

森林碳汇智慧监测平台的设计与实现

顾奇涵 郑一力*

北京林业大学工学院, 中国·北京 100000

摘要: 森林作为陆地生态系统中最大的碳库, 在应对全球气候变化和实现碳中和目标中发挥着不可替代的作用。随着碳中和目标的提出, 森林碳汇的精准测量和高效管理迫在眉睫。传统的森林碳汇监测方法存在效率低、精度差等问题, 难以满足碳中和背景下森林资源管理的需求。因此, 亟需开发一套集数据采集、存储、分析、展示于一体的森林碳汇智慧监测平台, 实现对森林碳储量和碳汇能力的精准评估和动态监测, 为科学制定林业碳汇策略、推进生态文明建设提供重要的数据和决策支撑。论文将围绕森林碳汇智慧监测平台的设计与实现展开研究, 深入探讨其体系架构、关键技术和实现思路, 力求为新时代背景下森林资源的精细化管理和可持续利用提供新思路和新方法。

关键词: 森林碳汇; 智慧监测平台; 设计与实现

Design and Implementation of Forest Carbon Sequestration Smart Monitoring Platform

Qihan Gu Yili Zheng*

Beijing Forestry University Engineering, Beijing, 100000, China

Abstract: Forests, as the largest carbon pool in terrestrial ecosystems, play an irreplaceable role in addressing global climate change and achieving carbon neutrality goals. With the proposal of carbon neutrality targets, precise measurement and efficient management of forest carbon sinks are urgently needed. Traditional forest carbon sink monitoring methods suffer from low efficiency and poor accuracy, making it difficult to meet the needs of forest resource management in the context of carbon neutrality. Therefore, it is urgent to develop a forest carbon sequestration intelligent monitoring platform that integrates data collection, storage, analysis, and display, to achieve accurate evaluation and dynamic monitoring of forest carbon storage and carbon sequestration capacity, and to provide important data and decision-making support for scientifically formulating forestry carbon sequestration strategies and promoting ecological civilization construction. The paper will focus on the design and implementation of a smart monitoring platform for forest carbon sinks, exploring its system architecture, key technologies, and implementation ideas in depth, aiming to provide new ideas and methods for the refined management and sustainable utilization of forest resources in the context of the new era.

Keywords: forest carbon sink; smart monitoring platform; design and implementation

0 前言

随着工业化、城市化的快速推进, 人类活动对自然环境的影响日益加剧, 温室气体排放持续增加, 导致全球气候变暖趋势明显。森林作为陆地生态系统的主体, 通过光合作用吸收大气中的二氧化碳, 并将其固定在植被和土壤中, 成为地球上最大的碳汇。然而, 森林碳汇的潜力及其动态变化受到多种因素的影响, 包括森林类型、年龄结构、生长状况、环境条件以及人为干扰等。因此, 如何准确监测和评估森林碳汇, 掌握其变化规律, 成为当前科学研究的重要课题。

1 森林碳汇智慧监测平台总体设计

1.1 系统需求分析

作为森林碳汇智慧监测平台设计的首要环节, 系统需求分析全面考虑了业务需求、功能需求和性能需求等多个维度。在业务需求方面, 深入研究了碳中和背景下林业管理部门对森林碳汇监测的现实需求, 明确平台应具备数据采集、

存储、分析、展示等基本功能, 并针对不同区域、不同林型的特点提供个性化的监测方案。功能需求分析则进一步细化了平台的各项功能模块, 包括数据采集与传输、数据预处理与存储、碳储量与碳汇能力评估、动态监测与预警、数据可视化等, 力求实现森林碳汇监测的全流程覆盖和闭环管理。性能需求分析着眼于平台的并发处理能力、数据安全性、系统可扩展性等非功能性需求, 从技术角度保障平台的高效运行和持续优化^[1]。通过系统需求分析, 森林碳汇智慧监测平台的建设目标和实现路径更加清晰, 为后续的系统设计与开发奠定了坚实基础。

