

•生物多样性监测专题•

中国森林冠层生物多样性监测

沈 浩¹ 蔡佳宁^{1,2} 李萌姣^{1,2} 陈 青^{1,2} 叶万辉^{1*}
王峥峰¹ 练琚愉¹ 宋 亮³

1 (中国科学院华南植物园, 广州 510650)

2 (中国科学院大学, 北京 100049)

3 (中国科学院西双版纳热带植物园, 云南勐腊 666303)

摘要: 林冠作为森林与外界环境相互作用最直接和最活跃的关键生态界面, 承载了森林生物多样性的主体, 在生物多样性的形成与维持以及生态系统功能过程中发挥着重要的作用, 被称为地球的“第八大洲”。同时, 林冠对气候变化和人为干扰高度敏感, 在人类活动和全球气候变化加剧的背景下, 森林生态系统正面临着严重的威胁, 首当其冲的就是森林冠层。气候变化下的林冠生物多样性保护与可持续利用已成为现代生态学研究的热点问题, 受到森林生态学、气候学、环境科学等研究领域的学者越来越多的关注。据此, 中国生物多样性监测与研究网络以网络内拥有森林冠层塔吊的生物多样性监测样地为平台, 建立了林冠生物多样性监测专项网。该专项网将参照国际标准, 统一监测指标, 规范监测标准, 通过大尺度地带性森林冠层内植物(包括附生种子植物和附生孢子植物)多样性、动物多样性、微生物多样性及其动态变化的长期监测, 结合林冠小气候环境特征监测, 建立林冠小环境特征、植物多样性、节肢动物多样性和微生物多样性等4个动态更新的数据库, 以阐明我国典型森林林冠生物多样性变化的规律, 揭示其对森林生态系统功能过程的影响和对全球变化的响应。

关键词: 林冠; 塔吊; 生物多样性监测; 全球变化

On Chinese forest canopy biodiversity monitoring

Hao Shen¹, Jianing Cai^{1,2}, Mengjiao Li^{1,2}, Qing Chen^{1,2}, Wanhui Ye^{1*}, Zhengfeng Wang¹, Juyu Lian¹, Liang Song³

1 South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla, Yunnan 666303

Abstract: As the most direct and active ecological interface of the interaction between forest and its environment, the forest canopy, known as the earth's “eighth continent”, contains the greatest forest biological diversity, and plays an important role in the formation and maintenance of biodiversity as well as the processes and functions of the ecosystem. However, the forest canopy is highly sensitive to global climate change and human disturbance. In the wake of increasing human activities and global climate change, the forest ecosystem, especially the forest canopy, is facing a serious threat. Therefore, protection of forest canopy biodiversity and sustainable utilization are increasingly important issues in modern ecology research under the scenarios of climate change, and have gained more and more attention in the fields of forest ecology, climatology, and environmental science. Accordingly, in 2015, the Chinese Forest Canopy Biodiversity Monitoring Network was created within the framework of Sino BON. This network includes biodiversity monitoring plots those were or will be equipped with forest canopy cranes. According to international standards, the network will unify monitoring parameters of forest canopy biodiversity using monitoring standards and norms, and conduct long-term monitoring of plant diversity (including epiphytic seed plants and epispore plants), fauna diversity, microbial diversity and their dynamic changes, through large scale zonal forest cano-

收稿日期: 2016-10-12; 接受日期: 2016-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(31370446)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: why@scbg.ac.cn

pies. Combined with monitoring of the microclimate, we will build four dynamic databases (including a forest canopy microclimate database, canopy plant, canopy arthropod, and canopy microbial). The network is expected to discern the change patterns of forest canopy biodiversity of typical forest ecosystems in China, and to reveal how they influence the functioning of forest ecosystems and respond to global change.

Key words: forest canopy; canopy crane; biodiversity monitoring; global change

森林冠层(简称林冠)是由森林群落的树冠组成的集合体,为森林生态系统的重要组成部分,承载了地球上大约40%的现存物种(其中10%为冠层特有种)(Ozanne et al, 2003),被称为地球上的“第八大洲”(Lowman & Schowalter, 2012)。作为森林与外界环境相互作用最直接和最活跃的关键生态界面,林冠对气候变化和人为干扰高度敏感,在维持生态系统的多样性、弹性和功能等方面起着重要的作用(Clark & Clark, 1994, 2001; Emilio et al, 2010)。在人类活动和全球气候变化加剧的背景下,森林生态系统正面临着严重的威胁,而首当其冲的就是森林冠层。考察森林冠层的结构与功能及其时空变化是深入理解整个森林生态系统格局、过程及其运作机制的重要基础(李德志和臧润国, 2004)。林冠生物多样性及其与全球变化的关联以及林冠附生生物的保护与可持续利用等已成为现代生态学研究热点问题,受到森林生态学、气候学、环境科学等研究领域学者越来越多的关注。由于林冠生态学过程在空间和功能上表现出的独特性,有人将其称为“林冠科学”。

