北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

数字孪生驱动森林精准经营决策：理论模型、关键技术与应用示范

张怀清 邱汉清 雷可欣 王建森 廉官俊 杨廷栋

Digital-twin-driven precise forest management and decision-making: theoretical models, key technologies and application demonstrations

Zhang Huaiqing, Qiu Hanqing, Lei Kexin, Wang Jiansen, Lian Guanjun, Yang Tingdong

引用本文:
张怀清, 邱汉清, 雷可欣, 王建森, 廉官俊, 杨廷栋. 数字孪生驱动森林精准经营决策：理论模型、关键技术与应用示范[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(11):1–16. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250340
Zhang Huaiqing, Qiu Hanqing, Lei Kexin, Wang Jiansen, Lian Guanjun, Yang Tingdong. Digital–twin–driven precise forest management and decision–making: theoretical models, key technologies and application demonstrations[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(11):1–16. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250340

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250340

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

面向城市绿化精细管理的低密度树木数字孪生模型

A low–density tree digital twin model for refined urban greening management: a case study of tree wind disaster risk management

北京林业大学学报, 2025, 47(3): 139–150. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240400

森林生态系统服务多功能性：概念、指标和经营模拟模型

Forest ecosystem service multi–functionality: definitions, indicators and simulation models for forest management

北京林业大学学报, 2024, 46(5): 1–11. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230327

塞罕坝北曼甸林场森林生态功能等级评价

Grade evaluation of forest ecological function for Beimandian Forest Farm of Saihanba, Hebei Province of northern China

北京林业大学学报, 2023, 45(1): 89–98. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210373

植被恢复年限对塞罕坝华北落叶松人工林土壤碳氮磷储量的影响

Effects of vegetation recovery years on soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks of *Larix gmelinii* var. *principis–rupprechtii* plantations in Saihanba, Hebei Province of northern China

北京林业大学学报, 2025, 47(5): 92–99. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240415

关于理想森林及其经营的遗传学思考

Genetic thinking on ideal forest and its management

北京林业大学学报, 2024, 46(6): 1–9. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240093

大兴安岭盘古林场森林碳汇木材复合经营规划

Forest carbon sink–timber compound management planning of Pangu Forest Farm in Great Xing’an Mountains of northeastern China

北京林业大学学报, 2020, 42(8): 1–11. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190331

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250340

数字孪生驱动森林精准经营决策：理论模型、关键技术与应用示范

张怀清　邱汉清　雷可欣　王建森　廉官俊　杨廷栋
（中国林业科学研究院资源信息研究所，国家林业和草原科学数据中心，北京 100091）

摘要:森林经营是实现森林质量精准提升的关键路径。由于森林类型复杂且生长周期长，森林经营长期面临管理粗放、方案实施困难，智能化水平低，试错成本高等突出问题，严重制约了森林质量精准提升。针对上述挑战，本文首先剖析了森林经营决策的转型需求——从粗放经验向数字智能转变，并阐释了森林数字孪生体的构建机理——将“林地”转变为“决策实验室”。在此基础上，围绕数据智能感知与更新、林分结构智能解析、森林生长建模与智能模拟、森林经营方案智能编制与优选、经营措施精准实施、经营成效智能评估与决策反馈等关键环节，提出了数字孪生驱动的精准经营决策理论模型和关键技术。以塞罕坝机械林场尚海纪念林数字孪生系统为例，系统阐释了从森林数字孪生构建、林分生长模拟、林分结构分析到森林经营决策优化的实现路径。最后，探讨了面临的机遇与挑战：“数字中国”战略引领、生物多样性保护与碳中和目标驱动、森林质量精准提升需求以及人工智能赋能形成多重战略契机；但亟需攻克多源异构数据融合更新、大规模孪生体高效建模、多目标优化决策的可解释性、虚实精准联动交互等关键技术瓶颈。为此，本文提出与多模态大模型、具身智能、生成式人工智能、元宇宙等前沿技术深度融合的演进方向，旨在推动森林经营向精准化、高效化和智能化发展，赋能林草行业高质量发展。

关键词：数字孪生；森林精准经营；林分结构分析；森林生长模拟；智能决策；多模态大模型；具身智能；塞罕坝
中图分类号：S757.2；TP391.9　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2025)11−0001−16
引文格式：张怀清，邱汉清，雷可欣，等. 数字孪生驱动森林精准经营决策：理论模型、关键技术与应用示范［J］. 北京林业大学学报，2025，47(11)：1−16. Zhang Huaiqing, Qiu Hanqing, Lei Kexin, et al. Digital-twin-driven precise forest management and decision-making: theoretical models, key technologies and application demonstrations[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(11): 1−16.

Digital-twin-driven precise forest management and decision-making: theoretical models, key technologies and application demonstrations

Zhang Huaiqing　Qiu Hanqing　Lei Kexin　Wang Jiansen　Lian Guanjun　Yang Tingdong
(Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, National Forestry and Grassland Science Data Center, Beijing 100091, China)

Abstract: Forest management is the critical pathway for improving forest quality. Existing management models are constrained by the complexity of forest types and long growth cycles, resulting in coarse management practices, difficulties in implementing operational plans, low levels of intelligence, and high trial-and-error costs. These limitations hinder the realization of precise forest management objectives. To address these challenges, this paper first analyzes the transformation demands of forest management and decision-making from experience-based approaches to data- and intelligence-driven paradigms and elaborates the construction mechanism of forest digital twins, which transform forestlands into decision-

收稿日期: 2025−09−03　**修回日期:** 2025−11−17
基金项目: 国家重点研发计划项目（2022YFE0128100）。
作者简介: 张怀清，研究员，博士生导师。主要研究方向：林草人工智能与数字孪生。Email: zhang@ifrit.ac.cn　地址：100091 北京市海淀区东小府 2 号中国林业科学研究院资源信息研究所。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

making laboratories. On this basis, a digital-twin-driven framework for precise forest management and decision-making was proposed, encompassing key modules such as intelligent data perception and updating, stand structure analysis, forest growth modeling and intelligent simulation, intelligent formulation and optimization of management plans, precise operation execution, and intelligent evaluation and feedback of management performance. Using the Shanghai Forest of Saihanba Mechanized Forest Farm, Hebei Province of northern China as an empirical case, the paper systematically demonstrates the complete implementation pathway from digital twin construction, stand growth simulation, and stand structure analysis to forest management optimization. Finally, it discusses the opportunities and challenges facing this framework. The multiple strategic opportunities were created by "Digital China" strategy providing strategic leadership, biodiversity conservation and carbon neutrality goals driving initiatives, the demand for precise forest quality enhancement together with AI empowerment. However, critical technological bottlenecks remain to be addressed, including the integration and updating of multi-source heterogeneous data, efficient large-scale twin modeling, interpretable multi-objective optimization decision-making, and precise virtual-real interactive linkage. To this end, this paper outlines its future evolution toward deep integration with multimodal large models, embodied intelligence, generative artificial intelligence and the metaverse, aiming to promote precision, efficiency and intelligence in forest management and to empower the high-quality development of forestry and grassland sector.

Key words: digital twin; precise forest management; stand structure analysis; forest growth simulation; intelligent decision-making; multimodal large model; embodied AI; Saihanba

我国人工林面积位居世界第一，但仍面临森林结构不合理、质量较差、生产力低下等状况[1]。森林经营是森林质量精准提升的关键路径，对保障国家生态安全、应对全球气候变化、实现“双碳”目标等国家战略具有重要意义。然而，受人力物力资源压力、极端气候频发、火灾与病虫害干扰、生物多样性减少等因素影响，森林经营正面临前所未有的挑战。因此，迫切需要通过技术创新，实现从粗放经营向精准经营的转型升级，构建支撑多目标动态优化决策的智慧经营技术体系。

数字孪生理念最初源于航空航天领域，通过构建物理对象的数字镜像，实现对复杂系统的实时感知、动态仿真与智能控制。数字孪生依托“数据—模型—决策”的闭环机制，成为提升管理效率、优化决策流程以及增强自主决策能力的重要手段，在智能制造、城市管理、水利工程等领域得到了广泛应用[2]。这些行业实践表明，数字孪生能够突破数据同步与智能反馈等关键技术瓶颈，为解决森林经营决策难、效率低等问题提供了新的契机。

当前森林经营研究多集中于森林资源监测、生长模型构建、林分结构调控及森林收获等单一或部分环节，缺乏“模型—技术—应用”一体化系统框架。鉴于森林经营过程具有周期长、干扰因子多、多目标耦合等特点，亟需构建集数据感知、结构分析、质量诊断、经营过程决策、经营成效同步反馈于一体的数字孪生系统，以满足森林经营高效、精准、智能化的需求，从而实现森林质量精准提升的目标[3]。

本文针对现有森林经营决策系统存在的效率低、分析能力弱等突出问题，基于森林经营决策智能化转型升级的需求，阐述森林经营数字孪生体的构建机理，提出“数据—模型—知识”驱动的森林经营决策数字孪生技术框架。在此基础上，构建人工智能驱动的“数据同步—过程协同—决策实施—孪生反馈”一体化智慧经营技术体系，实现森林经营过程的动态感知、智能决策、精准实施与同步反馈，有效解决传统模式下经营决策能力不足、试错成本高的难题，提升森林经营决策效率与智能化水平，推动森林经营管理向精准智能方向迈进。

1 森林经营决策的转型诉求：从粗放经验到数字智能

森林经营以提高森林质量，构建稳定、健康、优质、高效的森林生态系统为目标，旨在增强森林供给、调节、服务及支持等多功能属性，并贯穿于整个森林生长周期中的保护与培育活动[4]。森林经营兼具生态、经济与社会属性，其核心在于通过科学手段调控森林结构与动态过程，从而实现森林资源的合理利用与生态系统服务功能的最大化。森林经营具有多目标性、长期性与复杂性等显著特征，涉及森林更新、生长、演替以及干扰响应等过程。这不仅决定了森林结构优化与质量提升的方向，也直接影响碳汇能力、气候调节、生物多样性保护及生态安全格局的

实现[5]。

目前，我国森林经营决策体系主要依赖人工调查、遥感反演与经验判断相结合的传统模式。以小班为基本经营单元，通过样地调查获取平均胸径、树高、蓄积量等林分统计参数，再据此制定相对统一的经营方案[6]。这种基于群体平均特征的管理方式在宏观层面具备一定的可操作性，但在微观尺度上往往忽略了单株林木在生长势、形态结构、空间分布及功能上的差异性。现有决策系统多侧重于资源清查与统计分析，缺乏对过程模拟与智能优化功能的支持，难以实时响应环境的动态变化、林木生长差异及多目标协同优化。经营规划与执行过度依赖人工经验和静态规则，难以实现实时反馈与动态调整，导致数据“孤岛化”和决策“滞后化”的问题日益凸显。