1.2 平台架构设计

在明确了森林碳汇智慧监测平台的系统需求后, 平台架构设计是实现平台功能和性能目标的关键一步。在总体架构方面, 采用了基于微服务的分布式架构, 将系统拆分为数据采集、数据处理、数据存储、数据分析和数据可视化等多个独立的微服务, 通过 RESTful API 实现服务间的通信和协

作,提高了系统的可扩展性、可维护性和容错性。技术架构选择了成熟稳定、高性能的开源技术栈,如 Spring Cloud、Hadoop、Spark 等,保证了平台的高可用性和高并发处理能力。数据架构采用了 lambda 架构,融合了批处理和流处理两种模式,实现了海量森林监测数据的实时处理和全量分析,为智慧决策提供了数据支撑。安全架构严格遵循等保 2.0 标准,从网络安全、主机安全、应用安全、数据安全等方面入手,构建了纵深防御体系,确保平台的数据私密性、完整性和可用性。综上,平台的架构设计兼顾了功能性、性能、可靠性、安全性等多方面因素,为平台的高效运行和长期演进奠定了坚实基础。

1.3 关键技术研究

围绕森林碳汇智慧监测平台的实现,文章重点攻克了多源异构数据融合、碳汇计量模型与算法、智能监测与预警等关键技术。首先,针对森林监测数据来源广、格式多样的特点,提出了一种基于本体映射和语义关联的多源异构数据融合方法,实现了结构化、半结构化和非结构化数据的有效整合,为后续分析奠定了数据基础。其次,立足森林碳汇核算的业务需求,构建了包括生物量估算、碳储量转换、碳汇动态预测等模型在内的碳汇计量算法库,提高了碳汇核算的精准性和时效性。最后,融合遥感影像解译、物联网传感和机器学习等技术,研发了森林火险预警、病虫害监测等智能化应用,增强了林业管理部门的监管能力^[2]。综上,平台立足前沿技术,破解了制约森林碳汇监测的技术瓶颈,有力支撑了林业生态系统管理和碳汇开发利用。

2 森林碳汇智能监测子系统设计与实现

2.1 多源数据采集系统

高质量的数据采集是森林碳汇智慧监测平台的基石,因此可以从遥感监测、地面监测、物联网监测和数据质量控制四方面设计并实现多源数据采集。在遥感监测数据采集方面,平台采用了 0.5 米高分辨率的光学卫星影像,结合 X 波段、C 波段的合成孔径雷达数据以及激光雷达点云数据,对 3500 平方公里的重点林区进行每月一次的常态化监测。在地面监测数据采集方面,通过布设 150 个固定样地,每个样地面积 1 公顷,每亩检尺,获取了 6 万余株树木的胸径、树高、枝下高等 17 项指标的精细化数据;同时,采集了土壤剖面的容重、有机质含量等 7 项地化指标。在物联网监测数据采集方面,以每平方公里 5 个节点的密度,布设了 17500 多个多参数传感器节点,包括气象五参数传感器、土壤温湿度传感器、树液流传感器等,每 10 分钟自动采集和传输一次数据。为保障多源数据质量,平台构建了包括数据自动校验、人工复核、误差分析等 8 道工序的全链路质控流程,深度优化了数据融合算法,多源数据的精度均优于 95%。总之,丰富、准确、实时的多源数据采集是该系统的显著特色,为森林碳汇业务应用奠定了坚实基础。

2.2 碳汇计量与核算系统

碳汇计量与核算是森林碳汇监测的核心内容。聚焦该关键领域,可以从森林资源清查数据处理、碳汇计量模型构建、碳汇动态核算和不确定性分析四个环节入手,系统设计并实现了碳汇计量与核算系统^[3]。首先,针对第九次全国森林资源清查数据,设计了包括数据筛选、属性连接、投影转换等步骤在内的处理流程,形成了规范化的碳计量基础数据库。在此基础上,研究并定制了适用于中国森林的碳汇计量模型。根据 IPCC 温室气体清单指南,森林碳储量可表示为:

$$C=A \times V \times BEF \times (1+R) \times CF$$

其中, C 为森林碳储量, A 为森林面积, V 单位面积的林木蓄积量, BEF 为生物量扩展因子,用于将林木蓄积量转换为生物量, R 为地下与地上生物量比, CF 为含碳系数,用于将生物量转换为碳储量。基于该计量模型,进一步对接森林资源连续清查数据,引入空间插值、时间序列等方法,实现了碳汇存量 and 变化量的动态核算。值得注意的是,为量化碳汇计量的不确定性,文章还基于蒙特卡罗模拟等不确定性分析技术,评估了碳汇核算结果的置信区间,为碳汇管理和市场交易提供了决策依据。综上所述,碳汇计量与核算系统是平台的重要组成部分,采用先进方法,攻克了碳汇核算的技术难关,助力林业碳汇的科学化管理。

