

中国智慧林草研究进展

韩长志^{1,3*} 黄垠凌^{1,2} 崔庆江⁴

(1. 西南林业大学林学院, 云南 昆明 650224; 2. 西南林业大学研究生院, 云南 昆明 650224; 3. 云南省森林灾害预警与控制重点实验室, 云南 昆明 650224; 4. 云南林业职业技术学院, 云南 昆明 650224)

摘要: 智慧林草作为融合现代信息技术的新型生态管理模式, 依托智能传感器与信息网络系统, 实现对林草资源的动态监测、精准管理、科学决策和高效利用。该模式在提升资源利用效率、加强生物多样性保护、增强灾害预防与恢复能力和促进林草业可持续发展等方面成效显著, 已逐渐成为中国生态文明建设的重要技术支撑。然而, 当前关于智慧林草发展的系统性报道相对匮乏, 制约了该模式的进一步创新与推广。本文基于对国内外智慧林草发展历程的系统梳理, 结合对其关键技术及应用范围的分析, 提出中国智慧林草发展仍面临自动化水平不足、智能化程度不高以及精准化能力偏弱等突出问题。针对上述瓶颈, 从自动化、智能化以及精准化三个层面, 提出未来中国智慧林草的研究重点与发展方向。

关键词: 智慧林草; 信息化; 自动化; 生产力

中图分类号: F326.20

文献标识码: A

文章编号: 2097-5279(2026)02-0024-10

DOI: [10.27035/j.cnki.issn2097-5279.20260203](https://doi.org/10.27035/j.cnki.issn2097-5279.20260203)

Research progress on Smart Forestry and Grassland in China

Han Changzhi^{1,3*} Huang Yinling^{1,2} Cui Qingjiang⁴

(1. College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Graduate School of Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 3. Yunnan Key Laboratory of Forest Disaster Warning and Control, Kunming 650224, China; 4. Yunnan Forestry Technological College, Kunming 650224, China)

Abstract: As a new ecological management model that integrates modern information technology, Smart Forestry and Grassland relies on intelligent sensors and information network systems to enable dynamic monitoring, precise management, scientific decision-making, and efficient utilization of forest and grassland resources. It has achieved significant results in enhancing resource utilization efficiency, strengthening biodiversity conservation, improving disaster prevention and recovery capabilities, and promoting the sustainable development of forestry and grassland sectors, and has gradually become an important technological pillar for China's ecological civilization construction. However, systematic reports on the development of Smart Forestry and Grassland are currently scarce, which hinders further innovation and promotion of this model. Based on a systematic review of the development history of Smart Forestry and Grassland both domestically and internationally, combined with an analysis of its key technologies and scope of application, this paper points out that the development of Smart Forestry and Grassland in China still faces prominent issues such as insufficient automation, low levels of intelligence, and weak precision capabilities. To address these bottlenecks, this paper proposes future research priorities and development directions for China's Smart Forestry and Grassland sector across three dimensions: automation, intelligence, and precision.

Keywords: Smart Forestry and Grassland; informatization; automatization; productivity

智慧林草技术是以集成传感器、无人机、卫星遥感、大数据分析和人工智能等多种技术手段为支撑, 通过构建“感知-传输-分析-决策”技术链, 实现森

林和草原资源智能化管理的现代生态治理体系(曹林等, 2022)。2023年7月, 习近平总书记在全国生态环境保护大会上指出: “深化人工智能等数字技术

收稿日期: 2024-10-22; 修回日期: 2025-02-21。

基金项目: 西南林业大学学术学位研究生精品课程建设项目(森林保护学)(202502); 西南林业大学教育科学研究课题(JWC-ZD202501); 云南省科技特派员项目(20250353)。

* 通信作者: 韩长志(E-mail: hanchangzhi2010@163.com), 教授。

引文格式: 韩长志, 黄垠凌, 崔庆江. 2026. 中国智慧林草研究进展[J]. 树木医学, 3(2): 24-33.

Han C Z, Huang Y L, Cui Q J. 2026. Research progress on Smart Forestry and Grassland in China[J]. Tree Health, 3(2): 24-33.

应用,构建美丽中国数字化治理体系,建设绿色智慧的数字生态文明。”作为生态环境治理的一种方式,智慧林草技术将多种技术手段有机融入生态文明建设,保证了数据采集、处理和分析的准确性、时效性和全面性,从而实现林草资源的智能化监测、科学决策和精准调控,能够更有效地提升生态保护效能与资源可持续利用水平。在全球气候变化和生态环境问题日益严峻的背景下,智慧林草研究作为生态文明建设的重要支撑,正逐步成为中国林草领域科技创新的前沿方向。近年来,新一代信息技术与林草科技深度融合,为促进科技成果转化、推动林草高质量发展提供了重要契机(韩长志等, 2025)。

当前,智慧林草技术应用已取得显著进展。基于智慧林草体系,集成物联网、大数据、云计算、人工智能等技术,可以实现林草资源实时监测、数据分析和决策支持的协同运作(肖粤新等, 2022)。利用遥感技术开展植被动态监测,结合大数据分析预测林草资源变化趋势(胡雅娟等, 2024)。同时通过智能传感器和监测设备提高数据采集能力,运用数据融合技术提升处理精度与效率(何芸, 2023);依托人工智能、机器学习算法实现模式识别与趋势预测,为科学决策提供智能化支撑(王洪胜等, 2024)。通过智慧林草技术实时监测森林和草原覆盖率、植被生长情况等关键指标,可有效评估林草资源的健康状况和可持续利用潜力;构建的火灾监测预警系统可实时监测环境参数,并结合历史数据和气象信息评估火灾风险,为灾害防范提供指导(冯德乾等, 2023)。

前人对我国智慧林草领域开展了诸多研究,主要集中在以下几个方面:1)通过智能传感器和信息网络系统实现林草生态的智能化识别、定位、监测和管理;2)利用智能算法处理和分析海量林草业数据,提高决策精度(吕欧, 2023);3)利用无人机辅助物联网系统,通过数据采集、无线中继和移动边缘计算等技术,解决林区通信基础设施薄弱、传感器能量受限及计算能力不足等核心问题(陈钊等, 2024)。但目前有关智慧林草发展历程、技术体系演进、现状及未来趋势等系统性报道较为匮乏。本文旨在梳理中国智慧林草研究的最新进展,深入探讨关键技术突破与应用实践,以期为优化未来研究路径、促进可持续发展提供理论参考。

