



# 激光雷达在森林生态系统监测模拟中的应用现状与展望

郭庆华<sup>①\*</sup>, 刘瑾<sup>①</sup>, 陶胜利<sup>①②</sup>, 薛宝林<sup>①</sup>, 李乐<sup>①</sup>, 徐光彩<sup>①</sup>, 李文楷<sup>①</sup>, 吴芳芳<sup>①</sup>, 李玉美<sup>①</sup>, 陈琳海<sup>①</sup>, 庞树鑫<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 北京大学城市与环境学院生态学系, 北京 100871

\* 联系人, E-mail: qguo@ibcas.ac.cn

2013-05-17 收稿, 2013-08-07 接受, 2014-01-16 网络版发表

国家自然科学基金(31270563)和国家重点基础研究发展计划(2013CB956604)

**摘要** 激光雷达是一种新兴的主动遥感技术, 能够在多重时空尺度上获取森林生态系统高分辨率的三维地形、植被结构参数. 其对森林生态系统变化的精确、高效监测和模拟在认识这些变化如何影响陆地生态系统碳循环、全球气候变化, 并促进生物多样性保护方面将发挥重要作用. 本文拟对激光雷达技术的概念和发展应用简史作一介绍, 通过分析其在数字地形产品生成、森林生态参数提取反演应用中的主流算法和优势, 继而阐明其推广应用所面临的挑战, 最后指出未来激光雷达技术在生态学应用中可能的研究热点. 本文认为, 构建集太空、天空、地面多源传感器于一体的数字生态系统是未来生态系统观测网络发展的必然趋势, 而激光雷达技术能够在数字生态系统建设过程中搭建可靠的数据支撑体系, 最终有助于决策部门调控、优化人与环境关系, 实现二者和谐共存.

## 关键词

遥感  
植物群落  
生态系统  
生物多样性  
点云

人类活动以前所未有的速度和强度影响并改变着生命赖以存在的地球生态系统, 造成了世界范围的生态环境问题, 如全球气候变化、生物多样性丧失、生态系统服务功能的降低与退化等<sup>[1,2]</sup>, 致使地球可持续发展能力面临严重威胁. 对生态系统进行实时、快速和准确的监测分析, 有助于正确评估人类活动在环境变化中的作用, 以便决策部门进行有效的管理和控制<sup>[3,4]</sup>.

就生态系统监测(包括生物多样性)而言, 传统手工测量方法多在样方水平上调查, 获取实地数据<sup>[5,6]</sup>, 再将调查结果外推到整个景观或者更大范围作为管理尺度的依据加以应用<sup>[7]</sup>. 这类方法在样点尺度上能够得到最为准确的信息, 并在过去相当长一段时间发挥了巨大作用. 可是近年来, 随着研究的深入、对地观测技术的发展以及生态系统长期定位监测的需要, 传统手工测量方法在监测有关生物多样性和生

态系统结构功能的关键指标(如净初级生产力、土地覆盖、干扰等)时逐渐呈现出局限性, 对大尺度和跨尺度既定监测目标格局与动态的把握存在困难: (i) 大范围样方数据的收集需要耗费大量人力、物力, 短时间内实现重复周期性取样难度大; (ii) 在计算一些指标参数时, 由于无法进行重复性取样导致结果包含空间异质性信息<sup>[8]</sup>; (iii) 传统方法未能很好地解决尺度推绎问题, 样点数据结果上推到景观水平往往并不完全可靠, 因为这个过程又忽略了空间异质性.

