

•生物多样性监测网络专题•

# 中国森林生物多样性监测：科学基础与执行计划

米湘成<sup>1</sup> 郭 静<sup>1</sup> 郝占庆<sup>2</sup> 谢宗强<sup>1\*</sup> 郭 柯<sup>1</sup> 马克平<sup>1</sup>

1 (中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093)

2 (中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016)

**摘要:** 中国森林生物多样性保护和恢复措施的制订依赖于生物多样性的监测信息。设计一个有效的生物多样性监测网络是一项复杂的系统工程。监测网络的设计框架可分为监测目标、监测对象、监测指标、取样策略、数据采集和处理、网络维护以及组织工作等几个部分。目前, 国际上已有5个得到广泛认可的生物多样性监测网络, 包括地球观测组织-生物多样性监测网络、全球森林监测网络、热带生态评估与监测网络、泛欧洲森林监测网络和亚马逊森林清查网络, 它们的监测目标、监测内容和方法、样地布局及部分监测成果各有特色。我们试图在全国生物多样性监测、森林资源清查和森林生态系统定位研究的基础上, 通过网络布局、建设和运行, 形成中国森林生物多样性监测网(Chinese Forest Biodiversity Monitoring Network, Sino BON-CForBio)及其监测规范体系。该网络的科学目标是, 在全国尺度上研究不同典型地带性森林的生物多样性维持机制、监测森林生物多样性变化并阐明其机理、研究生物多样性变化的效应。该网络布局以《中国植被区划》中的森林植被区划成果作为顶层设计和监测样地选择的核心依据, 设计了4个层级的监测系统; 其监测指标体系以生物多样性核心指标为主, 并结合我国传统森林群落调查方法进行拓展; 预期建成国家水平上的森林生物多样性监测网络, 阐明森林生物多样性维持机制和生物多样性变化的效应, 同时对重大生态保护工程的生物多样性保护效果进行有效性监测和验证型监测。

**关键词:** 监测网络; 设计框架; 顶层设计; 监测规范与体系; 样区布局; 生物多样性核心指标; 有效性监测; 验证型监测

## Chinese forest biodiversity monitoring: scientific foundations and strategic planning

Xiangcheng Mi<sup>1</sup>, Jing Guo<sup>1</sup>, Zhanqing Hao<sup>2</sup>, Zongqiang Xie<sup>1\*</sup>, Ke Guo<sup>1</sup>, Keping Ma<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093

2 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016

**Abstract:** The management and restoration of forest biodiversity is strongly dependent on information regarding biodiversity monitoring. The design of a monitoring network consists of monitoring objects and variables, an effective sampling strategy, data collection and analyses, network maintenance, and organization. Firstly, we reviewed the roles of these components in designing an effective monitoring network. We then introduced five large biodiversity networks, namely, GEO BON (Group on Earth Observations-Biodiversity Observation Network), ForestGEO (Forest Global Earth Observatory), TEAM (Tropical Ecology Assessment and Monitoring Network), Pan-European Forest Monitoring Network, and RAINFOR (Amazonian Forest Inventory Network). Finally, we reviewed the history of Chinese forest biodiversity monitoring, and put forward the aims, monitoring variables and methods, and sampling strategy for forests in the Chinese Biodiversity Monitoring Network. Chinese forest biodiversity monitoring was based on a national forest resource inventory and long-term research of forests ecosystem from 1970s to 1980s. Regulations and methods of biodiversity monitoring were defined during the establishment and operation of the Chinese Forest Biodiversity Monitoring Networks (Sino BON-CForBio). Sino BON-CForBio has important achievements in biodiversity

收稿日期: 2015-11-12; 接受日期: 2016-08-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0500202)、中国科学院植物所植被与环境变化重点实验室研究群项目

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: xie@ibcas.ac.cn

monitoring and maintenance. The planning aims of Sino BON-CForBio include: (1) to study biodiversity maintenance mechanisms of typical zonal forests, (2) to monitor trends of forest biodiversity change and to explore mechanisms at the national scale, and (3) to study the effects of biodiversity change based on manipulation experiments. Results will provide scientific foundations for management and restoration of forest biodiversity. The framework and sampling strategy of Sino BON-CForBio are based on the regionalization of forest vegetation. The framework for Sino BON-CForBio includes four levels of forest biodiversity monitoring. We will integrate essential biodiversity variables and indicators of conventional forest surveys as monitoring variables for Sino BON-CForBio. Sino BON-CForBio aims to establish forest biodiversity monitoring networks at the national scale and will continue to explore mechanisms of biodiversity maintenance and the effects of biodiversity change. In addition, Sino BON-CForBio will monitor the effectiveness of biodiversity conservation and validate the mechanisms of biodiversity change for key ecological conservation projects.

**Key words:** monitoring networks; design framework; top-down design; regulations and indicators system; sampling strategy; essential biodiversity variables; effectiveness monitoring; validation monitoring

生物多样性是自然生态系统生产和服务的基础和源泉。目前,全球人口的爆炸性增长、气候变化以及掠夺式的土地利用,导致超过90%的生境丧失,严重威胁着生物多样性。当前,生物多样性灭绝的速率甚至超过了地质历史时期前五次生物大灭绝的速率(Barnosky et al, 2011)。由于人口众多和经济的快速发展,中国生物多样性保护面临的挑战尤其严峻。生物多样性的严重丧失(40–60%)可能导致生态系统的生产力下降13%,这与臭氧污染和土壤酸化等的危害程度相当,将严重威胁人类的福祉(Hooper et al, 2012)。因此,监测生物多样性变化并阐释其机理,制订生物多样性保护策略显得非常必要和紧迫。

监测是指在一定时期内不同的时间和空间维度上,对一个或多个样区的同一组指标进行的重复测量(Vos et al, 2000)。在按一定方法选择的一组样地中,对自然体系中的种群和群落指标进行测量,以监测其趋势性变化,称为生物多样性监测网络(Vos et al, 2000)。有效的生物多样性监测不仅是收集数据,还需要对数据进行深入分析和挖掘,并以适当的形式把结果呈现给决策者和公众。监测网络应该选择哪些监测指标,如何布局才能使之具有区域代表性并且能进行有效的统计分析,以何种方式呈送给决策者和公众等,都是监测网络设计者所必须考虑的。因此,生物多样性监测网络框架的设计及其各个组分之间的相互衔接,构成了一个复杂的系统工程。

## 1 生物多样性监测网络的设计框架

通过对一系列指标进行连续观测,监测网络可

以回答生物多样性变化的一系列科学问题。由于整个网络由不同样区的观测人员按相同的方案实施监测,并将所得数据进行存储和分析,因此整个网络需要统一的组织和维护(Gardner, 2012)。Vos等(2000)将整个监测网络的框架分为5个部分:(1)监测目标;(2)监测对象和监测指标;(3)取样策略;(4)数据采集和分析;(5)网络维护和组织工作。

### 1.1 监测目标的确定

根据监测目标的不同, Gardner (2012)把监测分为4类:观测型监测(surveillance monitoring)、执行型监测(implementation monitoring)、有效性监测(effectiveness monitoring)和验证型监测(validation monitoring)。(1)观测型监测:主要关注生物多样性是否发生趋势性变化,并为系统提供预警。例如:生物多样性总量每年发生多少变化、发生变化的区域、变化是否显著以及监测到变化的概率等。通过这些观测和分析,我们可以判断是否需要对该区域内的生物多样性加强保护,以避免其进一步下降。(2)执行型监测:只记录生物多样性管理措施是否已经按照协议执行,并不判断其是否已经达到保护的目标。然而,由于科学上有关生物多样性保护管理的不确定性以及人为或自然干扰等不可预测的外部原因,有时即使完全执行了推荐的生物多样性管理措施,也有可能达不到保护的目标。(3)有效性监测:在管理措施实施后,评估生物多样性的状态和趋势是否已经达到保护的目标。但是,有效性监测也可能会造成误导,因为所达到的保护目标可能并不是生物多样性管理措施的直接作用,如某濒危植物种群增长,可能是由于近年来降雨的连续增加或其他自然和人为因子的影响。(4)验证型监测:分

析生物多样性变化是否由保护措施的变化引起, 从而判断是不是特定的管理措施产生了特定的变化效应。通过验证型监测, 可以判断生物多样性管理措施是否需要进一步调整, 以达到相应的保护目标(Lindenmayer et al, 2006)。

## 1.2 监测指标体系及取样方法的确定

近年来, 为实现《生物多样性公约》2020年的目标, 并考虑到生物多样性变化的复杂性, 不同的组织向《生物多样性公约》秘书处提交了100多个生物多样性监测指标, 但其中有2/3的指标并不能指示生物多样性的变化(Bubb et al, 2011)。为了在全世界采用具有可比性的指标比较不同区域生物多样性的变化, 《生物多样性公约》缔约方大会分别于2004年和2006年决定建立生物多样性评估的指标体系并成立生物多样性指标联盟(Biodiversity Indicators Partnership)。Pereira等(2013)提出的生物多样性核心监测指标(essential biodiversity variables), 定义了一组最少的核心指标来监测全球生物多样性变化的主要维度, 这使全球采用相同的生物多样性指标体系和相似的取样方案成为可能, 有利于地区之间的结果比较。目前, 生物多样性监测指标主要包括4类: (1)状态指标, 反映生物多样性及其组分的现状和变化趋势; (2)压力指标, 反映威胁生物多样性的主要因素的变化; (3)响应指标, 反映保护政策或措施的效果; (4)效益指标, 反映生物多样性产品和服务的现状和变化(<http://www.bipindicators.net/indicators/>)。另外, 生物多样性监测指标的选择还需要考虑监测费用, 如生理生态指标的测量往往比较昂贵。

## 1.3 监测网络的时空布局及其动态调整

取样的时空布局决定了统计上显著的生物多样性变化和我们假定的原因之间相关的置信度。随机取样是比较科学的统计方案, 可以避免一些取样上的偏差。例如, 生态学家如果倾向于在成熟林中取样, 监测结论就会倾向于: 大树的密度随时间增加而减小, 但死亡率和增长率会随时间的增加而增加, 造成成熟林偏差(majestic forest bias) (Phillips et al, 2002); 相反, 如果生态学家倾向于在次生林中取样, 监测的结论就会倾向于: 森林的胸高断面积随时间增加而增加, 造成次生林偏差(immature forest bias) (Phillips et al, 2002)。同样, 如果在森林斑块中心或边缘有倾向性地取样, 也会得出有偏差

的结论。另一方面, 也可根据监测区域的生态梯度对不同亚区域分层, 便于对不同亚区域的生物多样性变化进行比较。但也有人反对这种预先分层的方案, 因为亚区域的数量是监测生态梯度的指数函数, 这样做容易导致样区数量庞大。如监测网络有5个主要生态变量, 每个生态变量分为高、中、低3个梯度, 那么就需要分为 $3^5 = 243$ 个样区。

数据采集要尽量排除主观因素, 如计数而不是目测估计。此外, 还需要对整个数据采集方案进行优化, 包括取样频度、取样区数量和重复数量等, 在达到监测目标的同时尽量减少监测费用。但是, 在监测的开始阶段, 监测取样和数据采集方案很难达到完美, 加之监测网络很少有预监测项目, 因此最优方案通常是在监测开始几年后通过逐渐调整优化而成(Vos et al, 2000)。数据分析是用来检验生物多样性变化的假设, 如“生物多样性在监测的时间序列上没有变化”的零假设, 需要按事先设计的统计方法进行分析。

监测指标和取样频度需要不断优化, 同时, 监测数据要保证高质量。数据质量控制最重要的部分是数据统计分析以及结果的阐述。为了确保监测质量, Board (1990)建议对监测分析结果进行经常性的同行评议。另外, 大型监测网络必须在网络设计之初就考虑到网络的组织工作, 包括数据采集、储存、分析以及对监测网络的维护等。

## 1.4 监测网络的有效性评价

全国范围内的生物多样性监测需要耗费大量的时间和财力, 因此监测系统能否真正起到监测生物多样性变化的作用至关重要。根据Elzinga等(2009)的分类, 监测结果可分为结论性结果和非结论性结果。结论性结果可为监测目标提供明确的结论, 而非结论性结果由于取样量不足或取样方案等问题, 不确定性很高, 从而难以做出明确的判断, 因此应该尽量避免非结论性的监测。另外, 在进行生物多样性监测网络的设计时, 取样策略必须是可操作的, 并需要考虑森林群落结构的复杂性以及监测区域内时空上的异质性。