1 国内外智慧林草发展历史沿革

1.1 国外智慧林草发展经验

国外智慧林草发展经验表明,发达国家通过融合

数字技术、精准育种、公私合作与社区参与等措施,有效提升了森林资源管理与生态保护效率。日本注重运用人工智能、信息与通信技术及“3S”技术(遥感技术 remote sensing, RS; 地理信息系统 geographic information system, GIS; 全球定位系统 global positioning system, GPS)构建林木信息数据库,实现机械化作业与精准育种,推动森林资源高效利用(郭乐东等, 2022)。美国智慧林草发展的核心经验,在于依托长期、系统的资源监测网络和高新技术研发应用,从而实现精准管理与科学决策。自1928年起,美国林务局通过森林调查与分析中心持续开展全国森林资源清查与健康监测,利用积累近百年的连续数据,并结合遥感、地理空间技术、大数据分析等手段,评估森林生长潜力、健康状况及气候变化影响,为可持续经营提供科学依据;在灾害防控方面,利用林火预警软件、空中侦察等技术动态评估火灾风险与病虫害扩散趋势,实施“国家防火计划”和“森林病虫害管理”计划,有效降低灾害损失(张卓立等, 2022)。此外,美国林务局广泛建立公私伙伴关系(Public-Private Partnership, PPP),与可口可乐、迪士尼等近80个企业及非营利组织合作,每年获得约5.33亿美元投入,用于森林健康监测、碳汇交易及城市林业项目,如“种植一百万棵树”计划通过碳信用额度和私人基金会弥补资金缺口(姜喜麟等, 2019)。德国通过独立科研机构 and 大学体系,系统研究气候变化对森林生物多样性的影响,并开发适应性经营方案(郭乐东等, 2022)。印度则通过联合森林管理制度,依托联合森林管理委员会吸纳社区参与,结合利益共享和微计划编制,森林覆盖率从19.43%增至21.67%(朱洪革等, 2021)。芬兰在林业政策中融入新社团主义,鼓励公众参与决策;同时国家林业局转制为市场化企业,剥离行政管理职能以解决“运动员兼裁判员”的问题(陈欣和陈勇, 2023)。综上所述,国外智慧林草发展的核心经验包括:以数字技术为基础构建资源监测与决策支持系统;以PPP模式撬动社会资本;以社区共管和权利共享促进治理效率;以适应性政策和持续科研应对气候变化。这些经验为我国林草智慧化发展提供了重要参考。

1.2 中国智慧林草发展历程

中国的智慧林草领域起步较晚但发展迅速,在基础设施和科技创新等方面展现出巨大的潜力,并且注重顶层设计。2011年,中国科学院遥感应用研究所等多个研究机构共同研发出国家级的林业有害生物灾害监测与预警系统,能够实现全国范围内林业有害生

物灾害信息可视化(常原飞等, 2011); 2019 年, 宁夏推出护林员巡护远程监管信息化管理系统, 有效解决了传统林业巡护管理手段耗时、耗资、耗人力等问题(安必宁, 2019)。与此同时, 无人机技术的不断发展, 为中国草原健康监测及防火系统的建立提供了技术支撑(袁晓春等, 2012)。张建辉等(2019)提出了“建成一张网, 形成两个体系, 实施三大工程, 构建四个中心”的发展思路, 并强调了基于 3S 技术和计算机网络技术的地理信息系统数据库平台的建设; 孙中平等(2020)推出“星-空-地”一体化遥感观测技术。

中国林业政策经历了从以木材生产为核心向以生态建设为主导, 并最终迈向高质量发展与治理体系现代化的深刻转型, 这一过程为智慧林草政策的孕育与发展奠定了坚实的制度、技术与理念基础。早期政策以规制型工具为主, 高度依赖行政命令进行资源管控, 如实施木材统购统销和限额采伐(余洋婷等, 2021), 政策主题聚焦于“木材供应管理”与“林业生产活动”, 旨在为国家工业化提供原始积累(马艺菲等, 2025)。随着改革开放和市场经济体制的建立, 政策开始兼顾经济与生态效益, 经济激励型工具如贴息贷款、税收优惠等逐步引入, 政策主题扩展至“造林绿化行动”与“森林采伐管理”, 并开始重视科技在林业中的应用, 技术推广和人员培养成为新的关注点(郑瑀豪等, 2024)。进入新时代, 特别是党的十八大以来, 在“绿水青山就是金山银山”理念和“中国式现代化是人与自然和谐共生

的现代化”目标指引下, 林业政策进入优化提升与系统深化阶段。首先, 在顶层设计上, 明确强调“林业科学技术提升”与“科技支撑”, 例如国家林业局发布《关于加强重点林业建设工程科技支撑的指导意见》等文件, 将科技研发、技术改革和信息化建设确立为核心政策主题, 直接推动了全国林业信息化建设和林业管理向智能化、精细化转型(马艺菲等, 2025; 郑瑀豪等, 2024)。其次, 在具体政策工具应用上, 信息公开型工具的地位大幅提升, 其使用频率在 2009—2019 年达到 18.3%, 内容从早期的监督考核结果通报, 扩展至政务公开、监测结果公开等, 这为构建基于大数据的林草资源动态监测体系和智慧决策平台提供了数据公开与信息共享的政策基础(余洋婷等, 2021)。此外, 为填补现有研究在基于政策文本定量评估中国林业政策效果方面的空白, 余洋婷等(2021)通过政策力度与工具二维框架量化分析 2 495 份林业政策文本, 发现部门规章和通知类文件显著增长, 规制型工具使用频次占比呈下降趋势, 而经济激励、信息公开和社会参与型工具的使用频率占比则呈上升趋势, 表明中国林业政策正从强制管控转向多元治理。中国智慧林草研究从政策效果定量评估到技术协同应用不断深化, 相关技术广泛应用于遗传育种、资源监测与经营管理、火灾监测预测、病虫害防治以及野生动植物保护等多个方面(表 1)(李海亮等, 2024), 取得了显著成效, 为中国林草资源的可持续管理提供了有力支撑。

