过程中，需

要继续加强基础研究、技术创新、人才培养和国际合作，确保技术的高效应用和社会经济效益的最大化。

综上，智慧林业的发展不仅仅是科技进步的体现，更是对林业可持续发展战略的一种全新诠释。中国的智慧林业研究和应用，将在全球林业管理实践中发挥越来越重要的作用，为全球林业的可持续发展贡献中国智慧和方案。

#### 参考文献

- Bottom up meets top down: Data and tools for developing forest biodiversity metrics combining in situ and remote sensing  
Operational solutions for biodiversity monitoring and mapping in forest ecosystems  
Jang-Hwan Jo<sup>1</sup>, Moongi Choi. Supply and Demand of Local Forest Cultural Ecosystem Services based on Human Activity using Agent-Based Modelling.  
The Realities of Ecosystem Services: Acknowledging the Imperfect Nature of Trees and Forests  
Babooshka Shavazipour, Santeri Karppinen. An interactive decision support tool for sustainable robust forest harvest planning.  
Robert Radics<sup>1</sup>, Muhammad Umar<sup>1</sup>, Karen Bayne. Environmental, safety and economic benefits of two-stage trucking in harvesting operations, introducing a decision-supporting tool  
Nicolas Cattaneo, Clara Antón Fernández, Rasmus Astrup. PixSim: Enhancing high-resolution large-scale forest simulations.  
Katsuhiko Nakao, Haruka Tsunetaka, Wataru Murakami. Adaptation strategies timeline for conservation and sustainable use of forest resources under uncertainty climate change.  
Jan Kaspar, Emin Baskent, Ola Eriksson, Harald Vacik. Integrated Decision Support Systems for delivery of ecosystem services based on EU forest policies (DSS4ES): New COST Action CA22141 project.  
Woodam Chung<sup>1</sup>, Jay Kim, Kevin Lyons. Advancing Technologies for Sustainable Forestry and Workforce Development  
Adan L. Martínez-Cruz<sup>1</sup>, Daniel Martey Junior Mensah, Camilla Widmark. Digital literacy among individual forest owners in Sweden – Is it associated with sustainable management?  
Spur road segmentation using text-to-image synthesis for autonomous driving in forest machinery  
HUIQING ZHANG, TINGDONG YANG. The development of artificial intelligence and visualization technology promotes the application of smart forestry  
Clara Antón Fernández. The potential of artificial intelligence in forest growth and yield modelling  
Christoph Kogler, Peter Rauch. Developing smart forest logistic strategies in serious-game-based simulation workshops.  
Ida Wallin, etc. How to achieve gender equality and diversity in forest-related sectors? Bridging the education–practice gap with a Massive Open Online Course (MOOC)  
Dagmar Karisch-Gierer<sup>1</sup>, Iza Pigan, etc. WoFo - Women in Forestry International.  
Philip Chambers, Heli Kymäläinen, Daniela Nousiainen. Content creation and streaming by forest machine operators – current trends and impacts on forest-related discourse  
And the forests tweets will echo with laughter? - German "forest death 2.0" in the hybrid media system  
Kristina Riegert, Ida Wallin. Mediated Battles for the Forest: comparing discursive power in hybrid media systems in the Baltic Sea Region  
Daniel Brockington, Rose Pritchard, Jocelyne Sze. Data Justice and Forest Governance.  
Lauri Mehtätalo<sup>1</sup>, Minna Rätty, etc. MoniFun - Co-creating a blueprint of a harmonised European Forest Multifunctionality Monitoring System  
Bob Kreiken. Institutional design for equitable governance of hybrid forest commons.

# 物联网边缘计算在智慧林业上的应用

林茁杨<sup>1</sup> 陈淑武<sup>2</sup>

(1 福建农林大学 福州 350002; 2.福建农林大学 福州 350002; )

**摘要:**本文探讨了物联网边缘计算在智慧林业领域的应用。智慧林业是将现代信息技术与传统林业相结合,通过物联网、云计算、大数据等技术手段,实现对森林资源的智能化管理和可持续利用。物联网技术的广泛应用在智慧林业中已经取得了显著成效,如森林资源监测、林火监测、森林病虫害监测等多个领域。物联网边缘计算技术应用通过更快速的数据处理、更低延迟的数据传输,提高了系统的响应速度和可靠性,为智慧林业提供了更加智能化、高效化的解决方案。智慧林业系统的总体架构主要分为物联网感知层、边缘计算层和应用层。在感知层,各类传感器节点用于实时采集林业环境中的数据。边缘计算层由多个部署在靠近数据采集地点的边缘节点组成,这些节点具备一定的计算能力,能够对从感知层传输来的数据进行初步处理和分析。应用层包括云平台和多种应用服务,负责数据的深度分析、存储和展示,为林业智能管理提供全方位的支持。在智慧林业中,本文以林火监测和森林病虫害防治两个具体应用场景介绍物联网边缘计算在智慧林业当中的应用。在林火监测方面,利用各类传感器和监控设备实时监测森林环境状况,及早发现火情并快速响应,以减少火灾造成的损失。在森林病虫害防治方面,通过实时监测植被生长情况、昆虫生物影像,并结合数据分析和模型算法,实现对森林病虫害的智能判断和精准防治。当前,智慧林业中物联网边缘计算技术也面临一些挑战,包括数据采集的稳定性和准确性、网络覆盖的限制以及数据存储容量的问题。为了解决这些问题,可以采取优化传感器设备、扩展网络覆盖范围、采用分布式存储技术等措施,推动智慧林业向更加智能和可持续的未来发展。物联网边缘计算技术在智慧林业中的应用为林业管理和保护带来了新的机遇和挑战,并推动了智慧林业向智能化和可持续发展的方向迈进。

**关键词:** 物联网; 边缘计算; 智慧林业; 数据传输; 传感器; 林火监测; 森林病虫害防治;

**中图分类号** Q958.15; S154.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-7488 ( ) -0000-00

现如今,物联网技术与智慧林业领域的联系已经密不可分。充分利用物联网技术可以显著降低监测和管理成本,有效提升各项工作的效率和准确性,促进林业生态可持续发展<sup>[1]</sup>。物联网技术在林业资源监测、林火监测、森林病虫害监测、野生动植物保护、森林游憩、林业种植等多个领域已经得到了广泛应用,其独特的优势表现得尤为突出。

此外,物联网边缘计算技术的应用为智慧林业提供了更加智能化、高效化的解决方案。边缘计算通过在靠近数据源的地方进行数据处理,使得数据处理过程更加快速,减少了传输延迟,并能够在互联网连接不稳定的情况下继续工作,从而进一步提高了系统的响应速度和可靠性。

这种技术进步不仅推动了智慧林业的发展,为林业管理和保护带来了新的机遇和挑战,还促进了整个行业的转型升级。例如,通过实时数据分析和预测,可以更及时地发现和应对森林火灾、病虫害等潜在威胁,保护森林资源的安全。同时,智能化的林业管理系统还可以优化资源配置,提升林业生产的精细化管理水平,减少人工投入,实现可持续发展。物联网与智慧林业的结合,必将引领林业领域走向更加智能和可持续的未来。