然而,长期以来由于缺乏接近林冠层的有效手段,人们对林冠的了解甚少(Neto, 1989),无法从生态系统的整体层面全面揭示其在全球环境维持中的作用,更无法预测林冠对全球变化的响应及适应。直到20世纪70年代后期, Perry (1978)提出单绳攀爬技术(single rope technique)之后,人们才初步找到了接近森林冠层的方法而开始了林冠生物多样性的研究,此后利用的技术手段还有热气球、空中廊道、塔吊等。一些致力于林冠学研究的国际组织也应运而生,如国际林冠网络(International Canopy Network, ICAN)、全球林冠项目(Global Canopy Program, GCP)、国际林冠塔吊网络(International Canopy Crane Network, ICCN, https://www.stri.si.edu/english/research/facilities/terrestrial/cranes/canopy_crane_network.php)等。这些工作进一步推动了林冠研究的发展(吴毅等, 2016)。林冠生物多样性、

林冠与全球气候变化等相关研究成果相继在*Nature*和*Science*等期刊发表,其中林冠微生物多样性的研究成果尤为突出(Norby, 1996; Ozanne et al, 2003; Hopkin, 2005; Lambais et al, 2006; Leveau, 2009; Basset et al, 2012)。在此背景下,林冠学有望逐步发展成为一门新兴学科。

近年来,在中国生物多样性监测与研究网络的统一组织和部署下,成立了中国森林冠层生物多样性监测专项网(马克平, 2015)。该专项网通过调查与监测大尺度地带性森林林冠内植物、动物、微生物多样性的格局及其变化,来研究林冠生物多样性对森林生态系统功能和过程的影响及其对全球变化的响应。

1 林冠生物多样性监测与研究现状及趋势

有关林冠的生物多样性研究起步较晚,最初以描述性的定性研究为主。由于生境的特殊性,林冠生物多样性研究受到时间与空间多种因素的限制,特别是林冠层极为丰富的生物多样性(很多生物至今仍然未被命名或被发现)以及量化研究通用规程的缺乏(Lowman & Moffett, 1993; 李德志和臧润国, 2004),严重阻碍了林冠研究的发展。近些年来,随着更加便捷、有效和量化的林冠实测技术和研究方法不断问世并取得长足发展,大大深化了人类对于森林冠层结构和功能过程的理解(李德志和臧润国, 2004; 吴毅等, 2016)。

从森林生态学的发展历史来看,大多数的相关研究理论和观点都是从温带地区的森林开始的,而关于林冠的研究工作则是从热带地区最先开始的。生态学家转而关注热带林冠学研究的原因在于:(1)热带林冠是最复杂的森林类型组分;(2)面临灭绝威胁的热带生物有很多生活在林冠层,促使研究者加强研究(Lowman & Moffett, 1993)。

1.1 相关国际组织

由于巨型吊车等新型设备的出现,人们对森林冠层的兴趣伴随着林冠的数据信息也日益增加,因

此林冠生态学家需要新的手段和分析方法以共享、管理、分析和对比来自不同研究项目的林冠数据。在此背景下, 1993年7月, 在美国国家科学基金会(National Science Foundation)的数据库活动计划(Database Activities Program)和生态计划(Ecosystems Program)的资助下成立了国际林冠网络(ICAN) (Nadkarni & Parker, 1994; Nadkarni et al, 1996; 彭少麟和任海, 2002)。ICAN致力于整合林冠研究者、数量科学家和计算机科学家, 以挖掘、收集、贮存、分析、解译并显示有关树冠与林冠的三维空间数据(植物、动物、微生物及生物和非生物环境)的技术和方法, 促进世界各地学者之间的持续互动。该组织是一个由全球范围内的科学家、保护倡导者、冠层教育者和环境保护专业人士共同组成的非营利组织, 由会员的会费、捐赠和基金项目资助。ICAN每年出版3期名为“What's Up?”的通讯, 主要介绍关于林冠的一些研究主题和专题论文, 以及有关林冠研究和教育的资源库和引文情况。

