

3-20-2021

Functions and Applications of Multi-tower Platform of Qingyuan Forest Ecosystem Research Station of Chinese Academy of Sciences (Qingyuan Ker Towers)

Jiaojun ZHU

Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China Qingyuan Forest CERN, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China CAS-CSI Joint Laboratory of Research and Development for Monitoring Forest Fluxes of Trace Gases and Isotope Elements, Shenyang 110016, China, jiaojunzhu@iae.ac.cn

See next page for additional authors

Recommended Citation

ZHU, Jiaojun; GAO, Tian; YU, Lizhong; YU, Fengyuan; YANG, Kai; LU, Deliang; YAN, Qiaoling; SUN, Yirong; LIU, Lifang; XU, Shuang; ZHANG, Jinxin; ZHENG, Xiao; and SONG, Lining
"Functions and Applications of Multi-tower Platform of Qingyuan Forest Ecosystem Research Station of Chinese Academy of Sciences (Qingyuan Ker Towers)," *Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version)*: Vol. 36 : Iss. 3 , Article 14.

DOI: <https://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.20210304002>

Available at: <https://bulletinofcas.researchcommons.org/journal/vol36/iss3/14>

This Key Research Infrastructures in CAS Field Stations is brought to you for free and open access by Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version). It has been accepted for inclusion in Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version) by an authorized editor of Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version). For more information, please contact lcyang@cashq.ac.cn, yjwen@cashq.ac.cn.

Functions and Applications of Multi-tower Platform of Qingyuan Forest Ecosystem Research Station of Chinese Academy of Sciences (Qingyuan Ker Towers)

Abstract

The structure regulation and function optimizations of forest-ecosystems are fundamental and significant topics on ecology & management of forests. However, due to the limitations in theories and technologies to describe the three-dimensional forest structure for complex terrain and to precisely evaluate the structure-associated functions, these topics have been challenged by the complications in canopy structure and the urgencies in various societal demands towards forest ecosystem services. To face against the challenge, Chinese Academy of Sciences (CAS) funded the "Multi-tower Platform for Monitoring the Structure and Function of Temperate Secondary Forest Ecosystems" (Qingyuan Ker Towers) as a corner-stone research infrastructure project for the field station network. Ker Towers were completed in 2019 by Qingyuan Forest CERN (Chinese Ecosystem Research Network) inside a distinctively-bounded and monitored-outlet watershed. The three towers, hydrology station networks, and forest plot arrays uniquely formed the Ker Towers research facilities as a synthesized platform. This platform was integrated with the light detection and ranging scanners for acquisition of holographic information on forest canopy structure, the advanced eddy covariance flux systems for the measurements of CO₂/H₂O, trace gases, and energy fluxes between the watershed forest systems and the atmosphere, and the hydrology station networks for observations of ground/underground water flows. All real-time data from the platform are streamed into a live data center. The platform including remote sensing technology, eddy covariance, biometry (or inventory), forest informatics and collaborative and interdisciplinary team prominently builds up multiple approaches and essential elements at different scales to fulfill comprehensive projects in response to national needs and international concerns as well. The Ker Towers team mainly focuses on the four tasks: (1) explore forest ecological principles for a new vision of holographic information in describing forest three-dimensional structure; (2) innovate theories and techniques to measure the fluxes of CO₂/H₂O/NO_x and the other trace gases over complex forest terrains; (3) understand the response of carbon and nitrogen cycles in forest ecosystems to global change; and (4) demonstrate the hydrologic processes in forest ecosystems and its regulating mechanism. The four above tasks aim to provide fundamental data and theoretical support to optimize and sustain forest functions through forest structure management. The ultimate objective of the platform is to deliver solutions for regional and national forests to offer broad and sustainable benefits to human society.

Keywords

multi-tower, temperate forest, secondary forest ecosystem, LiDAR 3-dimensional canopy structure, eddy covariance, carbon-nitrogen-water coupling cycles, global change, collaborative observation

Authors

Jiaojun ZHU, Tian GAO, Lizhong YU, Fengyuan YU, Kai YANG, Deliang LU, Qiaoling YAN, Yirong SUN, Lifang LIU, Shuang XU, Jinxin ZHANG, Xiao ZHENG, and Lining SONG



专栏序言： 建设“镇站之宝”，提升野外站科技创新能力

科学研究的范式已经发生深刻变革。宇宙演化、物质结构、生命起源等基础前沿领域的科技创新，越来越依赖精度高、功能强的重大科技基础设施。作为国之重器，北京正负电子对撞机、中国遥感卫星地面站、上海光源、“中国天眼”等重大科技基础设施，对我国科技自立自强发挥了重要作用。

20世纪末建设的中国生态系统研究网络（CERN）是当时我国生态环境领域少有的重大科技基础设施，也是分布式重大科技基础设施建设的一次成功尝试，目前，CERN已有44个生态站、1个综合中心和5个分中心。30年来，依靠CERN领导小组和科学委员会的坚强领导，在20多个中国科学院所属研究所支持下，1万余名科技人员、研究生依托CERN开展研究，因而推动了我国生态系统生态学的快速发展，也在服务国家和地方农业发展、生态建设、环境治理、资源可持续利用等方面发挥着重要作用。目前，CERN同美国生态系统网络、欧洲生态系统网络并驾齐驱，互有优势和特色，具有重要国际影响。

未来的CERN科技创新，有两条成功做法必须长期坚持。① 根据统一的监测指标、标准、规范，进行长期、连续定位观测，揭示短时间尺度不可能确定的科学规律。例如，宁夏沙坡头沙漠生态系统国家野外科学观测研究站积累了50多年的土壤-水分监测数据；河南封丘农田生态系统国家野外科学观测研究站积累了20多年的土壤-肥料控制性试验数据等。② CERN的网络化特征十分突出，其依靠网络层面的研究实现空间尺度的拓展，解决单一野外站依靠长期观测不能明确的科学规律。

我们也应当清醒地看到，CERN科技创新还依赖于比较小型的监测观测仪器、科研样地等，大型科技基础设施不多，同其他快速发展的分支学科相比，显得有些落后。因此，一方面，我们要积极推动“中国陆地生态系统观测实验网络”（坤脉工程）重大科技基础设施项目尽快立项、建设，构建由地表站点-样带-网络观测、无人

机-遥感立体化观测相结合的研究设施,实现多时空尺度长期连续监测、对碳氮水通量及循环过程多尺度协同观测,显著提升野外观测和实验研究的综合能力。另一方面,我们要重点建设基于顶层设计的野外重点科技基础设施,使之成为多所联合、多学科交叉的野外研究平台,逐步实现每个野外站至少有一个符合该站学科特点的标志性装置,作为“镇站之宝”,从而显著改变野外站的装备状况,增强野外站的科学研究能力和核心竞争能力。

2015年,CERN科学委员会遴选了中国科学院清原森林生态系统观测研究站、宁夏沙坡头沙漠生态系统国家野外科学观测研究站、新疆阜康荒漠生态系统国家野外科学观测研究站、河北栾城农田生态系统国家野外科学观测研究站、江苏太湖湖泊生态系统国家野外科学观测研究站、湖北东湖湖泊生态系统国家野外科学观测研究站、山东禹城农田生态系统国家野外科学观测研究站等11个野外站(后来又遴选了6个野外站),建设清原科尔塔群、沙坡头大型称重式蒸