# 2 地球观测组织-生物多样性监测网络和国际森林生物多样性监测网络的进展

## 2.1 地球观测组织-生物多样性监测网络

2001年, 在南非约翰内斯堡举行世界可持续发

展峰会期间,各成员国都意识到了获取全球共享的、足够的环境信息对于共同管理地球环境的紧迫性和重要性(Scholes et al, 2008)。接下来,经过各国协商和设计,于2005年成立了地球观测组织(Group on Earth Observations, GEO)。目前, GEO是一个由87个政府、欧盟委员会和64个国际组织志愿成立的合作组织,目标是提高与全球环境相关的信息的可用性和协作性(Scholes et al, 2012)。在GEO提出的9个与环境相关的优先社会惠益领域中,生物多样性是其中之一。2008年5月,联合国《生物多样性公约》缔约方会议发起成立了地球观测组织-生物多样性监测网络(Group on Earth Observations-Biodiversity Observation Networks, GEO BON, <http://geobon.org/>),来协调全球生物多样性信息的组织和合作。

生物多样性包括不同时空尺度的生物和环境等各方面复杂的信息,因此GEO BON的主要目标是通过制订数据结构、标准以及设计监测网络和取样策略来提高生物多样性监测的一致性(Scholes et al, 2008)。《生物多样性公约》要求GEO BON协助设计一组全球通用的生物多样性监测指标来评估生物多样性的变化趋势,以贯彻其2011–2020生物多样性战略规划的爱知目标([www.cbd.int/sp/](http://www.cbd.int/sp/)),因此, GEO BON设计了生物多样性核心监测指标(Pereira et al, 2013)。然而, GEO BON不是一个实体监测组织,它的主要目标是指导数据收集、监测标准化以及生物多样性信息的交换。目前, GEO BON包括8个工作组,涵盖的领域有:陆地生态系统监测、淡水生态系统监测、海洋生态系统监测、生态系统服务、立地和遥感数据的模型整合以及数据整合与协作。Scholes等(2012)对GEO BON的定位总结了8点: (1)数据开放共享; (2)监测生物多样性的状态和变化; (3)服务于生物多样性监测用户的需求,且监测标准容易执行; (4)重点跟踪较大空间尺度的生物多样性变化; (5)覆盖全球; (6)覆盖不同的生物类群; (5)质量控制; (6)经济高效; (7)可持续; (8)全球协作。

GEO BON的一个很好的策略是鼓励国家和地区成立不同水平的子网络,如欧盟成立了EU BON (<http://www.eubon.eu/>), 亚太地区成立了AP BON (<http://www.esabii.biodic.go.jp/ap-bon/index.html>),以逐步达到全球水平的监测网络,并均衡区域、国家和全球尺度的角色定位。

## 2.2 全球森林监测网络

美国史密森热带研究所的热带森林研究中心和哈佛大学等单位推动建立的全球森林监测网络(Forest Global Earth Observatory, ForestGEO, <http://www.forestgeo.si.edu/>),是目前全球最大的森林生物多样性监测网络(Anderson-Teixeira et al, 2015)。ForestGEO在全球25° S–61° N之间的24个国家和地区建立了63个2–120 ha大小不等的样地,其中90%的样地面积超过10 ha (Anderson-Teixeira et al, 2015)。样地涵盖了全部12种土壤类型中除旱成土(aridisol)之外的11种,总面积达到1,653 ha,较好地代表了不同的地带性森林,包括热带雨林、北美和中国东部的温带和亚热带森林。

ForestGEO网络采用统一的监测标准,即对胸径大于1 cm的每个木本植物个体挂牌、空间定位、鉴定到种并测量胸径,每5年复查1次,同时还制订了监测幼苗、种子产量、物候、枯倒木和凋落物等植物生活史各阶段的方案。

通过对大型样地的长期监测,人们发现ForestGEO样地的森林群落处于高度的动态变化中。在对巴拿马的BCI (Barro Colorado Island)样地前18年的监测中,发现胸径大于1 cm的树种的周转率超过40%, 75%的物种多度变化超过10%,表明森林群落正在响应全球气候变化(Leigh, 2004); Chisholm等(2014)在对ForestGEO的12个样地的研究中发现,在10年的时间尺度上,环境变化是种群变化最重要的驱动因子。Chave等(2008)对ForestGEO的10个热带森林样地的研究发现,有9个干扰较少的热带森林中生长速度较慢物种的优势度正在增加,其中5个样地增加显著,可能反映出这些森林对全球气候变化的响应,也有可能是因为它们正在从过去的干扰中恢复。在对ForestGEO的6个热带样地超过10年的监测中, Wright和Calderon (2006)发现藤本植物花的数量和种子产量一直在增加,这与在巴拿马的BCI样地及其他地区监测的结果(Ingwell et al, 2010, Schnitzer & Bongers, 2011)一致。在巴拿马的BCI样地和马来西亚的Pasoh样地都监测到地上净初级生产力减少的现象(Feeley et al, 2007),但在美国马里兰州的次生林中却监测到了净初级生产力增加的现象(McMahon et al, 2010),这可能与成熟林和次生林对气候变化的响应不一致有关。另外, ForestGEO也试图探索引起森林生物多样性变化的

驱动机制。如: 在ForestGEO的4个热带样地中, Feeley等(2007)和Dong等(2012)发现, 树种的生长速率与夜间温度呈负相关, 可能是由于夜间的呼吸速率增加导致了碳储存的减少。

### 2.3 热带生态评估与监测网络

与ForestGEO相比较, 热带生态评估与监测网络(Tropical Ecology Assessment and Monitoring Network, TEAM, <http://www.teamnetwork.org/>)是一个更为综合的热带生物多样性监测网络。TEAM由保护国际、密苏里植物园、史密森研究院和野生生物保护区学会共同发起(Baru et al, 2012), 跨越中美、南美、东南亚和非洲热带森林的17个研究点, 每个样区采用相同的气候、植被、陆地脊椎动物和样区周围人类-自然系统的监测标准, 人类-自然系统的监测内容包括土地利用变化、水文过程、生境连续性等。

与ForestGEO专注于群落水平的生物多样性监测和机理研究相比, TEAM更侧重于多尺度分析。TEAM的目标是从样地尺度(1 ha)、景观尺度、区域尺度到全球尺度上监测热带森林生物多样性动态和生态系统服务功能的变化。在样地尺度上, 每个TEAM样区由在核心研究区内的至少6个1 ha森林样地组成, 样地在研究区域内设置为随机分布, 间距在2 km以上, 对胸径在10 cm以上的木本和藤本植物进行空间定位并鉴定到种, 每年复查1次, 用于监测和研究热带森林生物多样性和森林碳库的动态变化及机制。Cavanaugh等(2014)分析了分布在东南亚、非洲和美洲的11个TEAM样区59个1 ha样地的地上生物量与环境因子和生物多样性的关系, 发现种间生态位互补效应与选择效应同时影响热带雨林的地上碳储量, 表明生物多样性与生态系统功能的关系也存在于生物多样性较高的热带雨林中。

在景观尺度上, TEAM要求在180 km<sup>2</sup>的范围内, 按每2 km<sup>2</sup>布置1个红外相机的密度, 在整个样区内布置60台红外相机, 对包括哺乳动物、地面活动鸟类等在内的陆生脊椎动物进行调查(Youn et al, 2011)。在区域和全球尺度上, 截至2012年4月, TEAM的17个样区已累积达70万张陆生脊椎动物照片, 成为全球最大的陆生脊椎动物照片数据库, 为理解热带森林动物群落动态提供了重要的数据源(Baru et al, 2012)。如通过对分布在乌干达、印度尼

西亚、哥斯达黎加和巴西等6个TEAM样区的5.1万张照片进行分析, Ahumada等(2011)鉴定出105种哺乳动物, 发现与部分片断化森林区和连续森林区相比较, 高度破碎化地区具有较低的物种丰富度、物种多样性和功能多样性。

### 2.4 泛欧洲森林监测网络

泛欧洲森林监测网络(Pan-European Forest Monitoring Network, PEFMN)由国家水平上的森林清查扩展而成, 主要目标是保障欧洲森林的可持续利用。其主要监测目标有: (1)对由人为或自然压力导致的欧洲森林时空变化进行周期性评估; (2)理解由人为或自然压力引起森林变化的驱动机制(Ferretti & Chiarucci, 2003)。

泛欧洲森林监测网络跨越40多个国家, 由6,800个以上的第一层次(Level 1)样地和760个以上的第二层次(Level 2)样地组成, 两个层次上样地的监测相互补充(Ferretti, 2010)。为了达成第(1)个目标, 要求第一层次样地代表欧洲水平上的森林信息, 因此第一层次样地由大范围内在时间和空间上有代表性的森林样地组成, 普遍采用以确定的地理坐标为圆心和一定长度为半径的样圆, 样圆面积通常为2,400 m<sup>2</sup>, 每个欧盟国家最少应该在16 km × 16 km面积内设置一个样圆。每个国家可以采用不同的取样策略(随机取样或系统取样等), 但同一国家的样地要求设置成相同的形状和面积。2003–2006年, 欧盟对第一层次样地的土壤、森林结构和植物多样性进行了调查(Ferretti & Fischer, 2013)。

为了理解森林的变化机制, 第二层次上的样地主要由物种组成、生境类型等尽可能相同的森林区组成, 且样地的数量至少为第一层次样地的10%, 样地的最小面积为0.25 ha。同时, 为方便长期监测和空间定位, 可在样地内设置子样地。此外, 第二层次样地还可设置缓冲区, 缓冲区的设置根据立地条件而定, 但必须足以确保样地能避免附近道路等干扰的影响。为了方便数据分析, 应尽可能在相同类型的森林区设置重复, 而不是在大批不同的森林类型中分别设置单个的第二层次样地(Ferretti & Fischer, 2013), 使样地的变化机制难以比较。

利用1987–2007年泛欧洲森林样地监测网络的数据, Carnicer等(2011)分析了干旱对欧洲南部森林的脱叶率、死亡率和食物网的影响。他们发现欧洲

低地针叶树种的种群数量几乎持续下降,同时干旱地区脱叶率增加的趋势与死亡率增加的趋势是一致的,而且严重干旱的影响与昆虫和真菌引起脱叶率的突然变化导致了食物网长期的断裂效应。另外,通过对泛欧洲森林监测网络第二层次样地土壤硝态氮、铵态氮和硫含量在1999–2004年的连续监测,Lorenz等(2008)发现硫的沉降减少了1/4,这是欧洲《大范围跨境空气污染公约》(Fraenkel, 1989)对空气污染成功控制的结果。但是,硫、硝态氮和铵态氮在许多森林样地还是超过公约的阈值,特别是硝态氮和铵态氮,这些氮和硫的沉降引起植物群落有轻微向喜氮和喜酸植物演替的趋势(van Dobben & de Vries, 2010)。以上这些监测都为进一步制订生物多样性保护策略提供了非常关键的数据支持。

## 2.5 亚马逊森林清查网络

亚马逊森林清查网络(Amazonian Forest Inventory Network, RAINFOR) (<http://www.rainfor.org/>)是近年来崛起的另一个区域尺度上的森林监测网络。亚马逊地区的森林面积占全球森林面积的45%,储存了全球20%的碳,其重要性毋庸置疑(Malhi & Grace, 2000)。RAINFOR的主要目标是通过分析环境因子与森林在空间上的变化,理解亚马逊森林的生产力及其动态与环境因子的关系(Malhi et al, 2002)。其主要关注的环境因子包括水、光和土壤养分(Malhi et al, 2002)。后来,又增加了4个目标:(1)量化森林生物量和碳周转的长期动态变化;(2)分析当前森林结构、生理生态、生物量及其动态变化与局部气候和土壤养分的关系;(3)理解生产力、死亡率和生物量之间的关系;(4)通过上述(1)和(3)之间的关系,理解气候变化如何影响亚马逊森林的生物量和生产力,为整个区域的碳动态模型提供参数。

RAINFOR的样地由一次调查样地、多次调查样地和精细监测样地组成。样地建设从2001年开始,并将亚马逊地区原有的样地纳入网络。样地面积通常为1 ha左右,形状可设为正方形或长方形,对胸径大于10 cm以上的木本植物个体进行挂牌、空间定位、鉴定到种,并测量木本和藤本植物的胸径、树高以及叶面积指数(Phillips et al, 2003)。整个网络的样地设置在地图上随机定位,以避免因为偏向于选择成熟林或次生林,造成对森林结构和生物量估计的偏差。另外,尽可能在原来取样较少的区域取样,避免在已有样本密集区重新取样,使样地覆盖

