钱江源国家公园的亚热带常绿阔叶林林貌　供图 / 钱江源站



多角度看森林
——“天空地”一体化生物多样性监测和研究体系

撰文　王宁宁　王巍伟

亚热带常绿阔叶林是我国独特的地带性森林植被类型，在我国分布最广，南北纵跨约10度（24°~32° N），东西横贯约25度（99°~123° E），占我国国土面积的1/4，是全球常绿阔叶林的主体，生物多样性仅次于热带雨林区。

北纬30°线贯穿四大文明古国，是一条神秘而又奇特的纬线，钱江源国家公园就位于北纬30度。钱江源国家公园地处浙皖赣三省交界处，是我国社会经济发达区域长三角地区唯一的国家公园。这里是钱塘江的主要发源地和重要的水源涵养地，分布着全球极少的发育和保存完好的呈原始状态的低海拔亚热带常绿阔叶林，具有全球保护和科学研究价值。这里植物区系背景古老独特、复杂多样、特有性突出、特有种丰富，珍稀濒危植物种类达83种，是国家一级重点保护植物南方红豆杉（*Taxus chinensis*）的主要生长地，也是我国罕见植物南紫茎（*Stewartia sinensis*）、野含笑（*Michelia skinneriana*）的集中保留地。区域内栖息着多种珍稀濒危动物，其中国家级重点保护动物58种，包括中国特有的世界珍稀濒危物种、国家一级重点保护野生动物白颈长尾雉（*Syrmaticus ellioti*）和黑麂（jī）（*Muntiacus crinifrons*）。

如何摸清这一片天然林的物种有多少，分布在哪里，状态如何？生态学上采用样地调查和



工作人员利用全站仪（左图）和森林罗盘仪（右图）划分调查单元　供图 / 王宁宁

长期监测的方法来回答这个问题。通过持续的监测，可以明确物种的数量、分布范围、种群结构等信息，为制定保护措施提供重要信息。为了开展高效、精准的生物多样性监测，浙江钱江源森林生物多样性国家野外科学观测研究站（简称“钱江源站”）构建了集合不同监测方法和监测目标的“天空地”一体化生物多样性综合监测和研究体系。该监测和研究体系包括钱江源国家公园全域森林动态样地监测平台、钱江源国家公园全域网格化动物多样性监测平台、森林冠层生物多样性监测平台、遥感监测平台、亚热带森林生物多样性与生态系统功能实验平台。通过该监测体系，获取了钱江源国家公园物种数量、分布范围以及现状；利用该体系的长期持续监测，为钱江源国家公园的生物多样性保护策略的制定和实施提供了重要信息。下面我们就介绍一些该平台在天然林中监测和研究的故事。

森林的“林口普查”

我们国家每十年组织一次全国人口普查，可以了解人口性别比例、出生性别比、适婚人口、老龄人口等人口组成信息，生态学家们也会在森林中定期对树木进行“林口普查”，以此获取森林中物种数量、坐标位置、胸径大小、生长状态等信息。在钱江源站钱江源国家公园全域森林动态样地监测平台，生态学家们每隔5年对样地进行一次“林口普查”。钱江源站植物多样性监测平台包括1个24公顷主样地、1个5公顷和13个1公顷辅助样地，此外还包括分布在钱江源国家公园全域的603个20米×20米的植被样方。

仅在24公顷样地内，记录了超过14万个个体，共159个物种。样地中有这么多个体，调查人员是如何准确又无遗漏地调查和记录每个个体的呢？下面以古田山24公顷森林大样地为例，介绍森林的“林口普查”。

1. 森林“林口普查”的组织形式

森林的“林口普查”是以样地和样方为单元进行的。古田山24公顷森林大样地是一个东西长600米，南北长400米，投影面积为24公顷的样地。调查人员利用全站仪和森林罗盘仪把样地精确划分为600个20米×20米的样方，每个样方为一个调查单元。样方四角安装带有样方编号的固定标识标定样方边界，以确保每次复查的可重复性。为了便于调查估计个体的坐标，又