1997年3月, 在巴拿马举行的首次国际林冠塔吊研讨会(International Canopy Crane Symposium)将“整合研究力量, 发挥林冠塔吊研究的最大影响力”作为核心议题, 并成立了国际林冠塔吊网络; 1999年, 在由欧洲科学基金会和美国国家科学基金会联合资助的于牛津大学召开的国际林冠科学研讨会(International Canopy Science Workshop)上, 设立了全球林冠项目。这些林冠研究组织的宗旨、研究内容及关注的科学问题详见有关文献(宋亮和刘文耀, 2013; 吴毅等, 2016)。

为了高效利用已经建立的塔吊设备, 充分发挥其在林冠研究中的作用, 中国科学院西双版纳热带植物园于2015年10月27-29日举办了“林冠生态学与生物多样性”国际学术研讨会。该研讨会旨在加强国内外同行在林冠科学研究中的新成果、新技术的交流, 探讨未来合作研究的机遇和设想, 促进国内外林冠科学的合作研究。

1.2 相关技术和方法

早期林冠研究是通过获得下层枝叶的样本资料来推断林冠上层乃至整个林冠的结构(李德志和臧润国, 2004)。随后, 望远镜、梯子、摘棉机、超轻便小型飞机、单绳攀爬、冠层步道、热气球、林冠筏、塔吊等设备和技术先后被用于林冠研究, 研究方法的可靠性、研究者的安全性以及获取数据资

料的准确性等方面逐步得到提升(Lowman & Wittman, 1996; Lowman & Rinker, 2004; 李德志和臧润国, 2004; 张云等, 2007; 杨洁等, 2008; 吴毅等, 2016; 杨龙等, 2016)。其中, 林冠塔吊在三维空间作业中具有“全方位、高精度、非破坏、可重复”的特征, 已成为当前林冠学研究的标志(吴毅等, 2016)。自1990年全球第一个用于森林冠层观测的塔吊由美国史密森热带研究院(Smithsonian Tropical Research Institute, STRI)建立于巴拿马, 目前全球已有8个国家建成了11个塔吊(不包括中国)。

1.3 监测与研究内容和对象

如前文所述, 新技术的发展使得林冠科学家在树冠进行定量化研究成为可能, 包括固着生物(sessile organisms)、可移动生物(mobile organisms)以及冠层的相互作用和过程的研究。从类群上可以分为植物、动物和微生物的研究, 且都已成为林冠生物学的分支; 在获取数据方面需要使用不同的技术和方法(Lowman & Wittman, 1996)。林冠研究涉及的问题非常多样, 且均强调时空分异: 空间上从叶片(如定量化每个叶面上昆虫的数量)、树体(如测量阳叶和阴叶的光合作用)、森林立地(如观测冠层上部的湍流)到整个景观尺度(如比较不同森林类型之间的哺乳动物)。时间分异在热带森林冠层特别重要, 主要包括生物种群及其所利用资源的日变化、季节动态甚至年际的周期性变化(Lowman & Moffett, 1993; Lowman & Wittman, 1996; Lowman, 2009; Lowman & Schowalter, 2012)。

近年来, 针对小气候环境(崔启武和朱劲伟, 1981; 王汉杰, 1986; 刘和平等, 1997; 苗世光和蒋维楣, 2004; 鲜靖苹等, 2014)、(附生)植物多样性(刘文耀等, 2006; 杨洁等, 2008; 江浩等, 2011, 2012; 刘广福等, 2011; 吴毅等, 2016)及动物多样性(孟庆繁, 2007; 张云等, 2007; 郑国和李枢强, 2013)的观测与研究报道较多, 并取得了长足进步。但是, 针对林冠微生物多样性的研究相对较晚。较为经典的案例是来自全球生物多样性热点地区之一的巴西大西洋沿岸森林林冠细菌多样性的研究(Lambais et al, 2006, 2014)。该研究发现, 尽管该研究区域森林中相同树种的细菌群落存在差异, 却还是可用判别分析归为同一组; 平均每个叶面可栖息95-671种细菌, 并且97%的细菌物种尚未有分类描述。因此, 叶际微生物种群远比想象的复杂(Yang et al, 2001)。

Kembel等(2014)通过新热带森林的研究发现, 叶际细菌的多样性与其所栖息植物的生长、死亡及功能关系密切, 因而探讨植物-微生物间的关系对于理解植物功能生物地理学和植物及生态系统变异的驱动机制具有重要意义。