整个亚马逊地区的环境梯度和森林类型(Phillips et al, 2003)。除了森林结构参数以外,还对土壤养分、土壤物理特性、叶功能性状、地形等进行监测,并建立自动气象站(Malhi et al, 2002)。

RAINFOR的研究发现,气候变化和人类干扰将强烈影响亚马逊森林的结构和动态(Barlow et al, 2011)。Malhi等(2009)采用19个气候变化模型模拟了亚马逊地区未来的气候变化情景对亚马逊森林的影响,表明亚马逊地区东部的季节雨林在21世纪可能面临更大的水胁迫,有可能转变成稀树草原。Brienen等(2015)分析了321个亚马逊地区的森林样地,证实了亚马逊森林是一个长期的碳库,但与20世纪90年代比较,在过去10年里地上生物量增长的速率大约减少了1/3。他们认为这可能是由于气候变化引起树木死亡率增加,从而导致森林碳储存随时间减少引起的(Brienen et al, 2015)。另有研究表明,十多年来,群落的定居率和死亡率在亚马逊森林中普遍增加,这可能是由全球气候变化导致,将来随着亚马逊老龄林的饱和、死亡率的增加以及增温所导致的呼吸速率增加,碳库有可能转化为碳源(Phillips et al, 2008)。

与RAINFOR类似的还有非洲热带雨林监测网络(African Tropical Rainforest Observation Network, afriTRON, <http://www.afritron.org/>),监测跨越非洲的热带雨林生物多样性、森林碳库的变化等。

## 3 中国森林生物多样性监测研究进展

### 3.1 森林资源清查体系和中国森林系列丛书的出版

森林资源广义上指林业用地的各种林业面积和各种森林蓄积量,同时还包括森林中的野生动植物资源、药用植物资源等。我国的森林资源清查是以掌握宏观森林资源现状和动态为目的,以省为单位,以固定样地为主,进行定期复查的森林资源调查方法,是全国森林资源与生态状况综合监测体系的重要组成部分(林来仙和岳祥华, 2007)。

全国第1次森林资源清查从1973年开始,到1976年结束。此后,每5年清查一次,优化完善了各省清查体系,并引入了遥感、全球定位和地理信息系统等技术(林来仙和岳祥华, 2007)。从第6次森林资源调查开始,国家林业局下发了《国家森林资源连续清查主要技术规定》,要求固定样地的设置按系统抽样的原则,在公里网交点上设置面积为

0.067 ha的固定样地, 对样地内胸径为5 cm以上的个体测量胸径。

根据我国8次森林资源清查的结果, 森林面积由第1次清查的1.22亿ha增加到第8次的2.08亿ha, 森林蓄积量由86.6亿 $\text{m}^3$ 增长到151.4亿 $\text{m}^3$ 。同时, 森林资源结构也更加优化, 针叶林、阔叶林、针阔混交林的比例由第5次森林资源清查的51:48:1变为37:55:8, 呈现针叶林减少、阔叶林和针阔混交林增加的趋势。但是, 我国森林小径级株数比例由第4次森林资源清查时的55%上升到第8次森林资源清查时的73%, 大、特径级比例由13%下降到3% (许传德, 2014)。从我国森林资源清查数据的布局来看, 总体上能较好地进行观测型监测和执行型监测, 如: 监测了我国“三北”防护林建设工程、20世纪90年代的造林灭荒行动及本世纪初启动的天然林保护, 但由于总体上面积都较小, 很难进行验证型监测, 即分析和验证生物多样性变化的机制。

在早期森林资源清查资料的基础上, 林业部从20世纪70年代开始组织编写《中国森林》系列丛书, 各省、自治区林业主管部门也都成立了相应的森林编辑委员会。丛书按统一规程编写, 主要内容包括: 森林的自然地理环境; 重要森林类型的水平和垂直分布、组成结构、生境和更新演替等规律以及应采取的经营措施; 重要森林病虫害及其防治等。另外, 《中国森林》介绍了全国400多个森林植被类型(相当于植被分类中的群系)及其分布规律、更新演替和生长发育规律等(中国森林编辑委员会, 2000)。大部分省、自治区都出版了相应的单行本, 《中国森林》系列丛书对认识我国森林的主要类型及其分布规律有重要作用, 也推动了森林生物多样性监测(宫连城, 1988)。

### 3.2 森林生态系统定位研究

20世纪50年代末至60年代初, 天然和人工生态系统结构与功能的定位观测逐渐受到重视。1958年, 中国科学院在云南西双版纳建立了我国第一个生物地理群落定位站, 一些科研院所和高校开展了小规模定位监测。之后, 中国科学院又于1988年开始筹建中国生态系统研究网络(Chinese Ecosystem Research Networks, CERN)。CERN的主要目标是对全国不同区域和不同重要生态系统类型(包括农田、森林、草地、湖泊和海湾生态系统)进行长期监测与实验, 同时结合遥感与模型模拟等方法, 研究我国

生态系统的结构与功能、过程与格局的变化规律, 并开展生态系统优化管理与示范。CERN确定了29个初始成员站, 设计了生态站—分中心—综合中心的三级数据库和共享系统(杨萍等, 2008)。目前, CERN共建有40多个生态系统类型站, 其中包括长白山森林生态系统定位研究站等11个森林定位研究站, 形成了覆盖全国主要生态系统类型和区域的网络。从1998年开始, CERN采用统一的监测规范, 对水分、土壤、气候和生物4个方面进行监测, 先后出版了森林、草地、农田等生态系统的观测与分析手册。CERN的森林监测主要通过设置1–2个综合观测场进行, 每个综合观测场选择1个100 m × 100 m的样方或2–3个40 m × 40 m的样方(于贵瑞和于秀波, 2013)。

经过30多年的监测和研究, CERN建立了规范的指标体系、标准规范和规章制度体系, 形成了国家尺度上的生态系统监测网络, 获得了大量科学数据, 并有一批高水平理论成果发表, 如: 内蒙古草原站在25年的监测基础上, 研究了多样性与稳定性的关系及其机制, 得出了“群落尺度的稳定性主要来自物种之间和功能群之间的补偿作用”的研究结论(Bai et al, 2004); 鼎湖山站通过20多年的观测研究, 否定了“成熟森林生态系统没有碳汇功能”的假说, 推动了生态系统生态学非平衡理论框架的建立(Zhou et al, 2006)。

与CERN同一时期开始建设的规模较大的监测网络还有森林生态系统研究网络(Chinese Forest Ecosystem Research Network, CFERN) (<http://www.cfern.org/>)。1978年, 林业部正式确立“森林生态系统研究”规划, 制订了全国发展规划草案。20世纪80年代, 林业部门建立了30多个定位监测点, 监测“三北”防护林等林业防护林体系的生态功能及环境效益。1992年, 林业部总结了森林生态系统定位研究工作, 成立了由11个定位站组成的CFERN, 制订了“林业部森林生态系统定位研究网络规划”。CFERN管理委员会由国家林业局有关专家和科学家组成, 网络管理中心设在中国林业科学研究院大岗山森林生态系统定位研究站(王兵等, 2004)。

目前, CFERN拟在全国布设102个站点, 包括已经建成的88个站点, 以形成从南到北沿热量梯度变化以及从东到西沿水分变化梯度的研究样带。CFERN的主要目标是: 以十字式网络定位观测为



基础,从个体、种群、群落到生态系统4个水平上同步对森林生态系统结构和功能进行长期、全面的监测,揭示森林生态系统组成、结构与气候环境之间的关系,监测人类活动对系统的冲击与其自我调节过程,并建立森林生态环境动态评价、监测和预警体系(王淑元和林升寿,1995)。CFERN也建立了一套监测标准规范体系(<http://www.cfern.org/jczb/index.asp/>)和取样标准方法:样区确定后,在森林内坡面的上部、中部和下部各设置一条样带,在样带内选择代表性地段设置0.1–1 ha样地,在样地内设置10 m × 10 m的乔木样方、2 m × 2 m的灌木样方和1 m × 1 m的草本样方各3–5个。CFERN建立了国家尺度上的森林生态系统监测网络和规范的指标体系,并在中国森林生态系统固碳(Wang D et al, 2013)、生态系统服务(Niu & Wang, 2013)和地球化学循环(Han et al, 2013)等方面取得了重要成果。

在CERN、CFERN以及农业和气象部门、高等院校观测站点的基础上,2004年,科技部成立了国家生态系统观测研究网络综合研究中心,遴选了35个基础条件好、观测和研究水平较高的野外观测站,其中包括17个国家森林生态站,成立了国家生态系统观测研究网络(National Ecosystem Research Network of China, CNERN) (<http://www.cnern.org/>)。

### 3.3 中国森林生物多样性监测网络(CForBio)

为推动中国森林生物多样性监测和分析方法的标准化进程,中国科学院生物多样性委员会(以下简称多样性委员会)开始在中国不同典型地带性森林中建立标准化固定样地,用于不同气候带地带性森林生物多样性的长期监测和比较研究(马克平,1994)。随后,在国家自然科学基金“九五”重大项目以及林业部全球环境基金“森林植物生物多样性的动态监测”的支持下,多样性委员会采用标准化、规范化的统一方法和点面结合的网络途径,开始筹建“中国生物多样性动态监测网络”。首先,在中国科学院鼎湖山森林生态系统定位研究站、神农架生物多样性定位研究站、北京森林生态系统定位研究站以及长白山森林生态系统定位研究站等地都设置了1–5 ha不等的固定样地,对样地内各物种进行了空间标定和个体参数的测量。继而,《森林生物多样性监测规范和方法》一文发表(贺金生等,2000)。该文详细介绍了森林动态监测样地的选择、设置、调查等方面的工作方法和流程,为进一步明确和规范

森林动态监测提供了详实的基础资料。该阶段工作的主要特征是,将中国森林生态系统研究与国际上主流的研究方法接轨,积累了森林长期样地建设的经验,也为中国森林生物多样性研究领域培养了大批人才,奠定了后期进行更大规模的森林样地建设和学术研究的基础。

按照ForestGEO样地建设的技术规范(Condit, 1998),以2004年代表温带森林的长白山25 ha样地建成为标志,多样性委员会正式启动了“中国森林生物多样性监测网络”(Chinese Forest Biodiversity Monitoring Network, CForBio)的建设。随后,在2005–2007年,代表中亚热带森林的古田山24 ha样地、代表南亚热带森林的鼎湖山20 ha样地和代表热带季雨林的西双版纳20 ha样地建成。陆续建立的样地还包括,亚热带高海拔的八大公山25 ha样地、喀斯特季雨林的弄岗15 ha样地、暖温带中部的东灵山20 ha样地、暖温带南部的宝天曼25 ha样地。同时,还联合院外单位建立了若干大型森林监测样地,如:小兴安岭丰林和凉水的阔叶红松(*Pinus koraiensis*)林样地、浙江天童的常绿阔叶林样地以及大兴安岭北方林样地等。

自2004年开始建立以来,CForBio邀请了一批在生物多样性监测和研究方面知名的国内外专家,对研究人员进行培训和指导,如加拿大蒙特利尔大学的Pierre Legendre教授、阿尔伯特大学的何芳良教授、台湾东海大学的孙义方教授、ForestGEO的Richard Condit、Joseph Wright、Nathan Swenson、Liza Commita和Helene Muller-Landau博士等,为研究人员举办了“种子生态学与植物功能性状”、“计算机R语言”以及“数据管理”等培训。此外,自2011年,在中美双方国家自然基金委员会的支持下,CForBio和ForestGEO每年在美国或中国举办一次数据分析和论文写作研讨班,以加强我国生态学者的能力培养及其与ForestGEO各样地的交流。

CForBio的建立标志着我国森林生物多样性监测网络初具规模,同时,在生物多样性维持机制研究方面也取得了比较好的进展,主要成果如下:

(1)各样地的物种大部分呈聚集分布。虽然物种的分布格局受多个生态学过程的影响,如种子的扩散限制、样地生境异质性、同种个体之间的密度制约效应等,但是各样地的大部分物种呈聚集分布,如在长白山样地(Hao et al, 2007)、鼎湖山样地(Li et



al, 2009)和八大公山样地(Guo et al, 2013)中, 优势种和常见种都表现出显著的空间聚集分布。

(2)不同纬度地带的森林中都存在普遍的密度制约现象。在南亚热带的鼎湖山样地(Bin et al, 2012)、中亚热带的古田山样地(Zhu et al, 2010)、北亚热带的八大公山样地(Lu et al, 2015)和温带的长白山样地(Bai et al, 2012)发现大部分物种都存在密度制约现象。另外, Chen等(2010)发现, 在古田山样地, 生境异质性的对幼苗动态的相对贡献(约占34.6%)要高于密度制约机制的相对贡献(约占17.7%); Lin等(2012)发现, 在西双版纳热带季雨林样地中, 雨季幼苗的密度制约强度大于旱季。