激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)是一种新兴的主动遥感技术, 能够直接、快速、精确地获取研究对象的三维地理坐标<sup>[9]</sup>, 特别是在提供垂直结构信息以及数据的后续处理这两方面, 激光雷达技术能够从不同空间尺度实现对生态系统的高效、精准监测, 对于准确掌握生态系统变化现状以及认识

**引用格式:** 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: 459–478

Guo Q H, Liu J, Tao S L, et al. Perspectives and prospects of LiDAR in forest ecosystem monitoring and modeling (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2014, 59: 459–478, doi: 10.1360/972013-592

这些变化将如何影响陆地生态系统碳循环、全球气候变化并促进生物多样性保护起重要作用。

过去 30 年中, LiDAR 技术在地学、林学和生态学领域的应用已经取得了一些根本性进展, 如数字高程模型的建立、森林结构参数的提取以及森林生态系统功能参数的反演等<sup>[10]</sup>。但事实上, 激光雷达能够为研究者提供更多的应用支撑, 如评价叶的物理性能、植物的蒸散过程、微生物的多样性等<sup>[11]</sup>。尤其是近几年来地面激光雷达扫描仪的迅速发展, 使得进行样地尺度(plot-level)的监测成为可能。这样, LiDAR 技术能够实施从样地尺度到景观、区域尺度(landscape- or regional-level), 再到全球尺度(global-level)一整系列梯度范围的监测活动; 而且, 地面激光雷达和机载激光雷达能够将扫描误差控制在厘米甚至毫米级别。虽然有关 LiDAR 技术在获取森林生态系统参数方面的应用综述已有介绍和讨论<sup>[9,11~14]</sup>, 但是, 该领域中还鲜少有文章把地面激光雷达(ground-based LiDAR 或 terrestrial LiDAR, T-LiDAR)、机载激光雷达(airborne LiDAR, A-LiDAR)和星载激光雷达(spaceborne LiDAR, S-LiDAR)整合在一起, 探讨和论述它们如何在森林生态学研究应用中发挥各自的技术优势、解决生态学问题。那么, LiDAR 作为森林生态系统监测、模拟的革命性技术手段, 究竟能有效地获取哪些方面的信息, 进而拓展其在生态学领域的应用? 本文将从以下 3 个方面回答这个问题。(i) 简要介绍 LiDAR 技术相关概念、划分和发展应用历程; (ii) 详细介绍 LiDAR 技术在现今森林生态系统监测、模拟中的应用情况; (iii) 阐释 LiDAR 技术面临的挑战并展望其未来的研究热点。

## 1 激光雷达简介

激光雷达是激光探测与测距系统的简称, 它通过测定传感器发出的激光在传感器与目标物体之间的传播距离, 分析目标地物表面的反射能量大小、反射波谱的幅度、频率和相位等信息, 进而实现对目标物体的精确定位、识别以及一些特性的检测(图 1)。

按照监测目的不同, 激光雷达可以分为环境状态观测及距离测量两大类。观测环境状态的激光雷达以远距离测量环境状态为目的, 可以对大气、水域、陆地的各种状态进行测量; 测量距离类激光雷达, 主要是空间信息科学方面的应用, 通过测距来获取地球或地表目标物的形状、结构、位置等三维信息。

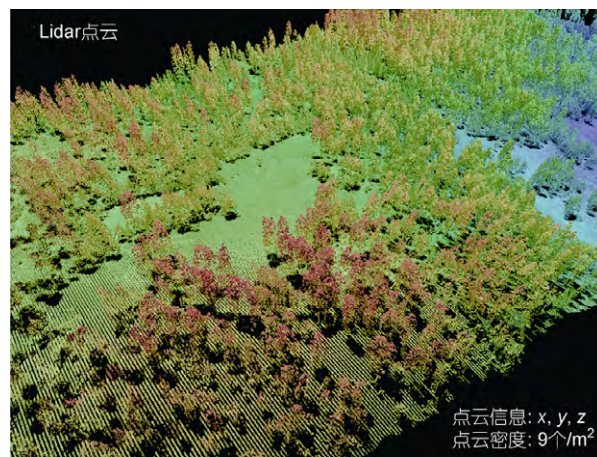


图 1 小光斑机载激光雷达获取的植被离散点云示意图

按照承载平台的不同, 又可分为星载、机载和地面激光雷达(表 1)。其中, 地面激光雷达可被细分为固定平台类和移动平台类, 前者指激光扫描仪放置在三角架或附属于建筑物的棚架、圆顶建筑内部; 后者指车载、舰载型。