## 1 物联网边缘计算与智慧林业概况

智慧林业是指将现代信息技术与传统林业相结合,通过物联网、云计算、大数据等技术手段,实现对森林资源的智能化管理和可持续利用。智慧林业融合了林业科学、信息科学、地理科学和工程科学等相关学科的理论和方法,具有显著的多学科交叉特点。同时,智慧林业是由数据、知识、模型及软硬件等核心要素相互联结而成的,其实施过程贯穿了林业全产业链,每个环节都具有独特的结构功能特征,经过优化组合后呈现整体性和系统性,是一项复杂的系统工程<sup>[2]</sup>。智慧林业的邻域范围涵盖了林业生产、经营、管理和服务等各个环节,旨在提高林业生产效率、优化资源配置、促进生态保护和推动林业产业升级。

物联网(IoT)是一种通过传感设备和嵌入式系统,利用短距无线自组织网络将物体与互联网连接起来的技术体系。它实现了信息的交换和通信,促进了智能化应用的发展,如识别、定位、

跟踪、监控和管理等功能。物联网技术广泛应用于智能家居、智慧城市、智能交通、环境监测和医疗健康等领域，极大地提升了生活和工作的便利性与效率。

随着物联网技术的进一步发展，边缘计算（Edge Computing）成为其关键组成部分。边缘计算是一种将数据处理和计算能力推向接近数据源和终端设备的网络边缘的新型计算模式<sup>[3]</sup>。在这种架构下，数据在生成的瞬间就能得到即时处理，不仅减少了对数据中心服务器的依赖，也优化了数据传输过程，减少了数据传输对网络带宽的占用，从而提高了整个网络系统的运行效率<sup>[4]</sup>。此外，边缘计算能够保护数据隐私，通过在数据产生地进行加密和处理，减少数据传输过程中的泄露风险。它还具有良好的可扩展性和灵活性，能够应对物联网设备数量的迅猛增长，满足多种应用场景的需求。

在智慧林业领域，物联网边缘计算技术的应用前景广阔<sup>[5]</sup>。通过在森林中部署各类传感器，如温湿度传感器、烟雾传感器、红外相机等，可以实时监测森林环境状况，及早发现火灾、病虫害、盗伐等威胁，并快速作出响应。边缘计算设备可以在本地对采集到的数据进行初步分析，筛选出关键信息，减少数据传输量，提高反应速度。此外，无人机和卫星遥感技术的应用，结合边缘计算，可以实现对森林资源的精准调查和动态监测，为林业管理决策提供数据支持。智慧林业还可以利用物联网技术优化林业生产过程，如精准灌溉、施肥和病虫害防治等，提高林业生产效率和产品质量。

## 2 方法与技术

本章节将介绍智慧林业系统的总体架构、传感器的部署与数据采集方法以及边缘计算的实现。这些内容能够为理解智慧林业中物联网与边缘计算技术的结合及其高效应用提供基础。

### 2.1 系统架构设计

基于不同的应用需求，物联网的体系结构主要分为三层架构、四层架构、五层架构、分布式架构、面向服务的体系结构及各物联网开发平台集成额外服务的物联网参考体系结构，另有结合低轨卫星通信的天地一体化物联网体系架构设想<sup>[6]</sup>。智慧林业系统的总体架构主要分为三个层次：物联网感知层、边缘计算层和应用层。如图 2-1：

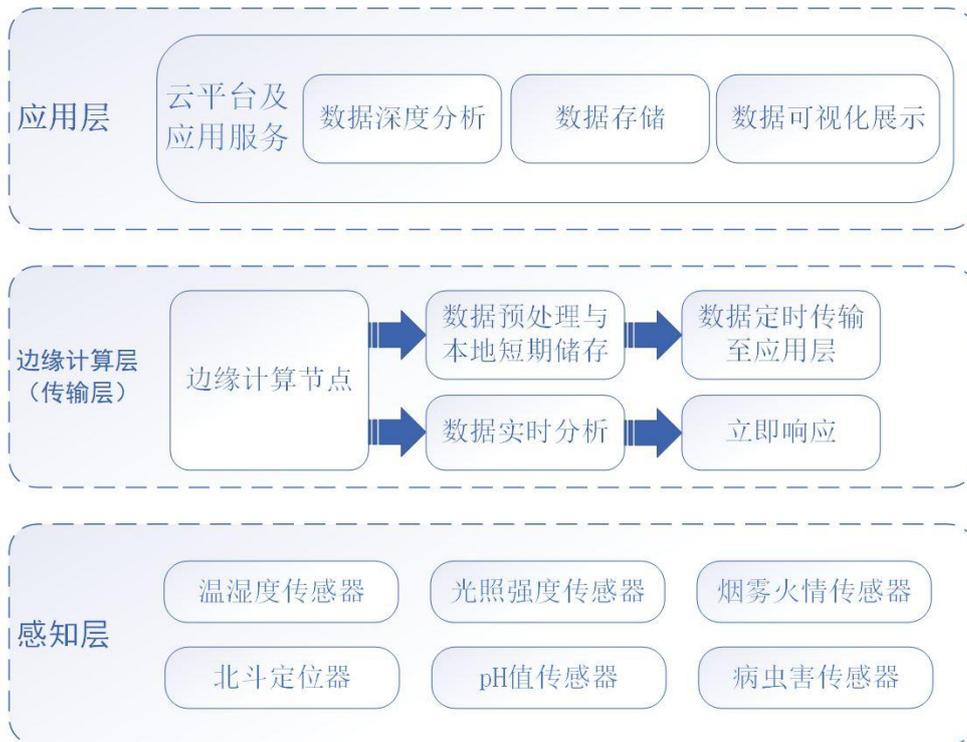


图 2-1 智慧林业系统的总体架构

### 物联网感知层：

感知层主要由各种传感器节点组成，用于实时采集林业环境中的数据。这些传感器包括温湿度传感器、土壤湿度传感器、二氧化碳浓度传感器、光照强度传感器、树木径增长传感器以及病虫害检测传感器等。传感器通过无线或有线方式将数据传送至边缘节点。考虑到林业环境的复杂性，传感器节点通常布设在树木、土壤及空气中，不同的采集频率和数据类型可根据实际需求调整。

### 边缘计算层（传输层）：

边缘计算层由多个边缘节点组成，这些节点通常部署在靠近数据采集地点的区域，如森林监测站或林区管理站。边缘节点具备一定的计算能力，能够对从感知层传输来的数据进行初步处理和分析。边缘节点接收传感器的数据后，进行数据的过滤、清洗和初步分析，提取有用的信息，然后将处理结果传输至应用层。同时，边缘计算层也可以实时监控传感器状态，协助数据的高效传输和设备管理。

### 应用层：

应用层主要包括云平台和多种应用服务，负责数据的深度分析、存储和展示。通过数据可视化工具和决策支持系统，应用层可以为林业管理提供全方位的支持。最终用户可以通过移动端和Web应用，实时查看林业环境数据，获取预警信息和管理建议。

## 2.2 传感器与数据采集

智慧林业系统中使用的传感器种类繁多，林业智能感知传感器较多地应用在林区防火（如风向、风力、蒸发量、干燥度和温湿度传感器等）、病虫害防治（如影像光谱成像仪、定位仪、热红外感应器等）、动植物保护（如射频红外感应器、夜光成像仪、定位器、电子标签感应器等）、造林工程监管（如温湿度感应器、降水量传感器等）及生态因子监测（如温湿度、降水量、风速、土壤温湿度、二氧化碳含量传感器）等<sup>[2]</sup>。其部署与数据采集方法需要根据不同目标进行优化。