渗仪群、武汉东湖城市湖泊多组分在线监测平台等项目。

2019年,我参加了清原科尔塔群项目的验收,感觉成效十分明显。清原科尔塔群集多类科研设施于一体,获取高精度、高频度、即时数据,提升了研究的广度和深度,实现了从定性描述性研究到定量、模型模拟、生态过程的精细化描述和预测研究的升级,全面提升了清原站的科研能力和水平,为未来5—10年的发展打下了坚实基础。

全面总结已经完成的野外控制实验平台、野外物理模拟实验装置等重点科技基础设施的做法、成效和经验,并向国内外同行介绍、宣传,可以进一步改进我们的工作,也可以吸引相关研究领域的专家利用不同级别的数据产品开展合作研究。真诚邀请青年科学家到野外站利用这些平台设施,同时推动继续在若干野外站建设若干野外重点科技基础设施,以此推进中国科学院乃至全国野外科技事业的高质量发展。



中国科学院院士

中国生态系统研究网络科学委员会主任

2021年3月4日

编者按 中国科学院野外站网络是分布式的野外科技基础设施,是资源生态环境领域重要的科技基础条件平台。自2017年起,《中国科学院院刊》设立“中国科学院野外台站”专栏,陆续报道了相关野外站取得的成果。“十四五”期间,中国科学院野外站网络将更加重视顶层设计与全面布局,面向世界科技前沿、针对国家重大需求,重点建设野外重点科技基础设施,使之成为野外站的“镇站之宝”。为此,《中国科学院院刊》在原有专栏的基础上,新设立“中国科学院野外站重点科技基础设施”专栏,介绍各野外站建设“标志性设施”取得的成效,以期总结经验,展望未来,为研究生态系统生态过程机理、揭示自然环境演化规律,为国家粮食安全、空间环境安全、脆弱生态恢复和重大工程建设提供重要科技支撑。本专栏由中国生态系统研究网络科学委员会主任陈宜瑜院士指导推进,中国科学院科技促进发展局杨萍研究员担任客座编辑。

温带次生林生态系统塔群监测 研究平台 (清原科尔塔群)

朱教君^{1,2,3*} 高 添^{1,2,3} 于立忠^{1,2,3} 于丰源^{1,2,3} 杨 凯^{1,2,3} 卢德亮^{1,2,3} 闫巧玲^{1,2,3} 孙一荣^{1,2,3}
刘利芳^{1,2,3} 徐 爽^{1,2,3} 张金鑫^{1,2,3} 郑 晓^{1,2,3} 宋立宁^{1,2,3} 周新华^{3,4}

1 中国科学院沈阳应用生态研究所 沈阳 110016

2 中国科学院清原森林生态系统观测研究站 沈阳 110016

3 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

4 美国坎贝尔科学仪器公司 洛根 UT 84321

摘要 森林生态系统结构调控与功能优化是森林生态与管理的核心研究主题。然而,受技术与理论限制,复杂地形下森林三维精细结构监测能力不足、功能估测精度不高;森林生态系统结构的复杂性和人类社会对其服务功能的迫切需求对上述研究主题提出前所未有的挑战。在中国科学院野外站网络重点科技基础设施建设项目的支持下,中国科学院清原森林生态系统观测研究站于2019年在典型独立小流域内建成了观测塔群(3座观测塔)、水文站网、长期固定样地群,辅以综合数据中心;打造以激光雷达为主要森林结构监测、以涡动通量系统和水文站网为主要功能监测手段的“温带次生林生态系统塔群监测研究平台”(以下简称“科尔塔群”)。科尔塔群集成了观测塔群-水文站网-长期固定样地群,构成以遥感技术-涡度相关法-测树学法-森林信息学法为主要手段的协同、跨学科观测体系,具有多方法、多尺度、多要素的核心特征,可开展多类相关研究以满足国家需求、探索国际前沿。基于上述优势,科尔塔群可准确获取森林三维结构,以全息新视角探索森林生态学规律,发展复杂地形下森林生态系统碳-氮-水和其他痕量气体通量观测新理论与方法,研究全球变化背景下森林生态系统碳-氮-水等循环过程与响应,阐明森林水文过程及调控机制,为森林结构调控与功能优化提供基础数据和理论支持,使森林为人类社会提供广泛且可持续的生态服务。

资助项目:中国科学院野外站网络重点科技基础设施建设项目(KFJ-SW-YW006)

修改稿收到日期:2021年3月4日

关键词 塔群, 温带森林, 次生林生态系统, 激光雷达, 冠层三维结构, 涡度相关, 碳-氮-水耦合过程, 全球变化, 协同观测

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20210304002

1 森林生态系统监测现状及观测塔群建设意义

森林是陆地生态系统的主体, 对维系全球生态平衡和人类社会可持续发展起着无可替代的作用^[1]。然而, 由于长期的人为和自然干扰, 原始林几乎消失殆尽, 次生林已成为全球森林资源的主体 (占比达 60%)^[2]。为保护和恢复森林资源, “减少毁林及退化造成的碳排放” 计划 (REDD)、《联合国森林战略规划 (2017—2030 年)》及各国针对性的森林保护举措相继出台。我国于 1998 年实施了天然林保护工程, 林区逐步完成了由以木材生产为主向提供多种生态服务为主的历史性转变。次生林结构不合理、功能低下, 恢复速度缓慢, 提升其质量及服务功能成为当前的迫切需要。森林生态系统的结构与功能关系是森林生态学和林学的核心主题, 是优化森林结构调控、经营管理及服务功能提升的关键理论基础。

东亚温带森林是全球三大温带森林之一, 主要分布在我国东北地区。与欧美温带森林相比, 东亚温带森林结构更复杂、多样性更丰富, 并且多分布在山区, 结构与功能的监测与研究面临诸多挑战。在结构方面, 森林高大郁闭冠层使森林群落垂直空间的结构复杂、异质性高, 显著影响着生态系统中的生物、非生物环境与生态过程。以往研究较少关注森林三维或多维结构, 更未聚焦林木个体叶片、枝条、林冠等组成的精细结构, 与森林生态过程相关的关键结构无法准确测量, 限制了对森林生态过程的理解及相关学科的发展。在功能方面, 碳循环是地球上最大的生物地球化学循环^[3], 而碳汇功能是森林生态系统最重要的功能之一, 与多种生态系统服务密切相关。然而, 由

于复杂山区森林边界层难以满足涡动通量测定理论中的关键假设条件, 主流测定方法——涡动协方差 (EC) 技术在山地森林应用面临前所未有的挑战, 为森林碳通量观测和评估带来极大不确定性^[4]。此外, 水源涵养是山区森林最重要的生态服务功能之一, 但受水文站点和数据限制, 森林结构与水源涵养服务功能的关系尚不明确^[5]。

为深入理解森林生态系统的结构与功能关系, 国际上建成了众多观测装置推动相关领域的研究。在森林冠层结构监测方面, 观测塔 (塔吊) 成为监测森林高大冠层的有力手段之一。例如, 塔吊可以进入森林冠层, 实现冠层、枝条、叶片形状及环境要素的测量^[6]。从监测手段上看, 激光雷达 (LiDAR) 已经得到较多应用^[11], 主要依托地基平台与机载平台, 二者分别采用“自下而上”和“自上而下”的方式; 但对冠层垂直结构或更精细结构的描述则相对较弱。LiDAR 与观测平台结合实现冠层垂直结构或更精细结构的研究较少; 虽在温带森林和热带雨林已有少量尝试^[8], 但尚缺乏多平台 LiDAR 集成研究。在森林功能监测方面, 通量塔是监测森林碳收支的主流方法之一。例如, 1993 年研究人员首次报道了美国哈佛大学 (温带森林) 的净生态系统碳交换 (NEE)^[9], 该通量塔已经持续观测近 30 年, 在森林碳循环领域贡献了诸多重要的研究成果^[10,11]。国际上知名的通量网包括: 美国通量网 (AmeriFlux)^[12]、欧洲通量网 (Euroflux)^[13]和澳洲通量网 (OzFlux)^[14]。在中国, 陆地生态系统通量观测研究网络 (ChinaFLUX) 历经近 20 年的发展, 在数据积累、过程机理、模型模拟等方面均取得了重要进展^[15]。上述通量塔多为单塔观测, 难以准确量化目标区域不同森林类型的贡献, 不