激光雷达数据类型有点云数据和波形数据两种。就目前而言, 地面激光雷达和小光斑机载激光雷达系统一般获取的都是离散点云数据, 也有部分机载小光斑系统如奥地利 RIEGL 公司的 480u, 680i 和 780 系列的激光扫描仪具备了波形数据获取的能力; 而大光斑激光雷达系统获取的则是波形数据, 机载系统如美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的激光植被成像传感器(laser vegetation imaging sensor, LVIS)和激光林冠扫描成像系统(the scanning lidar imager of canopies by echo recovery, SLICER), 星载系统如地学激光测高系统(geosciences laser altimeter system, GLAS), 其系统光斑直径在 70 m 左右<sup>[15]</sup>。本文重点关注的是测距类激光雷达, 以下文中无特殊说明, 激光雷达专指测距激光雷达。有关激光雷达常用术语及定义详见表 2。

激光雷达技术最早是基于机载平台进行的针对近海岸线水深测量的研究工作。1968 年, 美国 Syracuse 大学的 Hickman 和 Hogg<sup>[16]</sup>建造了世界上第一个激光海水深度测量系统, 进行了基于机载激光雷达不同回波之间时间差的海洋深度测算, 首次阐述了激光水深测量技术的可行性。20 世纪 70 年代末, NASA 研制成功一种具有扫描和高速数据记录能力的机载海洋激光雷达 AOL(airborne oceanographic LiDAR)<sup>[17]</sup>, Hoge 等人<sup>[18]</sup>用 AOL 在大西洋和切萨皮

表 1 3 种激光雷达系统的详细参数及应用领域介绍

类型	距离地面高度	光斑大小	垂直方向精度	适宜应用尺度	应用
T-LiDAR	1 m	0.5~10 cm	2 km 范围内为 1~10 cm	单木-样地水平	(i) 群落样方调查, 获取树高、具体位置、胸径(diameter at breast height, DBH)、胸高断面面积、覆盖度、林窗空隙(gap fraction, GF)、叶面积指数(leaf area index, LAI)、材积、生物量等参数; (ii) 物种识别; (iii) 三维景观重建; (iv) 生物多样性模拟、监测; (v) 逆境胁迫检验; (vi) 辐射传输模型改进
A-LiDAR 小光斑	1 km	0.2~3 cm	10~20 cm	景观-区域水平	(i) 景观或区域树高分布、覆盖度、GF、LAI、蓄积量、生物量、碳汇估算;
A-LiDAR 大光斑	10 km	8~25 m	裸地 50 cm 植被 100 cm		(ii) 监测植被生长变化; (iii) 辅助植被制图; (iv) 三维景观重建; (v) 快速应急监测
如激光植被成像传感器 (laser vegetation imaging sensor, LVIS)					
S-LiDAR	600 km	60~70 m	因地形坡度不同, 误差为 5~10 m	区域-全球水平	全球树高分布、生物量、碳汇估算
如地学激光测高系统 (geosciences laser altimeter system, GLAS)					

克湾进行了水深的测定, 还绘制出水深小于 10 m 的海底地貌. 此后, 机载激光雷达系统蕴含的巨大应用前景开始受到关注, 并很快被应用到陆地地形勘测研究当中. 20 世纪 80 年代初, Arp 和 Griesbach<sup>[19]</sup>及 Krabill 等人<sup>[20]</sup>的研究是该时期的代表. 值得一提的是, 当时植被被视作地形测量的“障碍”, 因为在冠层郁闭度较高的地区, 激光往往被“拦截”. 直到 1984 年, Nelson 等人<sup>[21]</sup>在宾夕法尼亚 Blue Mountain 地区的研究发现, 激光脉冲的穿透力与冠层郁闭度高度相关, 并指出激光雷达系统可以用于遥感森林垂直结构并估测林木高度. 但由于当时激光雷达仪较为原始, 低于 8 m 的树木无法被系统检测识别. 进入 20 世纪 90 年代后, 随着全球定位系统及惯性导航系统的发展, 激光扫描过程中的精确即时定位定姿成为可能. 其标志性成果为 1990 年德国 Stuttgart 大学 Ackermann 教授领衔研制的世界上第一个激光断面测量系统的诞生, 成功将激光扫描技术与即时定位定姿系统结合, 形成机载激光扫描仪(Ackermann-19)<sup>[22]</sup>. 1993 年, 德国出现首个商用机载激光雷达系统 TopScan ALTM 1020<sup>[23]</sup>. 1995 年, 机载激光雷达设备实现商业化生产. 此后, 机载激光雷达技术作为森林资源调查的补充手段, 用于快速获取大范围森林结构信息, 如树木定位、树高计算、树冠体积估测等,