森林经营决策是一个多目标、多约束的复杂系统优化过程，涉及森林培育、木材生产、生物多样性保护、生态服务提升及社会经济效益协调等多元目标的权衡与协同[7]。传统决策模型多基于静态或线性优化方法，缺乏多情景、多时序的动态模拟能力。数据驱动机制薄弱，不同尺度的数据采集与建模手段在分辨率、精度与时效性上存在差异，难以形成统一的信息流闭环。因此，森林经营决策大多仍停留在“事后分析”与“静态优化”阶段，面临实时感知、智能推理与自主优化的闭环技术瓶颈，难以满足森林经营过程中的动态变化与多目标优化需求。在此背景下，数据驱动与智能决策的数智融合模式，正成为推动森林经营转型升级的关键方向。数据驱动通过多源信息采集与数据同化技术，实现对森林状态的连续监测与动态评估；智能决策则依托人工智能算法与大模型知识推理机制，为复杂决策提供快速、透明且可解释的决策支持[8]。通过构建森林生长、林分优化、森林演替等模型，在数字空间中“加速演绎”长周期过程，从而评估不同经营方案的潜在成效与风险。

2　森林数字孪生体构建机理：把“林地”变成“决策实验室”

森林数字孪生体以森林物理实体为基础，构建与现实森林在几何结构、行为及状态上高度一致的虚拟数字模型，从而实现对森林全要素、多尺度和动态过程的精准映射[9−10]。森林数字孪生体主要包括虚拟数字场景构建、实时数据驱动、机理模型赋能以及虚实融合与交互决策这 4 个核心部分。

2.1　森林数字孪生体的构建

2.1.1　三维建模

森林场景三维模型的构建是森林经营数字孪生系统建设的首要任务，其过程主要包括几何建模、场景搭建、逻辑控制和场景优化这 4 个部分[11]。其中，几何建模主要涉及模型的构建与可视化渲染，场景搭建侧重于环境元素的布局与交互设计，逻辑控制涵盖运动学建模和规则模型，场景优化则关注多层级细节表达和网格结构合并。在这些环节中，几何建模是森林场景模型构建的核心。

森林场景三维建模的对象主要包括树木、灌草、水体、林区旗舰物种、土壤、地形、岩石、林区道路以及经营设施等。根据研究需求的不同，可选择相应的建模方法。对于枝干形态精度要求较低、注重建模效率和外观模拟的树木三维建模场景，可采用参数化建模方法，如 L 系统、SpeedTree 和分形建模，以实现快速建模[12−13]。而对于林区旗舰物种、代表性树种、古树名木等需要高保真、等比例还原的典型树木三维建模，则需利用激光雷达扫描设备获取高精度三维点云数据，并结合区域生长算法、图神经网络等林木形态参数提取算法，量化提取林木枝干结构参数[14−15]。在此基础上，通过定量结构模型（quantitative structure model，QSM）和体素化建模等点云三维重建技术，最终实现杉木（*Cunninghamia lanceolata*）、白桦（*Betula pendula*）、松树（*Pinus* spp.）等不同分布区域树种的枝级、干级或叶级三维重建[16−17]。目前，针对小范围精细化森林场景重建，神经辐射场（neural radiance fields，NeRF）技术，因其在真实感渲染、光照模拟、构建成本和效率方面的独特优势而受到广泛关注。通过低成本无人机或地面采集的多视角 RGB 图像，NeRF 技术能够对单木、林分及复杂冠层结构进行快速、低成本重建，其建模精度和渲染效果显著优于传统的运动恢复结构（structure from motion，SFM）方法。然而，在大尺度森林三维场景建模中，NeRF 的建模效率较低，更适合样地或区域尺度的森林场景重建[18]。对于大尺度非核心区域的森林场景三维重建，通常采用无人机激光雷达点云或倾斜摄影技术，结合参数化三维建模或 SFM 方法，实现快速重建。此类方法具有覆盖范围广、建模效率高的特点，是当前大尺度森林三维场景建模的主流技术路线（表 1）。

随着生成式人工智能（generative artificial intelligence，GenAI）的不断发展，以 GenAI 为核心的森林三维场景智能化建模技术，正推动森林三维建模从“规则驱动建模”向“语义理解与知识推理”转变[19]。借助多任务预训练模型，GenAI 能够在理解用户语义需求的基础上，自动生成符合生物学规律的树木结构，并支持自然语言控制、草图引导以及语义参数化等多种建模方式，从而推动森林场景三维

表 1 森林场景三维模型构建技术及其应用场景

Tab. 1 Forest scene 3D model construction technology and its application scenarios

类别	技术代表	优点	缺点	应用场景
基于规则建模	L系统、粒子系统、IFS迭代函数、参数化建模等	快速生成，参数可控，适合简单场景的大规模模拟	真实感有限，难表达个体差异	林木形态结构差异较小，树种较为单一的森林三维场景构建
基于图像建模	单/多视角图像SFM重建、草图建模等	成本低，直观，纹理真实	遮挡影响大，内部结构难恢复	森林冠层结构、不同季节植被物候、景观级森林场景的快速重建
基于点云建模	定量结构模型（QSM）、基于拉普拉斯算子骨架提取算法、基于聚类算法的图神经网络等	精度高，可提取结构参数，适合科研与经营应用	数据量大，冠层重叠影响效果	树种精细化建模，大尺度精细化森林场景重建
基于人工智能建模	NeRF以及VAE、GAN、扩散模型等	支持个性化、多样性、智能化建模	依赖大规模标注数据，计算成本较高	区域尺度森林三维场景交互问答式建模，森林动态变化场景的实时智能重建

建模向个性化、大规模和智能化方向发展。

2.1.2 三维场景优化

森林场景的三维模型数据量庞大，传输与渲染效率较低。在国家公园、自然保护区、国有林区以及地方林业局等应用单位的实际部署过程中，需采用网格简化、LOD（level of detail）、点云稀疏化等方法，对林区内树木、灌木、草本及旗舰物种等高精度三维模型进行轻量化处理。通过这些方法，在减少数据量和降低硬件资源需求的同时，仍能实现高保真的建模效果，避免在后续森林生长、采伐、补植等经营过程的仿真模拟与动态交互中出现模型失真或延迟卡顿现象。

2.2 数据驱动的森林数字孪生体

2.2.1 数据动态更新

数据动态更新是森林经营管理与模型优化迭代的核心环节。数据动态更新模块主要由数据感知和动态入库两部分组成[20−21]。在数据感知层，通过数字样地中的 5G 物联网设备，动态采集物理空间中林木个体属性、林分结构特征、气候因子等自然因素，以及采伐、抚育、病虫害防治、道路建设等经营管理相关数据，并将这些信息实时传输至数据管理层以支持智能决策。在数据管理层，首先基于领域知识对入库数据进行冗余处理、特征提取和统计拟合；随后结合 Kalman 滤波、链式方程多重插补等异常检测与质量控制模型，对数据进行质量检查与修正，确保入库数据的准确性和可靠性，避免噪点或脏数据的干扰。此外，利用 Apriori 时空关联算法和图神经网络技术，对入库数据进行分类、关联分析、集成与融合，挖掘经营过程中潜在的规律性特征，并将其存储至林木、环境、作业设备等实体要素对应的数据库中。

2.2.2 数据驱动下模型修正

数据驱动是森林经营数字孪生体实现自我修正的关键环节，主要包括模型参数修正与权重更新两部分。在参数修正方面，机理模型利用动态入库的森林经营数据，结合遗传算法（genetic algorithm，GA）、NSGA-II、模拟退火（simulated annealing，SA）等优化算法，持续调整森林生长与经营相关参数，校正模型中的关键参数[22−23]。例如，基于动态入库的温湿度、土壤水分或林分结构变化数据，动态修正林木生长模型中的生长系数、竞争参数以及碳汇计量模型参数，从而提升模型在动态情境下的拟合精度，使其更加贴合森林生长与经营的实际情况。对于耦合深度学习的机理模型，通过增量学习与在线微调策略，利用最新入库的监测数据动态更新模型权重，进一步提高模型在病虫害预警、经营作业成效评估及林木生长预测等方面的精度与鲁棒性[24]。最终，应用层将交互过程中生成的结果数据进行集成，并反馈至森林物理实体。

2.2.3 误差分析与阈值设定

森林经营数字孪生体的一致性评估通常依赖于数据误差分析与阈值设定方法。通过对比模型输出结果与林分实测数据之间的偏差，判断是否需要对模型进行更新与修正。合理设定误差阈值后，当预测结果与同步入库数据的偏差超过该阈值时，将自动触发模型的调整与更新机制，从而确保森林孪生体在林木生长动态模拟、经营措施评估以及作业方案推演中的稳定性和可靠性。

2.3 模型驱动的森林数字孪生体

森林孪生模型是森林经营物理实体在数字空间中的镜像，也是实现虚实结合的关键环节[9]。其中，机理模型构成了孪生模型的核心引擎，涵盖了几何模型、物理模型、行为模型、规则模型以及经验知识等[25]。几何模型主要用于对林木、人员、营林设备和土壤等森林环境要素的几何特征进行真实且细致的描述。物理模型则用于刻画树木、土壤及环境的属性，例如林木的物理与机械特性等[26]。行为模型描述了森林物理实体对实际森林经营措施的响应行为，包括生长与竞争、碳氮循环、干扰响应、气候适应性以及群落演替等过程。知识模型整合了专家知识、森林管理经验和林业专业知识。规则模型则涉及森林经营过程中的运行、评估和优化等规则体系（表 2）。