#### 传感器部署：

**部署策略：**传感器需根据地理分布、森林类型和监测需求进行科学布设，确保数据覆盖全面、传输稳定。高密度的传感器布设能够提高数据的精度，而关键点位的传感器则能提供关键环境指标。

**能源管理：**由于森林环境电力供应受限，传感器通常采用太阳能或电池供电，并配合低功耗传感技术延长使用寿命。

#### 数据采集与传输：

**采集方式：**智慧林业数据采集主要通过多种森林环境基本参数传感器，运用包括射频识别（RFID）技术、光谱成像、热红外成像、无线传感器网络等技术手段对数据进行采集。

**数据传输：**传感器通过无线传感网（如LoRa，4G/5G、NB-IoT）将数据汇总至边缘节点。数据按设定时间间隔进行采集，频率可根据实时需求动态调整。

## 2.3 边缘计算的实现

边缘计算的实现是智慧林业系统高效运行的关键，下面从边缘节点选取、计算能力和数据处理流程三方面进行详细阐述。

#### 边缘节点的选取：

**节点位置与设备选择：**边缘节点应选择在数据采集密集区或监测站附近，以减少传输路径和提高数据传输效率。设备选取上，应选择具备低功耗、高计算能力和高稳定性的计算设备。这些边缘节点通过有线或无线网络连接至传感器节点和云平台，确保数据的实时传输与处理。

#### 计算能力：

边缘节点通常配备多核处理器、大容量内存和本地存储设备，保证足够的计算能力和存储能力。通过边缘计算技术，大部分可处理可分析的数据在本地进行数据分析和处理，并将处理分析结果以及其余复杂数据上传至云端，减少对带宽的依赖。

### 数据处理流程:

边缘节点实时接收传感器数据，首先对原始数据进行预处理，包括去噪、滤波、数据整合和冗余信息删除。数据预处理有助于降低传输成本和存储负担，提高数据质量。再通过预先部署低规模模型算法对数据进行分析，包括烟雾预警、温湿度预测、病虫害预警等。处理后的数据按时间戳和地理坐标存储在本地存储设备上，并定时上传至云平台进行深度分析和备份。基于处理结果，边缘节点可直接发出控制指令给物联网设备，如启动灌溉系统、发布预警信息，做到快速响应。

通过上述系统架构设计、传感器配置与数据采集方法以及边缘计算实现策略，智慧林业系统能够高效地进行环境监测、数据分析和决策支持，提高森林管理的智慧化水平。

## 3 物联网边缘计算在智慧林业中的应用

### 3.1 林火监测

森林火灾对森林生态系统和人类活动造成的破坏往往十分严重<sup>[7]</sup>。因此，如何在复杂的森林环境中及时发现火情并做出预警是森林可持续经营管理中亟待解决的关键技术问题。林火监测是指利用温湿度传感器、烟雾传感器、火焰传感器、红外摄像头、视频监控、GIS<sup>[8]</sup>和卫星遥感技术<sup>[9]</sup>等技术设备，实时采集和传输环境数据与图像，并通过边缘计算和数据分析模型进行火情分析和预警，以便早期探测和响应森林火灾。这对防止森林火灾蔓延、保护生态环境和生物多样性、减少木材资源损失和灭火成本、保障居民和游客安全，以及提升森林管理的精细化和科学化水平具有重要意义。通过及时发现火情、发出预警通知并组织有效的灭火行动，林火监测能够最大限度地减少森林火灾的危害，保护森林资源和生态系统的稳定与安全。

在智慧林业中，物联网边缘计算技术可以应用于林火监测，通过实时监测森林环境状况，及早发现火情，快速响应和处置，减少火灾造成的损失。如图 3-1，我们可以从物联网边缘计算的三个基本层面来了解其具体应用场景：

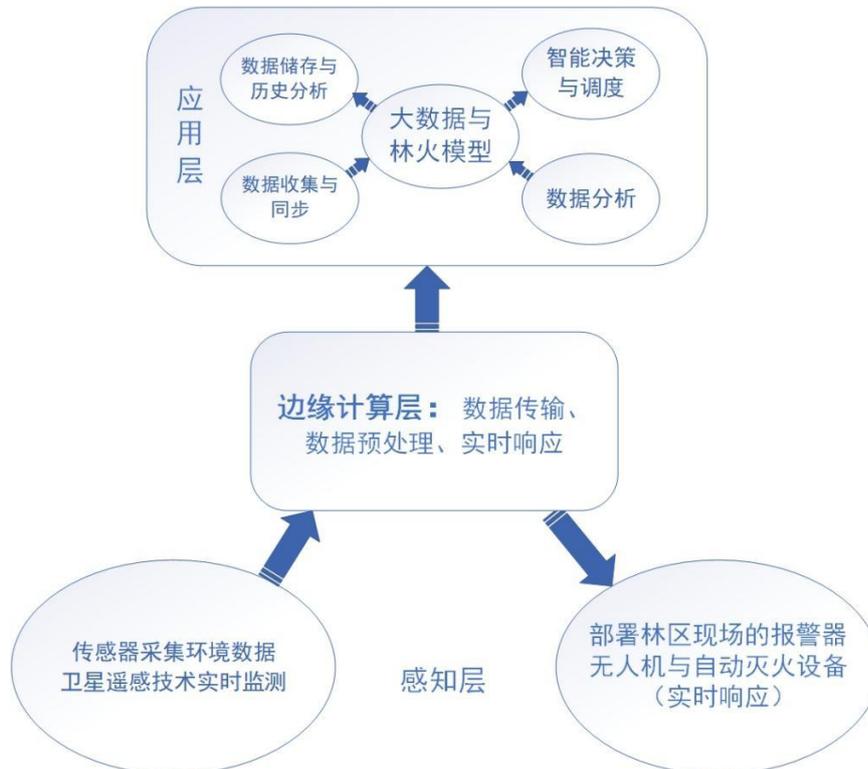


图 3-1 林火监测的基本架构

## 感知层

**数据采集：**通过在森林中部署温度传感器、湿度传感器、烟雾传感器、红外摄像头、可见光摄像头等，以实时采集森林环境数据，监控森林画面，捕捉可疑火情。在此基础上，部署响应更快、成本更低的 GIS 和卫星遥感设备，实现对林区更全面且实时的监控。

**北斗定位：**在各类传感器和监控设备内置北斗定位模块，实时记录和传输设备位置，为数据分析提供地理参考。也为森林管理人员和灭火队伍的行动轨迹也通过北斗定位进行实时监控，确保快速反应。

## 边缘计算层（传输层）

**数据接收：**通过无线传感器网络（如 LoRa、ZigBee、NB-IoT 等）将采集到的数据传输到边缘计算节点。再利用北斗短报文通信等功能，在网络不稳定或中断时，仍能保障数据传输的可靠性。

**数据预处理与上传：**利用边缘计算节点接收传感器采集的数据，进行初步的数据清洗和过滤，剔除噪声和冗余数据。同时对图像和视频数据进行预处理，如图像增强、目标检测等，提取关键信息。最后边缘节点将处理过后的环境数据、图像视频数据以及初步分析结果上传到云端平台进行存储和进一步分析。

**实时响应：**当边缘计算节点以预设模型通过初步演算检测到火情风险或确认发生林火时，立即触发预警。将火情预警信息（包括地理位置）和相关数据实时传输到云端平台和林业管理部门。边缘计算节点可控制搭载消防泵与喷雾系统的无人机<sup>[10]</sup>等自动灭火设备，通过卫星遥感、北斗定位精确导航，实施初步灭火措施。