2 中国森林冠层生物多样性监测专项网

2.1 科学目标

林冠生物多样性监测专项网旨在围绕气候变化和人为干扰下的林冠生物多样性保护与可持续利用等热点问题, 在中国生物多样性监测与研究网络框架内, 以安装有森林冠层塔吊的监测样地为平台, 参照国际标准, 统一监测指标, 规范监测标准, 通过调查与监测大尺度地带性森林林冠内的植物、动物、微生物多样性及其动态变化的时空格局与纬度分布格局, 阐明我国典型森林林冠生物多样性的组成及其动态变化规律, 揭示林冠各生物类群之间的互动与协同进化机制, 探讨林冠生态系统功能及其对全球变化的响应与适应机制, 为生物多样性在全球变化背景下的动态监测、维持机制的研究提供支撑条件, 为我国生物多样性研究和制定保护行动计划提供系统科学的数据, 并推动林冠生物多样性相关学科的跨越式发展。

2.2 总体设计

林冠生物多样性监测专项网目前主要由中国生物多样性监测与研究网络中安装了森林塔吊的样地组成。考虑监测点的代表性与全局性, 从北到南共有8个监测样点, 具体的森林类型及地理位置见表1。在前期这8个样点的基础上, 将不断增加网络内后续装备森林塔吊的其他样地。

2.3 监测的主要内容、方法和指标

2.3.1 林冠小气候环境

按群落垂直结构特征选取5-10个树种, 分林冠内外利用自动微气象系统监测小气候环境参数, 实现林冠层环境的实时立体监测。主要方法是: 在林冠内外各装备1套微气象环境监测系统, 包括: 空气温湿度传感器、雨量传感器、光合有效辐射传感器、无线数据采集器、数据采集扩展单元、太阳能供电系统等。另外, 在各样地装备1套风速风向传感器和大气压强传感器等, 进行样地的气象监测。主要监测指标包括: 林冠内外的空气相对湿度、温度、太阳辐射、风速、风向、降雨量等。

2.3.2 林冠植物多样性

生活在森林冠层的植物主要包括具有独立根系统、营缠绕或攀援习性的木质藤本植物和不具有独立根系统的其他附生植物, 对气候变化具有高度

表1 中国森林冠层生物多样性监测专项网样点布局
Table 1 The plot distribution within the Chinese Forest Canopy Biodiversity Monitoring Network

序号 No.	样点名称 Plot name	森林类型 Forest type	地理坐标 Geographic coordinates
1	吉林长白山阔叶红松林25 ha样地 25-ha deciduous broad-leaved-Korean pine mixed forest plot at Changbai Mountain in Jilin Province	温带阔叶红松林 Temperate broadleaved-Korean pine mixed forest	42.38° N, 128.08° E
2	湖南八大公山中亚热带山地常绿落叶阔叶混交林25 ha样地 25-ha mid-subtropical mountain evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest plot at Badagong Mountain in Hunan Province	中亚热带山地常绿落叶阔叶混交林 Mid-subtropical mountain evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest	29.77° N, 110.09° E
3	浙江古田山亚热带常绿阔叶林24 ha样地 24-ha subtropical evergreen broad-leaved forest plot at Gutian Mountain in Zhejiang Province	中亚热带常绿阔叶林 Mid-subtropical evergreen broad-leaved forest	29.25° N, 118.12° E
4	四川栗子坪亚高山针叶林20 ha样地 20-ha subalpine coniferous forest plot at Liziping in Sichuan Province	亚高山针叶林 Subalpine coniferous forest	28.91° N, 102.36° E
5	云南云杉坪暗针叶林25 ha样地 25-ha dark coniferous forest plot at Yunshanping in Yunnan Province	寒温性云冷杉林 Cold temperate spruce-fir forest	27.14° N, 100.23° E
6	云南哀牢山亚热带常绿阔叶林20 ha样地 20-ha subtropical evergreen broad-leaved forest plot at Ailao Mountain in Yunnan Province	亚热带常绿阔叶林 Subtropical evergreen broadleaved forest	24.54° N, 101.03° E
7	广东鼎湖山亚热带常绿阔叶林20 ha样地 20-ha lower subtropical evergreen broad-leaved forest plot at Dinghu Mountain in Guangdong Province	南亚热带常绿阔叶林 South subtropical evergreen broadleaved forest	23.10° N, 121.32° E
8	云南西双版纳热带雨林20 ha样地 20-ha tropical rain forest plot at Xishuangbanna in Yunnan Province	热带雨林 Tropical rain forest	21.61° N, 101.57° E

的敏感性。附生植物在维持森林生态系统的物质循环和能量流动过程中有重要作用。但林冠附生植物却因受攀爬技术限制以及人们的认识不足而长期被忽略。为此,我们将围绕附生植物开展一系列的监测。类群上将包括附生非维管束植物(附生藻类、苔藓和地衣植物)和附生维管束植物(附生蕨类和被子植物)两大类。主要是基于林冠塔吊,采用常规方法进行人工观测、分类采样和功能指标测定。在物种监测方面,采用形态和DNA条形码(DNA barcoding)相结合的方法进行分类鉴定;在数量监测方面,对于可通过形态肉眼鉴定的物种进行传统计数统计,对于无法进行上述计数的物种,利用分子技术中的DNA扩增片段重复次数进行丰度估算。