适于开展山区森林生态系统碳通量的监测理论与方法研究（多点对比和验证困难）。方法的局限制约了山区森林生态系统碳-氮-水耦合循环机制的认识，难以准确评估森林的碳汇能力，增加了区域/全球 CO_2 及其他温室气体（如 NO_x 等）源/汇强度评估的不确定性。

在森林水文监测方面，森林对产水量和水质的影响也备受关注^[6]。然而，在独立集水区内，基于水文站网开展特定林型水源涵养服务功能的研究较少，与通量塔结合并系统地研究森林碳-水过程的研究平台未见报道，更缺乏集成森林生态系统的结构与功能监测于一体的综合研究平台。

在中国科学院野外站网络重点科技基础设施建设项目的支持下，中国科学院清原森林生态系统观测研究站（以下简称“清原站”）在核心独立小流域（536.4 ha）内建成了观测塔群，打造以 LiDAR 为森林结构主要监测手段，以 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ /痕量气体通量和水文站网为森林功能主要监测手段的“温带次生林生态系统塔群监测研究平台”（以下简称“科尔塔群”^①）（图 1）。科尔塔群监测研究平台集多类科研设施于一体，可高质量地获取森林生态系统的全息三维结构与动态、通量监测数据和生态水文数据，探索复杂地形下森林生态系统碳-氮-水及其他痕量气体通量的观测新理论与方法，研究全球变化背景下森林生态系统碳-氮-水循环、水文过程及调控机制等森林生态学的前沿科学问题。2019 年 8 月，陈宜瑜院士在清原站现场验收科尔塔群设施时评价：“清原站超额完成了中国科学院野外站重点科技基础设施项目建设任务，建成的塔群监测研究平台集多类科研设施于一体，可精准、实时、多尺度地获取森林生态系统结构与功能监测数据；其核心特征是整合多学科理论与方法，探索生态系统生态学（森林生态学）的前沿科学

问题，聚焦次生林结构调控和功能恢复的国家需求，为提升森林生态系统服务功能和森林可持续经营提供重要理论和技术支撑。”

2 观测塔群建设难点与解决方案

清原站位于辽宁省抚顺市清原满族自治县大苏河乡国营大苏河林场大湖工区（ $41^\circ49'34''\text{N}$ — $51^\circ08''\text{N}$ ， $124^\circ53'53''\text{E}$ — $56^\circ35''\text{E}$ ），属长白山余脉的龙岗山脉北麓^[5]。山地地形（坡度范围： 10° — 35° ）与复杂森林景观（以次生林为主，人工林镶嵌其中）为工程施工与监测带来诸多困难。

（1）科学选址、合理施工，确保山地建塔的稳定性与承载力。① 工程实施前，在核心流域组织了多次选址调研、考察与论证。充分考虑主风向与山谷风系统，评估通量贡献源区。② 开展岩土工程勘察，查明受力深度范围内地层的结构类别、分布，明确不良地质作用的分布范围与地下水的埋藏条件，评价地基的稳定性、均匀性和承载力。③ 根据地勘报告设计塔体

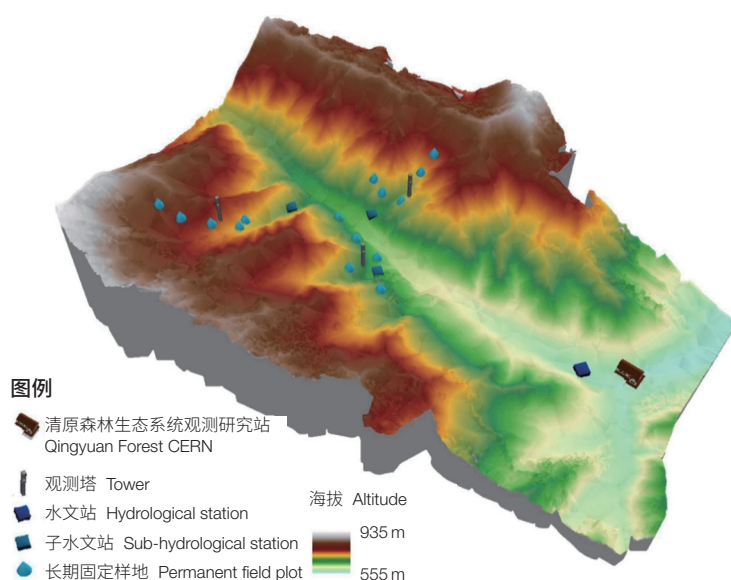


图 1 科尔塔群所在流域的地形图^[5]

Figure 1 Watershed topographic map of Ker Towers^[5]

① 在“温带次生林生态系统塔群监测研究平台”项目建设期间，中国科学院沈阳应用生态研究所与美国坎贝尔科学仪器公司（Campbell Scientific Inc.）共同成立“科尔森林痕量气体与同位素通量监测研发联合实验室”，简称“科尔（联合）实验室”（Ker Joint Lab）。“温带次生林生态系统塔群监测研究平台”是科尔（联合）实验室的核心支持设施，因此被命名为：科尔塔群（Ker Towers）。

结构,采用铁塔拉线系统和地基筏板保证其稳定性;为降低塔体对气候的影响,尽量采用柱体钢材。

(2) 精准获取多尺度森林结构以确保结构监测准确性。①在观测塔两侧设计垂直升降系统,结合云台实现LiDAR垂直方向扫描位置的任意调整,获取森林垂直冠层结构。②在观测塔和地面观测点视野范围内,设置球形靶标实现地基-塔基LiDAR点云数据的准确拼接。③在小流域内,设置方形地面靶标和无人机起降场,实现多期无人机LiDAR点云数据的获取和几何配准。上述方案从多个角度保证了LiDAR点云数据获取的准确性和完整性,为后续处理和森林结构反演提供数据基础。

(3) 保证复杂地形下的碳-水通量等监测的可靠性以准确确定功能。①在设计阶段,调研在国内外山区单个塔建设与运行情况,吸取山区建塔经验;经科学设计和多方论证,形成科尔塔群的建设方案。在独立出水口小流域内,建成了集观测塔群—水文站网—样地群协同的观测体系;每个塔对应具独立出水口的子流域。②在碳通量测定方面,采用塔群平台(EC法)—激光雷达(遥感法)—样地群(测树学法和箱法)的跨尺度测定方法,结果相互验证,以保证碳观测的可靠性。③在水文方面,采用塔群—多级水文站—水源涵养监测样地的多级观测,保证水文状况的准确监测^[5]。④在测定仪器方面,设计传感器与程序的系统性构架理念,构建高度集成通量系统,并配合智能大型程序管理控制,完成数据修正运算及质量评级等,从而保证碳-水通量测定的可靠性和智能化。

