

朱教君, 高添, 张金鑫, 孙一荣, 孙涛, 刘志华, 于立忠, 卢德亮, 于丰源, 滕德雄, 闫巧玲, 杨凯, 宋立宁, 郑晓, 王绪高, 王庆伟, 梁宇, 李辉东, 刘利芳, 徐爽, 刘华琪, 胡艳阳, 李秀芬, 王宗国, 周新华. 2023. 以“塔群”为核心的“立体-全息”森林生态系统信息化观测研究方法体系. 生态学杂志, 42(12): 3050-3054.

Zhu JJ, Gao T, Zhang JX, Sun YR, Sun T, Liu ZH, Yu LZ, Lu DL, Yu FY, Teng DX, Yan QL, Yang K, Song LI, Zheng X, Wang XG, Wang QW, Liang Y, Li HD, Liu LF, Xu S, Liu HQ, Hu YY, Li XF, Wang ZG, Zhou XH. 2023. Methods of “Three-dimensional and Holographic” observation for forest ecosystems centered on “Multi-Tower”. *Chinese Journal of Ecology*, 42(12): 3050-3054.

## 以“塔群”为核心的“立体-全息”森林生态系统信息化观测研究方法体系

朱教君<sup>1,2,3,4\*</sup> 高添<sup>1,2,3,4</sup> 张金鑫<sup>1,2,3,4</sup> 孙一荣<sup>1,2,3,4</sup> 孙涛<sup>1</sup> 刘志华<sup>1</sup> 于立忠<sup>1,2,3,4</sup>  
 卢德亮<sup>1,2,3,4</sup> 于丰源<sup>1,2,3,4</sup> 滕德雄<sup>1,2,3,4</sup> 闫巧玲<sup>1,2,3,4</sup> 杨凯<sup>1,2,3,4</sup> 宋立宁<sup>1,2,3,4</sup>  
 郑晓<sup>1,2,3,4</sup> 王绪高<sup>1</sup> 王庆伟<sup>1</sup> 梁宇<sup>1</sup> 李辉东<sup>1</sup> 刘利芳<sup>1,2,3,4</sup> 徐爽<sup>1,2,3,4</sup>  
 刘华琪<sup>1,2,3,4</sup> 胡艳阳<sup>1,2,3,4</sup> 李秀芬<sup>2,4,5</sup> 王宗国<sup>6</sup> 周新华<sup>2,4,7</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院沈阳应用生态研究所, 中国科学院森林生态与管理重点实验室, 沈阳 110016; <sup>2</sup>中国科学院沈阳应用生态研究所, 辽宁清原森林生态系统国家野外科学观测研究站/中国科学院清原森林生态系统观测研究站, 沈阳 110016; <sup>3</sup>中国科学院沈阳应用生态研究所, 辽宁省公益林生态与管理重点实验室, 沈阳 110016; <sup>4</sup>科尔森林痕量气体与同位素通量监测研发联合实验室, 沈阳 110016; <sup>5</sup>沈阳农业大学, 沈阳 110866; <sup>6</sup>中国科学院计算机网络信息中心, 北京 100190; <sup>7</sup>Campbell Scientific Inc., Logan, UT 84321, USA)

**摘要** 当前森林生态学研究在时空尺度上朝着更宏观和更微观两个方向发展, 传统的观测研究方法或模式已不适合现代森林生态学研究的需求。尤其是在信息化技术的不断发展背景下, 当前森林生态观测科研范式亟需变革。本文基于辽宁清原森林生态系统国家野外科学观测研究站的“科尔塔群”, 提出以塔(群)为核心的“天-空-塔-地”一体化观测研究体系。具体包括: 主/被动星载遥感(天)、无人机+激光雷达+多/高光谱传感器的近地面遥感(空)、塔群或单塔(塔)、长期固定样地群(地); 运用物联网、云计算和人工智能等新一代信息技术, 实现海量数据的自动获取、传输、运算、分析与展示, 形成“立体-全息”森林生态系统信息化观测研究方法体系。该研究方法体系旨在促进森林生态学或生态系统生态学、林学等领域知识创新, 探索科研范式变革提供实现途径; 并为地理学、遥感科学和边界层气象学等学科提供参考。