(3)生态位过程和中性过程在不同地带性森林的群落构建中都发挥着比较重要的作用。Legendre等(2009)发现, 在古田山样地中, 中性过程和生态位过程对亚热带常绿阔叶林群落组成变化的影响大致相等(都在30%左右)。同样, Shen等(2009)和Wang等(2011)也发现, 在古田山和长白山样地中, 只有生态位过程和扩散限制共同作用才能更好地解释种-面积曲线和 $\beta$ 多样性格局。Zhang等(2011)发现, 古田山亚热带森林树种的分布与土壤水分和养分分布显著相关。Bin等(2010)在鼎湖山样地中也发现, 中性过程和生态位过程共同决定森林的分布格局和 $\beta$ 多样性格局。另外, 在鼎湖山(Wang et al, 2009)、古田山(Lai et al, 2009)和八大公山(Wang et al, 2014b)样地中, 不同树种都表现出与生境的显著关联。

(4)不同纬度地带森林的系统发育结构和功能结构都显著地偏离随机结构。例如, Liu等(2013)对古田山样地5种性状空间分布的研究结果发现, 大部分性状受到非随机过滤作用的影响, 呈现聚集分布, 且环境过滤联合扩散限制对群落功能结构有着重要影响, 但群落进化历史对群落功能结构的影响较小。Wang等(2015)将长白山样地森林群落与代表不同生态过程的模型模拟群落的系统发育和功能 $\beta$ 多样性相比较, 发现扩散限制能较好地拟合小尺度上的系统发育 $\beta$ 多样性与功能 $\beta$ 多样性, 说明在温带森林中种间相互作用可能并不重要。同时, Wang XG等(2013)在分析长白山样地单个个体周围物种数、系统发育多样性时也发现了类似的结论。Yang等(2013)进一步分析了9个温带和热带样地个体周围的系统发育多样性, 发现个体周围的系统发育多

样性虽然没有表现出纬度梯度, 但都表现出非随机结构, 表明局部群落生态过程对群落构建有重要作用。Mi等(2012)采用群落系统发育学的方法分析了包括CForBio的4个样地在内的亚洲11样地与美洲的4个森林样地, 结果发现干扰较小的9个森林中有6个支持生态位分化假说, 而6个干扰占主导以及其他3个干扰较小的森林并不支持该假说。Yang等(2014)还分析了不同生活史阶段和不同尺度上的系统发育和功能结构, 结果支持在大尺度上环境因子决定群落结构, 而在小尺度上种间相互作用决定群落结构的结论。

(5)不同纬度地带都有较强的种间相互作用。在长白山温带阔叶红松林样地, Wang等(2010)分析了该样地内所有胸径大于10 cm树种之间的种间关系, 结果表明约有31%的物种对呈显著的负相关(排斥), 明显高于热带雨林的6%, 该结果不支持中性理论假说。Wang等(2014a)在八大公山亚热带森林中发现, 大约47%的物种对在小尺度上呈显著的种间相互作用, 而且乔木树种比灌木树种表现出更强的种间相互作用。

大样地中植物样本量大, 因此建立大型监测样地的工作量相当繁重, 但单独一个样地往往不能代表整个地带, 只能代表所在地区的少数林型。如长白山建立的25 ha样地虽然能较好地代表地带性森林——阔叶红松林, 但其所在的植被地带——温带南部针叶落叶阔叶混交林跨度较大, 即使是同一类型的阔叶红松林, 在长白山和小兴安岭也有差异。同时, 该地区除了阔叶红松林以外, 面积较大的还有杨桦(*Populus davidiana*–*Betula platyphylla*)林、落叶松(*Larix olgensis*)林、云冷杉(*Picea asperata*–*Abies fabri*)林等。因此, 中国生物多样性监测与研究网络(Sino Bon)于2015年成立后, 开始在现有的CForBio基础上, 建设中国森林生物多样性监测网(Sino Bon-CForBio), 并依据植被地带性规律适当增加监测样地, 以便在全国水平上更好地监测森林生物多样性变化。

## 4 中国森林生物多样性监测网的整体设计

### 4.1 科学目标

第一, 不同典型地带性森林的生物多样性维持机制研究。Sino BON-CForBio将以大样地为核心, 研究不同典型地带性森林的生物多样性维持机制。

同时,在各森林植被区的主要森林类型中设立较大的样地(1–5 ha),研究各植被区内主要森林类型的生物多样性维持机制,并进行比较。

第二,生物多样性变化的监测及驱动机制研究。(1)在全国尺度上监测森林生物多样性变化。Sino BON-CForBio是一个观测型监测网络,可在已有的CForBio基础上,以森林大样地为核心,选择不同森林类型的典型分布点建立植物群落监测样地,并合理取样以避免前述各种可能的取样偏差。另外,从时间和空间上扩展森林植物多样性监测工作:时间上开展长期的规范监测工作;空间上需按照生态梯度和区域代表性,涵盖不同的森林群落类型,在这些森林中开展统一的监测活动,为决策者和公众提供生物多样性变化的信息,为生物多样性保护提供预警。(2)阐明森林生物多样性变化的机理。生物多样性变化可能是由人为因素、自然因素或多种因素相互作用引起的。部分样地要能够成为验证型监测样地,即探索生物多样性变化的机理,为生物多样性保护决策提供信息支持。(3)在验证生物多样性变化机理的基础上,为生物多样性恢复提供管理示范,部分样地要成为有效性监测样地,监测生物多样性恢复措施是否有效。

第三,生物多样性变化效应的研究。由于人为干扰,生物多样性面临严重威胁,目前尚难评估由于我国生物多样性的减少所导致的生态系统功能变化,但已有少数相关研究,如以江西新岗山“生物多样性–生态系统功能”50 ha大型控制实验平台为基础,研究不同生物多样性水平下的生态系统功能和服务,以探讨在生物多样性锐减的情景下生态系统功能的变化(Bruelheide et al, 2014)。

## 4.2 网络设计

### 4.2.1 总体设计

《中国植被》(吴征镒, 1980)和《中华人民共和国植被图(1:100万)》(中国植被图编辑委员会, 2009)将我国陆地植被划分为8个植被区域、28个植被地带、119个植被区以及453个植被小区。其中,森林植被区域5个、森林植被地带14个、森林植被区57个和森林植被小区212个(附录1, 2)。森林生物多样性监测网必须对中国森林植被区和主要森林群落类型具有充分的代表性,因此,中国植被中有关森林植被区划的成果是顶层设计和监测样地布局的最重要依据。

Sino BON-CForBio涵盖了中国主要气候带的地带性森林类型,为理解森林生物多样性形成和维持机制沿纬度的变化提供了理想的实验平台。该网络的大样地是森林生物多样性监测网最重要的核心样地,在顶层设计中必须充分体现。

### 4.2.2 分层设计

基于上述顶层设计原则,结合Sino BON-CForBio对生物多样性核心指标的监测要求,以及中国科学院森林生物多样性监测的现状,拟将其分为4个层级:

第一层:在5个主要森林植被区域设置大型固定样地,主要监测对象是典型地带性森林植被。每个植被区域设1–3个大型固定监测样地(图1),覆盖我国14个森林植被地带,样地面积在16–25 ha以上,包括原有的CForBio样地。其主要目标是监测群落内优势种和常见种的多度、群落多样性的变化,研究物种共存和群落变化的机制,进行验证型监测。

第二层:在每个植被地带的森林植被区(共57个,附录2),选择典型的森林群落(附录3),设置50 m × 50 m至100 m × 100 m的固定样地。群落类型与大型固定监测样地的群落类型不重复,根据森林群落的分布面积可设置一定数量的重复,以监测各森林植被区主要森林群落动态和生物多样性变化,并开展样地间的联网研究,揭示生物多样性变化机理,进行验证型监测。

第三层:在森林植被小区(212个)设置多个小型样地(20 m × 20 m至50 m × 50 m),以监测主要森林植被类型(可以群系为基本单位)生物多样性核心指标的变化。此层次上的监测主要是观测型监测,观测植被区内森林生物多样性是否有趋势性变化。

第四层:长期野外控制实验。在观测实验中,可影响生物多样性变化的因素很多,包括气候变化、氮沉降、人为干扰和管理措施等,即使是验证型分析也只是由管理措施与生物多样性变化的显著相关性推导而来。在建立长期监测样地的同时,还需要在典型森林生态系统中建立针对重要生物多样性影响因素的长期野外受控实验,并开展对照与处理样地的长期监测,从而阐明单个影响因子及其与其他影响因子的交互作用对生物多样性的影响及作用机制。例如,在以往的观测实验中,很难验证生物多样性变化的效应,而在江西新岗山建立的50 ha的生物多样性–生态系统功能大型控制实验

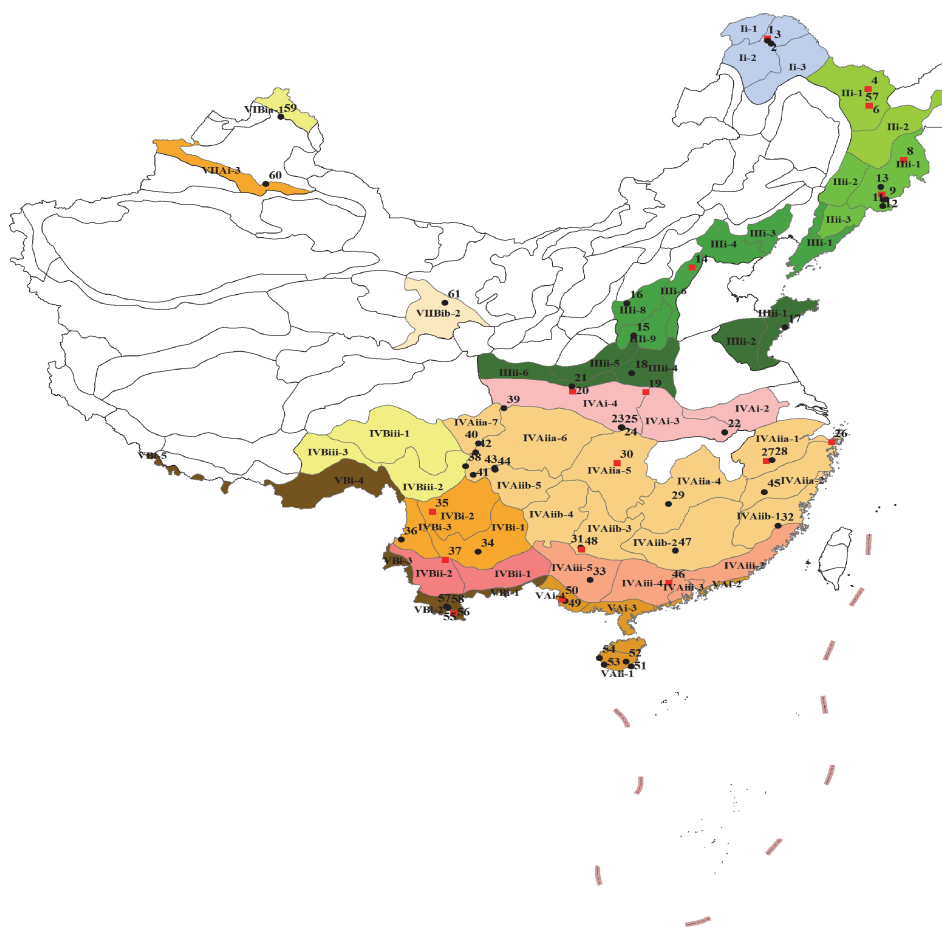


图1 中国主要森林类型的代表性群落监测样地布局。黑色圆点表示森林植物区代表性群落样地, 红色方块表示已建成或正在建设的大样地。图中从Ij-1到VII B1b-2均为植被区的编号, 详见附件2。

Fig. 1 Samples distribution of representative forest communities in China. The black circles stand for representative forest communities, and the red squares for being constructed or constructed large forest dynamic plots. The code from Ii-1 to VIIBib-2 represents different forest areas in Appendix 2.