3 观测塔群(科尔塔群)的组成与功能

科尔塔群由观测塔群、激光雷达扫描仪、通量及微气象传感器、水文监测设施、长期固定样地群和数据中心6部分组成^[5]。

(1) 观测塔群。观测塔群建设于独立小流域内,由3座观测塔组成,每座观测塔位于一个独立子流域

内,分别对应各自主要森林类型:典型次生林(杂木林)、蒙古栎林和落叶松林(人工林)。观测塔为钢结构直立塔,塔高为50 m,正方形基座边长5 m,配3层拉线,两侧对称配备垂直升降梯及固定平台。

(2) 激光雷达扫描仪。科尔塔群配备2台激光雷达扫描仪。①Riegl vz-400i脉冲式激光雷达扫描仪(奥地利Riegl公司生产)有效测量速度 $5.0 \times 10^5 \text{ pts} \cdot \text{s}^{-1}$,测量分辨率为5 mm,最大测距800 m,具有长测距优势。该扫描仪主要搭载到观测塔固定平台和升降平台上,可实现扫描视角范围水平方向 270° 垂直方向 100° 的扫描作业。②Faro Focus S 350相位式激光雷达扫描仪(美国Faro公司生产)重量仅为4.2 kg,最大测量速度为 $9.8 \times 10^5 \text{ pts} \cdot \text{s}^{-1}$,最大测距为350 m。该扫描仪具有更大的垂直扫描视角范围(300°)和更高的测量分辨率,可用于获取生长季林下的结构信息,是塔基Riegl vz-400i的重要补充。

(3) $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ /痕量气体通量观测系统。3座观测塔均配备了CPEC310和AP200系统(美国Campbell公司研发),以监测森林生态系统的涡动通量、廓线及储存通量、NEE和蒸散。其中,CPEC310安装在观测塔46.5 m,AP200系统进气口分列8层。上述系统可自定义标定时间间隔,调整 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 气体分析仪运算中的Zero/Span参数,从而提高 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 涡动通量测定的准确性。匹配的EasyFlux软件自动完成数据修正计算、质量评估及源区特征量估计。此外,还配有微气象传感器和土壤 CO_2 通量观测系统。上述所有测量仪器和传感器都集成到一套完整的通量系统中,可进行实时数据通信,用于计算生态系统尺度的生态学变量。

(4) 水文监测站网。整个流域出水口处设有集水区水文站,各塔所在子流域出水口设有水文站(子流域面积按顺序分别为:23.1 ha、13.4 ha和36.8 ha),并匹配长期监测样地群,形成三级森林水文监测网。水文站安装实时在线监测系统和水质自动监测系统,

监测流域内的水量与水质；样地配备水源涵养功能自动连续观测系统，以及树干径流、穿透收集器等，监测林冠层、枯枝落叶层和土壤层的截雨/蓄水等。

（5）长期固定样地群。根据源区贡献，每座观测塔布设5个样地（30 m×30 m），共计15个，以测定净初级生产力（NPP）和净生态系统生产力^[17]；样地亦用于LiDAR长期监测，用于交互验证观测塔测定的生态系统碳通量。样方内每株样木（胸径>2 cm）安装号牌和生长环（胸径>10 cm），用异速生长法测定木质组织（树干、枝、粗根）NPP；布设凋落物收集器6个，收集并分类器官称干质量估算叶片、小枝与繁殖器官等当年损失的NPP。样地内布设灌木样方3个，每个灌木样方内布设草本样方2个，分别采用异速生长法和收获法估算灌木和草本的地上NPP。采用内生长芯法估算细根NPP^[18]；采用动态箱式法和挖壕法测定土壤呼吸和异养呼吸。测量样方内主要树种各器官养分（如氮、磷）含量，连年测量鲜叶和凋落叶的养分含量；每5年（8月份）鉴定枯枝落叶层和0—50 cm土壤有机碳、全氮密度。

（6）数据中心。采用5.8 G 802.11AC的900 Mbps带宽的无线网桥组网，在站区实验楼与塔群之间架设无线传输骨干网络。每座观测塔上布置一台无线接入设备完成对周边区域的无线网络覆盖，水文站等试验样地通过无线网桥汇聚到临近观测塔，按照由远及近的顺序——塔3（T3）→塔2（T2）→塔1（T1）完成数据传输。数据中心工作室位于清原站实验楼，屋内布置2台数据库服务器、不间断电源（UPS）电池柜、交换机、多台液晶显示屏等设备，实时传输、存储、管理、分析与展示科尔塔群及多种设备的监测数据。

4 科学目标与学科支撑作用

科尔塔群以森林系统结构和功能关系为主线，研究森林系统结构和功能的监测理论、技术与方法，探索森林生态系统结构与碳-氮循环（碳-氮源汇状况、

生产力、土壤养分维持等）、水文过程（水源涵养）的关系及其与环境的互馈机制，核心科学目标包括以下4个方面。

（1）模拟森林三维结构，以全息新视角探索森林生态学规律。以新一代激光雷达和光学遥感手段为核心推动力，以地面/近地面遥感为主要平台，发展森林三维结构信息的获取与数据融合关键技术，创建森林生态系统结构量化的新方法和新指标；模拟森林全息结构，定量描述森林三维生境、林木结构与理化特征；以全息化（holography）新视角探索林木-枝条-叶片的结构与性状特征、功能与演替机制，阐明森林生态系统种内/种间的竞争与协同关系、更新及生长过程。上述研究都将致力于酝酿新兴交叉学科——森林生态遥感学。

（2）破解CO₂和其他痕量气体通量监测难题，发展复杂地形下通量监测的新理论、技术与方法。为森林微气象与通量测定方法研究提供试验平台，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；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，打造复杂地形林区通量观测系统的范例。力争在CO₂和其他痕量气体通量测定技术领域取得原创性成果，为提高全球尺度森林生态系统CO₂和其他痕量气体通量的估测精度提供参考。

（3）探索森林生态系统碳-氮-水循环耦合过程与调控机制，促进生态系统生态学等领域知识创新。研究森林生态系统碳-氮-水循环耦合过程及其生物调控机制；分析全球变化背景下森林生态系统碳循环过程的响应与适应机制，解释森林生产力形成过程及不同垂直层次的固碳过程、贡献与控制因素；分析森林生态系统氮循环过程，评价其对氮氧化物的吸收效应。促进生态系统生态学、森林生态学、全球变化生态学交叉学科知识创新，为我国碳达峰与碳中和提供理论指导和科技支撑。

(4) 打造森林水文研究综合性平台, 探索森林水源涵养服务功能的形成机制。为森林水文监测与研究提供长期支撑平台, 研究森林生态系统不同层次的水文过程与环境的互馈机制, 认识环境变化下森林水循环过程及其与生物因子的关系; 从冠层-生态系统-小流域-集水区尺度, 跨尺度量化森林水文过程及各组分贡献率; 分析森林类型与结构对水量/水质的影响, 探索森林水源涵养服务功能的形成机制。努力打造以森林水文学与生态水文学为核心的监测研究平台, 为保障区域生态水安全提供科技支撑。

5 取得进展及未来观测、研究计划

(1) 以地面/近地面遥感为主要平台, 以 LiDAR 为核心传感器, 结合多源光学遥感手段, 开展森林结构监测相关研究。截至 2020 年底, 已获取无人机、塔基、地基 LiDAR 点云数据超过 8 TB, 并在量化林