**关键词** 森林三维结构; 全息; 激光雷达; 涡度协方差; 多尺度数据融合

**Methods of “Three-dimensional and Holographic” observation for forest ecosystems centered on “Multi-Tower”.** ZHU Jiaojun<sup>1,2,3,4\*</sup>, GAO Tian<sup>1,2,3,4</sup>, ZHANG Jinxin<sup>1,2,3,4</sup>, SUN Yirong<sup>1,2,3,4</sup>, SUN Tao<sup>1</sup>, LIU Zhihua<sup>1</sup>, YU Lizhong<sup>1,2,3,4</sup>, LU Deliang<sup>1,2,3,4</sup>, YU Fengyuan<sup>1,2,3,4</sup>, TENG Dexiong<sup>1,2,3,4</sup>, YAN Qiaoling<sup>1,2,3,4</sup>, YANG Kai<sup>1,2,3,4</sup>, SONG Lining<sup>1,2,3,4</sup>, ZHENG Xiao<sup>1,2,3,4</sup>, WANG Xugao<sup>1</sup>, WANG Qingwei<sup>1</sup>, LIANG Yu<sup>1</sup>, LI Huidong<sup>1</sup>, LIU Lifang<sup>1,2,3,4</sup>, XU Shuang<sup>1,2,3,4</sup>, LIU Huaqi<sup>1,2,3,4</sup>, HU Yanyang<sup>1,2,3,4</sup>, LI Xiufen<sup>2,4,5</sup>, WANG Zongguo<sup>6</sup>, ZHOU Xinhua<sup>2,4,7</sup> (<sup>1</sup>CAS Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; <sup>2</sup>Qingyuan Forest CERN, National Observation and Research Station, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; <sup>3</sup>Liaoning Key Laboratory for Management of Non-commercial Forest, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; <sup>4</sup>CAS-CSI Joint Laboratory of Research and Development for Monitoring Forest Fluxes of Trace Gases and Isotope Elements, Shenyang 110016, China; <sup>5</sup>Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; <sup>6</sup>Computer Network Information Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; <sup>7</sup>Campbell Scientific Inc., Logan, UT 84321, USA).

中国科学院网络安全和信息化专项应用示范项目(CAS-WX2022SF-0101)资助。

收稿日期: 2023-06-25 接受日期: 2023-07-11

\* 通信作者 E-mail: jiaojunzhu@iae.ac.cn

**Abstract:** The research on forest ecology should develop towards more macroscopic and more microscopic at spatio-temporal scales, which has challenged traditional approaches for ecological observation. With the development of information technology, shifts in the research paradigm are critically needed. Based on Ker Towers as a Corner-Stone Research Infrastructure Project in Qingyuan Forest CERN, National Observation and Research Station, we propose a framework of “space-air-tower-ground” for integrated observation and research with the tower(s) as the center. The framework includes four components: active/passive satellite-based remote sensing (space), near-ground remote sensing platform by unmanned aerial vehicle with LiDAR and multi/hyperspectral sensors (air), tower group or single tower (tower), and long-term forest plot arrays (ground). Along with information technology such as the Internet of Things, cloud computation and artificial intelligence, data acquisition, transmission, computation, analyzation and display can be achieved to develop an information technology-based “three-dimensional and holographic” observation and research in forest ecology. This framework would promote knowledge innovation in forest ecology, ecosystem ecology, and forest science, and provide insights toward the paradigm shifts in geography, remote sensing science, boundary layer meteorology, and other disciplines.

**Key words:** forest three-dimensional structure; holography; Light Detection and Ranging (LiDAR); eddy covariance; multi-scale data fusion.

森林作为陆地生态系统的主体,是重要的自然资源,是人类赖以生存发展的基础和文明进步的摇篮,对维系地球的生态平衡起着至关重要的作用(Bonan, 2008)。因此,经营森林生态系统的国家需求或目标就是:实现森林生态系统服务功能的高效、稳定与可持续(朱教君, 2013)。对森林结构和功能观测、研究与评价是实现该目标的核心基础。由于森林生态系统的复杂性、林木生命的长周期性、野外监测与控制试验的困难性,在林木结构与功能监测方面仍面临诸多问题与挑战(Pommerening, 2002; West *et al.*, 2009; Ryu *et al.*, 2019)。以往研究多集中在短周期和单一尺度,缺乏多尺度系统性思维,鲜有创新平台和信息化技术的支撑(高添等, 2020)。

在结构方面,以往获取森林结构多为二维信息、数据模态单一、导致部分关键结构参数,如树高、郁闭度、生物量等的测量精度受限;部分因子难以测量,如根系分布、叶倾角、冠层聚集度等(Zhu *et al.*, 2003; Garcia *et al.*, 2015)。在功能方面,森林过程与功能复杂、影响因素多,监测不确定性大(Wang *et al.*, 2017; Harris *et al.*, 2021),联网观测与区域评估困难,野外站监测积累的长期数据缺乏针对性解析模型与计量方法(朱教君等, 2021; 高添等, 2023)。综上,传统的观测、研究与评价方法已无法满足现实需求,亟需依托新一代观测手段和信息化技术,探索传统森林生态与生态系统生态学科研究范式的变革途径。