平台,可以排除观测实验中较多的其他干扰因素,研究不同生物多样性情景下的生态系统功能变化。

对于每个层次的监测样地, 主要选择代表性地带、植被区和植被小区的典型植被, 这些植被类型蕴含大量的特有种, 对气候变化和干扰等比较敏感, 可对生物多样性变化有较强的指示作用。在森林植被区内也可以选择一些以珍稀和濒危物种为优势种的植被类型, 因为它们不仅是生物多样性保育的主体, 对气候变化和干扰等也非常敏感。

样区布局的近期目标重点在第一层级(5个森林植被区域)和第二层级(57个森林植被区),样区数量控制在50~60个。中长期目标将拓展到第三层级(212个森林植被小区)。

### 4.3 监测指标体系

GEO BON的Pereira等(2013)提出了生物多样性核心指标的概念,定义了一组最少的生物多样性核心指标来监测生物多样性主要维度的变化,以利于数据的整合和比较。生物多样性核心指标强调在同一样点或地区对同一类群的重复测量,包括生物多样性的不同层次:

(1)遗传多样性: 物种的共祖性、等位基因的多样性、种群的基因分化、类型和品种的多样性。

(2)物种多样性: 物种的分布范围、种群的多度及年龄结构; 物种的主要功能性状, 包括比叶面积、叶片元素含量、木材密度、种子大小、树高、物种物候、传播距离、迁移行为、出生和死亡率等

形态性状和生理性状;群落的组成,包括类群多样性和种间相互作用。

(3)生态系统多样性:净初级生产力、次级生产力、营养的保留率及干扰类型;生境结构、生态系统范围和破碎程度及生态系统功能类型的组成。

遗传多样性主要在物种的不同种群中测定,因而依赖物种多样性和群落多样性的监测。生态系统多样性在大尺度上主要依赖遥感对生境结构、生态系统范围、干扰类型和破碎程度等的监测,在小尺度上依靠对净初级生产力、次级生产力、营养的保留率等生态系统功能进行监测。因此,森林植物多样性监测的核心主要是对群落和物种多样性的监测。Sino BON-CForBio主要以生物多样性核心指标为主,并结合我国传统森林群落调查方法进行拓展。

#### 4.4 监测内容与方法

第一层大型森林样地主要采用ForestGEO森林样地的建设方法(Condit, 1998);第二层、第三层的典型森林群落调查既有传统的群落学调查内容,也有群落的定期复查以及群落动态的长期监测等内容,如树木生长动态实时监测、群落地段水文条件监测以及群落更新动态监测等。归纳起来,典型森林群落监测的工作内容主要包括以下几个方面:

(1)典型森林群落实体的选择、确定和定位立标。根据中国植被分类系统和植被分布规律确定典型森林群落的类型及确切地理位置,同时考虑中国科学院相关研究所的基础和野外生态研究台站的布局,由相关研究所提出建议并由整个网络协调总体布局,选择具有代表性的典型森林群落类型及其具体样地,设立永久性标记。

目前,取样主要在群系水平上考虑,但在工作深入的过程中会将典型森林群落确定到植物群落的基本单位(群丛)。另外,典型森林群落的面积根据具体植被类型来确定,一般为20 m × 20 m至100 m × 100 m。为了保证植物群落的相对均匀,典型森林群落所在地应选择在地形一致性较高的地段,并且应尽量在所在层次内随机取样,以避免各种取样偏差。

(2)典型森林群落环境信息调查与收集。典型森林群落的地理位置、坡位、坡向、土壤类型、土壤层次、土壤理化性质、母岩类型、人类及动物活动影响等因素,均需要在群落确定后进行调查或取样分析与保存。同时,收集区域内气象数据和群落历

史变迁概况等有关信息。

通过直接的气候要素连续观测,应用气候数据插值以及其他公认的推导方法,确定典型森林群落所在地的气候指标;通过采样和分析确定群落所在地的土壤特征。

(3)典型森林群落调查。主要采用常规群落调查。乔木层、灌木层和幼苗主要参照上文4.3节的生物多样性核心监测指标来调查群落的外貌特征、层次结构、物种组成及物种分布的多度、盖度和年龄结构等。

采集、压制、鉴定和保存群落中每一种植物的标本,并作为物种组成的重要凭证之一永久保存。同时,拍摄每个植物种的照片,包括物种在群落中的一般生存状况以及不同年龄个体特征等,还可以用微距镜头记录每一物种的识别特征。

(4)典型森林群落影像资料和植物标本的采集。采集植物标本作为该典型森林群落物种组成的重要凭证。同时,拍摄相关的影像资料,如群落的外貌特征、内部结构、物种的特征以及群落季相的相对变化等。在条件许可的情况下,采集群落三维结构的影像数据,如激光雷达空间数据,并利用全息技术获取不同季节的影像资料,供档案建立和典型森林群落展示时使用。

#### 4.5 Sino BON-CForBio的不可替代性

首先, Sino BON-CForBio的研究定位主要在3个方面:森林生物多样性维持机制的研究、生物多样性变化的监测与驱动机制研究和生物多样性变化效应研究,而目前我国现存的其他监测网络主要定位于生态系统与环境变化的研究,如CERN和CFERN。

其次, Sino BON-CForBio的大型监测样地有利于生物多样性变化驱动机制的研究。由于CERN和CFERN聚焦于生态系统的结构和功能变化,其监测取样面积较小,如CERN的监测结果主要来自1个100 m × 100 m的样方或2-3个40 m × 40 m的样方组成的综合观测场,已经足够研究森林生态系统的优势种群结构及生态系统功能。但由于CERN和CFERN的监测样方面积比较小,除了个别建群种之外,森林群落内几乎所有种群数量都比较小,很难确定种群的变化是其随机波动,还是由一定的生态因素所驱动的;另一方面,由于种群比较小,也很难观测种内和种间相互作用的变化(Ricklefs &

He, 2016)。另外, 由于CNERN只有17个森林定位研究站, 不能涵盖全国多样的典型森林植被类型。

最后, Sino BON-CForBio以“中国植被区划”为基础进行取样布局, 采用三层系统, 充分考虑了不同区划层次上的森林植被和环境异质性, 从植被区域的大型样地、植被区的1 ha样地到植被小区的0.04–0.25 ha样地, 能覆盖中国各植被区重要的森林植被类型, 与CERN和CFERN在布局上相互补充。

#### 4.6 Sino BON-CForBio的预期产出

第一, Sino BON-CForBio是在CForBio基础上进行拓展, 拟初步形成国家水平的森林生物多样性监测网络。Sino BON-CForBio在第一层次的大型森林样地建设已经初具规模, 在不同的植被地带建立了多个大型森林监测样地, 近期主要考虑在第二层次上不同的森林植被区代表性森林群落布设1 ha样地, 建立包括森林群落样方、森林植被区物种名录、植物功能性状以及DNA条形码等各类型数据库, 初步形成国家水平上的森林生物多样性监测网络, 观测各植被地带和植被区是否有趋势性变化, 进行预警型监测。以大型样地和主要森林植被区的代表性群落为基础, 研究主要森林类型生物多样性变化的原因和机理, 评估不同气候带森林群落对气候变化的响应, 进一步预测生物多样性未来的变化情景。

第二, 探讨和比较不同区域进化背景下的地带性森林生物多样性的维持机制, 以及生物多样性变化的效应。目前, 经过十多年的探索, 一些基本的生态学过程, 如中性过程、生态位过程和密度制约等在不同地带性森林群落构建中的相对作用逐渐清晰, 而且随着近年来区域物种进化与群落构建关系研究的发展, 进一步探究了不同进化背景下群落构建机制的异同以及沿纬向和经向梯度群落构建机制的趋势性变化; 在全球变化背景下生物多样性维持机制的变化, 并在群落水平上为珍稀濒危物种的保护提供理论基础。另一方面, 通过数年的建设, 在江西新岗山建成的生物多样性–生态系统功能研究平台已经开展研究工作, 将逐步揭示亚热带森林在生物多样性变化的情景下生态系统功能的变化及其机制。

第三, 森林生物多样性保护和恢复的示范。在验证型监测的基础上, 有效地检验生物多样性变化的机理, 为决策者和公众提供生物多样性对应的管

理措施, 同时, 为相应的森林生物多样性保护和恢复措施进行示范。

第四, 对我国天然林保护和退耕还林等国家重大工程进行有效性监测和验证型监测, 验证我国实施天然林保护和退耕还林等措施的地区森林生物多样性的变化是否由实施这些保护和恢复措施所产生。

#### 参考文献

- Ahumada JA, Silva CE, Gajapersad K, Hallam C, Hurtado J, Martin E, McWilliam A, Mugerwa B, O'Brien T, Rovero F (2011) Community structure and diversity of tropical forest mammals: data from a global camera trap network. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 366, 2703–2711.
- Anderson-Teixeira KJ, Davies SJ, Bennett AC, Gonzalez-Akre EB, Muller-Landau HC, Wright SJ, Abu Salim K, Almeyda Zambrano AM, Alonso A, Baltzer JL, Basset Y, Bourg NA, Broadbent EN, Brockelman WY, Bunyavejchewin S, Burslem DFRP, Butt N, Cao M, Cardenas D, Chuyong GB, Clay K, Cordell S, Dattaraja HS, Deng X, Detto M, Du X, Duque A, Erikson DL, Ewango CEN, Fischer GA, Fletcher C, Foster RB, Giardina CP, Gilbert GS, Gunatilleke N, Gunatilleke S, Hao Z, Hargrove WW, Hart TB, Hau BCH, He F, Hoffman FM, Howe RW, Hubbell SP, Inman-Narahari FM, Jansen PA, Jiang M, Johnson DJ, Kanzaki M, Kassim AR, Kenfack D, Kibet S, Kinnaird MF, Korte L, Kral K, Kumar J, Larson AJ, Li Y, Li X, Liu S, Lum SKY, Lutz JA, Ma K, Maddalena DM, Makana JR, Malhi Y, Marthews T, Mat Serudin R, McMahon SM, McShea WJ, Memiaghe HR, Mi X, Mizuno T, Morecroft M, Myers JA, Novotny V, de Oliveira AA, Ong PS, Orwig DA, Ostertag R, den Ouden J, Parker GG, Phillips RP, Sack L, Sainge MN, Sang W, Sri-ngernyuang K, Sukumar R, Sun IF, Sungpalee W, Suresh HS, Tan S, Thomas SC, Thomas DW, Thompson J, Turner BL, Uriarte M, Valencia R, Vallejo MI, Vicentini A, Vrška T, Wang X, Wang X, Weiblen G, Wolf A, Xu H, Yap S, Zimmerman J (2015) CTFS-ForestGEO: a worldwide network monitoring forests in an era of global change. *Global Change Biology*, 21, 528–549.
- Bai XJ, Queenborough S, Wang XG, Zhang J, Li B, Yuan ZQ, Xing DL, Lin F, Ye J, Hao ZQ (2012) Effects of local biotic neighbors and habitat heterogeneity on tree and shrub seedling survival in an old-growth temperate forest. *Oecologia*, 170, 755–765.
- Bai Y, Han X, Wu J, Chen Z, Li L (2004) Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. *Nature*, 431, 181–184.
- Barlow J, Ewers RM, Anderson L, Aragao LEOC, Baker TR, Boyd E, Feldpausch TR, Gloor E, Hall A, Malhi Y, Milliken W, Mulligan M, Parry L, Pennington T, Peres CA, Phillips OL, Roman-Cuesta RM, Tobias JA, Gardner TA (2011)