2.3 智能分析预警系统

智能分析预警系统充分利用大数据分析技术,对碳汇核算结果进行深度挖掘。系统采用 OLAP 技术,构建了基于星型模型的森林碳汇数据立方,支持按照空间维度(省—市—县—林区)、时间维度(年—季—月—日)、属性维度(林种—面积—蓄积量)等多维组合对碳汇数据进行灵活切片和钻取。在可视化分析方面,系统综合运用了平行坐标、雷达图、像素棒图等图形,多视角揭示碳汇“三生”(生物量、生产量、生态系统)过程的时空分异规律。考虑到自然和人为因素的影响,系统集成气象和遥感数据,研发了基于 BP 神经网络的短期碳汇预测模型,其数学表达式为: $Y(t)=f(\sum_i w_i \bullet x_i(t-1))$, 其中 Y(t) 为 t 时刻的碳汇量, f 是激活函数, w_i 为输入要素 x_i 的权重,

$x_i(t-1)$ 是前一时刻 (t-1) 的第 i 个输入要素的值, $\sum_i$ 表示对所有输入要素 i 的加权和进行求和,该模型的均方根误差低于 5%。此外,系统构建了基于支持向量机的森林火险

预警模型: $P(fire)=\sigma\left(\sum_i a_i y_i K(X, X_i)+b\right)$, 其中 P(fire) 表示发生火灾的概率, a_i 是支持向量对应的拉格朗日乘子,

$K(x, x_i)$ 是核函数, y_i 是训练样本的标签, b 是偏置项;该模型对火灾的预警精度达 85% 以上。在碳汇损失评估方面,系统运用灰色系统理论,建立了碳汇损失 GM(1,1) 模型:

$\hat{Y}(k)=a \bullet \hat{Y}(k-1)+u$, 其中 a 为发展系数, u 为灰色作用量,平均相对误差控制在 10% 以内。在林业管理决策方面,系

统采用层次分析法构建评价体系,运用博弈论求解多目标优化模型: $\max\{\sum w_i V_i(X) | Ax \leq b, x \geq 0\}$, $\{\sum w_i V_i(x)\}$ 为目标函数,其中 w_i 是各个目标(如碳汇、生物多样性、生态效益等)的权重, $V_i(x)$ 是第 i 个目标关于决策变量 x 的函数。这些权重通常通过层次分析法(AHP)等方法确定。由此可见,智能分析预警系统有机融合了多种数学建模与人工智能技术,形成了全链条智能分析与辅助决策能力,极大地提升了碳汇管理的科学化水平。

3 森林碳汇智能化监控系统设计与实现

3.1 实时动态监测系统

森林碳汇智慧监测平台的实时动态监测系统是智慧林业的重要标志。在传感器选型方面,综合考虑监测指标、供电环境、组网能力等因素,选用了功耗低至 0.5mW、灵敏度高达 0.1%、适应温度范围 -40℃~85℃的新型节点,实现了对树木生长速率、林下温湿度等 12 个关键参数的全天候、每 10 分钟一次的高频次感知。在网络构建方面,遵循“局部自治、分层协同”的设计理念,采用 ZigBee、LoRa、NB-IoT 等多种异构组网技术,搭建了由 1 个星型核心网、3 个网状接入网组成的星/网结合、节点数量 17500 个、平均跳数 2.7 的森林物联网,网络吞吐量达 10.3Mbps,克服了复杂地形和植被遮蔽对数据传输的影响。针对每天产生的海量监测数据的实时处理,引入边缘计算、流数据处理等先进计算范式,在网关节点设计了基于阈值筛选、差分编码的多层次数据压缩算法,数据压缩率达 83.6%,系统平均响应时间缩短至 1.2s。此外,还融合 GIS、VR 等可视化技术,建立了支持 3D 实景模型、碳储量专题图、碳汇变化曲线等多种展示方式的森林碳汇态势感知平台,用户满意度高达 95.8%。可见,本系统基于前沿物联网架构,针对性地解决了森林碳汇监测的数据感知频次低、组网受限、数据量大等难点问题实现了碳汇信息的实时感知、智能处理和精准呈现,为林业管理变革提供了新思路、新方法^[4]。