## 1 “天-空-塔-地”一体化观测体系总体设计思路

生态系统是生态学研究的核心尺度。生态系统结构、功能和动态源于较低尺度(如群落)中有机体

之间以及有机体与环境系统之间相互作用,但其边界条件受到更大尺度(如景观或区域)环境因素(如全球变化、人类活动和自然干扰)的制约(方精云, 2021)。因此,生态系统观测体系需遵循多等级嵌套理论(O'Neill, 1986),在多尺度上开展观测。

以独立流域内建成科研大装置——科尔塔群为核心,设置长期固定样地群,布置地上/地下生物和非生物要素监测设施;于塔群上集成激光雷达(LiDAR)、原位观测相机、涡度协方差系统,形成协同观测体系;组合无人机、LiDAR、高(多)光谱相机等传感器,形成近地面空中信息获取体系;获取星载遥感系列影像,如高分系列、Landsat系列、哨兵、MODIS、碳卫星、激光雷达(GEDI)等,形成多源星载遥感数据源;最终通过信息化与多尺度数据融合技术,构建“天-空-塔-地”的一体化观测研究体系,建立“立体-全息”的森林多维结构-功能监测研究与评估框架(图1) (“全息(Holography)”为一种影像技术,本文是指以激光雷达为核心,结合多(高)光谱技术、太阳诱导叶绿素荧光和地下根系探测等技术,获取海量森林三维几何结构和光谱特征信息的技术手段)。

## 2 “天-空-塔-地”各组分组成与研究方法/关键技术

### (1) 样地群(地)

尺度:组分/个体/样地(群)/林分( $\leq 25 \text{ hm}^2$ )

对象:不同尺度结构参数及量化——叶片形态(叶片分布、叶倾角、聚集度)、叶片生理(叶绿素含量、养分等)、单木结构、树(林)冠结构、林分结构、全息生物量(地下根系/地上植被)、土壤理化特征、

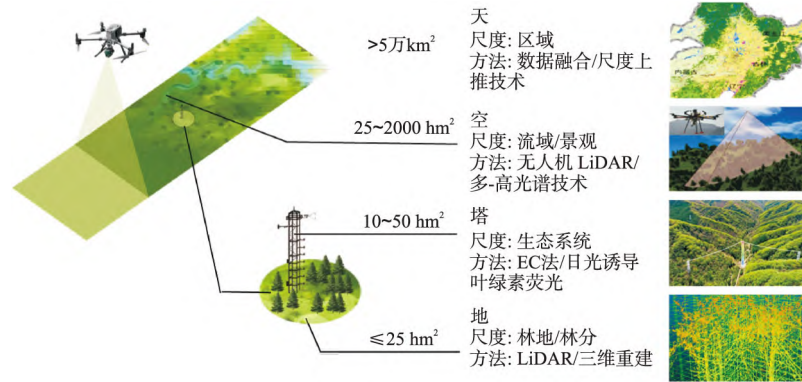


图1 “天-空-塔-地”的多尺度数据获取示意

Fig.1 Framework of “space-air-tower-ground” for integrated forest observation

土壤微生物、土壤呼吸等。

手段:地基激光雷达、探地雷达、红外相机、箱法(土壤、树干、枝叶碳通量)等。

思路:利用LiDAR与多(高)光谱相机提取林分结构/功能性状参数,获取叶-枝-干-冠层-林分的多尺度结构/功能性状参数集,通过建立多(高)光谱与树种不同物候期特征关系,高精度完成树种识别;研发快速获取群落植被、土壤多参数和林木空间条件的技术手段(邢振等,2020),变革传统“大样地”依靠人工监测方法;量化林木/林分/林窗结构(Lu *et al.*,2020; Yu *et al.*,2020)、枝叶分布与理化特征;以全息化新视角,研究多尺度林木结构与性状特征、功能与演替机制,更新及生长过程(朱教君等,2021)。

#### (2) 科尔塔群(塔)

尺度:生态系统(10~50 hm<sup>2</sup>)