- Using learning networks to understand complex systems: a case study of biological, geophysical and social research in the Amazon. *Biological Reviews*, 86, 457–474.
- Barnosky AD, Matzke N, Tomiya S, Wogan GOU, Swartz B, Quental TB, Marshall C, McGuire JL, Lindsey EL, Maguire KC, Mersey B, Ferrer EA (2011) Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature*, 471, 51–57.
- Baru C, Fegraus EH, Andelman SJ, Chandra S, Kaya K, Lin K, Youn C (2012) Cyberinfrastructure for observatory and monitoring networks: a case study from the TEAM Network. *BioScience*, 62, 667–675.
- Bin Y, Lin G, Li B, Wu L, Shen Y, Ye WH (2012) Seedling recruitment patterns in a 20 ha subtropical forest plot: hints for niche-based processes and negative density dependence. *European Journal of Forest Research*, 131, 453–461.
- Bin Y, Wang Z, Wang Z, Ye WH, Cao H, Lian JY (2010) The effects of dispersal limitation and topographic heterogeneity on beta diversity and phylobetadiversity in a subtropical forest. *Plant Ecology*, 209, 237–256.
- Board M (1990) *Managing Troubled Waters: The Role of Marine Environmental Monitoring*. National Academies Press, Washington.
- Brienen RJW, Phillips OL, Feldpausch TR, Gloor E, Baker TR, Lloyd J, Lopez-Gonzalez G, Monteagudo-Mendoza A, Malhi Y, Lewis SL, Vasquez Martinez R, Alexiades M, Alvarez Davila E, Alvarez-Loayza P, Andrade A, Aragao LEOC, Araujo-Murakami A, Arets EJMM, Arroyo L, Aymard C GA, Banki OS, Baraloto C, Barroso J, Bonal D, Boot RGA, Camargo JLC, Castilho CV, Chama V, Chao KJ, Chave J, Comiskey JA, Cornejo Valverde F, da Costa L, de Oliveira EA, Di Fiore A, Erwin TL, Fauset S, Forsthofer M, Galbraith DR, Grahame ES, Groot N, Herault B, Higuchi N, Honorio Coronado EN, Keeling H, Killeen TJ, Laurance WF, Laurance S, Licona J, Magnussen WE, Marimon BS, Marimon-Junior BH, Mendoza C, Neill DA, Nogueira EM, Nunez P, Pallqui Camacho NC, Parada A, Pardo-Molina G, Peacock J, Pena-Claros M, Pickavance GC, Pitman NCA, Poorter L, Prieto A, Quesada CA, Ramirez F, Ramirez-Angulo H, Restrepo Z, Roopsind A, Rudas A, Salomao RP, Schwarz M, Silva N, Silva-Espejo JE, Silveira M, Stropp J, Talbot J, ter Steege H, Teran-Aguilar J, Terborgh J, Thomas-Caesar R, Toledo M, Torello-Raventos M, Umetsu RK, van der Heijden GMF, van der Hout P, Guimaraes Vieira IC, Vieira SA, Vilanova E, Vos VA, Zagt RJ (2015) Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature*, 519, 344–348.
- Bruehlheide H, Nadrowski K, Assmann T, Bauhus J, Both S, Buscot F, Chen XY, Ding B, Durka W, Erfmeier A, Gutknecht JLM, Guo D, Guo LD, Härdtle W, He J-S, Klein A-M, Kühn P, Liang Y, Liu X, Michalski S, Niklaus PA, Pei K, Scherer-Lorenzen M, Scholten T, Schuldt A, Seidler G, Trogisch S, von Oheimb G, Welk E, Wirth C, Wubet T, Yang X, Yu M, Zhang S, Zhou H, Fischer M, Ma K, Schmid B (2014) Designing forest biodiversity experiments: general considerations illustrated by a new large experiment in subtropical China. *Methods in Ecology and Evolution*, 5, 74–89.
- Bubb P, Chenery A, Herkenrath P, Kapos V, Mapendembe A, Stanwell-Smith D, Wal-pole M (2011) National indicators, monitoring and reporting for the strategic plan for biodiversity 2011–2020. UNEP-WCMC: Cambridge, UK.
- Carnicer J, Coll M, Ninyerola M, Pons X, Sánchez G, Peñuelas J (2011) Widespread crown condition decline, food web disruption, and amplified tree mortality with increased climate change-type drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 108, 1474–1478.
- Cavanaugh KC, Gosnell JS, Davis SL, Ahumada J, Boundja P, Clark DB, Mugerwa B, Jansen PA, O'Brien TG, Rovero F, Sheil D, Vasquez R, Andelman S (2014) Carbon storage in tropical forests correlates with taxonomic diversity and functional dominance on a global scale. *Global Ecology and Biogeography*, 23, 563–573.
- Chave J, Condit R, Muller-Landau HC, Thomas SC, Ashton PS, Bunyavejchewin S, Co LL, Dattaraja HS, Davies SJ, Esufali S, Ewango CEN, Feeley KJ, Foster RB, Gunatilleke N, Gunatilleke S, Hall P, Hart TB, Hernández C, Hubbell SP, Itoh A, Kiratiprayoon S, LaFrankie JV, Loo de Lao S, Makana JR, Noor MNS, Kassim AR, Samper C, Sukumar R, Suresh HS, Tan S, Thompson J, Tongco MDC, Valencia R, Vallejo M, Villa G, Yamakura T, Zimmerman JK, Losos EC (2008) Assessing Evidence for a Pervasive Alteration in Tropical Tree Communities. *PLoS Biology*, 6, e45.
- Chen L, Mi XC, Comita LS, Zhang L, Ren HB, Ma KP (2010) Community-level consequences of density dependence and habitat association in a subtropical broad-leaved forest. *Ecology Letters*, 13, 695–704.
- Chisholm RA, Condit R, Rahman KA, Baker PJ, Bunyavejchewin S, Chen YY, Chuyong G, Dattaraja HS, Davies S, Ewango CEN, Gunatilleke CVS, Nimal Gunatilleke IAU, Hubbell S, Kenfack D, Kiratiprayoon S, Lin Y, Makana JR, Pongpattananurak N, Pulla S, Punchi-Manage R, Sukumar R, Su SH, Sun IF, Suresh HS, Tan S, Thomas D, Yap S (2014) Temporal variability of forest communities: empirical estimates of population change in 4000 tree species. *Ecology Letters*, 17, 855–865.
- Condit R (1998) *Tropical Forest Census Plots: Methods and Results from Barro Colorado Island, Panama and Comparison with Other Plots*. Springer, Berlin.
- Dong SX, Davies SJ, Ashton PS, Bunyavejchewin S, Supardi MN, Kassim AR, Tan S, Moorcroft PR (2012) Variability in solar radiation and temperature explains observed patterns and trends in tree growth rates across four tropical forests. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 279, 3923–3931.
- Editorial Board of Forest in China (2000) *Forest in China*. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [中国森林编辑委员会 (2000) 中国森林. 中国林业出版社, 北京.]
- Editorial Board of the Vegetation Atlas of China, Chinese Academy of Sciences (2009) 1: 1000000 Vegetation Atlas

- of China. Geology Publishing House, Beijing. (in Chinese) [中国科学院中国植被图编辑委员会 (2009) 中华人民共和国植被图(1:1000000). 地质出版社, 北京.]
- Elzinga CL, Salzer DW, Willoughby JW, Gibbs JP (2009) Monitoring Plant and Animal Populations: A Handbook for Field Biologists. John Wiley & Sons, New York.
- Feeley KJ, Joseph Wright S, Nur Supardi MN, Kassim AR, Davies SJ (2007) Decelerating growth in tropical forest trees. *Ecology Letters*, 10, 461–469.
- Ferretti M (2010) Harmonizing forest inventories and forest condition monitoring—the rise or the fall of harmonized forest condition monitoring in Europe? *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 3, 1–4.
- Ferretti M, Chiarucci A (2003) Design concepts adopted in long-term forest monitoring programs in Europe—problems for the future? *Science of the Total Environment*, 310, 171–178.
- Ferretti M, Fischer R (2013) Forest Monitoring: Methods for Terrestrial Investigations in Europe with an Overview of North America and Asia. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Fraenkel AA (1989) Convention on long-range transboundary air pollution: meeting the challenge of international cooperation, *The Harvard International Law Journal*, 30, 447–476.
- Gardner T (2012) Monitoring forest biodiversity: improving conservation through ecologically-responsible management. *Management of Environmental Quality*, 37, e16–e17.
- Gong LC (1988) The publication of book series of Chinese Forest. *Journal of Beijing Forestry University*, 10(2), 78. (in Chinese) [宫连城 (1988) 《中国森林》编辑出版概况. 北京林业大学学报, 10(2), 78]
- Guo Y, Lu J, Franklin SB, Wang Q, Xu Y, Zhang K, Bao D, Qiao X, Huang H, Lu Z, Jiang M (2013) Spatial distribution of tree species in a species-rich subtropical mountain forest in central China. *Canadian Journal of Forest Research*, 43, 826–835.
- Han Y, Yu X, Wang X, Wang Y, Tian J, Xu L, Wang C (2013) Net anthropogenic phosphorus inputs (NAPI) index application in Mainland China. *Chemosphere*, 90, 329–337.
- Hao ZQ, Zhang J, Song B, Ye J, Li B (2007) Vertical structure and spatial associations of dominant tree species in an old-growth temperate forest. *Forest Ecology and Management*, 252, 1–11.
- He JS, Liu CR, Ma KP (2000) Standards and methods of forest biodiversity monitoring. In: *China's Biodiversity Conservation Toward the 21st Century: Proceedings of the Third National Symposium on the Conservation and Sustainable Use of Biological Diversity* (ed. Xu ZH), pp. 331–347. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese with English abstract) [贺金生, 刘灿然, 马克平 (2000) 森林生物多样性监测规范和方法. 见: 面向21世纪的中国生物多样性保护—第三届全国生物多样性保护与持续利用研讨会论文集(许智宏主编), pp. 331–347. 林业出版社, 北京.]
- Hooper DU, Adair EC, Cardinale BJ, Byrnes JEK, Hungate BA, Matulich KL, Gonzalez A, Duffy JE, Gamfeldt L, O'Connor MI (2012) A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change. *Nature*, 486, 105–108.
- Ingwell LL, Joseph Wright S, Becklund KK, Hubbell SP, Schnitzer SA (2010) The impact of lianas on 10 years of tree growth and mortality on Barro Colorado Island, Panama. *Journal of Ecology*, 98, 879–887.
- Lai J, Mi X, Ren H, Ma K (2009) Species-habitat associations change in a subtropical forest of China. *Journal of Vegetation Science*, 20, 415–423.
- Legendre P, Mi X, Ren H, Ma K, Yu M, Sun IF, He F (2009) Partitioning beta diversity in a subtropical broad-leaved forest of China. *Ecology*, 90, 663–674.
- Leigh E (2004) The neutral theory of forest ecology. *Tropical Forest Diversity and Dynamism: Findings From a Large-Scale Plot Network* (eds Losos E, Leigh E), pp. 244–263. University of Chicago Press, Chicago.
- Li L, Huang Z, Ye W, Cao H, Wei S, Wang Z, Lian J, Sun IF, Ma K, He F (2009) Spatial distributions of tree species in a subtropical forest of China. *Oikos*, 118, 495–502.
- Lin L, Comita LS, Zheng Z, Cao M (2012) Seasonal differentiation in density-dependent seedling survival in a tropical rain forest. *Journal of Ecology*, 100, 905–914.
- Lin LX, Yue XH (2007) The overview, directions and trends of development of Chinese forest resources inventory. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 13(15), 112–113. (in Chinese with English abstract) [林来仙, 岳祥华 (2007) 我国森林资源清查概况、发展方向和趋势. 安徽农学通报, 13(15), 112–113.]
- Lindenmayer DB, Franklin JF, Fischer J (2006) General management principles and a checklist of strategies to guide forest biodiversity conservation. *Biological Conservation*, 131, 433–445.
- Liu XJ, Swenson NG, Zhang JL, Ma KP (2013) The environment and space, not phylogeny, determine trait dispersion in a subtropical forest. *Functional Ecology*, 27, 264–272.
- Lorenz M, Nagel HD, Granke O, Kraft P (2008) Critical loads and their exceedances at intensive forest monitoring sites in Europe. *Environmental Pollution*, 155, 426–435.
- Lu J, Johnson DJ, Qiao X, Lu Z, Wang Q, Jiang M (2015) Density dependence and habitat preference shape seedling survival in a subtropical forest in central China. *Journal of Plant Ecology*, 8, 568–577.
- Ma KP (1994) A workshop of biodiversity monitoring held in USA. *Biodiversity Science*, 2, 184–186. (in Chinese) [马克平 (1994) 生物多样性监测研讨班在美国举办. 生物多样性, 2, 184–186].
- Malhi Y, Aragão LEOC, Galbraith D, Huntingford C, Fisher R, Zelazowski P, Sitch S, McSweeney C, Meir P (2009) Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest.



- Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 106, 20610–20615.
- Malhi Y, Grace J (2000) Tropical forests and atmospheric carbon dioxide. *Trends in Ecology & Evolution*, 15, 332–337.
- Malhi Y, Phillips OL, Lloyd J, Baker T, Wright J, Almeida S, Arroyo L, Frederiksen T, Grace J, Higuchi N, Killeen T, Laurance WF, Leão C, Lewis S, Meir P, Monteagudo A, Neill D, Núñez Vargas P, Panfil SN, Patiño S, Pitman N, Quesada CA, Ruelas-Li A, Salomão R, Saleska S, Silva N, Silveira M, Sombroek WG, Valencia R, Vásquez Martínez R, Vieira ICG, Vinceti B, Canadell J, White PS (2002) An international network to monitor the structure, composition and dynamics of Amazonian forests (RAINFOR). *Journal of Vegetation Science*, 13, 439–450.
- McMahon SM, Parker GG, Miller DR (2010) Evidence for a recent increase in forest growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 107, 3611–3615.
- Mi XC, Swenson NG, Valencia R, Kress WJ, Erickson DL, Pérez AJ, Ren HB, Su SH, Gunatilleke N, Gunatilleke S, Hao ZQ, Ye WH, Cao M, Suresh HS, Dattaraja HS, Sukumar R, Ma KP (2012) The contribution of rare species to community phylogenetic diversity across a global network of forest plots. *The American Naturalist*, 180, e17–e30.
- Niu X, Wang B (2013) Assessment of forest ecosystem services in China: a methodology. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 11, 2249–2254.
- Pereira HM, Ferrier S, Walters M, Geller G, Jongman R, Scholes R, Bruford MW, Brummitt N, Butchart S, Cardoso A (2013) Essential biodiversity variables. *Science*, 339, 277–278.
- Phillips OL, Lewis SL, Baker TR, Chao KJ, Higuchi N (2008) The changing Amazon forest. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363, 1819–1827.
- Phillips OL, Malhi Y, Vinceti B, Baker T, Lewis SL, Higuchi N, Laurance WF, Vargas PN, Martinez RV, Laurance S, Ferreira LV, Stern M, Brown S, Grace J (2002) Changes in growth of tropical forests: evaluating potential biases. *Ecological Applications*, 12, 576–587.
- Phillips OL, Vásquez Martínez R, Núñez Vargas P, Lorenzo Monteagudo A, Chuspe Zans ME, Galiano Sánchez W, Peña Cruz A, Timaná M, Yli-Halla M, Rose S (2003) Efficient plot-based floristic assessment of tropical forests. *Journal of Tropical Ecology*, 19, 629–645.
- Ricklefs RE, He F (2016) Region effects influence local tree species diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 113, 674–679.
- Schnitzer SA, Bongers F (2011) Increasing liana abundance and biomass in tropical forests: emerging patterns and putative mechanisms. *Ecology Letters*, 14, 397–406.
- Scholes RJ, Mace GM, Turner W, Geller GN, Jürgens N, Larigauderie A, Muchoney D, Walther BA, Mooney HA (2008) Toward a Global Biodiversity Observing System. *Science*, 321, 1044–1045.
- Scholes RJ, Walters M, Turak E, Saarenmaa H, Heip CHR, Tuama ÉÓ, Faith DP, Mooney HA, Ferrier S, Jongman RHG, Harrison IJ, Yahara T, Pereira HM, Larigauderie A, Geller G (2012) Building a global observing system for biodiversity. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4, 139–146.
- Shen G, Yu M, Hu XS, Mi X, Ren H, Sun IF, Ma K (2009) Species–area relationships explained by the joint effects of dispersal limitation and habitat heterogeneity. *Ecology*, 90, 3033–3041.
- van Dobben H, de Vries W (2010) Relation between forest vegetation, atmospheric deposition and site conditions at regional and European scales. *Environmental Pollution*, 158, 921–933.
- Vos P, Meelis E, Ter Keurs WJ (2000) A framework for the design of ecological monitoring programs as a tool for environmental and nature management. *Environmental Monitoring and Assessment*, 61, 317–344.
- Wang B, Cui XH, Yang FW (2004) Chinese Forest Ecosystem Research Network (CFERN) and its development. *Chinese Journal of Ecology*, 23(4), 84–91. (in Chinese with English abstract) [王兵, 崔向慧, 杨锋伟 (2004) 中国森林生态系统定位研究网络的建设与发展. *生态学杂志*, 23(4), 84–91.]
- Wang D, Wang B, Niu X (2013) Forest carbon sequestration in China and its benefits. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 29, 51–59.
- Wang Q, Bao D, Guo Y, Lu J, Lu Z, Xu Y, Zhang K, Liu H, Meng H, Jiang M, Qiao X, Huang H (2014a) Species associations in a species-rich subtropical forest were not well-explained by stochastic geometry of biodiversity. *PLoS ONE*, 9, e97300.
- Wang Q, Xu Y, Lu Z, Bao D, Guo Y, Lu J, Zhang K, Liu H, Meng H, Qiao X, Huang H, Jiang M (2014b) Disentangling the effects of topography and space on the distributions of dominant species in a subtropical forest. *Chinese Science Bulletin*, 59, 5113–5122.
- Wang SY, Lin SS (1995) Progress in studies of long-term forest ecological research in China. *World Forestry Research*, (4), 44–49. (in Chinese with English abstract) [王淑元, 林升寿 (1995) 我国森林生态系统定位研究的进展. *世界林业研究*, (4), 44–49.]
- Wang XG, Swenson NG, Wiegand T, Wolf A, Howe R, Lin F, Ye J, Yuan ZQ, Shi S, Bai XJ, Xing DL, Hao ZQ (2013) Phylogenetic and functional diversity area relationships in two temperate forests. *Ecography*, 36, 883–893.
- Wang XG, Wiegand T, Hao ZQ, Li B, Ye J, Lin F (2010) Species associations in an old-growth temperate forest in north-eastern China. *Journal of Ecology*, 98, 674–686.
- Wang XG, Wiegand T, Swenson NG, Wolf AT, Howe RW, Hao ZQ, Lin F, Ye J, Yuan ZQ (2015) Mechanisms underlying local functional and phylogenetic beta diversity in two temperate forests. *Ecology*, 96, 1062–1073.
- Wang XG, Wiegand T, Wolf A, Howe R, Davies SJ, Hao ZQ (2011) Spatial patterns of tree species richness in two temperate forests. *Journal of Ecology*, 99, 1382–1393.

- Wang Z, Ye WH, Cao H, Huang Z, Lian JY, Li L, Wei S, Sun IF (2009) Species-topography association in a species-rich subtropical forest of China. *Basic and Applied Ecology*, 10, 648–655.
- Wright SJ, Calderón O (2006) Seasonal, El Niño and longer term changes in flower and seed production in a moist tropical forest. *Ecology Letters*, 9, 35–44.
- Wu ZY (1980) *Vegetation of China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴征镒 (1980) 中国植被. 科学出版社, 北京.]
- Xu CD (2014) Forest management in China from eight forest resources inventories. *Forest Economics*, (4), 8–11 (in Chinese with English abstract) [许传德 (2014) 从连续八次森林资源清查数据看我国森林经营. 生态经济, (4), 8–11.]
- Yang P, Yu XB, Zhuang XL, Niu D (2008) Present status and train of thought of future development of Chinese Ecosystem Research Network (CERN) of CAS. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 23, 555–561. (in Chinese with English abstract) [杨萍, 于秀波, 庄绪亮, 牛栋 (2008) 中国科学院中国生态系统研究网络(CERN)的现状 & 未来发展思路. 中国科学院院刊, 23, 555–561.]
- Yang J, Swenson NG, Cao M, Chuyong GB, Ewango CEN, Howe R, Kenfack D, Thomas D, Wolf A, Lin L (2013) A phylogenetic perspective on the individual species-area relationship in temperate and tropical tree communities. *PLoS ONE*, 8, e63192.
- Yang J, Zhang G, Ci X, Swenson NG, Cao M, Sha L, Li J, Baskin CC, Slik JWF, Lin L (2014) Functional and phylogenetic assembly in a Chinese tropical tree community across size classes, spatial scales and habitats. *Functional Ecology*, 28, 520–529.
- Youn C, Chandra S, Fegraus EH, Lin K, Baru C (2011) TEAM Network: building web-based data access and analysis environments for ecosystem services. *Procedia Computer Science*, 4, 146–155.
- Yu GR, Yu XB (2013) Chinese ecological research network and conservation of natural ecosystem. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 28, 275–283. (in Chinese with English abstract) [于贵瑞, 于秀波 (2013) 中国生态系统研究网络与自然生态系统保护. 中国科学院院刊, 28, 275–283.]
- Yuan ZQ, Gazol A, Lin F, Ye J, Shi S, Wang XG, Wang M, Hao ZQ (2013) Soil organic carbon in an old-growth temperate forest: spatial pattern, determinants and bias in its quantification. *Geoderma*, 195–196, 48–55.
- Zhang L, Mi XC, Shao H, Ma KP (2011) Strong plant-soil associations in a heterogeneous subtropical broad-leaved forest. *Plant and Soil*, 347, 211–220.
- Zhou G, Liu S, Li Z, Zhang D, Tang X, Zhou C, Yan J, Mo J (2006) Old-growth forests can accumulate carbon in soils. *Science*, 314, 1417.
- Zhu Y, Mi XC, Ren HB, Ma KP (2010) Density dependence is prevalent in a heterogeneous subtropical forest. *Oikos*, 119, 109–119.

(责任编辑: 王希华 责任编辑: 黄祥忠)

## 附录 Supplementary Material

### 附录1 中国森林植被区域和地带

Appendix 1 Chinese forest region and forest zone

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2015313-1.pdf>

### 附录2 中国57个森林植被区

Appendix 2 Fifty-seven forest areas in China

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2015313-2.pdf>

### 附录3 中国森林植被区代表性森林群落规划建设布局点

Appendix 3 Planned sites of representative forest communities of forest areas in China

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2015313-3.pdf>

米湘成, 郭静, 郝占庆, 谢宗强, 郭柯, 马克平. 中国森林生物多样性监测: 科学基础与执行计划. 生物多样性, 2016, **24** (11): 1203–1219.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2015313>

## 附录 1 中国森林植被区域和地带

### Appendix 1 Chinese forest region and forest zone

#### I 寒温带落叶针叶林区域

##### I i 南寒温带针叶林地带

#### II 温带针叶阔叶混交林区域

##### II i 温带北部针叶阔叶混交林地带

##### II ii 温带南部针叶阔叶混交林地带

#### III 暖温带落叶阔叶林区域

##### III i 暖温带北部落叶栎林地带

##### III ii 暖温带南部落叶栎林地带

#### IV 亚热带常绿阔叶林区域

##### IV A 东部湿润常绿阔叶林亚区域

###### IV Ai 北亚热带常绿、落叶混交林地带

###### IV Aii 中亚热带常绿阔叶林地带

###### IV Aiii 南亚热带季风常绿阔叶林地带

##### IV B 西部半湿润常绿阔叶林亚区域

###### IV Bi 中亚热带常绿阔叶林地带

###### IV Bii 南亚热带季风常绿阔叶林地带

###### IV Biii 亚热带山地寒温性针叶林地带

#### V 热带季雨林、雨林区域

##### VA 东部偏湿性热带季雨林、雨林亚区域

###### VAi 北热带半常绿季雨林、湿润雨林地带

###### VAi 南热带季雨林、湿润雨林地带

##### VB 西部偏干性热带季雨林、雨林亚区域

###### VBi 北热带季节雨林、半常绿季雨林地带

引自中国科学院中国植被图编辑委员会(2009).

## 参考文献

Editorial Board of the Vegetation Atlas of China, Chinese Academy of Sciences (2009) 1: 1000000 Vegetation Atlas of China. Geology Publishing House, Beijing. [中国科学院中国植被图编辑委员会 (2009) 中华人民共和国植被图(1:1000000). 地质出版社, 北京.]