表 2　森林经营数字孪生机理模型

Tab. 2　Mechanistic models of forest management digital twin

类别	组成要素	作用与功能
环境模型	气候模拟模型(温度/降水/风场)、水文模拟模型(径流/蒸散发)、土壤模型(理化性质/肥力)、地形模型(坡度/坡向)等	表征森林所处的自然环境条件，为森林经营决策提供基础数据
森林生长模型	单木生长模型、林分生长模型、经验统计模型、过程模型、竞争生长模型、混合生长模型等	模拟森林不同阶段的生长变化，预测林分未来发展演替趋势等
森林结构分析模型	胸径分布、林分密度、树种多样性、林分空间分布格局、竞争指数、混交度等空间以及非空间结构模型	量化森林结构特征，为森林资源管理和决策提供技术支撑等
装备与作业模型	路径规划模型、多机协同作业调度模型、碰撞检测与避障模型等	支撑森林经营作业模拟、效率评估、装备选型等应用
灾害防控模型	林火蔓延模型、病虫害扩散模型、极端天气预警模型等	灾害风险评估与应急响应
知识、规则模型	经营规则库、专家经验库、森林政策法规库等	规范操作流程，提升决策科学性，兼顾政策与生态要求
服务功能模型	碳汇功能、水文调节、土壤保持、文化与景观服务模型等	量化森林生态系统服务的多功能性
经营决策模型	造林、采伐、补植、经营区划、成效评估模型等	指导实际经营操作，提升森林质量与生产力

2.4　数智驱动的森林经营数字孪生体

森林物理模型与孪生模型的交互过程可分为“以实控虚”和“以虚控实”两个环节。在“以实控虚”环节中，林木采伐、抚育以及病害防治等真实的森林经营活动可通过 5G 传感网和地面监测站，结合动态数据更新机制，将森林物理实体的数据实时映射至虚拟数字森林经营模型中。这一过程能够同步更新森林几何模型、生长模型及环境模型等属性参数，同时为经营行为模型和物理模型等机理模型提供预训练，以及优化和模拟所需的数据[27]。在“以虚控实”环节中，利用森林几何模型、经营行为模型，并结合环境模型，可生成不同经营条件下的森林经营方案。通过多目标智能优化算法，对这些方案进行优选并应用于实际操作[24,28]。例如，基于模拟生成的经营方案，借助人机交互问答、虚拟现实和增强现实等技术手段，并结合森林场景的三维模型，可以开展采伐、修枝、施肥、补植、整地等交互决策模拟。通过模拟结果识别森林经营过程中的不合理之处，并及时进行调整与迭代优化。最终，通过对实际经营后森林结构、质量和功能的分析、总结与同步反馈，进一步提升森林经营数字孪生体的真实性，从而实现对整个森林经营过程的闭环优化。

3　数字孪生驱动的智慧经营决策体系与关键技术

森林经营数字孪生通过多维耦合评价模型，对林分空间格局、树种混交及竞争关系进行综合评估，并结合深度强化学习算法，构建林分空间结构动态优化调控模型，自主开展林分空间结构的智能化优化。在此基础上，融合林分结构、生理生态过程以及外部干扰因子，结合森林生长模型，完成单木尺度的生长动态建模与多情景模拟。通过预训练大语言模型和深度强化学习技术，智能生成多目标经营方案，并在数字孪生环境中推演其生态与结构变化，自动筛选出最优方案集[29−30]。此外，利用北斗定位系统构建厘米级导航图，实现单株林木的差异化作业(表 3)。同时，基于森林质量诊断与评估智能模型，对比分析数字样地的结构与功能变化，从而实现森

表 3　不同森林经营场景下人工智能模型应用策略

Tab. 3　Application strategies of artificial intelligence models under different forest management scenarios

类型	关键模块	训练数据	调参策略	评价指标	应用场景
多模态深度学习模型	模态编码器分别提取各模态的特征表示，融合模块进行模态间信息交互、对齐、融合，解码与任务头模块输出任务目标	无人机高分辨率影像、点云、遥感数据、样地观测数据	分模态学习率控制、模态权重与注意力层平衡、特征对齐与温度参数优化、分阶段冻结策略等	以准确率、召回率、F_1分数、跨模态一致性分数、交并比等为主	林分结构的参数提取、树种的识别、森林生长的预测以及冠层结构的一致性分析、森林微气候的预测等
强化学习模型	状态编码器接收状态，输入并提取特征向量；策略头(Actor)生成动作分布；价值头(Critic)输出状态价值；结合价值函数计算损失，更新网络参数	林分结构特征、具体经营措施、经营收益与成效等历史经营过程数据	学习率调整、批次大小、平衡与利用探索、奖励函数设计、折扣因子优化等	平均回报、成功率、收敛稳定性、样本效率、泛化性与安全性等	无人机、机械臂、采伐机器人自主路径的规划与操作控制，经营作业方案的智能推荐
大模型	嵌入层将离散的词或子词转换为连续向量，编码模块用于捕捉深层语义特征，自注意力模块实现上下文理解，前馈网络模块增强模型表达能力，输出层将隐藏状态映射为词汇概率分布	森林经营文献语料、森林经营方案文本、监测报告与政策文件	利用LoRA、Adapte、Prompt Tuning、Prefix Tuning等方法进行微调	困惑度、BLEU/ROUGE/生成质量、大规模多任务语言理解、多步骤数学推理能力、Toxicity Score等	森林经营方案的编制，经营成效的评估，经营数据的智能感知与挖掘

林经营成效的自动评估、作业规范的智能校验，以及营林成效的动态评估(图 1)。

3.1 数据智能感知与更新

森林经营数字孪生体以数字样地为基础，构建了由天基、空基、地基、塔基等多源感知终端组成的“天空地一体化”智能感知网络，支撑全时空、多尺度森林数据的动态采集与同步更新。通过物联网传感器(胸径传感器、压力传感器、土壤温湿度传感器、空气质量传感器等)、遥感(卫星影像、无人机影像、激光点云)以及通量塔数据，结合边缘计算与智能感知算法，实现了对林木胸径、树高、冠幅、生长状态、林分结构、林内温湿度等关键营林数据的智能感知与自动传输[31−32]。采用自适应学习策略，在林分结构、林木生长状态(如胸径、树高、冠幅等)、植被物候、森林覆盖、温度、光照、湿度等环境发生变化时，自动触发数据采集，确保数字孪生体与真实森林状态保持同步更新，提供全天候、全要素、智能化的森林感知能力，从而支撑森林生长、林分结构、功能特性、土壤性质及森林发展演替过程等状态的智能感知与更新[33](图 2)。