表 1 国内智慧林草关键技术的发展情况

Tab. 1 The development of key technologies for smart forests and grasslands in China

技术 Technology	功能 Function	典型应用场景 Typical application scenarios
物联网技术 Internet of Things technology	实时监测和预警、数据采集、智能化管理	森林资源与环境实时监测, 森林火灾实时监测预警, 森林病虫害监测预防, 林业生产智能化管理, 林区安全实时监控
3S和北斗导航技术 3S technology and Beidou navigation technology	大范围的生态环境调查和监测、生态经济价值潜力分析	大范围森林资源调查与监测, 森林病虫害分布及变化监测, 森林经济价值与潜力分析, 森林生态环境监测与评估, 森林火灾实时监测与定位, 林木生长参数提取与性状评价
云计算和大数据技术 Cloud computing and big data technologies	信息共享、生产智能管护、智能决策支持	建设林业资源信息共享平台, 构建林业生产智能管护系统, 森林火灾与病虫害监测预警建模, 利用地理云平台进行资源监测、灾害预警及生态评估, 支持智能决策
移动互联网技术 Mobile Internet technology	数据移动采集、资源环境移动监管	林业数据移动采集, 林业资源与环境移动监管, 森林火灾与病虫害移动监测预警, 林业生产技术移动指导, 古树名木移动跟踪, 应急救援移动视频指挥, 移动政务与经营

2 智慧林草发展中所采用的关键技术

2.1 智能感知技术

智能感知技术的核心基础设施是智能传感器和信息网络系统, 通过物联网、云计算、大数据及移动

互联网等关键技术, 实现对林草资源与环境的实时监测、精准数据采集、智能分析与决策支持, 提升资源管理效率(李海亮等, 2024)。智能传感器主要用于采集林草及环境信息数据, 信息网络系统主要用于林草业感知信息流通和管理等, 能够简化外业调

查数据采集系统流程、推动林草业数字化进程、促进林草业管理水平的提升。由于林草资源具有空间分布广、时间周期长等特点,数据收集工作任务繁重,智能感知技术的使用能够保证数据的准确性和时效性。林草业智能感知技术的发展,极大地提高了林草业资源的管理效率和保护水平,为实现林草业可持续发展提供强有力的技术支撑。

2.2 空间信息技术

空间信息技术主要涉及3S技术,其初期在林草业资源调查和管理中的应用主要为数据采集、区划判读、外业调查、数据库和图形库建立等。随着技术进步,3S技术正朝着自动化、集成化方向迈进,并展现出构建预测模型和优化森林空间布局的潜力,为林草业管理注入了新动能。在全空间地理信息时代,GIS技术可通过整合遥感、云计算、大数据等技术,实现林草业资源的全面感知、智能决策和高效管理,提高资源管理效率,促进林草业可持续发展。GPS作为精准定位的核心技术,能够提供精确的地理位置信息,在林草资源的定位和导航中发挥关键作用,例如美国GPS及其广域增强系统(wide area augmentation system, WAAS)、俄罗斯GLONASS、欧洲EGNOS与GALILEO系统等。遥感技术在草地资源调查中的应用提高了调查精度和效率,孙敏轩等(2023)利用现代遥感技术建立规范化的遥感解译框架,支持草地资源的调查与管理,并强调建立草地系统知识共享平台的重要性。此外,吴恒和闫睿(2024)提出林业遥感应发展的4个方向:图像识别与分类、定量遥感与反演、尺度效应与转换、影像变化监测。从基础数据采集到智能决策支持,从单点定位到生态系统级监测,空间信息技术正重构林草业管理模式。空间地理信息技术的发展,为林草业资源的高效管理和利用提供了强有力的技术支持,有助于生态环境保护和林草业可持续发展。

2.3 人工智能技术

当前,人工智能正与林草业深度融合,推动行业向智能化、自动化、精准化转型升级。《国家林业和草原局关于促进林业和草原人工智能发展的指导意见》提出,到2035年,中国林草人工智能在理论、技术与应用层面总体达到世界领先水平。在实践层面,人工智能技术已形成多维度应用场景:1)使用遥感技术结合机器学习算法,对林草覆盖度、生长状况和生物量进行监测和评估;2)通过遥感影像识别技术,自动识别和预警林草业病虫害,提高防治工作的时效性和准确性(杨军等, 2024);3)利用卫星遥感、无

人机巡查和机器学习模型预测火灾风险,及时响应火灾事件。技术演进正催生更多突破性应用场景,如使用无人机进行自动化森林巡查、基于物联网的智能监测系统等。此外,人工智能技术还具有帮助决策者解决林草业中复杂问题的潜力,如规避气候变化对林草生态系统的影响、林草资源的可持续管理等(Cesco et al., 2024)。人工智能技术推动了林草业向更高效、智能化的方向发展。

2.4 智能装备研发

中国的林草智能装备正处于技术融合创新发展阶段。例如,林草业机器人通过集成机械、电子、计算机控制和人工智能等技术,可执行林草生产和经营的各种任务;无人机技术作为智慧林草建设的重要组成部分,凭借其高效、精准、安全和成本可控等优势,在森林资源调查和管理、病虫害监测预警和森林防火等领域,展现出巨大的应用潜力。通过搭载高清摄像头、激光雷达等传感器,无人机能够实现林草资源的全面监测、病虫害的实时识别和火场的快速勘察,为林草业管理提供了强有力的技术支撑(管华, 2024)。在病虫害实时识别方面,固定翼无人机能够高效准确地监测松材线虫病疫点,与数字摄影测量技术相结合能够精准定位病死木;在林草火灾监测方面,中国的北斗三号全球卫星导航系统(BDS-3),可提供动态分米级、静态厘米级的精密定位服务,结合星基增强和精密单点定位服务,可实现高精度定位(林泽攀和武红敢, 2022)。目前,中国正致力于解决林业机器人研发中的难题,如复杂环境中的运动控制、目标识别和适应性问题(刘延鹤等, 2020)。