## 应用层

**数据收集和同步：**云端平台收集并汇总来自不同区域的火情数据，将各类数据信息实时同步操作，进行大规模数据分析和火情态势评估。

**数据分析：**就地通过边缘计算节点利用机器学习算法对环境数据进行初步分析，判断是否存在火情风险。以预设模型对图像和视频数据进行深度学习分析，识别火情特征，如烟雾、明火等。最后结合环境数据和图像分析结果，综合判断是否发生林火。

**智能决策和调度：**林业管理部门根据边缘计算节点和云端平台提供的火情信息，快速制定灭火方案、调度灭火力量，如林业消防队、无人机等，通过北斗定位精确定位火场，进行扑救行动。实时更新火情发展态势，动态调整灭火策略和资源部署。

**数据存储和历史分析：**将火情监测和处置过程中产生的数据存储于云端平台，建立林火数据库。系统对历史林火数据进行深度分析，挖掘火情发生规律，优化林火预防和应对策略。

智慧林业林火监测通过感知层的数据采集和北斗定位技术、传输层的数据传输和预处理，以及应用层的数据分析、实时响应和智能决策，物联网边缘计算技术实现了对森林火情的早期预警、实时响应和智能决策，大大提高了林火防控的效率和精准度，最大限度地减少了森林火灾造成的损失，保护了森林资源和生态环境安全。

## 3.2 森林病虫害防治

森林病虫害防治是指通过科学的方法和技术手段，预防、控制和治理森林中的疾病和虫害，以保护森林生态系统的健康和稳定。对于保护生态环境、保障资源可持续利用、维护生物多样性、提高森林生产力有着重要意义。森林病虫害防治的主要思路包括预防为主、综合治理、智能化防治、生态友好和科技支撑，强调综合运用多种手段和先进技术，实现智能化防治方案，保护森林生态系统的健康和稳定，促进森林资源的可持续利用，推动森林生态环境的良性发展。在智慧林业系统中如图 3-2 所示，森林病虫害防治总体架构涉及感知层、边缘计算层（传输层）和应用层三个关键层面，每个层面都发挥着重要作用。

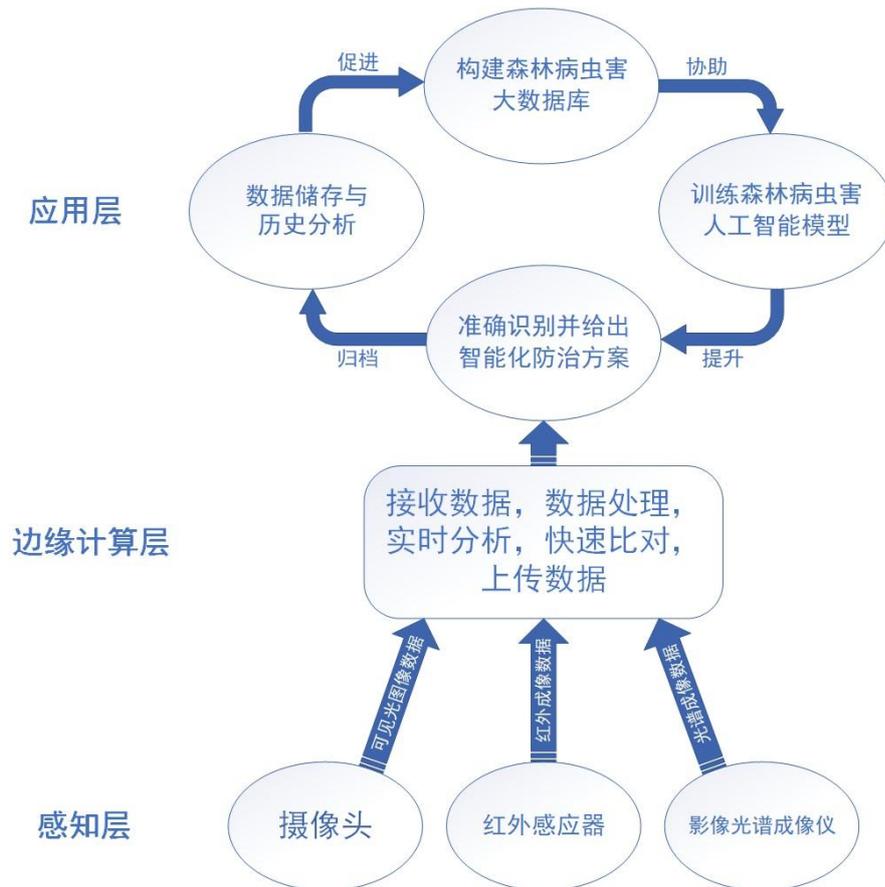


图 3-2 森林病虫害防治总体架构

### 感知层

在感知层，各类传感器和监测设备被部署在森林中，包括红外感应器、影像光谱成像仪、摄像头等。通过可见光成像、多光谱成像<sup>[1]</sup>、高光谱成像<sup>[2]</sup>和热红外成像等多源、多平台、多尺度遥感技术<sup>[3]</sup>，采集包括环境数据（气象、土壤等）、植物数据（生长状态、健康情况）、病虫害数据（种类、分布、危害程度）和监测数据（病虫害监测、虫口密度等）等关键数据。再通过无线传输中继，收集并传输大量数据到下一层级的边缘计算层进行处理。

### 边缘计算层（传输层）

在边缘计算层，利用边缘计算技术对从感知层传输过来的数据进行实时处理和分析。这些数据经过处理后，通过和建立的模型以及数据库进行比对，可以快速识别不同类型的病虫害、分析它们的分布情况以及严重程度。边缘计算层的作用在于实现数据的快速处理和分析，为后续的防治决策提供支持。

### 应用层

在应用层，基于边缘计算层处理的数据，通过人工智能算法和大数据分析，结合森林病虫害特征和规律数据库与大模型，应用层可以实现更深入的、更智能的、更准确病虫害诊断、精准施药和制定更有针对性的防治方案，提高防治效率并减少资源浪费<sup>[3]</sup>。这种智能化的防治方案有助于保护森林生态系统的健康和稳定，实现森林病虫害的有效防治。

同时，收集至云端的森林病虫害数据还可以帮助森林病虫害大数据库的构建与森林病虫害模型的训练，通过不断的数据积累实现量变达到质变，突破对森林病虫害的识别速度与识别准确度。并为更多的森林病虫害案例提供现实数据，完善对罕见森林病虫害的防治措施，实现更智能化防治方案。

## 4 挑战与解决方向

#### 4.1 面临的挑战

在智慧林业领域的不断发展中，物联网技术可以实现对森林资源的自动化、实时化、精细化管理和智能化服务，提高森林资源管理的效率和水平。然而，在物联网技术的应用过程中，也会面临一些问题，如数据采集、数据传输、数据存储等方面存在的问题，这些问题可能会影响智慧林业的健康发展<sup>[14]</sup>。首先，数据采集的稳定性和准确性受到多种因素的影响，如天气条件和地形地貌。这些因素可能导致数据采集过程中出现不稳定的情况，影响到数据的准确性和实时性。例如，恶劣的天气条件可能影响传感器设备的正常运行，导致数据采集的不稳定性。

除此之外，由于林区通常位于偏远地区，网络覆盖可能存在限制。这会导致数据传输过程中面临网络信号不稳定、传输速度较慢的问题。在这种情况下，数据的实时传输和监测可能受到影响，影响到智慧林业平台的实时监测和响应能力。缺乏稳定的网络连接也可能导致数据丢失或延迟传输，进而影响到决策的准确性和及时性。