3.2 森林结构智能分析优化

森林经营数字孪生体基于角尺度、大小比数、混交度、竞争指数等多维林分空间结构指数，结合林分空间结构智能体，自动构建林分空间结构异质性多

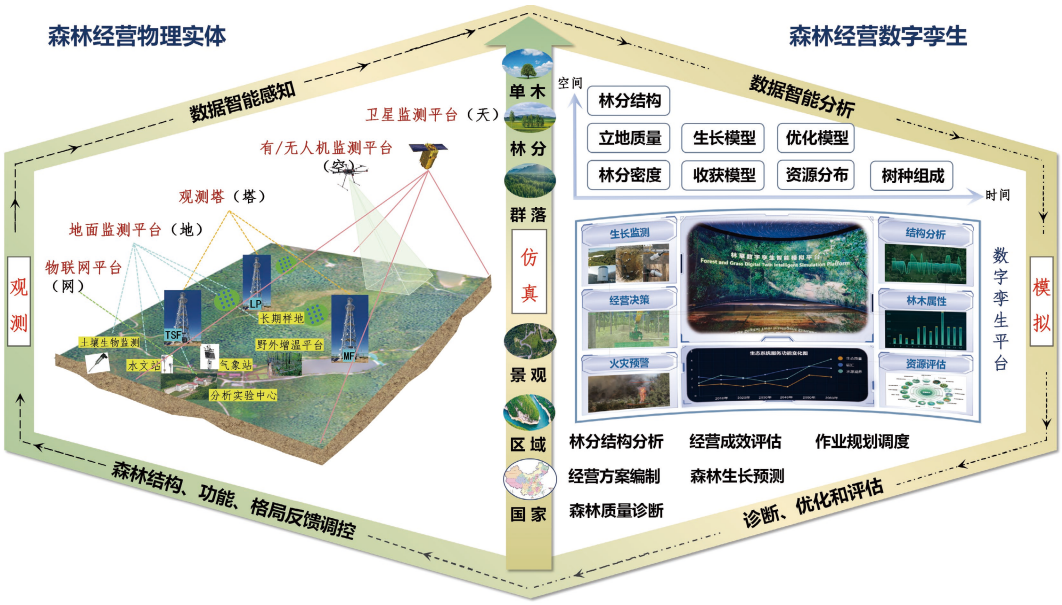


图 1 森林经营决策数字孪生体系

Fig. 1 Digital twin system of forest management and decision-making

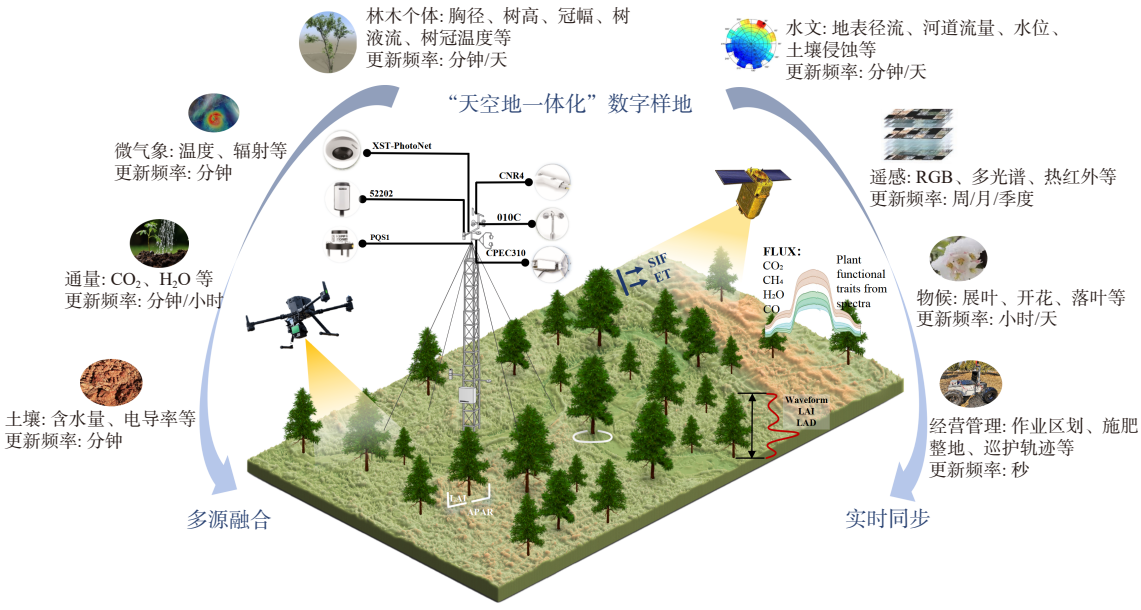


图 2 “天空地一体化”数字样地

Fig. 2 Integrated sky-ground digital sample plots

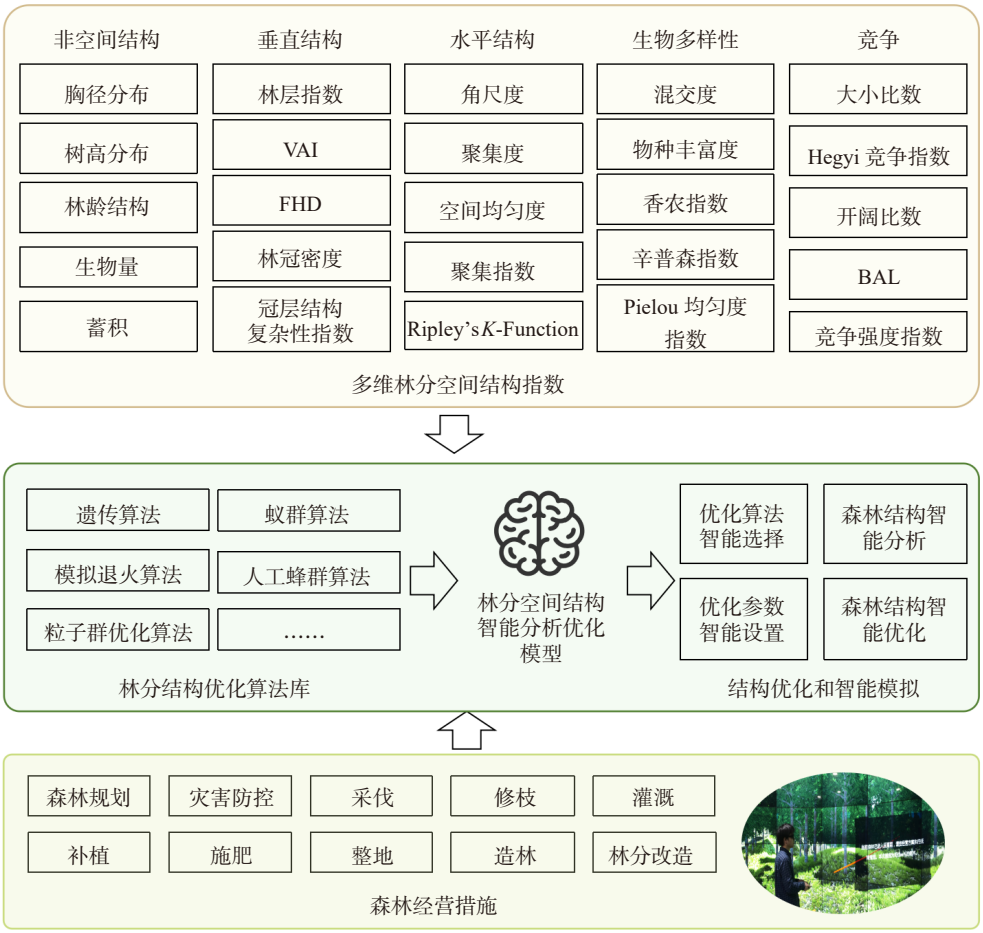
维耦合模型，从而实现对林分水平分布格局、垂直分布格局、树种组成、竞争关系以及植被覆盖等多维结构的智能分析[34−35]。此外，森林孪生体通过图神经网络与视觉大模型，自动识别并分类林分中的优势木、中庸木和被压木，进一步实现对林木竞争关系、生长潜力及空间结构的智能判定。在此基础上，以深度强化学习和遗传算法为核心，融合林木分布格局、竞争及生物多样性等多类优化目标，构建了林分空间结构智能优化调控模型。该模型能够自主生成林分空间结构优化调整方案，并模拟采伐、修枝、树种配置、施肥、整地等不同经营措施下的森林结构变化，为森林经营提供智能化、可解释且数据驱动的决策支持[36−37]（图 3）。

3.3　森林生长建模与智能模拟

森林经营数字孪生体采用三维智能重建技术，结合林木形态结构的动态参数，对林木器官、树干、根系及分支等形态结构进行精准模拟。基于构建的树种三维模型数据库，并结合森林结构、功能和环境等动态参数，同步模拟采伐、修枝、施肥、割灌等不同经营措施下的森林生长过程，从而实现林木形态结构、生长动态以及树木多态性动态的智能模拟[38−39]。通过林木生长时空智能模型捕捉林木生长的时序规律，集成蒸腾、光照、呼吸等生理生态过程，融合林分结构、竞争关系及生物多样性等环境因子，构建林分结构−生长−环境交互耦合模拟模型。此外，通过集成气候变化情景以及断梢、偏冠等干扰事件，定量分析外部驱动因子对森林生长的影响，最终实现森林生长全周期、全过程、差异化的精准建模与动态模拟[40−41]（图 4）。

3.4　森林经营方案智能编制与优选

森林经营数字孪生以森林面积、树种组成、龄组及森林蓄积等林分现状参数为基础，结合人工设定规则，利用森林经营方案智能编制大模型，综合考虑不同林区的生态类型、立地条件、经营目标、历史森林经营方案、历史经营语料数据以及模型微调策略，智能化生成符合特定区域、目标导向和生态约束条件的森林经营方案。该方法通过编制森林经营方案，自动解析历史文本中的关键经营因子与策略结构，



VAI为垂直方向上的叶面积密度，FHD为叶高多样性指数，BAL为大于对象木断面积。

图 3　森林结构智能分析与优化调整

Fig. 3　Intelligent analysis and optimization adjustment of forest structure

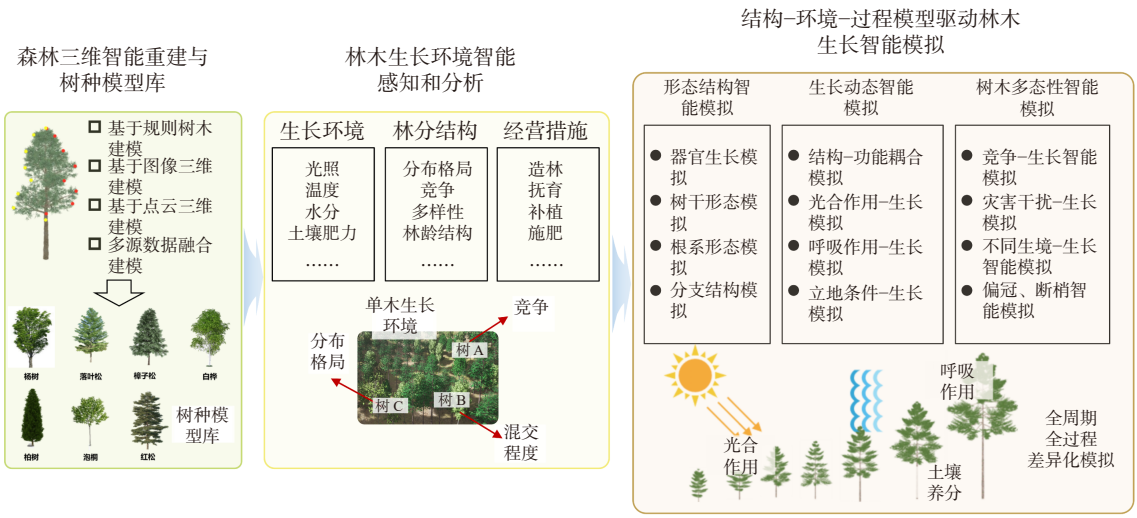


图 4 森林生长建模与智能模拟

Fig. 4 Forest growth modeling and intelligent simulation

显著提升方案设计的智能化水平和本地适应性。此外，借助森林经营方案智能体进行模型优选，在数字孪生环境中动态模拟不同经营方案下森林生长、结构及功能的变化过程，综合权衡森林生长、结构调整、生物多样性保护、木材生产、碳汇增长、水源涵养及经营成本等多重目标，自动生成最优经营方案解集，从而实现森林经营方案的智能优选[42]（图 5）。

3.5 森林经营措施精准实施

森林经营措施的实施正从林分尺度向单株水平的精准化和智能化作业方向发展[43–44]。森林经营数字孪生技术以北斗高精度定位、物联网智能终端和边缘计算为核心基础设施，通过无人机航拍与地面