3 智慧林草的应用范围

3.1 林草资源监测与管理

林草资源监测是林草业资源管理和监督的基础性工作,其核心是通过精准分析大数据应用需求,及时掌握林业资源现状和消长变化动态,预测林草业资源发展趋势,为林草业经营管理科学决策服务(图1)。在林草业资源监测与管理中,数据的收集与分析具有重要意义。在物联网和现代通信技术的协同支撑下,通过大数据进行林草业环境数据的采集、存储与分析,不仅保障了海量数据的实时采集与高效传输,还显著提升了信息传输效率与监测网络覆盖能力。基于此构建的“天地空”一体化全面智慧感知体系,将成为新时期实现林草资源监测与管理的重要方向(张雅娴等, 2023)。王林等(2023)通过搭建新疆生产

建设兵团智慧管理平台,将这一创新理念具体应用于草原资源管理实践。该研究不仅有效落实了国家提出的草原资源“一张图”管理理念,而且通过建立以草原小班(图斑)为基本单元的精细化管理系统,

实现了“天地空”多源数据的协同采集与深度融合,为立体观测网络体系的技术实现提供了可操作的示范案例,推动了林草资源监测从理论框架向工程化应用的跨越式发展(图 2)。

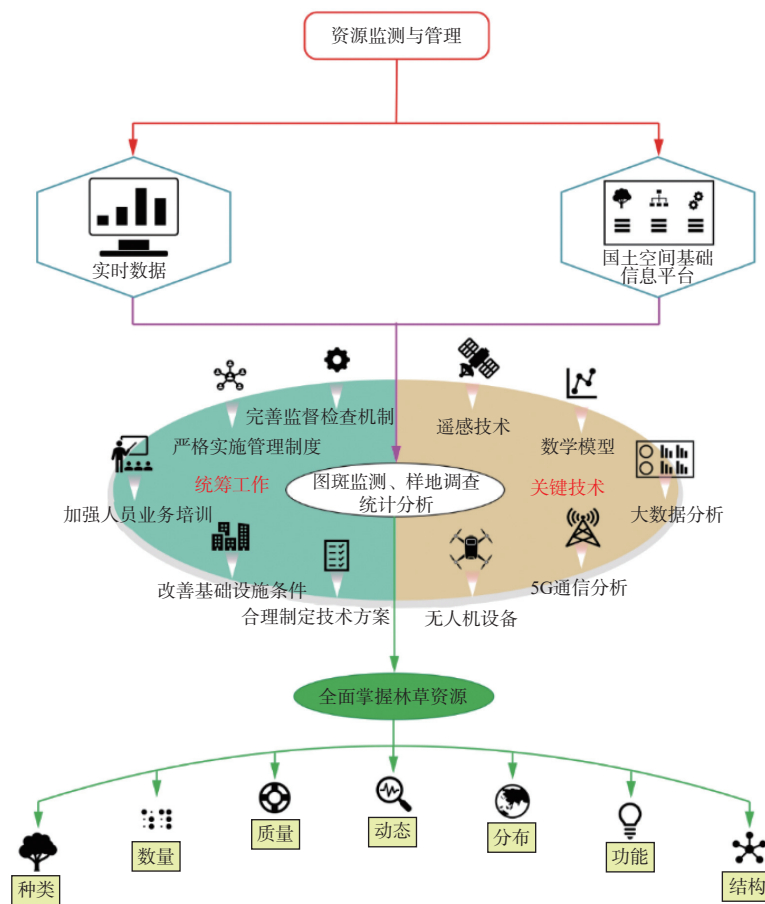


图 1 资源检测与管理框架图
Fig. 1 Resource detection and management framework

3.2 林草病虫害防治

智慧林草技术在林草病虫害防治中的应用已成为现代林业生态保护和可持续发展的重要手段。物联网技术的应用使得林草病虫害监测更加高效和精准,通过在林区部署传感器网络、智能监测设备可以实时采集林草生长环境数据并了解病虫害发生情况,如智能虫情测报灯利用图像识别技术自动识别害虫,大幅提高了监测效率和准确性,减轻了基层植保人员的工作负担(Wang et al., 2020)。卫星遥感和无人机遥感能够快速获取大范围林区的病虫害信息,通过分析植被指数、光谱特征等数据,实现对病虫害发生区域的精准定位和动态监测。人工智能和大数据技术通过对历史数据和实时监测数据的深度挖掘和分析,建立病虫害发生发展的预测模型,能够提前预判病虫害的发生趋势和危害程度。

在防控方面,智慧林草基于物联网技术,通过智

能决策支持系统,根据病虫害发生情况和环境条件,制定个性化的防控方案,减少化学农药的使用量,降低对环境的影响(丁亚会等, 2024)。智慧林草技术还促进了林草病虫害管理的信息化和智能化,通过建立统一的信息管理平台,实现病虫害监测数据、防控措施、资源信息等整合与共享,提高了林草病虫害管理的决策科学性和工作效率(封洪强等, 2023)。未来,随着技术的不断创新和应用的深化,智慧林草系统将在林草病虫害防治中发挥更加重要的作用,助力实现林草业生态保护高质量发展。

3.3 林草生态保护与修复

智慧林草技术正以信息化思维重塑绿水青山,为林草生态保护修复开启精准化、动态化、智能化的新纪元(陈振升等, 2025)。孙晓莉等(2021)通过融合草地资源综合动态变化度、地学信息图谱与 Logistic 回归模型,对会泽县草地资源动态变化展开定量研