对象:生态系统结构、碳储量、CO<sub>2</sub>浓度、碳通量、格局、水源涵养。

手段:涡度相关技术、塔基激光雷达、原位观测相机、太阳诱导叶绿素荧光(SIF)等。

思路:以塔群为核心,全量监测复杂地形下森林生态系统的风、太阳辐射、标量浓度和植被等要素(Li *et al.*,2023),监测与模拟复杂地形下空气动力学过程;监测通量塔所在小流域内的土壤蓄水、地表径流和水质等(高添等,2020);开展多塔协同观测,采用多种方法独立计算森林生态系统碳通量(如:LiDAR、箱法、SIF等),量化复杂地形特征对碳-水通量观测不确定性的影响,发展复杂地形森林碳-水及其他痕量气体通量计量方法。

#### (3) 无人机近地面遥感(空)

尺度:流域/景观(25~2000 hm<sup>2</sup>)

对象:景观结构、林木位置、树高、生物量、林窗

三维信息、树种-多样性、地形等。

手段:无人机、LiDAR、高光谱等传感器。

思路:以无人机为主要平台,采用LiDAR和多光谱/高光谱等传感器,多时相获取流域森林的点云和光谱信息,精准分割单木、获取信息(Chen *et al.*,2022):树种、高度、冠幅、林冠截雨指数、物候等;获取小流域微地形和连续冠层结构信息,计算获取表征森林功能的多维结构参数,实现大范围的森林结构要素的信息化采集,为分析森林结构和功能关系提供数据支持。

#### (4) 星载遥感(天)

尺度:区域-国家(>5万 km<sup>2</sup>)

对象:区域森林功能结构参数(如:叶面积指数)、功能(如:碳汇)、环境要素等。

手段:星载遥感,包括:激光雷达(GEDI)、Landsat系列、哨兵系列、高分系列、ALOS系列、SPOT系列、MODIS、碳卫星等。

思路:改进星载遥感产品的关键遥感变量,考虑地形因子,获取区域森林的功能结构参数(如:叶面积指数、光合有效辐射吸收比例、生物量等);量化地形对关键环境因子的影响,实现环境要素(太阳辐射、地表温度、降水等)数据的降尺度(如:太阳辐射在阴坡和阳坡的分配);基于森林功能与关键结构要素及环境影响因子的关系,研发星载遥感(天)和“空-塔-地”的关键结构和功能要素的尺度上推技术,优化估算模型,估算区域尺度森林关键功能(如:碳汇、净初级生产力、水源涵养等)。

#### (5) 信息化技术

融合物联网、人工智能和大数据等新一代信息化技术,针对“天-空-塔-地”一体化监测获取的海量多模态数据,结合生态原位观测、近地面遥感、星载遥感和过程模型等,采用人工智能算法解析,研发多

层级数据融合与陆面过程模式,模拟森林生态系统关键参数、过程和功能等,实现数据获取、自动传输、智能分析和决策的全链条信息化平台,为相关领域科学研究与知识创新提供支撑。

### 3 研究展望

基于上述框架,形成“天-空-塔-地”一体化的森林生态系统观测研究体系,实现以“塔群”为核心的立体-全息信息化观测。目前该体系基本搭建完成,但一些关键技术仍有待研发,需要森林生态学、生态系统生态学、林学、边界层气象学、遥感科学和信息技术等学科的深度融合,未来需要在以下方面开展研究(朱教君等,2021):

(1)模拟森林三维结构,以全息化新视角探索森林结构与功能的关系。在LiDAR监测的支持下,重建森林三维场景(Qi *et al.*, 2019),提取冠层关键结构/功能性状参数,分析森林功能与结构、环境要素的关系,研发表征森林生态系统关键功能的新结构参数,以全息化新视角促进森林结构与功能研究的知识创新。

(2)加强地下根系信息学的技术装置研发与模型预测。研发适用于探测地下根系生物量与三维结构的仪器设备,如新型探地雷达及新技术方法。基于已有数据,通过人工智能和模型模拟等方式,通过已知的地上生物量、多尺度、多物候期结构参数与精细环境要素监测等条件,建立与不同根序根系长度、生物量的关系,为发展完整的森林信息学研究提供支撑。

(3)复杂地形下的森林生态系统功能评估。破解经典通量理论难以满足复杂地形下森林生态系统边界层观测的难题(Belcher *et al.*, 2008; Acevedo *et al.*, 2009),发展复杂地形下森林生态系统关键通量参数监测的理论、技术与方法体系,在提高森林生态系统CO<sub>2</sub>和其他痕量气体通量的计量精度的同时,为其他仅有单塔的复杂地形森林生态系统功能研究提供理论与技术支撑。