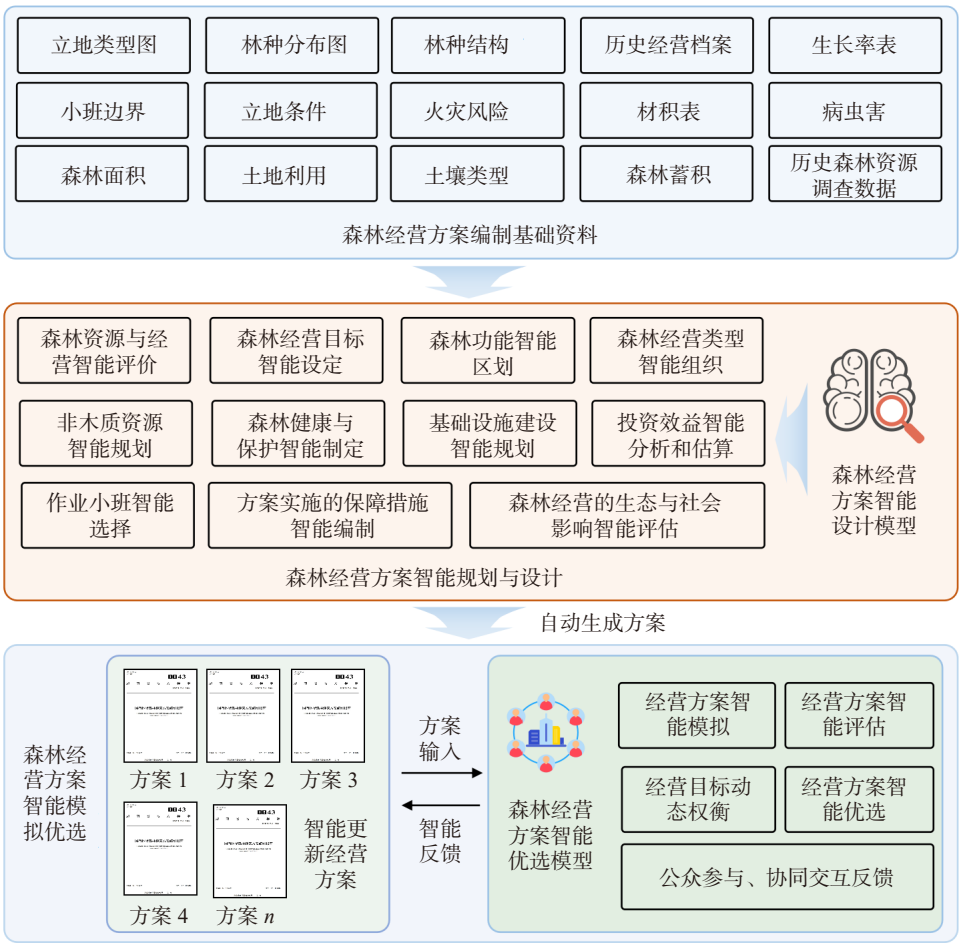


图 5 森林经营方案编制与优选

Fig. 5 Formulation and optimization of forest management plans

移动扫描的深度融合，结合森林三维智能重建算法，生成厘米级精度的作业导航地图。同时，基于森林结构智能分析与优化调整模型，系统能够自动识别森林结构并精准定位目标树木，实时为作业人员提供采伐标记、修枝及抚育等指导信息，从而实现从林分尺度到单木尺度的差异化精准作业。此外，借助森林经营智能决策模型，对每株林木的处理方式进行智能决策，并精准引导机械或人工执行操作，实现单木定位、结构解析、质量诊断以及采伐修枝的一体化智能化作业。

3.6　森林经营成效智能评估与决策反馈

森林经营数字孪生体通过对比分析经营前后数字样地的植被更新、竞争关系、林分结构、生物多样性、固碳能力以及水源涵养等功能和结构变化，智能评估不同经营措施对林木生长、物种多样性及碳汇能力等多方面的影响，并自动生成可视化评估报告[45−46]。借助自适应优化算法，依据评估结果动态调整森林经营智能分析与决策模型的参数，构建“监测—评估—优化”的闭环决策机制。此外，决策智能体通过经营成效智能判读模块，校验森林经营作业设计是否符合相关技术规程，推动成效评估从“后知后觉、人工判读”向“动态评估、智能辨识”转变[47]（图 6）。

4　典型应用示范：数据—模型—知识—决策闭环的落地检验

以塞罕坝机械林场尚海纪念林为典型示范，构建森林经营数字孪生智能决策系统，形成“数据感知—模型构建—知识推理—智能决策”的森林经营决策模式。该系统依托物联网、人工智能、大模型与虚拟现实等新一代信息技术，整合遥感、无人机与地面传感器等多源数据，构建高精度森林经营数字孪生体，实现森林经营过程的动态感知、可视分析、精准预测与智能反馈（图 7）。

4.1　数字样地构建

数字孪生系统以数字化样地为核心基础，构建了由天基、空基、地基多源感知终端组成的“天空地一体化”智能感知网络，实现对尚海纪念林森林资源的全时空、多尺度动态感知与更新。林场数字孪生系统部署了多种物联网感知设备，包括林木生长仪、红外相机、火灾传感器等，构建覆盖水平与垂直空间的多维监测网络。林木生长仪可自动监测胸径变化、树干生长速率与碳增量；生境监测仪实时感知空气温湿度、土壤含水量与环境质量指标；火灾探测器融合多光谱识别与红外热成像算法，能够精准识别与定位火点；红外相机实现野生动物的长期监测与自动识别；物候观测仪通过定期采集高清影像，分析植被盖度变化与季节性生长节律。

在数据处理与融合层面，采集数据经边缘计算节点初步处理后，通过云端网关进行时序校正、空间配准与异常检测，并与无人机多光谱影像、点云及地面气象数据融合，形成具有多尺度、时序连续与语义一致性的数字化样地数据库。系统采用智能感知算法，在林分结构、林木生长状态、环境因子发生变化时，自动触发数据采集与更新，实现孪生体状态与真实森林状态的同步演化。该数字化样地体系不仅实现了对林木胸径、树高、冠幅、生长速率、冠层结构、土壤湿度与碳储量动态等关键因子的精准感知与传

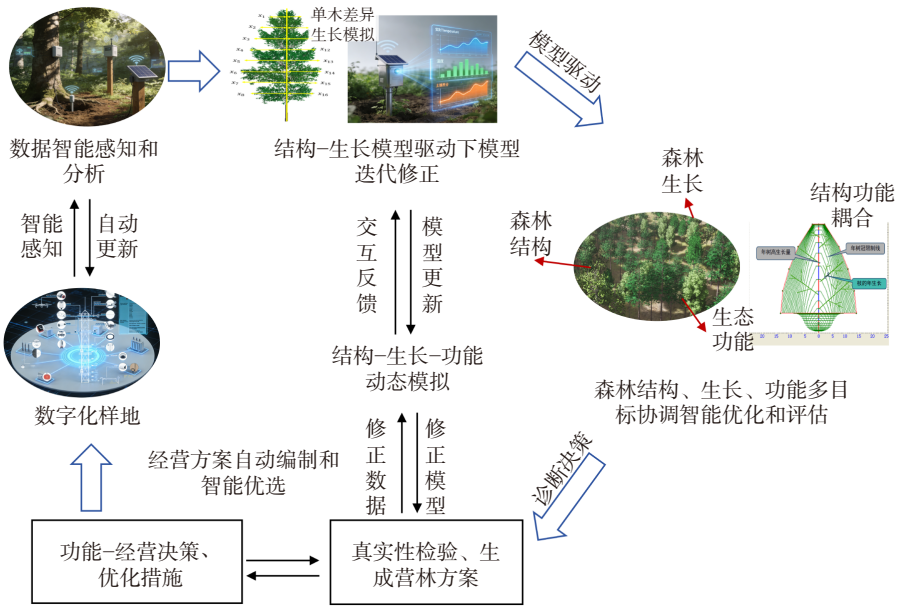


图 6　森林经营数字孪生智能决策与反馈

Fig. 6　Intelligent decision-making and feedback for forest management digital twin



图 7 塞罕坝机械林场尚海纪念林数字孪生系统

Fig. 7 Digital twin system of Shanghai Memorial Forest in Saihanba Mechanical Forest Farm

输，还能实时反映森林结构、功能与演替过程的时空特征，为森林生长动态监测、结构优化、经营模拟及生态过程重建提供了全天候、全要素、智能化的数据支撑。塞罕坝数字孪生系统实现了从“离散监测”向“天空地一体化”数字样地的跃迁(图 8)。

4.2 林分生长模拟

数字孪生系统融合过程驱动模型与深度学习模型，实现了林木生长与生长过程的多尺度智能模拟。系统基于长期监测样地数据与温度、降水、土壤湿度、光照强度等环境变量，对单木胸径、树高、冠幅等关键生长参数进行动态预测，捕捉林木生长的时序规律与空间竞争格局。

系统利用森林三维重建技术，结合林木属性和物候参数，实现林木形态结构的动态可视化与生长过程仿真。系统构建了树种三维模型数据库，可在不同立地条件和采伐、抚育等经营措施下模拟林木



图 8 数字化样地数字孪生场景

Fig. 8 Digital twin scenarios in digital forest sample plots

结构响应与生长趋势，量化经营干预对林木生长的动态影响。系统构建了林分结构–生长–环境交互耦合模型，综合光照等生理生态过程，融合林分竞争、生物多样性与环境扰动等多因素，实现森林生长过程的差异化精准建模。通过引入气候变化情景和干扰模拟模块，系统可定量评估外部驱动因子对林木生长的影响(图 9)。

4.3　林分结构智能分析

数字孪生系统以角尺度、大小比数、混交度、竞争指数等林分空间结构指数体系为基础，结合结构化森林经营理论和林分空间结构异质性分析方法，构建了森林空间结构的多维耦合分析模型。通过点云单木分割、空间树形重构与冠层层次识别技术，提取林木空间位置、冠层分层格局与层间竞争关系，形成对林分水平分布格局、垂直结构分层、树种组成与竞争态势的全要素认知。系统依托人工智能，能够在林分尺度上智能识别并分类优势木、中庸木与被压木，实现对个体竞争关系、生长潜力与群落结构状态的智能判定与可视化呈现。通过嵌入的结构异质性分析模型，定量刻画林分在空间格局、混交模式及垂直分层等方面的特征差异，为精准抚育与结构优化提供科学依据(图 10)。

4.4　森林精准经营

系统以单株林木为经营单元，开展单木层级的精准经营，根据每株树木的生长潜力、竞争压力、生态位特征与目标功能，实施差异化管理措施，实现林分结构与功能的最优配置。单株经营强调个体识别、精准决策与动态干预，在保持生态稳定性的同时，充分释放森林的生长潜力与生态服务功能。综合考虑林木分布格局、竞争关系、生物多样性与生态稳定性，系统生成多目标优化方案，模拟采伐、修枝、补植、树种配置等经营措施下的结构响应与生态效益变化，同步反馈林分结构变化，实现了森林结构由静态监测向动态优化的转变，为森林质量精准提升提供智