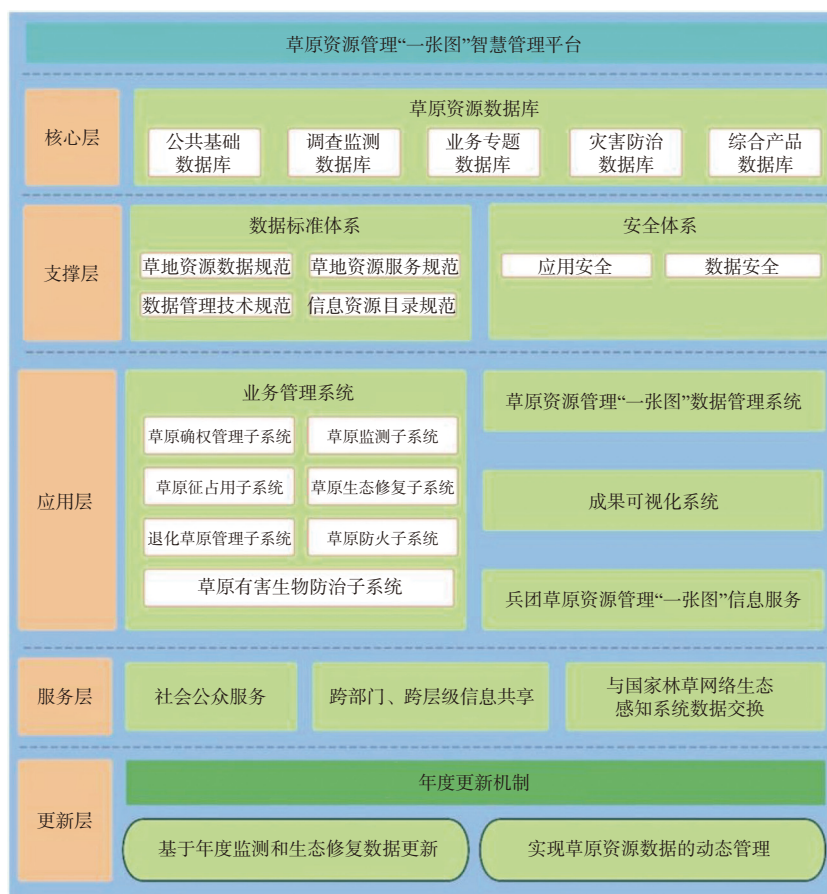


图2 草原资源管理“一张图”智慧管理平台总体框架图

Fig. 2 The overall framework diagram of the "one map" intelligent management platform for grassland resource management

究,结果表明草地资源实现净增长 21 134.51 hm²。这一发现表明,融合数据驱动、人工智能与生态规律的方法,能够弥补当前研究中监测手段粗放、人为驱动因素量化不足等短板,有助于推动林草生态保护从传统“经验治理”向更科学的模式转变,并为退化生态系统修复提供可借鉴的技术思路。此外,利用现代遥感技术和信息化手段可以深入了解中国林草资源生态修复的关键制约因子,如林草种质资源、土壤养分、土壤微生物等,为未来林草生态系统保护和修复提供支持,有助于建立健全监测预警体系,实现对林草资源和主要生态因子的动态监控。智慧林草为林草业工作者提供便利,促进了林草资源的合理利用和生态价值的充分释放,在林草生态保护与修复方面具有重大意义。

4 中国智慧林草发展面临的突出问题

4.1 智慧林草自动化建设存在短板

智慧林草技术在实际应用中面临诸多挑战,导致其自动化水平和推广效果受到限制,主要体现在以下几个方面:1)缺少工程性技术标准的指导。各

地开展管理工作时采用的开发平台和数据管理系统存在差异,数据的标准化程度和格式不统一,进而形成信息孤岛现象。2)信息安全问题日益突出,数据泄露、网络攻击等风险增加。3)存在资金短缺与人才缺乏的问题。在数据收集、整理及管理的过程中,设备与系统需要定期维护和更新,资金投入与专业人才的培养成为突出挑战。4)智慧林草技术相对复杂,技术普及度不足。在偏远或经济条件较差的地区,农户对新技术的接受度和使用度不高,需进一步加强培训和推广。此外,林草机械化水平也是影响林草业自动化水平的重要因素。例如,林草机器人的多机械手协调作业功能决定其在复杂林草业作业中的效率和灵活性,而多传感器信息融合功能则直接影响机器人的感知能力和决策能力(谭见君和范润宇, 2022)。

4.2 智慧林草智能化发展亟待提升

首先,信息采集设备的稳定性、精确度与覆盖范围存在不足,加之林草业数据具有海量、复杂、多维度等特点,而目前数据处理和分析技术不成熟,导致智能装备与现代培育技术的结合、多尺度林草生长

监测及健康诊断、林草资源精细化管理规划和经营决策等领域的智能化水平仍有待提升,未能充分发挥智慧林草在林草业现代化建设中的推动作用(曹林等, 2022)。其次,现行政策法规未充分考虑“互联网+”智慧林草的特性和需求,其更新和修订速度明显滞后于技术发展步伐。政策评估滞后不仅制约着林业政策的科学发展,也是导致政策失误或绩效不高的主要原因。当前,国内关于政策文本效力、政策力度、政策措施及政策反馈的量化分析相对欠缺,尚未系统构建政策效力评价指标体系,致使政策对智慧林草技术应用的引导和约束力不足(孟贵和王卫华, 2024)。

4.3 智慧林草精准化应用相对滞后

由于从事林草业管理的人员流动性较大、专业性不足,当智能设备或系统出现故障时,往往无法及时修复,导致智慧林草管理模式构建进程较为缓慢;构建智慧林草管理模式需要配置相应的网络系统、网络平台和物联网技术等,资金不足也是制约其推进的主要问题之一。智慧林草管理模式与精准化水平协同发展,共同构建和深化该模式,有利于推动林草治理体系和治理能力现代化,实现生态、经济、社会效益的最大化。在林草业资源管理中,数据采集和分析是基础性工作,但目前存在数据采集不全面、分析方法不精准等问题,影响了智慧林草的精准化水平。同时,智慧林草的相关技术迭代速度较慢,难以适应现代林草业管理的需求,导致精准化水平提升缓慢。例如,遥感数据的采集和处理可能存在时间延迟,且其迭代速度较快,使得现有的设备和软件很快过时,需要持续地投入和更新(周凯和曹林, 2021)。

5 展望

5.1 智慧林草自动化水平将成为未来发展的研究热点

智慧林草的自动化主要依赖大数据分析、高效传感器以及一体化管理服务平台实现。建立自动化处理系统,能够减轻劳动强度、降低用户使用难度,未来可进一步集成最新的信息技术,以提高监测和管理的智能化水平。例如,通过物联网技术,结合在林草业中部署的智能传感器、RFID标签、无线网络等设备,实现对森林环境信息和林业资源信息的实时感知、采集与传输,进而实现林业资源的智能化监测、管理与自动化控制,提升林业管理效率和资源利用水平(冯戈, 2019)。