树木“身份证”的标识　供图 / 王宁宁







调查人员测量树木胸径　供图 / 王宁宁

利用森林罗盘仪、皮尺和红绳把每个样方划分为16个5米×5米的小的调查单元。

2. 森林“林口普查”的调查信息

一个人可以用姓名、性别、年龄、居住地等信息确定，而一棵树的确定，需要物种名称、坐标、胸径、状态等信息，这也是大树“林口普查”的基本信息。类似每人的身份证，调查的每个个体同样有“身份证”。在大样地中，只有胸径大于等于1厘米的个体才可以发放“身份证”，也就是纳入了调查范围。对于发放“身份证”的每个个体，调查人员需要根据树皮、枝条、叶片、花、果实、种子等信息准确识别和记录物种名称，利用胸径尺测量胸径。胸径是位于树干距地面1.3米处的直径。此外，还要测量和记录调查样方每个个体的坐标信息。通过对样地进行长期、持续的监测，可以获取样地内物种组成、物种个体数及大小组成的变化。通过分析这些变化产生的原因，可以解释植物究竟是如何共存的，它们的多样性为什么能够长期、稳定地维持。这一直是生态学研究的热点。

森林植物的“朋友圈”

通过长期观察发现，如果一株幼苗的周围都是相同物种，它的生长会受限甚至死亡；相反，幼苗周围的异种种类越丰富，这株幼苗长得也越茁壮。这就是物种共存理论——负密度制约的表现。这个理论是20世纪70年代，由美国生态学家Janzen DH和Connell JH分别撰文描述，也叫Janzen-Connell假说。以往，大家普遍认为，导致负密度制约产生的原因是由于同种物种的群落容易导致具有寄主专一性的病原菌、植食性昆虫等大量聚集，很容易损害邻近同种个体的种子和幼苗，使得它们具有较高的死亡率。这个理论是基于热带森林样地提出的，那在亚热带森林中是否适用呢？2019年，钱江源站的科学家们利用分子生物学技术对24公顷大样地的植物根际土壤真菌群落组成进行测定，成功破译了亚热带森林生物多样

性维持的“密码”，首次揭示了不同功能型土壤真菌驱动亚热带森林群落多样性的作用模式，“扒出”了植物的“朋友圈”，找到了物种共存机制新的破解法，最终提出了基于外生菌根真菌与病原真菌互作过程影响植物生存的物种共存新模式，颠覆了基于病原菌-植物互作的经典物种共存理论。这一研究成果于2019年发表在国际顶级期刊《科学》上。

捕捉动物的影像声音

钱江源国家公园极好的生态环境吸引了大量的野生动物来此安家落户。密林深处，头顶朋克发型的国家一级保护动物黑麂妈妈正带着自己的孩子从红外相机镜头前走过。近年来，随着红外相机监测技术的出现和发展，24小时不间断采集野生动物影像成为可能。将钱江源国家公园划分267个1千米×1千米的网格，每个网格包含3个监测样点，每两个监测位点之间的距离不小于300米。在每个网格中选择一个监测位点安放红外相机，并在不同监测位点间定期轮换。通过红外相机每年持续监测大中型兽类和雉类物种的分布和种群动态，开展重要物种的保护生物学研究工作。此外，还在重点位点布设自动录音设备，记录鸣禽的生物多样性信息。

1. 明星动物——黑麂

黑麂是钱江源国家公园体制试点区的“明星物种”之一，属于鹿科、麂属，系麂类中体型较大的种类。它们长着一个非常醒目的黑白大尾巴，拥有很朋克的发型——头部的毛发很长且非常蓬松。黑麂是中国的特有物种，没有亚种分化，分布范围十分狭小，主要生活在中国安徽南部、浙江西部、江西东部和福建北部的武夷山地区，共4省39县7.65万平方公里的区域内。

黑麂是保存较好的中亚热带森林生态系统的指示性物种，倾向于出现在森林较为原始和道路密度较低的区域。其适宜栖息地面积42.5平方公里，占国家公园总面积的16.9%，且几乎完全分布在核心保护区和生态保育区。这一监测结果建议以生境恢复、廊道建设和跨省共建为主要手段，促进钱江源地区黑麂栖息地的完整性保护。

红外相机拍摄到的黑麂　供图 / 钱江源站和钱江源国家公园





自动录音设备　供图 / 钱江源站

2. 听音识鸟

物种丰富的钱江源国家公园给鸟类提供了非常适宜的生存环境，吸引了264种鸟类到此安家落户。如何识别不同种类的鸟？传统的鸟类数量调查方法包括图标法、样线法和样点法，但这些方法都依赖调查者的经验和观察能力，因此，