最后，应用物联网边缘计算技术搭建的智慧林业平台需要大量数据进行分析 and 决策，但林区内的设备和基础设施可能存在存储空间有限的问题。这可能导致数据存储不足或无法满足长期存储的需求。在数据量庞大的情况下，存储设备性能不足或存储设备故障可能会导致数据丢失或无法正常读取，影响到数据的完整性和可靠性。

因此，解决智慧林业中物联网边缘计算面临的挑战，需要采取有效的措施来提高数据采集的稳定性和准确性，改善网络覆盖和传输速度，以及优化数据存储策略，确保数据的安全性和可靠性。这些挑战的解决将对智慧林业的发展和管理起到关键作用。

#### 4.2 解决方向

在智慧林业领域，面临的挑战主要包括数据采集的稳定性和准确性、网络覆盖的限制以及数据存储容量的问题。针对这些挑战，可以采取以下具体可行的解决方向：

在数据采集方面，我们可以通过以下方式提高数据采集的稳定性和准确性：**优化传感器设备**：定期更新和维护传感器设备，确保其正常运行和准确采集数据。**多样化数据采集方式**：结合无线传感网和有线传感方式，根据不同环境条件选择合适的数据采集方式。**数据校准和质量控制**：建立严格的数据校准机制和质量控制流程，确保采集到的数据准确可靠。

在网络覆盖方面，我们可以采取以下措施以解决网络覆盖的限制：**扩展网络覆盖范围**：增加网络设备和信号中继器，扩展网络覆盖范围，提高数据传输的稳定性。**多网络备份**：建立备用网络和卫星通信等多网络备份机制，应对网络信号不稳定情况，确保数据传输的可靠性。

在数据存储方面，我们可以采取以下措施以解决数据存储容量的问题：**采用分布式存储技术**：利用分布式存储技术，将数据存储多个节点上，提高数据存储的容量和可靠性。**数据备份和恢复策略**：建立完善的数据备份和恢复策略，定期备份数据并确保数据的安全性，以防止数据丢失和损坏。

通过以上解决方向的科学合理实施，智慧林业可以有效提高数据采集的稳定性和准确性，优化网络覆盖和传输速度，确保数据存储的安全性和可靠性，推动智慧林业向更加智能和可持续发展的未来。

## 5 结束语

当前，在智慧林业中，物联网边缘计算技术的应用前景十分广阔。通过不断优化技术和应用，智慧林业将实现更加智能化、精细化和高效化的管理模式，为林业资源的可持续发展和保护提供更加有力的支持。随着智慧林业的不断发展，物联网边缘计算将成为推动林业现代化转型的重要引擎，为构建绿色、智慧的林业生态系统做出积极贡献。

未来，随着技术的不断进步和创新，物联网边缘计算将在智慧林业中发挥更加重要的作用。通过传感器技术和数据处理能力的提升，智慧林业将实现更加精细化的监测和管理，提高资源利用效率和保护水平。网络通信技术的发展将实现稳定高效的数据传输，为分析决策提供更多支持。存储技术的完善将确保数据安全可靠。这将推动智慧林业向智能化和数字化方向发展，为林业管理和保护带来更多创新和发展机遇，助力林业行业迈向更加智能和可持续的未来。

## 参考文献

- [1] 杨凤.物联网与智慧林业融合发展研究[J].智慧农业导刊,2024,4(01):6-9.DOI:10.20028/j.zhnydk.2024.01.002.
- [2] 曹林,周凯,申鑫,等.智慧林业发展现状与展望[J].南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(06):83-95.
- [3] 侯祥鹏,兰兰,陶长乐,等.边缘智能与协同计算:前沿与进展[J].控制与决策,2024,39(07):2385-2404.DOI:10.13195/j.kzyjc.2024.0206.
- [4] 张淼,张英威,席珺琳,等.智能物联网中的边缘计算与数据处理[J].通讯世界,2024,31(03):132-135.
- [5] 刘飞,陈倩,黄天来.林业数字化时代下物联网技术的应用[J].现代园艺,2024,47(07):185-187.DOI:10.14051/j.cnki.xdyy.2024.07.028.
- [6] 陈钊,赵飞翔,张怀清.无人机辅助的林业物联网系统技术研究综述[J].世界林业研究,2024,37(02):22-26.DOI:10.13348/j.cnki.sjlyyj.2024.0023.y.
- [7] 何乃磊,张金生,林文树.基于深度学习多目标检测技术的林火图像识别研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2024,48(03):207-218.
- [8] 李存宇,张景忠.GIS在林火管理中的应用与展望[J].林业勘查设计,2023,52(06):62-65+74.
- [9] 赵文化,张月维,石艳军,等.基于 Himawari 和 FY4 卫星实时监测森林火灾蔓延初探[J].森林防火,2024,42(02):1-8.
- [10] 陈志平.无人机监测在森林火灾中的应用[J].森林防火,2023,41(04):135-138.
- [11] 孙伟韬.基于多光谱遥感影像的森林病虫害监测研究[J].桉树科技,2023,40(04):39-46.DOI:10.13987/j.cnki.askj.2023.04.006.
- [12] 赵洪莹,舒清态,王柯人,等.高光谱遥感技术在森林病虫害监测中的应用[J].绿色科技,2020,(19):145-148.DOI:10.16663/j.cnki.lskj.2020.19.057.
- [13] 郑绍鑫,何江,封成,等.基于机器学习算法的森林病虫害遥感模型对比研究[J/OL].热带农业科学:1-12[2024-07-01].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1038.S.20240621.1836.011.html>.
- [14] 陈华昌.物联网技术在智慧林业应用中存在的问题及对策[J].智慧农业导刊,2023,3(18):21-24.DOI:10.20028/j.zhnydk.2023.18.006.

# 高清时序数据驱动下的松材线虫病智能防控解决方案

周国模<sup>1</sup> 尤勇敏<sup>2</sup>

1 浙江农林大学 2 久瓴(上海)智能科技有限公司

**摘要：**松材线虫病是全国森林生态系统中最具危险性的森林病害，我国自 2021 年开启松材线虫病五年攻坚计划，旨在“应除尽除”，但实际疫情现状表明松材线虫防控形势仍然严峻。松材线虫物理防控的主要阶段分为发现阶段、除治阶段和监理阶段，发现阶段中由于大部分地区均缺乏高清数据支撑，疫木识别准确率不足；除治阶段也缺乏精准的疫木定位数据支撑，导致作业人员找不准伐不尽；监理阶段大多采用人工抽查制，缺乏全域的监理数据支撑。因此，高清数据支撑下的全流程精准闭环管理是提升松材线虫防控质量的关键。针对上述问题，本文基于高清时序近地遥感数据，提出了融合模型、数据、孪生底座的时空人工智能解决体系，实现了数据处理自动化、疫木识别智能化和业务场景模型化全流程闭环管理。一是创新“高清-时序-成本”三位一体的松材线虫病普查模式，外业采集年均两到三次的 3cm-6cm-6cm 的高清时序影像；内业搭建林业数据处理中台，针对近地遥感照片、森林资源调查数据和除治/监理业务数据建立多源数据汇集的数字特征库，同时中台中设计数据处理模块，自动完成信息提取、清洗、入库和结果数据的关联分析。流程实现全自动化，数据处理上图的时效达到 T+1，成本降低到 0.35 元/亩。二是设计了针对多时序遥感数据的“时空 AI 疫木识别模型”，模型包括样本库构建、训练和目标检测三大部分。（1）基于疫木初期、疫木中后期和疫木枯死期的不同成像特征，构建高质量的疫木识别样本库，开发样本自动推送和人机交叉检验平台，大大提高了标注的效率和质量，当前样本量已经达到 1000 万亩以上。（2）训练部分设计了基于 optuna 的超参搜索模块，能够支持小样本下模型的快速更新，灵活使用多种林区场景下的疫木精准识别。（3）模型已经覆盖南方林区三省，模型参数达到两千万以上，能够识别疫木初期、中后期和枯死期，识别的准确率和召回率均达到 85%以上。三是着眼于松材线虫防控的全流程闭环管理问题，设计了视算一体的数字孪生底座，底座设计了感知分析、业务规划、资金监管和智能报告 4 大模块，支持多源数据的可视呈现、变化统计、空间计算和关联分析，使得普查数据可指导除治/监理等业务环节，除治/监测数据能够反哺普查，实现松材线虫防控全流程主要阶段的数据和业务双闭环。据此，在浙江省某县实施了示范应用。对该县全疫区一年三次普查采集高清数据，包含除治前（10 月份、3cm）、除治中（来年 1 月份、6cm）和除治后（来年 4 月份、6cm）三阶段，目前已经覆盖两年多共 7 次，总计覆盖面积 700 万亩以上，底座实施运营 2 年。实践表明，高清时序数据可以精准监测疫木不同时期的状态，同时还可以辅助监理全域疫木未砍伐、未清运等违规现象。高清数据也可为当地林业工程、林业资源调查和生态修复等方面实现多跨应用。