5.2 智慧林草智能化水平将成为未来发展的研究难点

智慧林草智能化的核心在于控制、数据和安全,

其不仅是自动化的高级阶段,还是仿生学的一种形式(Buchelt et al., 2024)。例如,通过传感器监测技术结合光谱分析法进行林草高通量表型监测,建立林草表型组学数据库;结合多组学研究,深度挖掘林草优异基因资源;利用3S、物联网、云计算等技术,实现林草生长精确监测诊断、智能装备变量灌溉施肥等一体化的现代林草培育技术体系(Sutcliffe et al., 2021)。同时,研究“天-空-地”一体化全面智慧感知体系,开发大数据存储管控平台及可视化分析技术,构建智能化林草火灾和病虫害等监测与预警等技术体系。此外,还可以结合虚拟现实(virtual reality, VR)技术,创建生态系统的虚拟副本,使得规划者和管理者能够在沉浸式的环境中评估和测试不同的管理策略。

5.3 智慧林草精准化水平将成为未来发展的研究重点

随着全球生态治理需求的升级与信息技术的深度融合,智慧林草精准化水平的提升将成为未来研究的核心方向。在数据采集层面,应突破传统技术局限,构建“空-天-地-人”一体化感知网络。通过集成激光雷达、多光谱无人机、北斗导航及低轨卫星链技术,实现对植被覆盖、病虫害、碳储量等参数的高频次、广域化动态监测。在数据融合层面,可通过整合各类适应性强的传感器测量结果,减少单一传感器的误差,提高测量结果的准确性(Ehrlich-Sommer et al., 2024)。区块链具备可溯源、去中心化等特性,能够助力林草业工作者实现资源的透明化管理,突破遮挡监测瓶颈与数据安全壁垒(Damaševičius et al., 2024)。在数据分析领域,应深化人工智能与云计算技术的应用,借助深度学习模型(如卷积神经网络 convolutional Neural Network, CNN;长短期记忆网络 long short-term memory, LSTM),实现单木识别、火灾风险预测的自动化解译,并依托林业数字孪生平台模拟生态响应,优化管理决策。在政策管理层面,应强化资金协同机制(如PPP模式)和人才培养体系,通过试点示范推动技术落地。未来研究应以“精准感知-智能决策-动态优化”为目标,推动智慧林草从理论创新向生态价值转化,为实现“双碳”目标和生物多样性保护提供科技支撑。

参 考 文 献

- 安必宁. 2019. 宁夏智慧林业——以护林员巡护远程监管信息化管理系统的应用为例[J]. 宁夏农林科技, 60(12): 2-3, 22-24.
- An B N. 2019. Ningxia smarter forestry——Taking the application of information management system of remote supervision of forest rangers