冠截雨能力^[19]与林窗边缘木偏冠效应^[20]取得进展(图 2)。未来监测/研究计划包括: ① 多尺度量化森林三维结构, 建立新参数体系; ② 采用物候相机监测冠层动态变化, 研究多途径遥感森林全息结构的数据融合技术; ③ 原位观测量化叶片-枝条-单木结构特征, 分析叶片性状变化、抗逆适应的内在机制; ④ 量化林分(林窗)结构与树木生长特性, 模拟三维空间光环境; ⑤ 基于小流域观测结果参数化遥感生产力模型与尺度外推。

(2) 依托科尔塔群的通量监测系统和源区长期样地群, 探讨复杂地形下森林生态系统痕量气体通量监测的理论与方法。截至 2020 年底已积累各类通量监测数据超 640 GB。未来研究工作包括: ① 定量描述复杂地形下的物质与能量传输过程, 包括光、风、水、CO₂ 格局, 分析其过程及驱动力(图 3); ② 探索复杂地形下关键通量参数及计算方法(如高频气温计

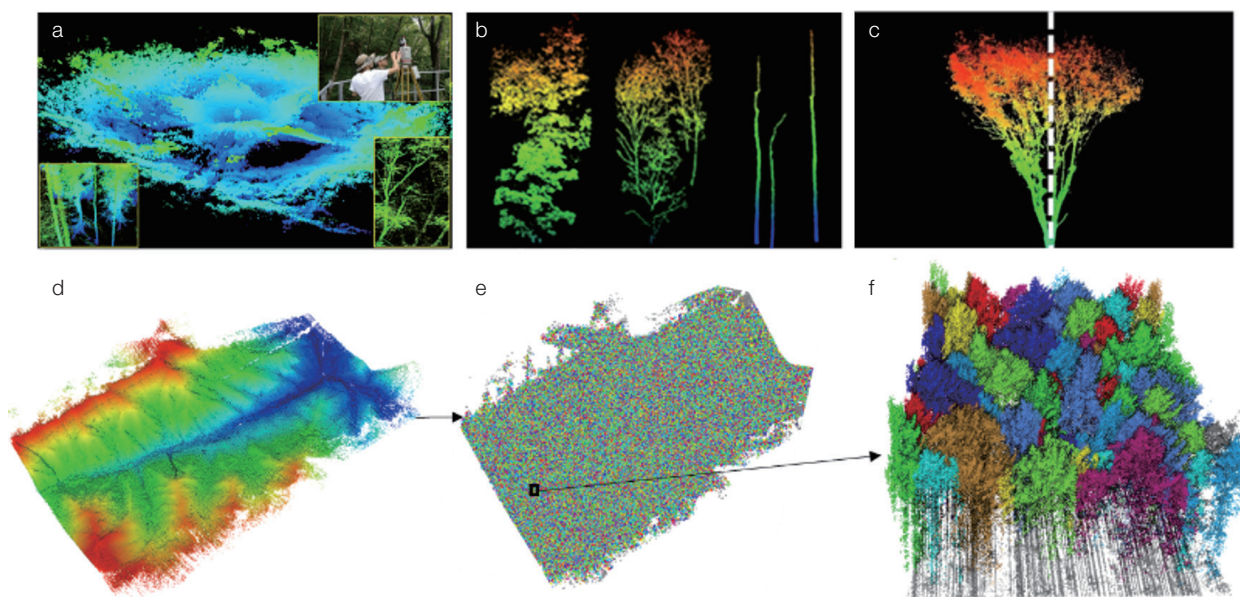


图 2 多平台激光雷达提取森林结构参数

Figure 2 Estimation of forest canopy structure from multi-platform LiDAR

(a) 塔基 LiDAR 扫描与点云数据; (b) 地基 LiDAR 点云分离树干、枝、叶, 用于量化冠层截雨能力^[20]; (c) 地基 LiDAR 量化林窗边缘木偏冠效应^[21]; (d) 无人机(UAV)-LiDAR 小流域点云数据; (e) 基于 UAV-LiDAR 点云森林单木分割, 共提取 32.5 万株(350 ha); (f) 典型林分单木分割结果(未发表数据, 已形成该相关方向研究论文)

(a) Point clouds obtained from tower-based LiDAR scanning; (b) Separations of point clouds for predicting rainfall interception; (c) Quantifying crown asymmetry induced by natural gaps using terrestrial LiDAR; (d) Point clouds obtained from (unmanned aerial vehicle, UAV)-LiDAR; (e) Total of 325 000 individual trees (350 ha) were segmented using UAV-LiDAR point clouds; (f) Segmented result of typical stand (unpublished data)

算，相关文章投稿中），分析环控加热超声风速仪对涡度相关法通量观测的影响；③ 评价复杂地形下碳通量测定的不确定性；④ 评估森林生态系统储存通量的测定方法对NEE估测的影响；⑤ 复杂地形森林通量功率谱/协谱的订正方法。

(3) 基于碳-氮通量的监测结果，探索森林生态系统碳-氮循环过程。目前及计划开展的研究工作包括：① 评估森林生态系统氮氧化物的源汇状况与季节动态格局（图4）；② 森林生态系统不同光能利用率的定义方法；③ 复杂地形下森林生态系统总初级生产力的光响应机制；④ 3种林型的光能利用率、养分利用率、水分利用率等及其与林分结构的关系；⑤ 碳通量年际变化对环境与生物因子的响应机制。

(4) 以水文站网为核心，形成水文监测数据集，研究森林水文过程与水源涵养服务功能。截至2020年底，水文监测数据记录超过10万条。目前及计划开

展的主要研究工作包括：① 森林小流域水文情势的年际-季节变化与驱动因素分析（图5）；② 基于森林小流域水文站观测结果参数化分布式水文模型并用于评估分析；③ 森林小流域水文过程对气候变化的响应；④ 情景模拟不同管理方式对森林水源涵养功能的影响；⑤ 基于多级嵌套流域水文情势分析浑河上游水源涵养形成机制。

6 运行与管理办法

(1) 平台运行机制。① 仪器设备管理。制定科尔塔群仪器设备管理规定，对购买、使用、借用进行记录备案。② 仪器设备运维。制定整套设备运维规程，由专职人员负责春/秋季维护、定期检查、故障诊断。③ 数据管理。组建数据中心，实现数据高效的存储、管理与分发；逐月提交数据报告、逐年完成年度数据报告，专职人员负责审查。④ 技术支持。依托科