(1)附生非维管束植物:选取单位面积树皮(干)进行取样。

附生藻类植物:传统藻类分类鉴定主要依据细胞的大小、形状和大孢子的形态结构及纹饰等,但对于隐形种的鉴定来说,这些特征是远远不够的。拟辅以 $cox1 + rbcL + 18S\ rDNA$ 三个DNA片段进行鉴定。

附生地衣植物:地衣是由共生菌(子囊菌或担子菌)与共生藻(蓝藻或绿藻)经过漫长的生物演化形成的,传统的地衣分类是基于对表型的比较分析。然而由于很难保证样品采集的完整性,导致样品经常缺少子囊盘形状、生长位置和子囊孢子的性状等重要的分类指标。拟采用 $GADPH + ITS + rbcL$ 三个DNA片段辅助进行鉴定。

附生苔藓植物:苔藓植物形态微小且高度变异,类群划分相当混乱和困难。由于很多种类孢子体并不多见,因此主要基于配子体形态进行分类。分类上常利用叶片形状、分枝长度、叶片细胞疣的特征,但这些特征往往因环境不同使得种内呈现很大差异。拟采用 $trnH-psbA + rps4$ 两个片段辅助进行鉴定。

(2)附生维管束植物:采用单个个体逐一采样。

附生蕨类植物:相对种子植物而言,蕨类植物可用的形态学性状较少,且存在同源性状不易判定等因素,因此仅利用形态学性状对蕨类植物进行分类面临着很多困难。拟采用 $rps4 + trnL-F + rps4-trnS$ 三个DNA片段辅助进行鉴定。

附生被子植物:采用目前国际公认的 $matk + rbcL + trnH-psbA$ 三个片段辅助进行鉴定。

2.3.3 林冠节肢动物多样性

冠层节肢动物是冠层动物的主体,也是森林生态系统的关键调节因子,具有重要研究价值。近几十年来,尽管该领域的研究有了比较快速的发展,但森林冠层仍然是我们了解最少的生境之一,冠层生物学中还有很多科学问题有待解答。为此,我们将结合传统冠层动物取样技术,并研制新型取样技术,围绕冠层节肢动物多样性及其动态开展一系列的监测和研究。类群上将主要包括节肢动物门的蛛形纲和昆虫纲,监测其种类和丰度。

主要方法是:基于林冠塔吊,集成传统冠层节肢动物取样技术,如杀虫剂击倒法、冠层喷雾法、灯诱技术、拦截器法、剪枝法等。在种类监测方面,采用形态和DNA条形码相结合的方法进行分类鉴定;在数量监测方面,对于可通过形态肉眼鉴定的物种进行传统计数统计,对于无法进行上述计数的物种,拟利用DNA扩增片段进行丰度估算。具体来说,将采集的节肢动物初步分为肉眼可见动物和肉眼不可见微小动物两类,减小库容,各自混合成“DNA soup”,然后对这两类动物采用国际通用的线粒体细胞色素c氧化酶I基因(COI)片段($cox1$)进行DNA条形码分类鉴定。

2.3.4 林冠微生物多样性

在地球生态系统中微生物的多样性和数量都极其丰富,对陆地生态系统中的众多过程产生影响,对生物多样性形成和维持等有着极其重要的作用。因此,对其动态进行长期监测是生物多样性研究的重要方面。为此,我们将利用分子遗传标记方法开展一系列的监测和研究。由于分子标记手段对微生物的研究是混合样,因此无需进行形态分类。故我们将分两个生境类型即森林群落树干和叶际分别进行监测。

主要方法是:分别采用手工方法和剪枝法进行树干和树叶的样品采集。在种类监测方面,采用形态(如大型真菌)和分子技术相结合的方法进行分类鉴定;在数量监测方面,对于可通过形态肉眼鉴定的物种进行传统计数统计,对于无法进行上述计数的物种,拟利用DNA扩增片段进行丰度估算。具体来说,将采集的样品初步分为肉眼可见和肉眼不可见微生物,后者采用16S rDNA和ITS两个区段进行种类和数量监测。