- as an example[J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 60(12): 2–3, 22–24. (in Chinese)
- 曹林, 周凯, 申鑫, 等. 2022. 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)*, 46(6): 83–95.
- Cao L, Zhou K, Shen X, *et al.* 2022. The status and prospects of smart forestry[J]. *Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition)*, 46(6): 83–95. (in Chinese)
- 常原飞, 武红敢, 董振辉, 等. 2011. 国家级林业有害生物灾害监测与预警系统[J]. *林业科学*, 47(6): 93–100.
- Chang Y F, Wu H G, Dong Z H, *et al.* 2011. A national monitoring and warning system for forest pest based on service-oriented architecture[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 47(6): 93–100. (in Chinese)
- 陈欣, 陈勇. 2023. 芬兰林业政策的演变、特点与启示[J]. *世界林业研究*, 36(2): 114–120.
- Chen X, Chen Y. 2023. Forestry policies in Finland: Evolution, Characteristics and Implications[J]. *World Forestry Research*, 36(2): 114–120. (in Chinese)
- 陈钊, 赵飞翔, 张怀清. 2024. 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*, 37(2): 22–26.
- Chen Z, Zhao F X, Zhang H Q. 2024. A review of technology research on UAV-assisted forestry IoT system[J]. *World Forestry Research*, 37(2): 22–26. (in Chinese)
- 陈振升, 罗陶然, 段佳丽, 等. 2025. 智慧林业科技前沿与创新发展研究[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 45(6): 199–208.
- Chen Z S, Luo T R, Duan J L, *et al.* 2025. Research on the Technological Frontiers and Innovative Development of Smart Forestry[J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 45(6): 199–208. (in Chinese)
- 丁亚会, 陈诚, 乔晓军, 等. 2024. 基于物联网的病虫害绿色防控系统研发与应用[J]. *中国农业科技导报*, 26(4): 77–86.
- Ding Y H, Chen C, Qiao X J, *et al.* 2024. Development and application of green pest control system based on IoT technology[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 26(4): 77–86. (in Chinese)
- 冯德乾, 王珊, 赵义民, 等. 2023. 中国森林资源变化趋势及龄组结构优化研究[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 43(4): 122–131.
- Feng D Q, Wang S, Zhao Y M, *et al.* 2023. Analysis of changes in China's forest resources and age group optimization[J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences)*, 43(4): 122–131. (in Chinese)
- 冯戈. 2019. 面向智慧林业的物联网技术研究[J]. *林业资源管理*(1): 136–140.
- Feng G. 2019. Research on Internet of things technology for intelligent forestry[J]. *Forest and Grassland Resources Research*, (1): 136–140. (in Chinese)
- 封洪强, 姚青, 胡程, 等. 2023. 我国农作物病虫害智能监测预警技术新进展[J]. *植物保护*, 49(5): 229–242.
- Feng H Q, Yao Q, Hu C, *et al.* 2023. Recent advances in intelligent techniques for monitoring and prediction of crop diseases and insect pests in China[J]. *Plant Protection*, 49(5): 229–242. (in Chinese)
- 管华. 2024. 无人机技术在智慧林业中应用前景分析[J]. *山西林业*(2): 26–27.
- Guan H. 2024. Analysis of the application prospect of UAV technology in smart forestry[J]. *Forestry of Shanxi*, (2): 26–27. (in Chinese)
- 郭乐东, 王宁, 陈琦, 等. 2022. 国内外林业研究热点及趋势分析[J]. *林业科技通讯*(6): 45–48.
- Guo L D, Wang N, Chen Q, *et al.* 2022. Analysis of domestic and International forestry research hotspots and trends[J]. *Forest Science and Technology*, (6): 45–48. (in Chinese)
- 韩长志, 刘妃, 张颖, 等. 2025. 信息技术在林草行业中的应用[J]. *树木医学*, 2(2): 29–38.
- Han C Z, Liu F, Zhang Y, *et al.* 2025. Application of information technology in the forestry-grassland industry[J]. *Tree Health*, 2(2): 29–38. (in Chinese)
- 何芸. 2023. 物联网林火红外监测预警系统在广西高峰森林公园的应用评价[J]. *森林防火*, 41(2): 65–68.
- He Y. 2023. Application evaluation of the Internet of things forest fire infrared monitoring and warning system in Guangxi Gaofeng Forest Park[J]. *Journal of Wildland Fire Science*, 41(2): 65–68. (in Chinese)
- 胡雅娟, 程学慧, 魏亚娟, 等. 2024. 基于 GIS 的内蒙古武川县 2000—2020 年土地利用和草地资源动态变化监测研究[J]. *北方园艺*(14): 67–76.
- Hu Y J, Cheng X H, Wei Y J, *et al.* 2024. Dynamic monitoring of land use and grassland resources in Wuchuan County, Inner Mongolia from 2000 to 2020 based on GIS[J]. *Northern Horticulture*, (14): 67–76. (in Chinese)
- 姜喜麟, 李想, 李昌晓. 2019. 国外典型林业 PPP 项目经验借鉴[J]. *世界林业研究*, 32(1): 11–15.
- Jiang X L, Li X, Li C X. 2019. Experiences from forestry Public-Private Partnerships(PPPs) in foreign countries[J]. *World Forestry Research*, 32(1): 11–15. (in Chinese)
- 李海亮, 李亦晴, 戴声佩, 等. 2024. 我国智慧林业关键技术研究进展[J]. *热带作物学报*, 45(11): 2476–2486.
- Li H L, Li Y Q, Dai S P, *et al.* 2024. Research progress on key technologies of smart forestry in China[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 45(11): 2476–2486. (in Chinese)
- 刘延鹤, 傅万四, 张彬, 等. 2020. 林业机器人发展现状与未来趋势[J]. *世界林业研究*, 33(1): 38–43.
- Liu Y H, Fu W S, Zhang B, *et al.* 2020. Development state and future trend of forestry robot[J]. *World Forestry Research*, 33(1): 38–43. (in Chinese)
- 林泽攀, 武红敢. 2022. 北斗三号全球卫星导航系统的林草行业应用展望[J]. *林业资源管理*(2): 27–31.
- Lin Z P, Wu H G. 2022. Application prospect of BD-3Navigation satellite system in forestry and grassland[J]. *Forest Resources Management*, (2): 27–31. (in Chinese)
- 吕欧. 2023. 大数据在智慧林业发展中的应用——以“2023 智慧林草大会”为例[J]. *林产工业*, 60(12): 93–94.
- Lyu O. 2023. The application of big data in the development of smart forestry: Taking the "2023 smart Forestry and Grassland Conference" as an example[J]. *China Forest Products Industry*, 60(12): 93–94. (in Chinese)
- 马艺菲, 柯进恺, 张彩虹, 等. 2025. 中国式现代化进程中的林业政策变迁——基于倡导联盟框架的政策主题分析[J]. *世界林业研究*, 38(4): 69–76.