(4)发挥塔群纽带作用,研发“天-空-塔-地”多尺度数据融合关键技术。研发针对样地、塔群、近地面遥感和星载遥感的数据融合关键技术,融合地形特征的森林结构和功能参数的尺度上推技术,引入机器学习算法,优化过程模型关键参数,评估与预测区域尺度森林结构与功能参数等,为区域森林管理与决策提供科学数据。

**致谢** 感谢北京理加联合科技有限公司郑宁和郝建敏提供的修图帮助。

### 参考文献

- 方精云. 2021. 生态学学科体系的再构建. *大学与学科*, (2): 61-73.
- 高 添, 于立忠, 于丰源, 等. 2020. 中国科学院清原森林生态系统观测研究塔群平台的功能和应用. *应用生态学报*, **31**(3): 695-705.
- 高 添, 朱教君, 张金鑫, 等. 2023. 基于新一代信息技术的温带森林生态系统碳通量精准计量. *数据与计算发展前沿*, **5**(2): 60-72.
- 邢 振, 董大明, 田宏武, 等. 2020. 一种土壤多参数测量仪及测量方法. 北京市: CN110672817A, 2020-01-10.
- 朱教君, 高 添, 于立忠, 等. 2021. 温带次生林生态系统塔群监测研究平台(清原科尔塔群). *中国科学院院刊*, **36**(3): 351-361.
- 朱教君. 2013. 防护林学研究现状与展望. *植物生态学报*, **37**(9): 872-888.
- Acevedo OC, Moraes OLL, Degrazia GA, *et al.* 2009. Is friction velocity the most appropriate scale for correcting nocturnal carbon dioxide fluxes? *Agricultural and Forest Meteorology*, **149**: 1-10.
- Belcher SE, Finnigan JJ, Harman IN. 2008. Flows through forest canopies in complex terrain. *Ecological Applications*, **18**: 1436-1453.
- Bonan GB. 2008. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, **320**: 1444.
- Chen QD, Gao T, Zhu JJ, *et al.* 2022. Individual tree segmentation and tree height estimation using leaf-off and leaf-on UAV-LiDAR data in dense deciduous forests. *Remote Sensing*, **14**: 2787.
- Garcia M, Gajardo J, Riano D, *et al.* 2015. Canopy clumping appraisal using terrestrial and airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment*, **161**: 78-88.
- Harris NL, Gibbs DA, Baccini A, *et al.* 2021. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nature Climate Change*, **11**: 234-240.
- Li ST, Yan QL, Liu ZH, *et al.* 2023. Seasonality of albedo and fraction of absorbed photosynthetically active radiation in the temperate secondary forest ecosystem: A comprehensive observation using Qingyuan Ker towers. *Agricultural and Forest Meteorology*, **333**: 109418.
- Lu DL, Zhu JJ, Wu DN, *et al.* 2020. Detecting dynamics and variations of crown asymmetry induced by natural gaps in a temperate secondary forest using terrestrial laser scanning. *Forest Ecology and Management*, **473**: 118289.
- O' Neill RV, DeAngelis DL, Waide JB, *et al.* 1986. A Hierarchical Concept of Ecosystems. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Pommerening A. 2002. Approaches to quantifying forest structures. *Forestry*, **75**: 305-324.
- Qi JB, Xie D, Yin T, *et al.* 2019. LESS: Large-Scale remote

- sensing data and image simulation framework over heterogeneous 3D scenes. *Remote Sensing of Environment*, **221**: 695–706.
- Ryu Y, Berry JA, Baldocchi DD. 2019. What is global photosynthesis? History, uncertainties and opportunities. *Remote Sensing of Environment*, **223**: 95–114.
- Wang XC, Wang CK, Bond-Lamberty B. 2017. Quantifying and reducing the differences in forest CO<sub>2</sub>-fluxes estimated by eddy covariance, biometric and chamber methods: A global synthesis. *Agricultural and Forest Meteorology*, **247**: 93–103.
- West GB, Enquist BJ, Brown JH. 2009. A general quantitative theory of forest structure and dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **106**: 7040–7045.
- Yu Y, Gao T, Zhu JJ, *et al.* 2020. Terrestrial laser scanning-derived canopy interception index for predicting rainfall interception. *Ecohydrology*, **13**: e2212.
- Zhu JJ, Matsuzaki T, Lee FQ, *et al.* 2003. Effect of gap size created by thinning on seedling emergency, survival and establishment in a coastal pine forest. *Forest Ecology and Management*, **182**: 339–354.
- 
- 作者简介 朱教君,男,1965年生,博士,研究员,主要从事森林生态与经营、防护林工程研究。E-mail: jiaojunzhu@iae.ac.cn
- 责任编辑 魏中青
-