灰树鹊　供图 / 徐良怀



调查者之间个人能力的差异会导致收集的数据集之间存在较大差异，缺乏可信度和可比性。近年来，自动录音设备受到科研人员的关注，捕捉鸟类声音信息后通过机器学习算法，能够自动准确识别录音中包含的鸟类。

钱江源国家公园内百鸟争鸣，不同的鸣叫声像音乐会上不同乐器碰撞出的一首首优美的曲子。为了监测和识别这些林鸟，科学家们在钱江源站国家公园核心区24公顷动态监测样地内安装自动录音设备进行数据采集，通过自动识别软件处理鸟鸣录音，让我们一起来认识一下这些被自动识别出来的林鸟吧！

揭开林冠神秘的面纱

林冠是森林群落树冠组成的集合体，它处于森林群落的最上层，是森林生态系统与大气系统的相互作用的功能界面，对森林群落的组成、结构和功能有着重要的塑造作用，被称为地球的“第八大洲”。林冠内丰富的生物类群包括：



褐顶雀鹛　供图 / 徐良怀

藤本植物、附生非维管植物（附生藻类、地衣、苔藓）、附生维管植物（附生蕨类、兰科植物、藤本等）、寄生植物（桑寄生、槲寄生）、节肢动物（如蝴蝶、蜜蜂、蚂蚁等昆虫纲生物，蜘蛛等蛛形纲生物）、爬行动物（蛇、蜥蜴等）、两栖类动物（蛙类）、鸟类、哺乳动物（猴、树懒、松鼠、蝙蝠等），以及林冠微生物（真菌、细菌等）。

面对如此丰富的林冠生物类群，科学家们是如何一点点去探索的呢？林冠的监测方法是从20世纪70年代的弹射和绳索爬树技术到铁塔、梯子、升降台、林冠桁（canopy boom）等，到20世纪80年代的林冠走廊（canopy walkway），再到20世纪90年代的热气球。1992年美国斯密森热带研究所在巴拿马热带雨林建立了全世界第一个森林塔吊。森林塔吊提供了快速、便捷、安全、无损伤到达林冠任何部分的手段，使得直接采样、可控制、可重复的实验能在林冠进行，并能长期获得全球可比较的数据。因此，森林塔吊作为研究林冠的有效手段得到学术界和国际机构的广泛关注。

1997年3月，在巴拿马举行的首次国际林冠塔吊研讨会上成立了国际林冠塔吊网络（International Canopy Crane Network，ICCN）。2015年开始，在中国科学院的支持下，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，从温带到热带分别在长白山、古田山、八大公山、栗子坪、鼎湖山、漓江、哀牢山、西双版纳建立8个林冠塔吊，形成国际上单一国家最大的林冠塔吊网络，成为我国生物多样性、全球变化研究的重要支撑平台。

钱江源站林冠塔吊高60米，半径60米，高度超过森林林冠的20%，吊臂可360度旋转，覆盖1.13公顷典型中亚热带低海拔常绿阔叶林。为



棕脸鹟莺　供图 / 徐良怀

钱江源站林冠塔吊　供图 / 钱江源站





钱江源站林冠塔吊覆盖的林冠外貌　供图 / 钱江源站

了方便科研仪器设备（如高光谱成像仪、物候相机等）的安装与操作，分别在塔机的2、10、30、50和55米等高度设立带护栏的工作平台。此外，塔臂吊钩安装具有防雨结构的方形工作平台（吊篮），塔机司机室可以通过控制吊篮在塔臂上的水平位置和距离地面的高度，把科研人员送到需要开展科学试验的林冠位置。以塔式起重机的位置为中心，按照中国森林多样性监测网络（CForBio）的监测规范，建成了一个140米×160米的永久样地。研究团队将样地划分成56个20米×20米的样方，该样地按照森林动态样地的调查方法，对样地中的植被进行长期动态监测。

鸟瞰森林

如果把对森林的观测比喻为人类的体检，那对森林的地面观测类似体检的分科各检查。通过仪器设备检查每个部分，利用获取的数据信息分析身体健康情况，而遥感就是给森林做了一次全身影像类检查，包括激光雷达的X光影像、高光谱的“面诊”、热红外的“体温测量”。无人机、激光雷达、高光谱、热红外等新一代遥感技术的出现和不断完善，促使生物多样性遥感研究的发展从宏观尺度到个体尺度，从平面到立体，从简单模糊的有无状态深入到机理的动态变化监测。