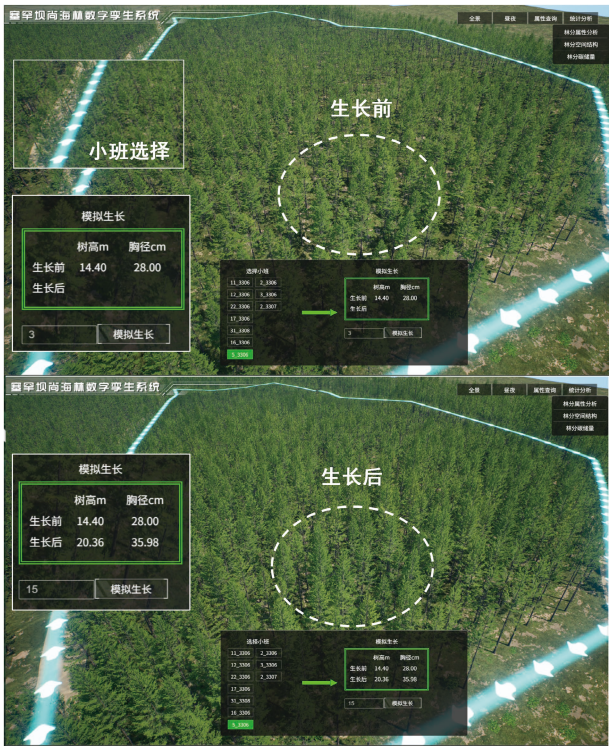


图 9　数字孪生场景林分生长动态模拟

Fig. 9　Stand growth dynamic simulation in digital twin scenarios

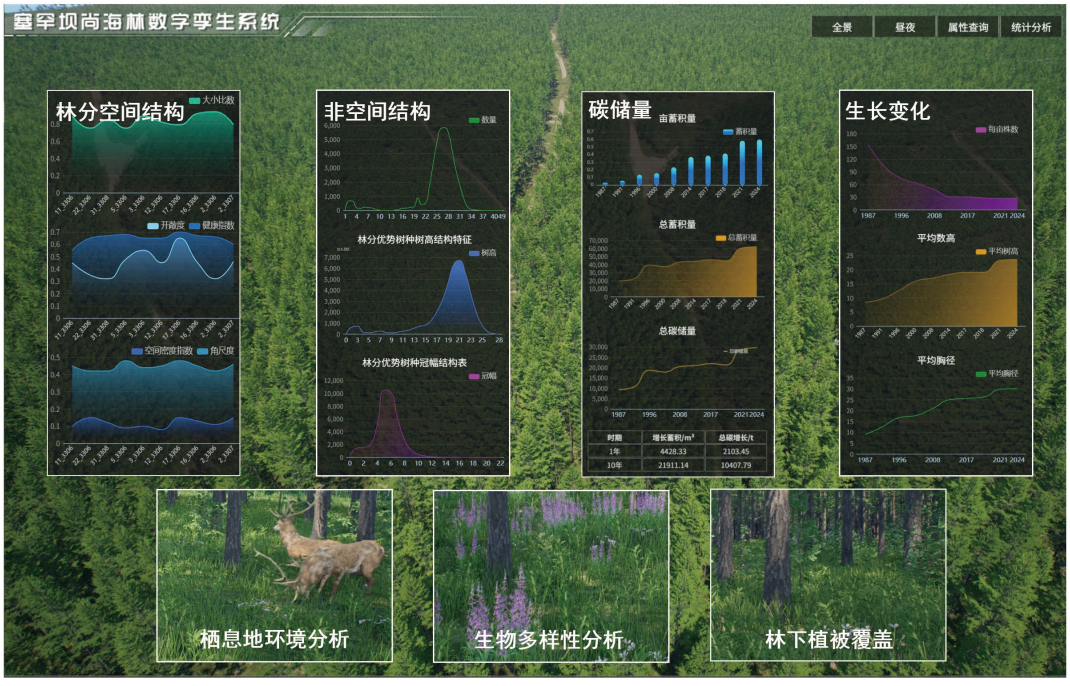


图 10　数字孪生场景林分结构分析

Fig. 10　Stand structure analysis in digital twin scenarios

能决策支撑(图 11)。

5 迈向下一代：机遇、挑战与实施策略

5.1 机 遇

5.1.1 “数字中国”战略发展机遇

《数字中国建设整体布局规划》等国家顶层设计明确要求建设绿色智慧的数字生态文明，智慧林业作为数字中国战略的核心组成部分，为林业的数字化转型提供了强有力的政策支持和制度保障。在生态文明建设、自然资源精细化管理以及智慧林草体系建设中，国家层面均强调以数字孪生、人工智能和大数据为支撑的治理体系重构，使森林数字孪生从“技术实验”逐步迈向“体系构建”。“数字中国”战略推动了“天空地一体化”监测网络等基础设施的建设，实现了对森林资源全方位、高精度的动态监测。此外，云计算平台和林业大数据中心的建设为海量数据处理提供了算力支撑，使得构建高精度的森林数字孪生模型成为可能。在此背景下，构建以森林智能体为核心，能够实现虚实映射、仿真模拟与决策优化的森林经营数字孪生系统，正成为推动林业治理现代化，实现“山林智治”的关键路径。

5.1.2 “双碳”目标和生物多样性需求

森林作为重要的陆地碳汇系统，其固碳与调节功能日益成为应对气候变化的重要支撑。在我国提出“双碳”目标后，森林碳储量的精准计量与动态监测需求显著提升。通过人工智能模型对林木结构参数、冠层密度及生物量进行高精度提取，可实现从单木到区域尺度的碳储量分层估算，为碳汇功能评估提供动态数据支撑。同时，森林生态系统的碳汇能力与其林分结构、健康状况和物种组成密切相关，推动森林质量精准提升不仅能增强生态系统的气候调节功能，也有助于实现碳计量的精细化与管理的科学化。

气候变暖与极端事件频发加剧了物种迁移与群落更替的复杂性，迫切需要通过多样性导向的精准经营策略维持生态系统的韧性。基于数字孪生与多源信息融合技术，可实现对物种分布、群落结构与生态位变化的实时监测与模拟，评估不同经营措施对生物多样性与碳储量平衡的影响。在碳汇热点区域优化经营措施以最大化固碳效率，在生物多样性关键区域优先保护物种栖息地连通性，在生态脆弱带则强化灾害预警能力，已成为森林高质量经营和生态安全保障的重要方向，从而形成兼顾碳计量精度、生物多样性保护与气候适应性的智慧林业治理新范式。

5.1.3 森林质量精准提升的迫切需求

当前，“资源禀赋约束”与“结构性矛盾”是制约森林质量精准提升的核心因素。尽管我国森林资源总量持续增长，但质量提升手段相对滞后，优质林比例偏低、结构失衡、生态功能发挥不足等问题依然突出。随着森林经营目标从“数量扩张”向“质量提升”转变[1]，实现森林质量智能评价与精准提升已成为当务之急。一方面，气候变化、病虫害频发及生态系统退化等外部压力，迫使森林经营必须从以蓄积量为导向的粗放式管理，转向以结构优化、健康稳定与生

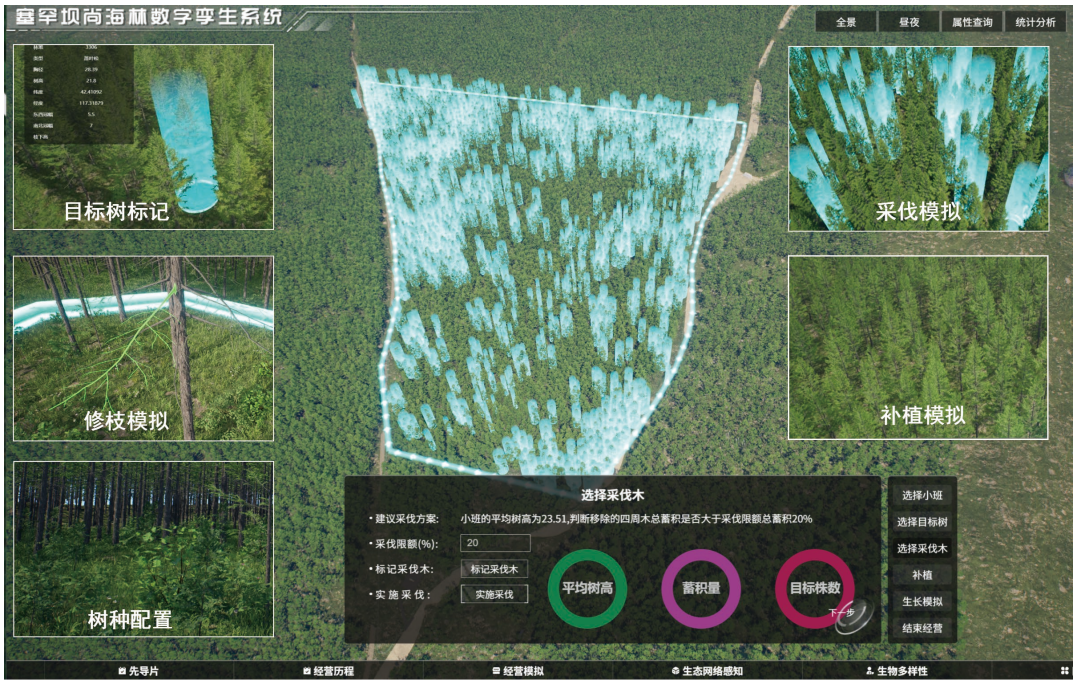


图 11 数字孪生场景森林精准经营

Fig. 11 Precise forest management in digital twin scenarios

态服务提升为核心的精细化管理。另一方面，传统森林质量监测方法以样地抽样和静态指标为主，难以揭示其动态演化过程与空间异质性，导致经营措施滞后于实际变化，无法实现“因树施策、因地制宜”的精准经营。

在此背景下，森林质量精准提升不仅需要在技术层面实现多源数据融合与智能分析，更需要在经营理念上突破“增量思维”，转向“提质导向”。通过构建基于数字孪生与“质量跃迁”的森林经营数字孪生系统，能够对不同区域、不同类型森林的资源禀赋进行精细刻画与分区诊断，识别制约森林生长与生态功能发挥的关键瓶颈，从而实现差异化、精准化的结构优化与质量提升策略。

5.1.4　人工智能驱动的森林经营智能化发展

人工智能技术的发展正在重塑森林经营的认知体系、决策模式与管理范式。可解释深度学习、多模态大模型、生成式人工智能等新一代人工智能技术的持续突破，促使森林经营从“经验驱动”向“数据智能驱动”深刻变革。人工智能的引入不仅是林草业顺应时代潮流、实现创新发展的历史机遇，更是破解生态监测与经营管理难题的关键途径。在空间、时间与语义维度上，人工智能实现了数据同化与动态更新，使森林生态系统具备了从被动监测向主动智能认知的跃迁能力，为林分结构的动态监测和多尺度演变分析提供了技术支撑。在语义层面，人工智能能够解析林木个体、群落结构与生态过程间的复杂关系，推动森林结构优化与生态功能演化的机制化建模。在决策层面，人工智能革新了数据获取方式，使其具备立体感知与高效传输能力，实现森林生态系统的实时监测，及时发现森林消长变化，动态评估森林健康状况，并建立面向主要森林类型，区分自然与经营条件下的森林生长收获智能预估模型体系，推动森林经营智能化变革。