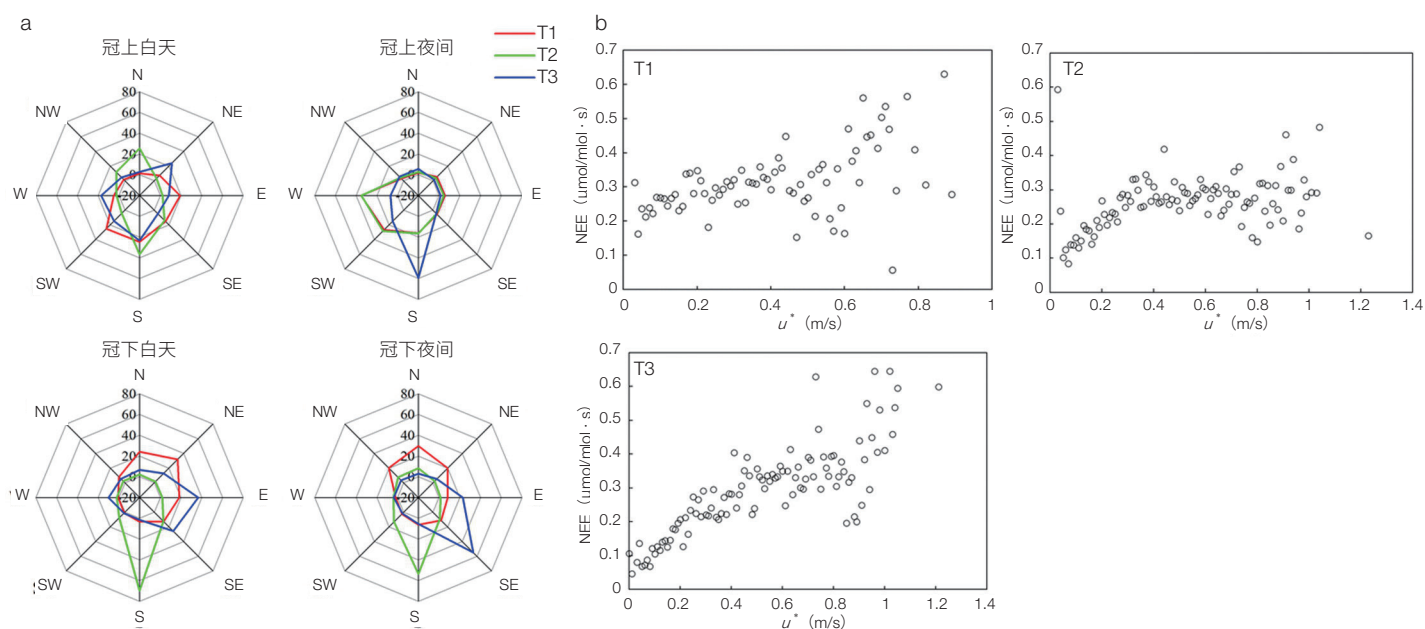
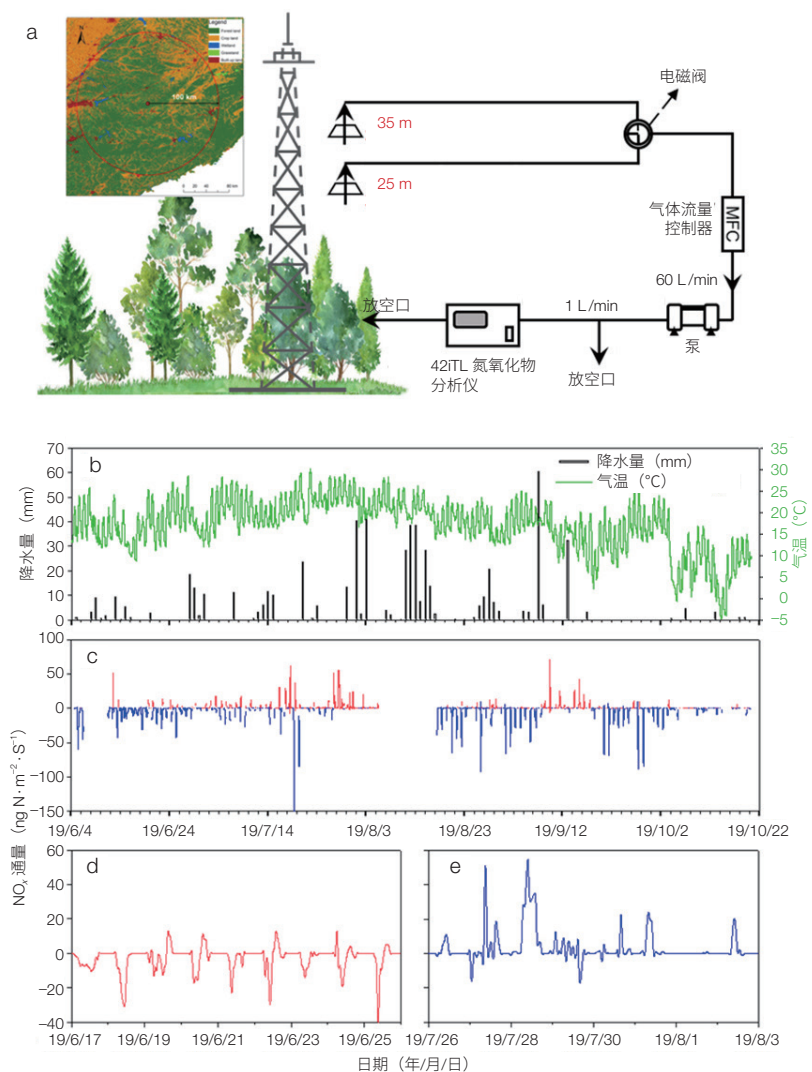


图3 风格局及其与生态系统碳净交换的关系

Figure 3 Wind regimes and their relationships to net ecosystem exchange (NEE)

(a) 三塔冠上冠下风向；冠上冠下表现出明显的风切变（观测到解耦现象，已形成文章）；(b) 三塔摩擦风速 (u^*) 与 NEE 的关系；T2 和 T3 可发现明显摩擦风速阈值（NEE 随 u^* 增加而增加，到达某个阈值后二者无关系），T1 阈值不明显（未发表数据，已形成该相关方向研究论文）

(a) Wind direction above and below forest canopy around the three towers (decoupling); (b) Relationships between friction velocity (u^*) and NEE; NEE becomes insensitive to atmospheric turbulence at certain thresholds of u^* for T2 and T3, but the similar threshold was not found for T1 (unpublished data)

图4 典型次生林林冠以上氮氧化物(NO_x)通量观测结果Figure 4 NO_x flux over typical secondary forest canopy

(a) 浓度梯度法观测森林林冠以上 NO_x 通量示意图；(b) 清原温带森林生态系统日均气温和降雨量；(c) 林冠以上 NO_x 通量的小时平均值，清原混交林林冠总体表现为 NO_x 向下的沉降，推测是林冠叶片气孔吸收驱动；(d) 6月份某些特殊天的 NO_x 通量小时平均值；(e) 7月份和8月份某些特殊天的 NO_x 通量小时平均值（未发表数据，文章投稿中）

(a) Schematic of leaf stomatal uptake of NO_x produced by combustion and forest soil; (b) Daily precipitation and half-hourly mean of air temperature; (c) Hourly average of NO_x flux; NO_x flux in some specific individual periods in June (d), July and August (e) (unpublished data)

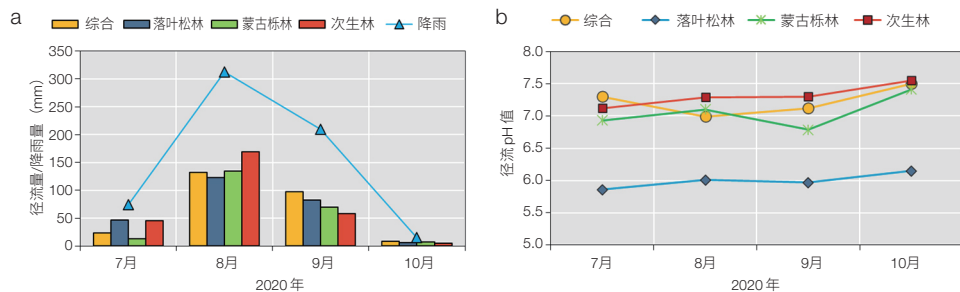


图5 地表径流量(a)和pH值(b)季节变化(未发表数据)

Figure 5 Seasonal changes in surface runoff (a) and pH (b) (unpublished data)

尔塔群成立了科尔森林痕量气体与同位素通量监测研发联合实验室，负责软、硬件研发，程序更新等技术支持。⑤ 运行经费。科尔塔群日常运行由专项经费支持，合作者需缴纳平台管理费用。

(2) 固定样地群的调查与运

维。① 样地定期调查与检查。每年4月排查样地，检查凋落物收集器、生长环、号牌等。每年9月底开展固定样地的调查，完成数据录入与分析。② 每2年在非生长季和生长季开展地基激光雷达扫描工作；每5年开展1次无人机LiDAR扫描作业。

(3) 合作共享方式。① 平台基

础设施共享。其他单位基于科尔塔群开展试验，须遵循清原站使用或搭载仪器的相关规定。② 数据共享。申请人在线提交数据申请，经审核后方可获取数据。③ 基于科尔塔群或数据发表成果须标注清原站。

参考文献

- 刘世荣, 代力民, 温远光, 等. 面向生态系统服务的森林生态系统经营: 现状、挑战与展望. 生态学报, 2015, 35(1): 1-9.