如果无人机是自拍杆，那搭载在无人机上的

监测器就是照相机。通过无人机搭载不同的监测器，可以获取不同类型的森林信息。激光雷达发射的光束可以穿透林冠，遇到地面或者枝干、树叶等被反射回来，通过计算光束发射时间和返回时间差，可以记录该光束的空间三维坐标点。光束持续发射，就记录了树冠的空间三维结构信息。通过对这些信息的解译和计算，可以获取树高、盖度、叶面积指数等冠层结构信息。CCD影像，可以理解为林冠鸟瞰照片，能直观地获取大面积的植被图片。高光谱影像，记录了目标物体反射的太阳光的不同波段的信息，可以反馈给森林生理生化的信息。钱江源站以已经建立的地面监测样地为基础，开展无人机激光雷达和高光谱影像监测，实现对钱江源国家公园全境的重要生态系统以及关键物种的长期动态监测。2018年至今，已获取了钱江源国家公园多时相遥感数据，反映生态系统和生物多样性变化。通过监测钱江源国家公园全域、跨省协作区和加盟区内主要保护对象栖息地的变化和森林生态系统服务功能的变化，为国家公园保护成效评估、资源动态预警和科学管理提供支撑。

1. 测量森林的“身高”

如何测量一片森林的高度？又如何在一片森林中找到最高的那棵树呢？机载激光雷达给这个问题提供了很好的解决方案。利用钱江源国家公园全域激光雷达点云数据，可以直接计算获取全域的林冠高度分布图，测量了钱江源国家公园的林冠高度。在点云中，设置高度阈值，提取树高高于阈值的树，发现了多棵高于50米的巨树。在钱江源站所处的古田山片区，研究团队发现该区内存在多棵树高超过40米的巨树，最高树的树高达48.4米。

2. 给森林称“体重”

生物量是森林“体重”的直观表现。森林生物量是森林经过长期的生产和代谢，在一定年龄、一定面积上所生长的全部干物质的重量。这个指标是研究森林生态系统结构、特征、功能以及森林生产力的基础。人的体重可以通过称重获得，森林的“体重”不能直接称量。传统生物量的计算，要先人工测量区域内所有树木个体的胸径和树高，然后通过公式计算得出结果。随着区域的增大，调查的劳动强度大、时间和人力成本高的弊端越来越明显。我们可以轻松地计算一棵树的生物量，也可以通过调查数据计算一个样地内的生物量，那更大区域的生物量如何估算呢？遥感和近地面遥感技术为区域或更大尺度生物量估算提供了方法。采用冠层结构指数量化亚热带常绿阔叶林的冠层高度和垂直复杂度，并结合地面调查数据和地形数据，用模型拟合和预测钱江源国家公园森林的地上生物量，进一步为国家公园森林生态系统保护和动物生境质量评估提供基础数据。

钱江源站是我国现有的4个生物多样性国家野外站之一，台站聚焦生物多样性基础理论研究和保护实践，建成了覆盖钱江源国家公园全域的“天空地”一体化生物多样性综合监测和研究体系，在观测研究和实验示范方面取得了系列重要进展，截至目前共发表论文388篇。长期监测数据支撑国家公园生物多样性保护、管理及生态修复的实践需求，优化保护策略和管护措施，形成国家公园有示范意义的生态修复模式，支撑了钱江源国家公园建设。

作者简介

王宁宁，中国科学院植物研究所工程师，浙江钱江源森林生物多样性国家野外科学观测研究站监测主管，主要从事森林监测和管理工作。

王巍伟，中国科学院植物研究所工程师，浙江钱江源森林生物多样性国家野外科学观测研究站监测主管，主要从事森林监测和管理工作。

（责编 桑新华）



灰喉山椒鸟（雄） 供图 / 徐良怀

黑领噪鹛 供图 / 范忠勇



领鸺鹠　供图 / 牛蜀军

栗背短脚鹎　供图 / 王昌大



绿翅短脚鹎　供图 / 牛蜀军



华南斑胸钩嘴鹛　供图 / 牛蜀军

棕颈钩嘴鹛　供图 / 徐良怀