**关键词：**松材线虫病；时空 AI 疫木识别模型；高清时序影像；数字孪生底座；智能防控

# 基于 Landsat-MODIS 图像填充与时空融合的 红树林物候优化提取\*

洪宇<sup>1,2</sup> 周润发<sup>2,3</sup> 陈科<sup>2,3</sup> 陈博<sup>1,2</sup> 潘俊福<sup>1,2</sup> 方梦凡<sup>2,3</sup> 旷开金<sup>1,4</sup> 刘金福<sup>1,2</sup>

(1.福建农林大学林学院 福州 350002; 2.福建省高校生态与资源统计重点实验室 福州 350002; 3.福建农林大学计算机与信息学院 福州 350002; 4.福建江夏学院金融学院 福州 350108)

**摘要:**【目的】植被物候是指植物生命周期中与季节变化相关的现象。红树林是一种生长在海水和淡水交接处沼泽的森林,准确提取物候信息对于获得红树林生长变化以及维护海岸带生态系统至关重要。然而,受限于滨海地区多云环境和卫星过境时间,大部分研究使用低时间分辨率、无云原始图像序列提取物候特征。结合图像空值填充和时空融合算法是一个能够优化红树林物候提取的思路,但数据量、计算量较大,红树林的遥感物候提取仍然面临挑战。【方法】以中国福建漳江口、广东淇澳岛、广西北仑、海南东寨港的红树林为对象,基于 2020 年的 30m Landsat、250m MODIS 数据和 500m MODIS 数据,在 Google Earth Engine 上结合图像填充算法和时空融合算法进行红树林物候优化提取。首先,基于 500m MODIS 数据,采用 Gap Filling and Savitzky - Golay filtering (GF-SG) 算法合成局部无空值的 Landsat NDVI 数据序列。其次,采用线性插值填充 250m MODIS NDVI 逐日数据的空缺值,并用 S-G 滤波平滑时间序列。进一步使用 ESTARFM - like 算法从 Landsat 和 MODIS 时间序列中拟合计算出高分辨率时间序列。最后,通过基于中心日期前后超过动态阈值的观测值比率差异提取时间节点的最大分离方法估计物候参数。【结果】(1) 基于 GF-SG 算法在 Landsat 和 MODIS 影像中都表现出比较好的空值填补和图像重建效果。与原始图像相比,重建 Landsat NDVI 图像的 RMSE 分别为 0.088、0.131、0.100 和 0.083,重建 MODIS NDVI 图像的 RMSE 分别为 0.088、0.131、0.100 和 0.083。(2) ESTARFM-like 算法能够拟合 30m 逐日 NDVI 数据,其结果与 GF-SG 拟合 NDVI 图像在不同红树林场景都表现出较强的一致性,R<sup>2</sup> 分别为 0.991、0.710、0.997 和 0.999。(3) 4 个地区的红树林 NDVI 都展现出明显地季节性特征。1 月至 4 月,NDVI 序列具有下降趋势或处于低值;4 月后 NDVI 序列先升高后降低。(4) 不同地区红树林的生长开始期 (SoS)、生长期长度 (LoS) 具有明显差异,呈现纬度越南、SoS 越早的特点。但东寨港的 SoS 晚于漳江口,可能是气候因素导致的物候异常。生长结束期 (EoS)、最大绿度 (MaxGreen) 无规律性差异。【结论】研究证实了图像空值填充和时空融合算法在红树林物候提取中的应用潜力,提出的方法对于更广泛、便捷地监测红树林物候提供参考依据。

**关键词:** 时空融合; 物候; 红树林; NDVI; Google Earth Engine

中图分类号 X87;TP751

文献标识码: A

文章编号: 1001-7488 ( ) -0000-00

# Optimized Extraction of Mangrove Phenology based on Landsat-MODIS Image Filling and Spatio-temporal Fusion

Hong Yu<sup>1,2</sup> Zhou Runfa<sup>2,3</sup> Chen Ke<sup>2,3</sup> Chen Bo<sup>1,2</sup> Pan Junfu<sup>1,2</sup> Fang Mengfan<sup>2,3</sup> Kuang Kaijin<sup>1,4</sup> Liu Jinfu<sup>1,2</sup>

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University Fuzhou 350002, China; 2. Key Laboratory of Ecology and Resources Statistics in Higher Education Institutes of Fujian Province, Fujian Agriculture and Forestry University Fuzhou 350002, China; 3. College of Computer and Information Science, Fujian Agriculture and Forestry University Fuzhou 350002, China; 4. College of Finance, Fujian Jiangxia University Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** Vegetation phenology pertains to the study of seasonal life cycle events in plants. Mangroves, a type of forest grows in intertidal zones where seawater and freshwater converge, require precise phenological monitoring to understand their growth dynamics and sustain coastal ecosystems. However, the cloudy conditions in coastal regions and the timing of satellite passes often necessitate the use of low temporal resolution, cloud-free image sequences for extracting phenological features. The combination of image gap filling and spatio-temporal fusion algorithms can enhance the accuracy of mangrove phenology extraction, but this approach requires extensive data and computational resources. Consequently, remote sensing phenology extraction of mangroves remains challenging. Mangroves in Zhangjiangkou (Fujian), Qi'ao Island (Guangdong), Beilun (Guangxi), and Dongzhaigang (Hainan), China, were selected as research subjects using 30m Landsat, 250m MODIS, and 500m MODIS data from 2020. The image filling algorithm and spatio-temporal fusion algorithm were combined on Google Earth Engine to optimize mangrove phenology extraction. Firstly, 500m MODIS data was processed using the Gap Filling and Savitzky-Golay filtering (GF-SG) algorithm to synthesize the Landsat NDVI data series, eliminating local null values. Secondly, linear interpolation addressed missing values in the 250m MODIS NDVI daily data, followed by Savitzky-Golay (S-G) filtering to smooth the time series. An ESTARFM-like algorithm was then applied to fit and compute high-resolution time series from the combined Landsat and MODIS data. Finally, phenological parameters were ultimately estimated using the maximum separation method, which relies on the differential ratio of observations exceeding the dynamic threshold before and after the central date. (1) The GF-SG algorithm showed effective gap filling and image reconstruction for both Landsat and MODIS images. Compared with the original images, the RMSE of the reconstructed Landsat NDVI images were 0.088, 0.131, 0.100 and 0.083, and the RMSE of the reconstructed MODIS NDVI images were 0.088, 0.131, 0.100 and 0.083, respectively. (2) The ESTARFM-like algorithm effectively fits 30m daily NDVI data, demonstrating high consistency with GF-SG fitted NDVI imagery across various mangrove scenes, with  $R^2$  values of 0.991, 0.710, 0.997, and 0.999, respectively. (3) The NDVI of mangroves in the four regions exhibited distinct seasonal variations. From January to April, the NDVI series displayed a downward trend or remained at a low value; after April, the NDVI series initially increased and then decreased. (4) Significant differences exist in the start of growth (SoS) and length of the growth period (LoS) of mangroves across different regions, with an earlier SoS observed at lower latitudes. However, Dongzhaigang's SoS is later than that of Zhangjiangkou, likely due to climate-induced phenological anomalies. No consistent differences are observed in the end of growth (EoS) and maximum greenness (MaxGreen). The study confirmed the potential of image gap filling and spatio-temporal fusion algorithms for extracting mangrove phenology. The proposed method offers a valuable reference for more comprehensive and convenient monitoring of mangrove phenology.