2.4 组织方式

林冠生物多样性监测网络主要依托中国森林生物多样性监测网络, 将建立由Sino BON总PI和各个参加样地PI或者林冠研究负责人组成的专家委员会, 负责冠层生物多样性研究与监测工作的设计与协调, 并制定相关工作标准。专家委员会每年例会一次, 总结上一年工作和部署下一年的任务。

主要参加单位有: 中国科学院华南植物园、动物研究所、西双版纳热带植物园、沈阳应用生态研究所、武汉植物园、微生物研究所、昆明植物研究所、成都生物研究所。

2.5 预期产出

林冠生物多样性监测网络将以生物多样性保护和生物资源持续利用的国家战略需求为导向, 采用先进监测技术支撑, 利用广泛的数据获取渠道和多样的数据整合分析方法, 以各监测样点为平台, 通过林冠植物、动物、微生物多样性及其动态变化的长期监测, 结合林冠小气候环境特征的实时立体监测, 建立4个动态更新的数据库: (1)林冠小环境(光照、温度)特征监测数据库: 包括林冠内外的空气相对湿度、温度、太阳辐射、风速、风向、降雨量等环境参数; (2)林冠植物多样性动态监测数据库: 包括附生植物的物种名录、物种空间位置、各物种数量、盖度、生活状况、DNA条形码鉴定序列等; (3)林冠节肢动物多样性动态监测数据库: 主要包括林冠节肢动物门蛛形纲和昆虫纲的物种组成和数量分布; (4)林冠微生物多样性动态监测数据库: 主要包括林冠微生物采集空间位置、种类、数量、DNA鉴定序列。

在建立以上4个数据库的基础上, 完成以下两项内容:

(1)提交林冠生物多样性及格局分布数据。以数据集技术规范文本、项目报告、咨询报告和数据报告、专题图集、数据库和信息系统的形式提交成果。摸清林冠生物多样性的本底, 提交相应的数据集和图件, 建立和完善数据库; 提交有关林冠生物多样性调查、在科学研究与监测中的基准作用与保护功能提升、林冠生物多样性环境脆弱性与指示作用等方面的报告。

(2)建立可查询和展示的林冠生物多样性资源调查信息管理及发布平台。通过整理监测所得的林冠生物多样性的图片、数据和标本, 结合GIS应用系

统与基因库, 形成林冠生物多样性信息管理及发布平台, 并对公众开放。

林冠生物多样性监测网的建成, 将保证在野外复杂的环境条件下, 实现有效监测、网络传送与数据分析处理三位一体的研究系统。其成果将服务于中国生物多样性监测与研究网络, 以完善我国林冠生物多样性的公共信息数据库, 完成长期监测、网络化分析管理、中长期预警分析的要求与目标。

参考文献

- Basset Y, Cizek L, Cuenoud P, Didham RK, Guilhaumon F, Missa O, Novotny V, Odegaard F, Roslin T, Schmidl J, Tishechkin AK, Winchester NN, Roubik DW, Aberlenc HP, Bail J, Barrios H, Bridle JR, Castano-Meneses G, Corbara B, Curletti G, da Rocha WD, de Bakker D, Delabie JHC, Dejean A, Fagan LL, Floren A, Kitching RL, Medianero E, Miller SE, de Oliveira EG, Orivel J, Pollet M, Rapp M, Ribeiro SP, Roisin Y, Schmidt JB, Sorensen L, Leponce M (2012) Arthropod diversity in a tropical forest. *Science*, 338, 1481–1484.
- Clark DA, Clark DB (1994) Climate-induced annual variation in canopy tree growth in a Costa-Rican tropical rain-forest. *Journal of Ecology*, 82, 865–872.
- Clark DA, Clark DB (2001) Getting to the canopy: tree height growth in a neotropical rain forest. *Ecology*, 82, 1460–1472.
- Cui QW, Zhu JW (1981) The transmissive and reflective theories of light for various structures of the forest canopy. *Acta Geographica Sinica*, 36, 196–208. (in Chinese with English abstract) [崔启武, 朱劲伟 (1981) 林冠的结构和光的分布——光的透射和反射理论. *地理学报*, 36, 196–208.]
- Emilio T, Nelson BW, Schietti J, Desmouliere SJM, Santo HMVE, Costa FRC (2010) Assessing the relationship between forest types and canopy tree beta diversity in Amazonia. *Ecography*, 33, 738–747.
- Hopkin M (2005) Biodiversity and climate form focus of forest canopy plan. *Nature*, 436, 452.
- Jiang H, Huang YH, Zhou GY, Hu XY, Liu SZ, Tang XL (2011) Leaf morphological and anatomical characteristics of epiphytes and their host trees in lower subtropical evergreen broad-leaved forest. *Ecology and Environmental Sciences*, 20, 1805–1812. (in Chinese with English abstract) [江浩, 黄钰辉, 周国逸, 胡晓颖, 刘世忠, 唐旭利 (2011) 南亚热带常绿阔叶林林冠层附生植物及其宿主叶片的形态解剖特征. *生态环境学报*, 20, 1805–1812.]
- Jiang H, Huang YH, Zhou GY, Hu XY, Liu SZ, Tang XL (2012) Acclimation in leaf morphological and eco-physiological characteristics of different canopy-dwelling epiphytes in a lower subtropical evergreen broad-leaved forest. *Plant Science Journal*, 30, 250–260. (in Chinese with English abstract) [江浩, 黄钰辉, 周国逸, 胡晓颖, 刘世忠, 唐旭利 (2012) 亚热带常绿阔叶林冠层附