5.2　技术挑战

5.2.1　多源数据自动获取与更新

森林数字孪生的核心在于“数据驱动”。目前，林业数据的来源包括卫星遥感、无人机、地面激光扫描、物联网传感器以及人工调查等，这些数据在空间分辨率、时间频度、光谱特征和数据格式上存在显著差异。如何实现不同尺度、模态和精度数据的自动配准、语义对齐及质量控制，成为数据融合的关键挑战。此外，由于森林环境复杂、地形起伏较大且气候多变，传感器网络容易受到干扰，导致数据缺失和延迟问题普遍存在。

5.2.2　大规模森林数字孪生体构建

构建大尺度、高精度的森林数字孪生体是实现智慧经营与生态模拟的重要基础。然而，森林生态系统的高维复杂性与动态异质性，给其构建带来巨大挑战。森林具有多层级、多要素耦合的空间结构，从单株树木到林分再到景观层面，需同时刻画林木形态、生理特征、环境因子及其相互作用。这对数据分辨率、时间序列连续性以及模型精度提出了极高要求。大规模孪生体模拟涉及海量三维空间数据、遥感影像及传感器流数据的实时处理，对云计算能力、硬件加速技术和分布式存储体系形成巨大压力。目前，缺乏适用于森林生态特征的轻量化孪生建模框架与标准化建模流程，限制了跨区域、跨尺度的模型迁移与共享。

5.2.3　森林多目标优化与智能决策

森林生态系统是一个典型的非线性、强耦合复杂系统，其生长、竞争、演替、碳循环等过程涉及多尺度、多因子交互。尽管当前人工智能模型在分类识别与参数估算方面表现优异，但在生态机制建模、非线性反馈解析以及多目标经营优化方面仍显不足。森林经营不仅需要兼顾碳汇效益、经济收益与生态服务价值，还需平衡生物多样性保护与气候适应性需求，这对人工智能模型的可解释性、稳健性与泛化能力提出了更高要求。尽管数字孪生在林分动态模拟、碳储量评估、病虫害监测与生态风险预警等方面具备显著优势，但其决策可解释性、模型可靠性与过程可追溯性仍存在瓶颈。

5.2.4　虚实联动与智能交互

森林数字孪生体在森林经营与管理场景中的落地应用仍面临实时反馈与闭环控制的挑战，模型预测结果难以直接指导造林、采伐与更新等具体经营措施。特别是在作业区划设计、林分结构调整、经营方案优化与生态效益评估等环节，模拟结果与实地作业指令之间存在“信息孤岛”现象，制约了模型成果的可操作性与可验证性。此外，林业管理与技术人员普遍缺乏对复杂数字系统的操作、维护及解释能力，难以形成高效的人机协同决策体系。

5.3　实施策略

5.3.1　数据智能挖掘与时空大模型

多源异构数据的分析处理需要构建面向森林生态系统的数据智能挖掘与时空大模型框架，以实现文本、遥感、地面站点、物联网传感器等多源数据的高维融合、时空推理与生态过程重建。通过引入数据智能挖掘技术，可从大规模森林观测数据中自动识别潜在的关联模式与关键控制因子，深入挖掘林木生长、碳储量变化、群落演替与环境因子之间的耦合关系，为模型构建提供数据驱动的知识先验。时空大模型结合时空注意力机制与状态空间建模，能

够在长时序遥感影像与地面监测数据中捕捉森林结构、冠层能量通量与生长动态的演变规律，从而实现从“观测数据”到“生态状态”的连续映射。结合自监督学习、特征选择与多模态语义对齐，该模型能够自动识别林分生长阶段、冠层结构变化，以及火灾、风倒、病虫害等干扰事件，并利用时空反演与因果推理技术，完成缺测区域重构与未来情景预测。数据智能挖掘与时空大模型的结合可构建“碳储量动态估算—生长趋势预测—经营措施反馈”的一体化分析框架，形成智慧经营的推理引擎，实现对林分动态、气候响应、碳循环及生态服务的高精度推演与诊断，为智慧经营提供连续、可信且可解释的时空数据支撑。

5.3.2 森林数字孪生体的智能化生成

针对大规模孪生体构建的复杂性与算力瓶颈，森林数字孪生体的生成正从“几何重建”向“智能生成”转变。基于 NeRF、Gaussian Splatting 等智能重建技术，可实现从遥感影像、三维点云到大尺度森林场景的高保真重建与语义复原。通过学习光照、反射与结构的辐射特征，可在不依赖密集测量的情况下生成兼具真实感与可计算性的三维森林场景。结合参数化林木生长模型与深度生成模型，可在森林数字孪生体中模拟林木个体生长、林分演替、冠层结构演化及经营措施响应，实现森林经营场景的大尺度智能重建、时空尺度连续性以及森林发展演替过程的智能模拟。快速重建采伐、更新、补植、病虫害扩散等典型森林经营场景，并与经营数据库联通，实现林分状态感知、经营方案仿真及结构优化的智能生成，推动从“小尺度静态孪生构建”向“孪生体大规模智能生成”的转变。

5.3.3 行业大模型与数字孪生的融合

将行业大模型与数字孪生体系深度融合，构建具备智能感知、自动推理与自动优化能力的森林智能体系统。行业大模型可在语义层面整合森林生态、经营规划与政策规范知识，通过多模态输入数据解析林分状态与经营意图。数字孪生体则提供可验证、可仿真的数字孪生环境，用于模型推理结果的可视化验证与情景演化。二者结合可形成“推理—仿真—反馈—优化”的闭环。行业大模型根据采伐强度、抚育策略、碳汇提升路径与经营目标生成方案，数字孪生系统模拟其对林分结构与生态功能的影响，并将结果反馈至模型进行自适应优化，在碳汇效益、经济收益与生态韧性之间实现动态平衡，推动森林经营从“经验决策”迈向“自主推理与智能决策”。行业大模型的语义理解能力与数字孪生体的虚实反馈能力协同融合，将成为森林经营智能化、精准化与可持续化的核心引擎。

5.3.4 具身智能与多模态交互

面向森林经营“最后一公里”的落地难题，建立“具身智能 + 沉浸交互 + 安全边界”的执行体系。在现场端，部署无人机、无人车、机器人等具身智能设备，完成数字样地巡检、林木样本采集、灾害区域精细喷洒、定点伐除、林区火情侦察与灌草清障等作业；通过多传感器融合 SLAM（simultaneous localization and mapping）与视觉−触觉−惯导感知，确保在复杂林下环境中的稳定运行。在指挥端，以脑机接口设备为基础，打造可视化指挥舱与多模态交互（语音文本、操作手势、林地三维地图），以“所见即所得”的方式下达森林经营作业指令，查看森林孪生状态并回收执行数据。为保障森林经营的安全与合规，叠加人机协同控制、风险等级分区管理、作业权限与责任链，并以生长、灾害、碳汇这 3 类早期预警作为闭环触发器，推动森林经营从指令到作业、从作业到评估、从评估到再优化的实战落地。

6 结论与展望

数字孪生技术为森林经营的智能化转型升级提供了核心技术支持。本文基于数字孪生技术，提出了面向智能决策与应用的森林经营数字孪生框架及其构建流程。针对森林三维场景建模问题，从模型构建要素、建模效率及场景优化等多个层面出发，提出了适用于不同尺度、不同层级（如枝、干、叶）以及不同应用场景的建模方案，对森林外观结构进行了全面描述和精准刻画。在数据更新、孪生模型构建及交互决策等方面，通过高效的数据处理与融合算法，阐述了森林数字孪生中机理模型与物理实体的交互融合机制，并提出了虚实融合策略及交互决策方案，显著提升了森林数字孪生的决策效率。在智能应用与实施方面，针对数据感知、结构优化、生长建模、经营方案编制、经营措施实施及成效评估等差异化场景，提出了适用于不同应用场景的关键技术路径与落地实施方案。以塞罕坝机械林场尚海纪念林数字孪生系统为例，展示了森林数字孪生构建、结构分析、生长动态模拟及经营决策等功能的具体实现过程。

目前，数字孪生驱动的森林精准经营决策应用仍处于起步阶段，面临诸多挑战，同时也蕴含重大发展机遇。未来，将进一步深化数字孪生与多模态大模型、具身智能、生成式人工智能及元宇宙等新兴技术的深度融合，突破大规模数字孪生场景高效重建、模型降阶与协同优化、轻量化场景部署以及虚实联动与智能交互等关键技术瓶颈，为智慧森林经营的发展注入核心动力，推动森林经营管理向更高水平的智能化迈进。

参 考 文 献

[1] 张会儒, 雷相东, 张春雨, 等. 森林质量评价及精准提升理论与技术研究 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(5): 1−18.
Zhang H R, Lei X D, Zhang C Y, et al. Research on theory and technology of forest quality evaluation and precision improvement[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(5): 1−18.

[2] Tao F, Xiao B, Qi Q, et al. Digital twin modeling[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2022, 64: 372−389.

[3] 谭晶维, 张怀清, 郭梦蕾, 等. 林草行业大模型构建思路与应用前景 [J]. 林业科学, 2025, 61(7): 170−181.
Tan J W, Zhang H Q, Guo M L, et al. Construction ideas and application prospects of large models in forestry and grassland industry[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2025, 61(7): 170−181.

[4] 国家林业和草原局. 森林经营规划编制指南: LY/T 3427—2025 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2025.
National Forestry and Grassland Administration. Guidelines for forest management strategie planning: LY/T 3427−2025 [S]. Beijing: China Standards Press, 2025.

[5] 张会儒, 雷相东, 李凤日. 中国森林经理学研究进展与展望 [J]. 林业科学, 2020, 56(9): 130−142.
Zhang H R, Lei X D, Li F R. Research progress and prospects of forest management science in China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(9): 130−142.

[6] 谢阳生, 陆元昌, 雷相东, 等. 多功能森林经营方案编制关键技术及辅助系统研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(8): 1−9.
Xie Y S, Lu Y C, Lei X D, et al. Research on key technology and auxiliary design system for multi-functional forest management plan[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2019, 39(8): 1−9.

[7] Dong L, Bettinger P, Liu Z. Maximizing the canopy openness for replanted Korean pine seedlings under secondary forests in northeast China[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 202: 107421.

[8] 雷可欣, 张怀清, 邱汉清, 等. 智慧国家公园技术体系构建与应用 [J]. 林业科学, 2025, 61(10): 15−25.
Lei K X, Zhang H Q, Qiu H Q, et al. Construction and application of smart national park technology system[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2025, 61(10): 15−25.

[9] Qiu H Q, Zhang H Q, Lei K X, et al. Forest digital twin: a new tool for forest management practices based on spatio-temporal data, 3D simulation engine, and intelligent interactive environment [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 215: 108416.