**Keywords:** spatio-temporal fusion; phenology; mangrove; NDVI; Google Earth Engine.

# 可穿戴的林草消防员险情辨识与定位搜救

姬淼鑫<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 河南工业大学电气工程学院, 郑州 450001

摘要: 森林火灾是一种破坏性极强的自然灾害, 对生态环境和人类社会造成了严重影响。在这种极端环境下, 保障森林消防员的安全和提高救援效率尤为重要。本团队提出了一种基于可穿戴设备和组合导航技术的森林消防员险情辨识与定位搜救系统。

首先, 本团队开发了一种可穿戴的林草消防员险情辨识与定位搜救设备, 该设备设计小巧, 便于佩戴, 集成了加速度计、陀螺仪、地磁传感器和气压计等多种传感器。通过复杂的算法, 设备能够实时监测和记录消防员的轨迹信息、当前位置以及环境状况, 实现对消防员运动状态的判断, 如行走、奔跑、停止和摔倒检测。当发生摔倒等异常情况时, 系统会自动发出警报, 通知指挥中心和附近救援人员, 从而实现对消防员险情的及时判断和响应。

其次, 本团队提出了基于组合导航的森林消防员定位系统。该系统在卫星信号受遮挡的地带, 采用惯性导航结合地磁和气压传感器, 实现自主导航; 在卫星信号良好的地带, 采用GPS与北斗导航系统结合的方式, 提高定位精度, 同时配合惯性传感器, 提供连续稳定的定位服务。通过手机端应用程序, 指挥中心可以实时查看消防员的轨迹和位置, 确保指挥调度的精准性和消防员的安全。



# 中国南方天然林气候敏感转移矩阵生长模型的建立

高原<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北京林业大学, 北京 100083

**摘要:** 本研究通过建立气候敏感性转移矩阵生长模型, 对模型进行检验, 并预测林分在不同碳排放情景下(RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5)未来 40 年间的生长状况。本研究利用第八次(2013)、第九次(2019)重庆市全国森林资源清查数据和 Climate AP 得到的气候数据, 建立气候敏感性转移矩阵生长模型。利用模型对实际林分开展生长预测, 对比不同气候情景下林分株数、胸高断面积、蓄积量变化情况。结果表明, 气候敏感性转移矩阵生长模型拟合精度表现良好, 各变量与林分生长、枯死、进界的关系符合自然演替和生长规律。虽然不同气候情景下的林木株数、胸高断面积、蓄积量的变化差异并不显著, 但是林分具有较好的更新幼苗和大径阶林木, 整个生长过程符合演替过程, 先锋树种逐渐被顶级群落树种取代。通过本研究建立的气候敏感性转移矩阵生长模型, 我们填补了重庆市天然次生林生长模型的空白, 为未来林分生长状况的预测提供了更准确的工具。通过该模型对林分展开长期预测, 我们能够更好地了解未来林分的生长趋势, 为未来森林经营提供可靠参考。这项研究的成果将有助于制定针对性的森林管理政策, 以更有效地应对气候变化和促进森林健康持续发展。

# 天然林碳汇量计算及监测样地布设支持系统构建

梁智胜<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北京林业大学, 北京 100083

**摘要:** 本研究开发了一套用于天然林碳汇量计算及监测样地布设的综合支持系统。该系统由两个主要模块组成。第一个模块利用 shp 文件, 采用系统抽样法进行监测样地的布设, 确保样地布设的科学性和代表性。第二个模块通过 shp 文件或 csv 文件, 根据输入的相关参数, 对碳层进行划分, 并逐年计算生物质碳储量、枯死有机质碳储量和土壤有机质碳储量及其变化量, 最终得出整体碳汇量。此外, 该模块还具备计算各碳层监测样地数量的功能。通过这两个模块的协同运作, 该系统能够精确地计算天然林碳汇量, 并科学地布设监测样地, 从而为天然林碳汇监测与管理提供了重要的技术支撑, 对森林碳汇研究和碳排放管理具有重要的应用价值。

# 特征选择和混合效应的加入改善了随机森林模型对单木枯死的预测

马颖皓<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北京林业大学, 北京 100083

**摘要:** 为了更好的预测林木的枯死, 对森林演变规律进行分析。基于山西省第七期(2004年)和第八期(2009年)全国森林资源连续清查数据。分别使用两种传统模型方法: 逻辑斯蒂模型(LR)和广义混合效应模型(GLMM)和基于随机森林算法的四种方法: 基础随机森林(RF)、混合效应随机森林(MERF)、使用GA算法进行特征选择的随机森林模型(GARF)和使用GA算法进行特征选择的混合效应随机森林模型(GAMERF), 对山西省天然林四个主要树种组(桦木、栎木、松木和杨树)的单木枯死率进行建模, 并使用SHAP分析对机器学习模型进行解释。结果表明①四种基于RF模型的方法在四个树种中的准确率都优于传统模型, 这说明RF模型可以改善单木枯死率的预测。②在模型种加入随机效应可以有效的提升模型的性能; ③使用GA筛选变量的随机森林模型, 表现较基础模型更好, 并可以更好的发掘气候方面的变量, 通过计算SHAP值对机器学习模型进行解释, 发现变量解释都符合生物学理论。