- 2 朱教君, 闫巧玲, 于立忠, 等. 根植森林生态研究与试验示范, 支撑东北森林生态保护恢复与可持续发展. 中国科学院院刊, 2018, 33(1): 107-118.
- 3 方精云, 唐艳鸿, Son Yowhan. 碳循环研究: 东亚生态系统为什么重要. 中国科学: 生命科学, 2010, 40(7): 561-565.
- 4 Belcher S E, Finnigan J J, Harman I N. Flows through forest canopies in complex terrain. *Ecological Applications*, 2008, 18(6): 1436-1453.
- 5 高添, 于立忠, 于丰源, 等. 中国科学院清原森林生态系统观测研究站塔群平台的功能和应用. *应用生态学报*, 2020, 31(3): 695-705.
- 6 Medina-Vega J A, Bongers F, Schnitzer S A, et al. Lianas explore the forest canopy more effectively than trees under drier conditions. *Functional Ecology*, 2021, 35(2): 318-329.
- 7 郭庆华, 刘瑾, 陶胜利, 等. 激光雷达在森林生态系统监测模拟中的应用现状与展望. *科学通报*, 2014, 59(6): 459-478.
- 8 Schneider F D, Kükenbrink D, Schaepman M E, et al. Quantifying 3D structure and occlusion in dense tropical and temperate forests using close-range LiDAR. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 268: 249-257.
- 9 Wofsy S C, Goulden M L, Munger J W, et al. Net Exchange of CO₂ in a mid-latitude forest. *Science*, 1993, 260: 1314-1317.
- 10 Barford C C, Wofsy S C, Goulden M L, et al. Factors controlling long- and short-term sequestration of atmospheric CO₂ in a mid-latitude forest. *Science*, 2001, 294: 1688-1691.
- 11 Wehr R, Munger J W, McManus J B, et al. Seasonality of temperate forest photosynthesis and daytime respiration. *Nature*, 2016, 534: 680-683.
- 12 Novick K A, Biederman J A, Desai A R, et al. The AmeriFlux network: A coalition of the willing. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 249: 444-456.
- 13 Berbigier P, Bonnefond J M, Mellmann P. CO₂ and water vapour fluxes for 2 years above Euroflux forest site. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108: 183-197.
- 14 Beringer J, Hutley L B, McHugh I, et al. An introduction to the Australian and New Zealand flux tower network - OzFlux. *Biogeosciences*, 2016, 13: 5895-5916.
- 15 于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏. 中国陆地生态系统通量观测研究网络 (ChinaFLUX) 的主要进展及发展展望. *地理科学进展*, 2014, 33(7): 903-917.
- 16 Wei X H, Li Q, Zhang M F, et al. Vegetation cover-another dominant factor in determining global water resources in forested regions. *Global Change Biology*, 2018, 24(2): 786-795.
- 17 王兴昌, 王传宽. 森林生态系统碳循环的基本概念和野外测定方法评述. *生态学报*, 2015, 35(13): 4241-4256.
- 18 Li X F, Zhu J, Lange H, et al. A modified ingrowth core method for measuring fine root production, mortality and decomposition in forests. *Tree Physiology*, 2013, 33(1): 18-25.
- 19 Yu Y, Gao T, Zhu J J, et al. Terrestrial laser scanning-derived canopy interception index for predicting rainfall interception. *Ecohydrology*, 2020, 13(5): e2212.
- 20 Lu D L, Zhu J J, Wu D N, et al. Detecting dynamics and variations of crown asymmetry induced by natural gaps in a temperate secondary forest using terrestrial laser scanning. *Forest Ecology and Management*, 2020, 473: 118289.

Functions and Applications of Multi-tower Platform of Qingyuan Forest Ecosystem Research Station of Chinese Academy of Sciences (Qingyuan Ker Towers)

ZHU Jiaojun^{1,2,3*} GAO Tian^{1,2,3} YU Lizhong^{1,2,3} YU Fengyuan^{1,2,3} YANG Kai^{1,2,3} LU Deliang^{1,2,3} YAN Qiaoling^{1,2,3}
SUN Yirong^{1,2,3} LIU Lifang^{1,2,3} XU Shuang^{1,2,3} ZHANG Jinxin^{1,2,3} ZHENG Xiao^{1,2,3} SONG Lining^{1,2,3} ZHOU Xinhua^{3,4}

(1 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2 Qingyuan Forest CERN, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

3 CAS-CSI Joint Laboratory of Research and Development for Monitoring Forest Fluxes of Trace Gases and Isotope Elements, Shenyang 110016, China;

4 Campbell Scientific Inc., Logan, UT 84321, USA)

Abstract The structure regulation and function optimizations of forest-ecosystems are fundamental and significant topics on ecology & management of forests. However, due to the limitations in theories and technologies to describe the three-dimensional forest structure for complex terrain and to precisely evaluate the structure-associated functions, these topics have been challenged by the complications in canopy structure and the urgencies in various societal demands towards forest ecosystem services. To face against the challenge, Chinese Academy of Sciences (CAS) funded the “Multi-tower Platform for Monitoring the Structure and Function of Temperate Secondary Forest Ecosystems” (Qingyuan Ker Towers) as a corner-stone research infrastructure project for the field station network. Ker Towers were completed in 2019 by Qingyuan Forest CERN (Chinese Ecosystem Research Network) inside a distinctively-bounded and monitored-outlet watershed. The three towers, hydrology station networks, and forest plot arrays uniquely formed the Ker Towers research facilities as a synthesized platform. This platform was integrated with the light detection and ranging scanners for acquisition of holographic information on forest canopy structure, the advanced eddy covariance flux systems for the measurements of CO₂/H₂O, trace gases, and energy fluxes between the watershed forest systems and the atmosphere, and the hydrology station networks for observations of ground/underground water flows. All real-time data from the platform are streamed into a live data center. The platform including remote sensing technology, eddy covariance, biometry (or inventory), forest informatics and collaborative and interdisciplinary team prominently builds up multiple approaches and essential elements at different scales to fulfill comprehensive projects in response to national needs and international concerns as well. The Ker Towers team mainly focuses on the four tasks: (1) explore forest ecological principles for a new vision of holographic information in describing forest three-dimensional structure; (2) innovate theories and techniques to measure the fluxes of CO₂/H₂O/NO_x and the other trace gases over complex forest terrains; (3) understand the response of carbon and nitrogen cycles in forest ecosystems to global change; and (4) demonstrate the hydrologic processes in forest ecosystems and its regulating mechanism. The four above tasks aim to provide fundamental data and theoretical support to to optimize and sustain forest functions through forest structure management. The ultimate objective of the platform is to deliver solutions for regional and national forests to offer broad and sustainable benefits to human society.