## 附录 2 中国 57 个森林植被区

### Appendix 2 Fifty-seven forest areas in China

---

#### 森林植被区划名称 (区域—地带—植被区, 3 级)

---

##### I 寒温带落叶针叶林区域

###### II 南寒温带落叶针叶林地带

Ii-1 大兴安岭北部山地含藓类的兴安落叶松林区

Ii-2 大兴安岭中部中低山含兴安杜鹃和樟子松的兴安落叶松林区

Ii-3 大兴安岭南部山地含蒙古栎林的兴安落叶松林区

##### II 温带针叶、落叶阔叶混交林区域

###### II i 温带北部针叶、落叶阔叶混交林地带

IIi-1 小兴安岭红松、落叶阔叶混交林区

IIi-2 完达山-张广才岭山地蒙古栎、柞栎、红松混交林区

###### II ii 温带南部针叶、落叶阔叶混交林地带

IIii-1 长白山东北部阔叶树-红松、赤松、沙冷杉混交林, 栽培植被区

IIii-2 长白山西部低山丘陵次生落叶阔叶林区

IIii-3 长白山南部栎类、红松、沙冷杉、油松混交林区

##### III 暖温带落叶阔叶林区域

###### III i 暖温带北部落叶栎林地带

IIIi-1 辽东丘陵赤松、蒙古栎、麻栎林区

IIIi-3 辽西低山丘陵灌丛, 油松、栎林区

IIIi-4 冀辽山地、丘陵油松、辽东栎、柞栎林区

IIIi-6 冀西山地落叶阔叶林、灌丛区

IIIi-8 晋中山地丘陵、盆地油松、辽东栎、云杉林区

IIIi-9 晋南油松林、辽东栎林区

###### III ii 暖温带南部落叶栎林地带

IIIii-1 胶东丘陵栽培植被, 赤松、麻栎林区

IIIii-2 鲁中南山地、丘陵栽培植被, 油松、麻栎、栓皮栎林区

IIIii-4 豫西、晋南山地丘陵、台地栽培植被, 油松、栓皮栎、锐齿槲栎林区

IIIii-5 汾河、渭河平原、山地栽培植被, 油松、华山松、栓皮栎、锐齿槲栎林区

IIIii-6 秦岭山地落叶阔叶林、针叶林区

##### IV 亚热带常绿阔叶林区域

###### IVA 东部湿润常绿阔叶林亚区域

###### IV Ai 北亚热带常绿、落叶阔叶混交林地带

IV Ai-2 江淮丘陵栎类、苦槠、马尾松林区

IV Ai-3 桐柏山、大别山山地丘陵落叶栎类、青冈栎林, 台湾松林区

IV Ai-4 秦巴山地丘陵栎类林, 巴山松、华山松林区

###### IV Aii 中亚热带常绿阔叶林地带

###### IV Aii a 中亚热带常绿阔叶林北部亚地带

IV Aii a-1 浙皖山地丘陵青冈栎、苦槠林, 栽培植被区

IV Aii a-2 浙闽山丘甜槠、木荷林区

IV Aii a-4 湘赣丘陵栽培植被, 青冈栎、栲类林区

IV Aii a-5 三峡、武陵山地栲类、润楠林区

---

IVAiia-6 四川盆地栽培植被, 润楠、青冈栎林区

IVAiia-7 川西山地峡谷云杉、冷杉林区

IVAiib 中亚热带常绿阔叶林南部亚地带

IVAiib-1 浙南、闽北山丘栲类、细柄蕈树林区

IVAiib-2 南岭山地栲类、蕈树林区

IVAiib-3 黔东、桂东北山地栲类、木荷林, 石灰岩植被区

IVAiib-4 贵州高原栲类、青冈林, 石灰岩植被区

IVAiib-5 川滇黔山丘栲类、木荷林区

IVAiia 南亚热带季风常绿阔叶林地带

IVAiia-2 闽粤沿海丘陵栽培植被, 刺栲、厚壳桂林区

IVAiia-3 珠江三角洲栽培植被、蒲桃、黄桐林区

IVAiia-4 粤桂丘陵山地越南栲、黄果厚壳桂林区

IVAiia-5 黔桂石灰岩丘陵山地青冈栎、仪花林区

IVB 西部半湿润常绿阔叶林亚区域

IVBi 中亚热带常绿阔叶林地带

IVBi-1 滇中滇东高原, 盆地、谷地滇青冈、栲类、云南松林区

IVBi-2 川滇金沙江峡谷云南松林, 干热河谷植被区

IVBi-3 滇西山纵谷具铁杉、冷杉垂直带的森林区

IVBii 南亚热带季风常绿阔叶林地带

IVBii-1 滇桂石灰岩丘陵润楠、青冈栎、细叶云南松林区

IVBii-2 滇中南山地峡谷栲类、红木荷、思茅松林区

IVBiii 亚热带山地寒温带针叶林地带

IVBiii-1 横断山北部山地峡谷云杉、冷杉林区

IVBiii-2 横断山南部山地峡谷云杉、冷杉林, 硬叶栎林区

IVBiii-3 雅鲁藏布江中下游常绿阔叶林区

V 热带季雨林、雨林区域

VA 东部偏湿性热带季雨林、雨林亚区域

VAi 北热带半常绿季雨林、湿润雨林地带

VAi-2 粤东南滨海丘陵半常绿季雨林区

VAi-3 琼雷台地半常绿季雨林、热带灌丛草丛区

VAi-4 桂西南石灰岩丘陵、山地季雨林区

VAii 南热带季雨林、湿润雨林地带

VAii-1 琼南丘陵山地季雨林, 湿润雨林区

VB 西部偏干性热带季雨林, 雨林亚区域

VBi 北热带季节雨林、半常绿季雨林地带

VBi-1 滇东南峡谷山地半常绿季雨林、湿润雨林区

VBi-2 西双版纳山地、盆地季节雨林、季雨林区

VBi-3 滇西南河谷山地半常绿季雨林区

VBi-4 东喜马拉雅南翼河谷季雨林、雨林区

VBi-5 中喜马拉雅山地季雨林区

VI 温带草原区域

VIB. 西部草原区域

VIBi. 温带草原地带

---

米湘成, 郭静, 郝占庆, 谢宗强, 郭柯, 马克平. 中国森林生物多样性监测: 科学基础与执行计划. 生物多样性, 2016, **24** (11): 1203–1219.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2015313>

---

VIBia-1 阿尔泰西部草原区

**VII 温带荒漠区域**

**VIIA. 西部荒漠亚区域**

**VIIAi 温带半灌木、小乔木荒漠地带**

VIIAi-3 天山北坡山地寒温性针叶林草原区

**VIIIB. 东部荒漠亚区域**

**VIIIBi. 温带半灌木、灌木荒漠地带**

VIIIBi-2 东祁连山山地寒温性针叶林、草原区

---

引自中国科学院中国植被图编辑委员会(2009).

参考文献

Editorial Board of the Vegetation Atlas of China, Chinese Academy of Sciences (2009) 1: 1000000 Vegetation Atlas of China. Geology Publishing House, Beijing. [中国科学院中国植被图编辑委员会 (2009) 中华人民共和国植被图(1:1000000). 地质出版社, 北京.]

### 附录3 中国森林植被区代表性森林群落规划建设布局点

Appendix 3 Planned sites of representative forest communities of forest areas in China

| 序号 | 植被区      | 植被类型           | 分布地点          |
|----|----------|----------------|---------------|
| 1  | Ii-2     | 兴安落叶松林         | 大兴安岭样地        |
| 2  | Ii-2     | 樟子松林           | 大兴安岭          |
| 3  | Ii-2     | 偃松矮曲林          | 大兴安岭          |
| 4  | IIi-1    | 阔叶红松林          | 丰林样地          |
| 5  | IIi-1    | 阔叶红松林          | 凉水红松阔叶林样地     |
| 6  | IIi-1    | 蒙古栎林           | 小兴安岭          |
| 7  | IIi-1    | 云冷杉林           | 凉水云冷杉林样地      |
| 8  | IIi-2    | 东北红豆杉林         | 穆棱样地          |
| 9  | IIii-1   | 长白落叶松林         | 长白山区          |
| 10 | IIii-1   | 臭冷杉            | 长白山区          |
| 11 | IIii-1   | 鱼鳞云杉林          | 长白山区          |
| 12 | IIii-1   | 紫椴、红松林         | 长白山样地         |
| 13 | IIii-1   | 岳桦林            | 长白山区          |
| 14 | IIIi-6   | 辽东林            | 东灵山样地         |
| 15 | IIIii-5  | 油松林            | 山西霍山或庞泉沟      |
| 16 | IIIi-8   | 华北落叶松林         | 山西关帝山(庞泉沟)    |
| 17 | IIIii-1  | 赤松林和麻栎林        | 崂山或昆崙山附近      |
| 18 | IIIIi-4  | 檀子栎林           | 三门峡市甘山森林公园    |
| 19 | IVAi-4   | 锐齿槲栎林          | 宝天曼样地         |
| 20 | IVAi-4   | 栓皮栎林           | 秦岭样地          |
| 21 | IIIii-6  | 太白红杉林          | 秦岭太白山自然保护区    |
| 22 | IVAi-3   | 栓皮栎-青冈栎林       | 安徽省鹞落坪自然保护区   |
| 23 | IVAi-4   | 巴山冷杉林          | 神农架自然保护区      |
| 24 | IVAi-4   | 米心水青冈-青冈栎林     | 神农架自然保护区      |
| 25 | IVAi-4   | 锐齿槲栎林          | 神农架自然保护区      |
| 26 | IVAiia-2 | 栲树-木荷林         | 天童山样地         |
| 27 | IVAiia-1 | 甜槠-木荷林         | 古田山样地         |
| 28 | IVAiia-1 | 黄山松林           | 古田山自然保护区      |
| 29 | IVAiia-4 | 马尾松林           | 湖南衡山          |
| 30 | IVAiia-5 | 亮叶水青冈-多脉青冈林    | 八大公山样地        |
| 31 | IViib-3  | 青冈-曼青冈林        | 贵州茂兰自然保护区     |
| 32 | IVAiia-1 | 丝栗栲林、罗浮栲林      | 福建戴云山国家级自然保护区 |
| 33 | IVAiia-5 | 厚壳桂-华栲-越南栲林    | 大明山自然保护区      |
| 34 | IVBi-1   | 云南松林、高山栲林、元江栲林 | 昆明、昭通、六盘水一带   |
| 35 | IVBi-2   | 云冷杉林           | 玉龙雪山样地        |
| 36 | IVBi-3   | 多变石栎-银木荷林、云南铁杉 | 高黎贡山          |
| 37 | IVBii-2  | 石栎林            | 哀牢山样地         |



米湘成, 郭静, 郝占庆, 谢宗强, 郭柯, 马克平. 中国森林生物多样性监测: 科学基础与执行计划. 生物多样性, 2016, **24** (11): 1203–1219.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2015313>

| 序号 | 植被区       | 植被类型                     | 分布地点         |
|----|-----------|--------------------------|--------------|
| 38 | IVBiii-2  | 高山松林、紫果冷杉林、高山栎林          | 贡嘎山保护区       |
| 39 | IVAiia-6  | 岷江冷杉林                    | 四川王朗自然保护区    |
| 40 | IVAiia-7  | 粗枝云杉林                    | 四川米亚罗自然保护区   |
| 41 | IVAiia-6  | 川西云杉林                    | 四川栗子坪自然保护区   |
| 42 | IVAiia-6  | 川滇高山栎林                   | 四川米亚罗自然保护区   |
| 43 | IVAiia-6  | 包石栎林                     | 四川峨眉山自然保护区   |
| 44 | IVAiia-6  | 峨眉栲林                     | 四川峨眉山自然保护区   |
| 45 | IVAiia-2  | 甜槠-米槠林、铁杉林               | 福建武夷山（四新）    |
| 46 | IVAiia-3  | 锥栗、荷木、厚壳桂林               | 鼎湖山样地        |
| 47 | IVAiib-2  | 山桂花、茜树林                  | 广东南岭国家级自然保护区 |
| 48 | IVAiib-3  | 小果厚壳桂-圆果化香树林             | 木论样地         |
| 49 | VAi-4     | 擎天树、海南风吹楠、方榄林            | 广西龙洲         |
| 50 | VAi-4     | 蚬木林                      | 弄岗样地         |
| 51 | VAii-1    | 青梅林                      | 海南省万宁牛岭山     |
| 52 | VAii-1    | 蝴蝶树、青梅林                  | 海南省陵水吊罗山     |
| 53 | VAii-1    | 厚壳桂、油丹林                  | 海南省尖峰岭(乐东县)  |
| 54 | VAii-1    | 青梅、光叶巴豆、海南暗罗林            | 海南省东方县       |
| 55 | VBi-2     | 千果榄仁、番龙眼林                | 基诺山巴卡小寨      |
| 56 | VBi-2     | 望天树林                     | 西双版纳样地       |
| 57 | VBi-2     | 红锥、印度锥林                  | 基诺山巴卡小寨      |
| 58 | VBi-2     | 四数木+多花白头树+越南榆林           | 勐仑石灰山        |
| 59 | VIBia-1   | 新疆落叶松林、西伯利亚云杉林、<br>新疆红松林 | 新疆阿尔泰地区      |
| 60 | VIIAi-3   | 雪岭云杉林、新疆野果林              | 新疆天池保护区      |
| 61 | VIIIBib-2 | 青海云杉林                    | 祁连山中段        |