- Ma Y F, Ke J K, Zhang C H, *et al.* 2025. Forestry policy changes in the process of Chinese-style modernization: Policy theme analysis based on advocacy coalition framework[J]. *World Forestry Research*, 38(4): 69–76. (in Chinese)
- 孟贵, 王卫华. 2024. 中国林业政策评估的研究主题、分析方法与未来展望[J]. *世界林业研究*, 37(5): 55–60.
- Meng G, Wang W H. 2024. Research themes, analytical methods and future prospects of forestry policy evaluation in China[J]. *World Forestry Research*, 37(5): 55–60. (in Chinese)
- 孙敏轩, 冀正欣, 马玮哲, 等. 2023. 中国草地资源调查历程及规范化遥感解译框架探索[J]. *草地学报*, 31(3): 623–631.
- Sun M X, Ji Z X, Ma W Z, *et al.* 2023. Investigation history of grassland resources in China and standardized framework for sensing image interpretation[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 31(3): 623–631. (in Chinese)
- 孙晓莉, 赵然, 和万荣, 等. 2021. 基于 Logistic 回归模型的会泽县草地资源变化及驱动力分析[J]. *西南农业学报*, 34(6): 1309–1315.
- Sun X L, Zhao R, He W R, *et al.* 2021. Analysis on grassland resources change and driving forces in huize county based on logistic regression model[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 34(6): 1309–1315. (in Chinese)
- 孙中平, 申文明, 张文国, 等. 2020. 生态环境立体遥感监测大数据顶层设计研究[J]. *环境保护*, 48(3): 56–60.
- Sun Z P, Shen W M, Zhang W G, *et al.* 2020. Study on top design of big data in stereoscopic remote sensing monitoring on ecology and environment[J]. *Environmental Protection*, 48(3): 56–60. (in Chinese)
- 谭见君, 范润宇. 2022. 林业机器人研究现状与展望[J]. *林业机械与木工设备*, 50(9): 4–8.
- Tan J J, Fan R Y. 2022. Research status and prospect of forestry robot[J]. *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*, 50(9): 4–8. (in Chinese)
- 王洪胜, 蔡红英, 吴思平, 等. 2024. 人工智能时代森林防火专业人才培养途径探讨[J]. *森林防火*, 42(3): 55–59.
- Wang H S, Cai H Y, Wu S P, *et al.* 2024. Discussion on the cultivation path of forest fire prevention professionals in the era of artificial intelligence[J]. *Journal of Wildland Fire Science*, 42(3): 55–59. (in Chinese)
- 王林, 高金萍, 田海静, 等. 2023. 草原资源管理“一张图”智慧管理平台建设实践与探讨: 以新疆生产建设兵团智慧草原管理平台为例[J]. *林业资源管理*(2): 27–35.
- Wang L, Gao J P, Tian H J, *et al.* 2023. Practice and discussion on the construction of “one map” intelligent management platform for grassland resources management: Take the intelligent grassland management platform of Xinjiang production and construction corps as an example[J]. *Forest Resources Management*, (2): 27–35. (in Chinese)
- 吴恒, 闫睿. 2024. 遥感技术在森林资源调查监测中的运用及发展探析[J]. *安徽农业科学*, 52(9): 99–101, 164.
- Wu H, Yan R. 2024. Application and development of remote sensing technology in forest resources investigation and monitoring[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 52(9): 99–101, 164. (in Chinese)
- 肖粤新, 王步清, 巩浩, 等. 2022. 关于融入自然资源调查监测体系的草原资源监测如何开展的思考[J]. *草业科学*, 39(12): 2683–2694.
- Xiao Y X, Wang B Q, Gong H, *et al.* 2022. Reflections on the integration of grassland resources investigation and monitoring into the natural resources survey and monitoring system[J]. *Pratacultural Science*, 39(12): 2683–2694. (in Chinese)
- 杨军, 苏显辉, 王彦博, 等. 2024. 无人机遥感数据的森林病虫害变色立木提取分析[J]. *林业勘查设计*, 53(2): 67–71.
- Yang J, Su X H, Wang Y B, *et al.* 2024. Extraction and analysis of discolored standing trees for forest diseases and pests using drone remote sensing data[J]. *Forest Investigation Design*, 53(2): 67–71. (in Chinese)
- 余洋婷, 孟贵, 张旭峰, 等. 2021. 中国林业政策的演进——基于政策力度和政策工具的分析[J]. *世界林业研究*, 34(4): 112–117.
- Yu Y T, Meng G, Zhang X F, *et al.* 2021. Evolution of China's forestry policy: An analysis based on policy power and policy tool[J]. *World Forestry Research*, 34(4): 112–117. (in Chinese)
- 袁晓春, 仲伟兵, 吴旭民, 等. 2012. 基于 ATV 平台的全地形立体草原防火系统[J]. *林业机械与木工设备*, 40(10): 15–17, 34.
- Yuan X C, Zhong W B, Wu X M, *et al.* 2012. All-terrain 3D grassland fire protection system based on ATV platform[J]. *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*, 40(10): 15–17, 34. (in Chinese)
- 张建辉, 吴艳婷, 杨一鹏, 等. 2019. 生态环境立体遥感监测“十四五”发展思路[J]. *环境监控与预警*, 11(5): 8–12.
- Zhang J H, Wu Y T, Yang Y P, *et al.* 2019. Development thought of ecological environment three-dimensional remote sensing monitoring in the 14th Five-Year Plan[J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 11(5): 8–12. (in Chinese)
- 张雅娴, 樊江文, 王穗子, 等. 2023. 草原调查、监测与评价的国际经验和启示[J]. *草业学报*, 32(6): 203–213.
- Zhang Y X, Fan J W, Wang S Z, *et al.* 2023. Grassland investigation, monitoring and evaluation: International experience and insight[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 32(6): 203–213. (in Chinese)
- 张卓立, 刘丹, 李永亮, 等. 2022. 美国森林服务管理经验与启示[J]. *世界林业研究*, 35(2): 105–110.
- Zhang Z L, Liu D, Li Y L, *et al.* 2022. Forest service management in the USA: Experience and Enlightenment[J]. *World Forestry Research*, 35(2): 105–110. (in Chinese)
- 郑瑞豪, 杨超, 杜德斌, 等. 2024. 1949 年以来中国林业政策的主题演进及变迁逻辑[J]. *世界林业研究*, 37(2): 110–116.
- Zheng Y H, Yang C, Du D B, *et al.* 2024. Thematic evolution and transition logic of China's forestry policy since 1949[J]. *World Forestry Research*, 37(2): 110–116. (in Chinese)
- 周凯, 曹林. 2021. 遥感在森林精准培育中的应用现状与展望[J]. *遥感学报*, 25(1): 423–438.
- Zhou K, Cao L. 2021. The status and prospects of remote sensing applications in precision silviculture[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(1): 423–438. (in Chinese)
- 朱洪革, 陈振环, 赵梦涵, 等. 2021. 印度联合森林管理制度: 经验与挑战[J]. *世界林业研究*, 34(4): 95–100.
- Zhu H G, Chen Z H, Zhao M H, *et al.* 2021. Joint forest management in India: Experiences and Challenges[J]. *World Forestry Research*, 34(4): 95–100. (in Chinese)

- Buchelt A, Adrowitzer A, Kieseberg P, *et al.* 2024. Exploring artificial intelligence for applications of drones in forest ecology and management[J]. *Forest Ecology and Management*, 551: 121530.
- Cesco S, Ascoli D, Bailoni L, *et al.* 2024. Smart management of emergencies in the agricultural, forestry, and animal production domain: Tackling evolving risks in the climate change era[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 114: 105015.
- Damaševičius R, Mozgeris G, Kurti A, *et al.* 2024. Digital transformation of the future of forestry: An exploration of key concepts in the principles behind Forest 4.0[J]. *Frontiers in Forests and Global Change*, 7: 1424327.
- Ehrlich-Sommer F, Hoenigsberger F, Gollob C, *et al.* 2024. Sensors for digital transformation in smart forestry[J]. *Sensors*, 24(3): 798.
- Sutcliffe C, Knox J, Hess T. 2021. Managing irrigation under pressure: how supply chain demands and environmental objectives drive imbalance in agricultural resilience to water shortages[J]. *Agricultural Water Management*, 243: 106484.
- Wang Q J, Zhang S Y, Dong S F, *et al.* 2020. Pest24: A large-scale very small object data set of agricultural pests for multi-target detection[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175: 105585.