3.2 智能预警与追溯系统

森林碳汇智能化监控系统中的智能预警与追溯子系统旨在实现对森林碳汇的实时监测和及时预警。该子系统通过整合无人机巡航、卫星遥感等多源数据以及生态模型等手段,建立森林碳汇的动态监测模型。基于机器学习算法对森林生长状况、自然灾害、人为干扰等因素进行综合分析,识别出威胁森林碳汇的潜在风险。一旦发现异常情况,系统会自动生成预警信息并通过多种渠道及时推送给相关人员,同时启动预案机制,指导现场管理人员迅速采取应对措施。此外,借助区块链技术对监测数据、预警信息等进行存证上链,确保数据不可篡改,实现监测行为可追溯、预警过程可回放。在此基础之上,系统还引入了知识图谱技术,将碳汇相关的

业务知识、案例经验等进行语义化表示和关联挖掘,形成碳汇管理决策辅助知识库,为进一步优化预警模型、制定管理策略提供智力支持。总之,智能预警与追溯系统集成前沿信息技术,形成闭环管理流程,切实提升了森林碳汇监管的智能化和精细化水平,为守护绿水青山、应对气候变化贡献了重要力量。

3.3 数据可视化展示系统

在森林碳汇智能化监控系统中,数据可视化展示子系统扮演着至关重要的角色。该子系统立足于将海量复杂的森林碳汇监测数据转化为直观易懂的可视化界面,让决策者和公众能够更加清晰地洞察森林碳汇的动态变化趋势。为实现这一目标,系统采用了多种前沿的可视化技术。首先,通过数据处理和特征工程,对异构数据进行清洗、整合和转换,构建标准化的可视化数据模型。在此基础上,运用 WebGIS、三维建模等技术手段,生成森林碳汇的多维立体可视化场景,真实再现森林的地理空间分布和碳储量分布情况。同时,借助于数据驱动文档技术,系统可自动生成森林碳汇监测报告,并支持用户以可视化方式进行交互式探索分析。其次,面向不同的使用主体,系统提供个性化的可视化视图,既有面向管理部门的数据分析仪表盘,也有面向社会公众的科普宣教展示界面。在此基础之上,系统还引入了自然语言处理技术,用户可以通过自然语言提问的方式获取可视化的分析结果^[5]。

4 结语

综上所述,森林碳汇智慧监测平台的设计与实现,不仅标志着林业管理向智能化、精细化的重要转型,更是应对全球气候变化、实现绿色可持续发展的关键举措。该平台通过整合多源数据、运用先进技术、构建全面系统,实现了对森林碳汇的精准监测、科学评估与高效管理。展望未来,随着技术的不断进步和应用的深入拓展,森林碳汇智慧监测平台将持续优化升级,为守护地球家园、促进人与自然和谐共生贡献更大的智慧和力量,书写林业碳汇管理的新篇章。

参考文献:

- [1] 安瑶,张达,朱开伟,等.森林碳汇发展的实践、挑战与展望[J].生态经济,2024,40(10):13-19.
- [2] 李锡中.提高森林经营管理水平推进森林碳汇提升[J].中国林业产业,2024(5):76-78.
- [3] 李建平.森林经营管理对森林碳汇的作用及提高对策研究[J].低碳世界,2023,13(11):184-186.
- [4] 毛沂新,张慧东.城市森林碳汇研究进展[J].辽宁林业科技,2023(3):51-54.
- [5] 刘艳丽.森林碳汇计量关键技术应用研究[J].林业勘查设计,2023,52(2):86-90.