- 生植物叶片形态结构及生理功能特征的适应性研究. 植物科学学报, 30, 250–260.]
- Kemmel SW, O'Connor TK, Arnold HK, Hubbell SP, Wright SJ, Green JL (2014) Relationships between phyllosphere bacterial communities and plant functional traits in a neotropical forest. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 111, 13715–13720.
- Lambais MR, Crowley DE, Cury JC, Bull RC, Rodrigues RR (2006) Bacterial diversity in tree canopies of the Atlantic forest. *Science*, 312, 1917.
- Lambais MR, Lucheta AR, Crowley DE (2014) Bacterial community assemblages associated with the phyllosphere, dermosphere, and rhizosphere of tree species of the Atlantic forest are host taxon dependent. *Microbial Ecology*, 68, 567–574.
- Leveau JHJ (2009) Life on leaves. *Nature*, 461, 741.
- Li DZ, Zang RG (2004) The research advances on the structure and function of forest canopy, as well as their temporal and spatial changes. *World Forestry Research*, 17(3), 12–16. (in Chinese with English abstract) [李德志, 臧润国 (2004) 森林冠层结构与功能及其时空变化研究进展. 世界林业研究, 17(3), 12–16.]
- Liu GX, Zang RG, Ding Y (2011) A review of research on epiphytes in forest canopies. *World Forestry Research*, 24(1), 33–40. (in Chinese with English abstract) [刘广福, 臧润国, 丁易 (2011) 林冠附生植物研究综述. 世界林业研究, 24(1), 33–40.]
- Liu HP, Liu SH, Zhu TY, Jin CJ, Kong FZ, Guan DX (1997) Determination of aerodynamic parameters of Changbai Mountain forest. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 33, 522–528. (in Chinese with English abstract) [刘和平, 刘树华, 朱廷曜, 金昌杰, 孔繁智, 关德新 (1997) 森林冠层空气动力学参数的确定. 北京大学学报 (自然科学版), 33, 522–528.]
- Liu WY, Ma WZ, Yang LP (2006) Advances in ecological studies on epiphytes in forest canopies. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 30, 522–533. (in Chinese with English abstract) [刘文耀, 马文章, 杨礼攀 (2006) 林冠附生植物生态学研究进展. 植物生态学报, 30, 522–533.]
- Lowman MD (2009) Canopy research in the twenty-first century, a review of arboreal ecology. *Tropical Ecology*, 50, 125–136.
- Lowman MD, Moffett M (1993) The ecology of tropical rain forest canopies. *Trends in Ecology & Evolution*, 8, 104–107.
- Lowman MD, Rinker HB (2004) *Forest Canopies*, 2nd edn. Elsevier Academic Press, San Diego.
- Lowman MD, Schowalter TD (2012) Plant science in forest canopies—the first 30 years of advances and challenges (1980–2010). *New Phytologist*, 194, 12–27.
- Lowman MD, Wittman PK (1996) Forest canopies: methods, hypotheses, and future directions. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 27, 55–81.
- Ma KP (2015) Biodiversity monitoring in China: from CForBio to Sino BON. *Biodiversity Science*, 23, 1–2. (in Chinese) [马克平 (2015) 中国生物多样性监测网络建设: 从CForBio到Sino BON. 生物多样性, 23, 1–2.]
- Meng QF (2007) Sampling methods for insect diversity in forest canopy. *Chinese Bulletin of Entomology*, 44, 815–820. (in Chinese with English abstract) [孟庆繁 (2007) 森林冠层昆虫多样性研究方法. 昆虫知识, 44, 815–820.]
- Miao SG, Jiang WM (2004) Large eddy simulation of turbulent flow in the forest canopy and the forest boundary layer. *Chinese Journal of Geophysics*, 47, 597–603. (in Chinese with English abstract) [苗世光, 蒋维楣 (2004) 森林冠层和森林边界层大涡模拟. 地球物理学报, 47, 597–603.]
- Nadkarni NM, Parker G (1994) Creation of the canopy research network. *Ambio*, 23, 461.
- Nadkarni NM, Parker GG, Ford ED, Cushing JB, Stallman C (1996) The international canopy network: a pathway for interdisciplinary exchange of scientific information on forest canopies. *Northwest Science*, 70, 104–108.
- Neto RB (1989) Environment—rain-forest canopy remains elusive. *Nature*, 340, 586.
- Norby RJ (1996) Forest canopy productivity index. *Nature*, 381, 564.
- Ozanne CMP, Anhuf D, Boulter SL, Keller M, Kitching RL, Korner C, Meinzer FC, Mitchell AW, Nakashizuka T, Dias PLS, Stork NE, Wright SJ, Yoshimura M (2003) Biodiversity meets the atmosphere: a global view of forest canopies. *Science*, 301, 183–186.
- Peng SL, Ren H (2002) Promoting the sustainable development of forestry through forest canopy research: an introduction to the 3rd International Canopy Conference. *Acta Ecologica Sinica*, 22, 1371–1732. (in Chinese) [彭少麟, 任海 (2002) 通过森林冠层研究促进林业可持续发展——第3届国际冠层大会介绍. 生态学报, 22, 1371–1372.]
- Perry DR (1978) A method of access into the crowns of emergent and canopy trees. *Biotropica*, 10, 155–157.
- Song L, Liu WY (2013) Anthropogenic influence on forest canopies: a review on the 6th International Canopy Conference. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 2632–2635. (in Chinese) [宋亮, 刘文耀 (2013) 人类活动对森林林冠的影响——第六届国际林冠学大会述评. 生态学报, 33, 2632–2635.]
- Wang HJ (1986) A numerical simulation model of radiation in forest canopy. *Chinese Journal of Ecology*, 5(2), 19–23, 27. (in Chinese with English abstract) [王汉杰 (1986) 森林冠层辐射的数值模拟. 生态学报, 5(2), 19–23, 27.]
- Wu Y, Liu WY, Song L, Chen X, Lu HZ, Li S, Shi XM (2016) Advances in ecological studies of epiphytes using canopy cranes. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 508–522. (in Chinese with English abstract) [吴毅, 刘文耀, 宋亮, 陈曦, 卢华正, 李苏, 石贤萌 (2016) 基于林冠塔吊的附生植物生态学研究进展. 植物生态学报, 40, 508–522.]
- Xian JP, Zhang JY, Hu HB (2014) Forest canopy hydrology: A review. *Journal of Northwest Forestry University*, 29(3), 96–104. (in Chinese with English abstract) [鲜靖苹, 张家洋, 胡海波 (2014) 森林冠层水文研究进展. 西北林学院