Keywords multi-tower, temperate forest, secondary forest ecosystem, LiDAR, 3-dementional canopy structure, eddy covariance, carbon-nitrogen-water coupling cycles, global change, collaborative observation



朱教君 中国科学院清原森林生态系统观测研究站/辽宁清原森林生态系统国家野外科学观测研究站站长，中国科学院沈阳应用生态研究所所长、研究员。长期从事森林生态和林业生态工程研究。中国生态学会副理事长，辽宁省生态学会理事长，SCI 期刊 *Ecological Processes* 共同主编。国家杰出青年科学基金获得者，“973”计划项目、国家重点研发项目首席科学家。以第一/通讯作者发表 SCI 论文 106 篇，出版专著 5 部，发明专利 6 项；以第一完成人获国家科技进步奖二等奖 2 项、省部级一等奖 3 项，获国际林联科学成就奖等个人奖励 20 余项。E-mail: jiaojunzhu@iae.ac.cn

ZHU Jiaojun Director of Qingyuan Forest CERN of Chinese Academy of Sciences (CAS) & Qingyuan Forest of National Observation and Research Station, Liaoning Province, and the Director General of Institute of Applied Ecology, CAS. Dr. Zhu has been focusing on research in Forest Ecology and Management, and Forestry Ecoengineerings. He currently serves as Vice President of Ecological Society of China, President of Ecological Society of Liaoning Province, and Co-Editor-in-Chief of *Ecological Processes*. He was awarded the National Science Fund for Distinguished Young Scholars by National Natural Science Foundation of China. He is a program leader and a principal investigator of the National Basic Research Program of China and the National Key Research and Development Program of China. He has published 106 peer-reviewed papers indexed by SCI as first or corresponding author, 5 monographs, and authorized 6 patents. As the first contributor, he was awarded 2 second prizes of National Science and Technology Advancement Award and 3 provincial achievement awards in Science and Technology. In addition, he has won more than 20 personal honors, including the IUFRO Scientific Achievement Award. E-mail: jiaojunzhu@iae.ac.cn

■ 责任编辑：张帆

参考文献 (双语版)

- 1 刘世荣, 代力民, 温远光, 等. 面向生态系统服务的森林生态系统经营: 现状、挑战与展望. 生态学报, 2015, 35(1): 1-9.
Liu S R, Dai L M, Wen Y G, et al. A review on forest ecosystem management towards ecosystem services: Status, challenges, and future perspectives. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(1): 1-9. (in Chinese)
- 2 朱教君, 闫巧玲, 于立忠, 等. 根植森林生态研究与试验示范, 支撑东北森林生态保护恢复与可持续发展. 中国科学院院刊, 2018, 33(1): 107-118.
Zhu J J, Yan Q L, Yu L Z, et al. Support ecological restoration and sustainable management of forests in northeast China based on research of forest ecology and demonstrations. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(1): 107-118. (in Chinese)
- 3 方精云, 唐艳鸿, Son Yowhan. 碳循环研究: 东亚生态系统为什么重要. 中国科学: 生命科学, 2010, 40(7): 561-565.
Fang J Y, Tang Y H, Yowhan S. Carbon cycle research: Why East Asian ecosystems are important. *Scientia Sinica (Vita)*, 2010, 40(7): 561-565. (in Chinese)
- 4 Belcher S E, Finnigan J J, Harman I N. Flows through forest canopies in complex terrain. *Ecological Applications*, 2008, 18(6): 1436-1453.
- 5 高添, 于立忠, 于丰源, 等. 中国科学院清原森林生态系统观测研究站塔群平台的功能和应用. 应用生态学报, 2020, 31(3): 695-705.
Gao T, Yu L Z, Yu F Y, et al. Functions and applications of multi-tower platform of Qingyuan forest ecosystem research station of Chinese Academy of Sciences. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(3): 695-705. (in Chinese)
- 6 Medina-Vega J A, Bongers F, Schnitzer S A, et al. Lianas explore the forest canopy more effectively than trees under drier conditions. *Functional Ecology*, 2021, 35(2): 318-329.
- 7 郭庆华, 刘瑾, 陶胜利, 等. 激光雷达在森林生态系统监测模拟中的应用现状与展望. 科学通报, 2014, 59(6): 459-478.
Guo Q H, Liu J, Tao S L, et al. Perspectives and prospects of LiDAR in forest ecosystem monitoring and modeling. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(6): 459-478. (in Chinese)
- 8 Schneider F D, Kükenbrink D, Schaepman M E, et al. Quantifying 3D structure and occlusion in dense tropical and temperate forests using close-range LiDAR. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 268: 249-257
- 9 Wofsy S C, Goulden M L, Munger J W, et al. Net exchange of CO₂ in a mid-latitude forest. *Science*, 1993, 260: 1314-1317.
- 10 Barford C C, Wofsy S C, Goulden M L, et al. Factors controlling long- and short-term sequestration of atmospheric CO₂ in a mid-latitude forest. *Science*, 2001, 294: 1688-1691.
- 11 Wehr R, Munger J W, McManus J B, et al. Seasonality of temperate forest photosynthesis and daytime respiration. *Nature*, 2016, 534: 680-683.
- 12 Novick K A, Biederman J A, Desai A R, et al. The AmeriFlux network: A coalition of the willing. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 249: 444-456.
- 13 Berbigier P, Bonnefond J M, Mellmann P. CO₂ and water vapour fluxes for 2 years above Euroflux forest site. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108: 183-197.
- 14 Beringer J, Hutley L B, McHugh I, et al. An introduction to the Australian and New Zealand flux tower network-OzFlux. *Biogeosciences*, 2016, 13: 5895-5916.
- 15 于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏. 中国陆地生态系统通量观测研究网络ChinaFLUX的主要进展及发展展望. 地理科学进展, 2014, 33(7): 903-917.
Yu G R, Zhang L M, Sun X M. Progresses and prospects of Chinese terrestrial ecosystem flux observation and research network (ChinaFLUX). *Progress in Geography*, 2014, 33(7):

- 903-917. (in Chinese)
- 16 Wei X H, Li Q, Zhang M F, et al. Vegetation cover-another dominant factor in determining global water resources in forested regions. *Global Change Biology*, 2018, 24(2): 786-795.
- 17 王兴昌, 王传宽. 森林生态系统碳循环的基本概念和野外测定方法评述. *生态学报*, 2015, 35(13): 4241-4256.
- Wang X C, Wang C K. Fundamental concepts and field measurement methods of carbon cycling in forest ecosystems: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(13): 4241-4256. (in Chinese)
- 18 Li X F, Zhu J, Lange H, et al. A modified ingrowth core method for measuring fine root production, mortality and decomposition in forests. *Tree Physiology*, 2013, 33(1): 18-25.
- 19 Yu Y, Gao T, Zhu J J, et al. Terrestrial laser scanning-derived canopy interception index for predicting rainfall interception. *Ecohydrology*, 2020, 13(5): e2212.
- 20 Lu D L, Zhu J J, Wu D N, et al. Detecting dynamics and variations of crown asymmetry induced by natural gaps in a temperate secondary forest using terrestrial laser scanning. *Forest Ecology and Management*, 2020, 473: 118289.