# 林分密度调控决策支持系统研究

赵卫高<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北京林业大学, 北京 100083

**摘要:** 林分密度对单木大小和林分产量具有重要的潜在影响, 因此可以通过控制林分密度来实现不同的经营目标。固定的轮伐期和严格的间伐时间表通常被用来指导人工林的经营, 但可能与特定的管理目标以及现场条件不一致。密度控制图能够量化确定不同经营目标下、不同森林类型在不同立地下的抚育间伐强度, 即精准量化具体林分的具体采伐株数, 确保经营目标的精准实现。目前常用的林分密度指数有两种, 赖内克指数(Reineke index)和相对株距指数(RS), 其中RS常用于人工林构建考虑自然灾害的密度控制图, Reineke可用于构建指导人工林和天然林生长和产量预测的密度控制图。随着林业的发展, 林分密度控制图的研究在理论和构建方法方面已经逐渐成熟与完善, 我国针对不同地区、不同树种先后编制了杉木 *Cunninghamia lanceolata*、油松 *Pinus tabulaeformis*、马尾松 *Pinus massoniana*、长白落叶松 *Larix olgensis*、兴安落叶松等主要用材树种的林分密度控制图。但由于缺乏友好的操作系统, 目前林分密度控制图还未被广泛应用。因此, 本文通过整合林业专业知识、计算机科技以及决策支持工具, 利用多种模型的算法整合和用户友好的操作界面, 开发了林分密度调控系统, 用于指导林分采伐。通过决策支持系统, 用户输入当前林分的平均水平或样地数据, 选择不同的经营目标, 系统可以在密度控制图上自动生成采伐线, 用以指导定量采伐和生产预测。例如, 可以有效通过密度管理来提高林分抗风、抗雪灾的能力; 也可以为碳汇林的经营提供理论依据, 简洁直观地展现出林分在不同生长时期内碳储量的变化等。

# 基于卫星观测与能量平衡模型的森林空间变化对区域气候的影响

曹金洪<sup>1</sup> 沈文娟<sup>1\*</sup>

(1.南京林业大学林草学院, 南方现代林业协同创新中心 南京 210037; )

**摘要:**【目的】本研究旨在构建造林与毁林时空模式及其对温度影响的效应评估, 揭示真实森林变化的生物物理机制与温度变化机制, 深化对长三角城市群森林变化的气候效应的全面理解与评估, 进而为森林从辐射与非辐射角度评估应对气候变化提供科学的数据与认知。【方法】以长三角地区为研究区域, 基于中高分辨率的土地覆盖数据进行森林变化的识别(2010-2020年)。在此基础上利用移动窗口策略、时空变化模式分析法, 比较发生变化的森林与未发生变化的森林或非森林的地表温度差异, 结合MODIS地表温度、反照率、蒸散发、长短波辐射通量等数据以及气温等数据量化尺度一致情况下的森林变化对地表温度的影响。通过辐射通量、土壤热通量以及能量再分配因子的变化构建地表能量平衡模型, 模拟森林变化对地表温度的影响。最后构建线性关联关系, 分析不同森林变化类型的温度效应与辐射、非辐射效应的关联。【结果】研究结果表明: (1) 通过地表能量平衡模型计算得出, 造林主要引起模型地表温度的下降, 当农田变为森林时, 平均下降了 $0.15 \pm 0.13^{\circ}\text{C}$ , 且在春夏季的白天更明显。毁林则一般引起模型地表温度的上升, 当森林变为农田时, 平均上升了 $0.10 \pm 0.14^{\circ}\text{C}$ ; 当森林变为不透水层时, 平均上升了 $0.25 \pm 0.26^{\circ}\text{C}$ , 且在春夏季的白天更明显。但是当森林变为草地时, 模型地表温度呈现为下降, 平均下降了 $0.15 \pm 0.22^{\circ}\text{C}$ 。(2) 通过地表能量平衡模型得出的地表温度与卫星观测的地表温度在变化趋势上大致相同, 二者具有一定的相关性(Pearson相关系数在0.77-0.96之间, 显著性P值均小于0.01)。但是二者的变化幅度差异较大, 总体上模型地表温度的变化幅度大于观测地表温度的变化幅度。(3) 由能量再分配因子引起的非辐射效应主导了长三角区域森林变化对地表温度的影响, 总体上非辐射强迫指数NRFI的值约为82.88%。与之相对的, 由反照率变化引起的辐射效应对长三角区域地表温度的影响较小。【结论】本研究的成果表明长三角地区森林变化的温度效应是由非辐射效应主导的, 林地和草地均有降温效果, 可以很好的应对气候变暖的趋势。因此, 本研究强调了保护林草地资源与落实退耕还林还草政策的必要性, 这对于改善长三角地区的气候乃至缓解全球气候的变暖具有重要的意义。

**关键词:** 森林变化; 卫星观测; 地表能量平衡模型; 地表温度

中图分类号 Q958.15; S154.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-7488 ( ) -0000-00

# 森林树(碳)表和森林树网研制及产业化

高飞<sup>1</sup>，李娜娜<sup>2</sup>，王勇军<sup>3</sup>，田颖泽<sup>1</sup>

(1 四川省林业和草原调查规划院，成都 610081; 2 四川省林业勘查设计院有限公司，成都 610081;

3 北京林业成都市农林科学院，成都 611130)

**摘要：**针对林草行业在生态文明建设中存在关键考核指标缺项、重大成效缺数、实时管理缺能，和先进装备稀缺，四大卡脖子问题，模拟智能电表、智能电网，原创性提出森林树（碳）表概念。实现产品产业化，提出森林树网、国家树网、地方树网、森林碳网等概念及解决方案，革新森林资源调查监测模式，并在林草生态综合监测森林碳汇、国家储备林、古树名木等项目中推广应用。项目组建成包含 38 项专利的高价值专利组合，其中国际发明专利 7 项、国内发明专利 27 项、实用新型专利 3 项、外观设计专利 1 项；登记软件著作权 15 项，注册商标 6 枚，出版著作 1 部，发表省级标准 1 项，构建知识产权全链条保护体系。项目组在四川省国家林草生态综合监测工作、中央财政林草科技推广示范项目、四川卡莎湖省级自然保护区能力提升、西昌市古树名木实时监测等项目实现销售 222 万元，2024 年意向合作项目近 20 个，具有广泛的推广应用前景。

# Geospatial assessment of climate and human pressure on Snow Leopard habitat in the Trans-Himalayan region of Pakistan

Um e Hani<sup>1</sup>

(1Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Reliable estimates of how human activities may affect wildlife populations are critical for making scientifically sound resource management decisions. A significant issue in estimating the consequences of management, development, or conservation measures is the need to account for a variety of biotic and abiotic factors, such as land use and climate change, that interact over time altering wildlife habitats and populations. The snow leopard *Panthera uncia* (Schreber, 1775), as a vulnerable species, is extremely sensitive to indirect impacts of climate change. Given that it is highly difficult undertaking conservation measures on the entire range of snow leopards, identifying hotspots for conservation is necessary. This study was conducted in Bagrot and Haramosh valleys, in the Trans-Himalayan region, to evaluate the impacts of climate and human pressure on snow leopard habitat. Hybrid classification of Landsat satellite data for 2010 and 2020 was performed to elucidate land use changes that suggested a decrease in permanent snow by 10 % and 3 % in Haramosh and Bagrot while an increase in settlements cover by 16 % and 23 %, respectively. Life zone comparison for 2010 and 2020 using the Holdridge life zone (HLZ) classification system disclosed a change from three life zones to five life zones in Haramosh, and four life zones to five life zones in Bagrot, caused by a temperature increase of 2°C to 3°C, indicating that the area is becoming more and more suitable for settlements and less favorable for snow leopards. This study underlines again that mountainous regions are more vulnerable to the impacts of climate change. Warming weather is making survival more difficult for snow leopards. Although they are resilient to the direct effects of climate change, indirect impacts like avalanches, flash floods, urbanization, and human-wildlife conflict make them more vulnerable and threaten their survival. Thus, we recommend establishing further protected areas, better controlling illegal wildlife trade, and conducting genetic studies to understand impacts on snow leopards and rangeland management, livelihood improvement, and human-wildlife conflict reductions.

**Keywords:** Climate change, Snow leopard, Hybrid classification, Holdridge life zones, Habitat modification