[10] 胡云帆, 张怀清, 安锋, 等. 基于激光点云的橡胶树参数反演与数字孪生构建 [J]. 西北林学院学报, 2024, 39(2): 1−12.
Hu Y F, Zhang H Q, An F, et al. Hevea brasiliensis property retrieval and construction of digital twin based on laser scanning data[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2024, 39(2): 1−12.

[11] 崔泽宇, 张怀清, 刘洋, 等. 树木三维建模与可视化模拟技术进展与应用 [J]. 林业科学, 2025, 61(6): 1−12.
Cui Z Y, Zhang H Q, Liu Y, et al. Progress and applications of 3D modeling and visualization simulation technology for trees[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2025, 61(6): 1−12.

[12] 白静, 张怀清, 刘闽. 合轴分枝树木形态结构三维可视化模拟方法 [J]. 林业科学, 2014, 50(12): 73−78.
Bai J, Zhang H Q, Liu M. Three-dimensional visual simulation of sympodial branching trees morphological architecture[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(12): 73−78.

[13] 高士增, 张怀清, 刘闽, 等. 基于点云的树木枝干形态参数提取技术 [J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(4): 109−114.
Gao S Z, Zhang H Q, Liu M, et al. Morphological parameters extraction of tree branches based on point cloud[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42(4): 109−114.

[14] 邓强, 张怀清, 李永亮, 等. 基于三维虚拟环境的林分结构调整可视化模拟技术 [J]. 林业科学研究, 2016, 29(6): 890−895.
Deng Q, Zhang H Q, Li Y L, et al. Visualization simulation technique of stand structure adjustment based on 3D virtual environment[J]. Forest Research, 2016, 29(6): 890−895.

[15] 刘金鹏, 张怀清, 刘闽, 等. 基于地面激光扫描数据的单木分枝结构参数自动提取 [J]. 林业科学, 2016, 52(3): 121−128.
Liu J P, Zhang H Q, Liu M, et al. Automatic extraction of individual tree branch structure parameters from terrestrial laser scanning data[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(3): 121−128.

[16] 卢康宁, 张怀清, 刘闽, 等. 杉木单木生长可视化模拟系统设计与实现 [J]. 林业科学研究, 2012, 25(2): 207−211.
Lu K N, Zhang H Q, Liu M, et al. Design and implementation of individual tree growth visualization system of *Cunninghamia lanceolata*[J]. Forest Research, 2012, 25(2): 207−211.

[17] 马载阳, 张怀清, 李永亮, 等. 基于空间结构的杉木树冠生长可视化模拟 [J]. 林业科学研究, 2018, 31(4): 150−157.
Ma Z Y, Zhang H Q, Li Y L, et al. Visual simulation of Chinese fir crown growth based on spatial structure[J]. Forest Research, 2018, 31(4): 150−157.

[18] Li W, Hu X, Su Y, et al. A new method for voxel-based modelling of three-dimensional forest scenes with integration of terrestrial and airborne LiDAR data[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2024, 15(3): 569−582.

[19] Hu K, Ying W, Pan Y, et al. High-fidelity 3D reconstruction of plants using neural radiance fields[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 220: 108848.

[20] 薛邵锴, 秦文萍, 张东霞, 等. 基于模型数据混合驱动的大规模双馈风电场并网数字孪生建模 [J]. 高电压技术, 2024, 50(3): 1025−1033.
Xue S K, Qin W P, Zhang D X, et al. Digital twin modeling for grid-connected large-scale doubly fed wind farms based on model-data hybrid drive[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 1025−1033.

[21] 汤磊, 许小峰, 程雨松, 等. 城市数字孪生数据体构建新范式: 全域、动态与智慧 [J/OL]. 地球信息科学学报, 2025 [2025−11−01]. DOI: 10.12082/dqxxkx.2025.250247.
Tang L, Xu X F, Cheng Y S, et al. A new paradigm for constructing urban digital twin data volume: omni-domain, dynamic and intelligent [J/OL]. Journal of Geo-Information Science, 2025 [2025−11−01]. DOI: 10.12082/dqxxkx.2025.250247.

[22] 陈伯望, Klaus von Gadow, 惠刚盈. 线性规划、模拟退火和遗传算法在杉木人工林可持续经营中的应用和比较 [J]. 林业科学, 2004, 40(3): 80−87.
Chen B W, von Gadow K, Hui G Y. The application and

comparison of linear programming, simulated annealing and genetic algorithm in the sustainable management of *Cunninghamia lanceolata* plantations[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2004, 40(3): 80−87.

[23] 沈康, 杨廷栋, 张怀清, 等. 基于模拟退火算法的林分多目标经营动态可视化模拟 [J]. 林业科学研究, 2020, 33(3): 99−106.
Shen K, Yang T D, Zhang H Q, et al. Dynamic visualization simulation of multi-objective stand management based on simulated annealing algorithm[J]. Forest Research, 2020, 33(3): 99−106.

[24] 朱念福, 张怀清, 崔泽宇, 等. 基于肢体动作交互的森林经营作业模拟研究 [J]. 林业科学研究, 2021, 34(5): 95−103.
Zhu N F, Zhang H Q, Cui Z Y, et al. Research on forest management operation simulation based on body motion interaction[J]. Forest Research, 2021, 34(5): 95−103.

[25] Jiang X, Jiang M, Gou Y, et al. Forestry digital twin with machine learning in Landsat 7 data[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 916900.

[26] Tagarakis A C, Benos L, Kyriakarakos G, et al. Digital twins in agriculture and forestry: a review[J]. Sensors, 2024, 24(10): 3117.

[27] 王红军, 林俊强, 邹湘军, 等. 基于数字孪生的果园虚拟交互系统构建 [J]. 系统仿真学报, 2024, 36(6): 1493−1508.
Wang H J, Lin J Q, Zou X J, et al. Construction of a virtual interactive system for orchards based on digital twin[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(6): 1493−1508.

[28] Buonocore L, Yates J, Valentini R. A proposal for a forest digital twin framework and its perspectives[J]. Forests, 2022, 13(4): 498.

[29] 王霞. 基于神经网络森林经营辅助决策的知识获取 [D]. 福州: 福建农林大学, 2008.
Wang X. Genetic algorithm in forest harvest adjustment application as well as software research [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2008.

[30] 邓立斌. 基于 ANN 的森林经营决策模型研究 [D]. 长沙: 中南林学院, 2001.
Deng L B. Study on forest management decision-making models based on artificial neural network [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2001.

[31] Zhao X B, Fei F. Data collection method based on data perception and positioning technology in the context of artificial intelligence and the internet of things[J]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2024, 15(8): 1108.

[32] Morais R, Silva N, Mendes J, et al. mySense: a comprehensive data management environment to improve precision agriculture practices[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 882−894.

[33] Singh R, Gehlot A, Akram S V, et al. Forest 4.0: digitalization of forest using the internet of things (IoT)[J]. Journal of King Saud University, Computer and Information Sciences, 2022, 34(8): 5587−5601.

[34] Hui G Y, Zhang G G, Zhao Z H, et al. Methods of forest structure research: a review[J]. Current Forestry Reports, 2019, 5(3): 142−154.

[35] Qiu H Q, Zhang H Q, Lei K X, et al. A novel method for forest spatial structure heterogeneity evaluation of plantation utilizing point-wise vector network and neighborhood index[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 229: 109774.

[36] Qiu H Q, Zhang H Q, Lei K X, et al. A new tree-level multi-objective forest harvest model (MO-PSO): integrating neighborhood indices and PSO algorithm to improve the optimization effect of spatial structure[J]. Forests, 2023, 14(3): 441.

[37] Sheng Q, Dong L B, Liu Z G. Multi-objective optimization of forest structure for broadleaf mixed forest under different CMIP5 scenarios[J]. Ecological Indicators, 2024, 166: 112397.

[38] Hu X T, Zhang H Q, Yang G B, et al. Visual simulation research on growth polymorphism of Chinese fir stand based on different comprehensive grade models of spatial structure parameters[J]. Forests, 2023, 14(3): 617.

[39] Tang L Y, Peng X M, Chen C C, et al. Three-dimensional forest growth simulation in virtual geographic environments[J]. Earth Science Informatics, 2019, 12(1): 31−41.

[40] Perttunen J, Siev R, Nikinmaa E, et al. LIGNUM: a tree model based on simple structural units[J]. Annals of Botany, 1996, 77(1): 1−11.

[41] Mérian P, Lebourgeois F. Size-mediated climate-growth relationships in temperate forests: a multi-species analysis[J]. Forest Ecology and Management, 2011, 261(8): 1382−1391.

[42] Du S Q, Tang S J, Wang W X, et al. Tree-GPT: modular large language model expert system for forest remote sensing image understanding and interactive analysis[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2023, XLVIII-1-W2-2023: 1729−1736.

[43] 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(6): 83−95.
Cao L, Zhou K, Shen X, et al. The status and prospects of smart forestry[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences), 2022, 46(6): 83−95.

[44] 张会儒, 雷相东. 森林经理与森林质量精准提升 [J]. 国土绿化, 2017(8): 13−15.
Zhang H R, Lei X D. Forest managers and precision improvement of forest quality[J]. Land Greening, 2017(8): 13−15.

[45] 刘永奎, 杨康, 脱奔奔, 等. 数字孪生工业机器人: 概念框架、关键技术与案例研究 [J]. 系统仿真学报, 2025, 37(7): 1723−1752.
Liu Y K, Yang K, Tuo B B, et al. Digital twinned industrial robot: conceptual framework, key technologies, and case study[J]. Journal of System Simulation, 2025, 37(7): 1723−1752.

[46] 张颖伟, 高鸿瑞, 张鼎森, 等. 基于多智能体的数字孪生及其在工业中应用的综述 [J]. 控制与决策, 2023, 38(8): 2168−2182.
Zhang Y W, Gao H R, Zhang D S, et al. A review of multi-agent-based digital twins and its application in industry[J]. Control and Decision, 2023, 38(8): 2168−2182.

[47] 石小云, 李际平, 王传立, 等. 森林经营决策模拟系统的设计与实现 [J]. 中南林业科技大学学报, 2007, 5(6): 144−148.
Shi X Y, Li J P, Wang C L, et al. Design and realization of the simulation system for forest management decision[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2007, 5(6): 144−148.

（责任编辑 吴 娟
责任编委 赵秀海）