- 学报, 29(3), 96–104.]
- Yang CH, Crowley DE, Borneman J, Keen NT (2001) Microbial phyllosphere populations are more complex than previously realized. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 98, 3889–3894.
- Yang J, Chen WH, Shui YM, Sheng JS (2008) Investigating methods of epiphytes in forest canopy. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 26, 661–667. (in Chinese with English abstract) [杨洁, 陈文红, 税玉民, 盛家舒 (2008) 林冠附生植物观测方法概述. *武汉植物学研究*, 26, 661–667.]
- Yang L, Sun ZY, Tang GL, Lin ZW, Chen YQ, Li Y, Li Y (2016) Identifying canopy species of subtropical forest by lightweight unmanned aerial vehicle remote sensing. *Tropical Geography*, 36, 833–839. [杨龙, 孙中宇, 唐光良, 林志文, 陈燕乔, 黎喻, 李勇 (2016) 基于微型无人机遥感的亚热带林冠物种识别. *热带地理*, 36, 833–839.]
- Zhang Y, Li ZH, Shi DL (2007) Progress on sampling of forest canopy arthropods. *Forest Pest and Diseases*, 26(1), 29–32. (in Chinese with English abstract) [张云, 李兆华, 石道良 (2007) 森林冠层节肢动物取样研究进展. *中国森林病虫*, 26(1), 29–32.]
- Zheng G, Li SQ (2013) The biodiversity of arthropods from forest canopies. *Acta Zootaxonomica Sinica*, 38, 178–182. (in Chinese with English abstract) [郑国, 李枢强 (2013) 森林冠层节肢动物多样性研究进展. *动物分类学报*, 38, 178–182.]

(责任编辑: 马克平 责任编辑: 黄祥忠)