同时还为森林生态研究、森林经营管理提供垂直结构分层、气体交换、冠层蒸散以及碳储量、枯枝落叶易燃物数量等参数, 相关方面的应用研究迅速增多<sup>[24~33]</sup>.

与机载 LiDAR 相比, 星载 LiDAR 运行轨道高、观测视野广, 理论上具备提供全球数据的能力. 这些特点使它在地形测绘、环境监测、森林调查等方面的应用具有独特的优势. 星载激光雷达的研制和应用是在 20 世纪 90 年代逐步发展成熟的, 美国航空航天局在该领域一直独占鳌头<sup>[34]</sup>. 2003 年, NASA 根据早先提出的采用星载 LiDAR 测量两极地区冰面变化的计划, 正式将地学激光测高仪 GLAS 列入地球观测系统(earth observation system, EOS)中, 并将其搭载在冰体、云量和陆地高度监测卫星(ice, cloud and land elevation satellite, ICESat)上发射升空运行. 其运行期间返回的数据在当前研究中普遍使用, 可以测量陆地表面粗糙度和反射率、植被冠层高度以及雪盖面和冰面的表面特征等信息<sup>[35]</sup>. Lefsky<sup>[36]</sup>已经基于 GLAS 数据与中分辨率成像光谱仪(moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)的 land cover 产品首次绘制了全球树高分布图. 董立新等人<sup>[37]</sup>进行了 GLAS 与增强型专题绘图仪(enhanced thematic mapper, ETM)联合反演森林地上生物量的研究. 值

表 2 LiADR 数据获取、处理及应用术语表(主要参考 Wulder 等人<sup>[14]</sup>)

术语	定义
冠层垂直分布剖面(apparent foliage profile, AFP)	由激光雷达传感器得到的植被冠层在垂直方向上的分布情况, 星载或机载系统采用自上而下的工作方式, 因此获取的冠层顶部信息可能更为准确
激光发散角/光束宽度(beam divergence/beamwidth)	发散角是指在激光传播方向上的发散角度, 发射角的存在使得激光传播过程中光束直径越来越大, 通常以弧度表示
冠层高度模型(canopy height model, CHM)	表达植被高度的连续数据集
差分 GPS(differentially corrected global positioning system, DGPS)	通过在固定测站和流动测站上进行同步观测, 利用在固定测站上所测得 GPS 定位误差数据改正流动测站上定位结果的卫星定位. 在 LiDAR 测量进行的过程中, 采用该技术改正 LiDAR 系统中的 GPS 记录数据, 使之更为精确
数字高程模型(digital elevation model, DEM)	一个连续的数据集合, 用来表达地形高度, 通过对地面测量值的插值得来, 通常也被称为数字地形模型(digital terrain model, DTM)
离散回波(discrete return)	LiDAR 系统以离散点的三维坐标信息记录脉冲的回波信号, 目前的机载系统一般都可以记录每个发射脉冲的多次回波信息
滤波(filtering)	通过对点云数据的处理建立地表参考平面从而实现 LiDAR 数据的分类, 如地面点、植被点、建筑点等
光斑、脚印或足印(footprint)	激光脉冲照射到地表的直径. 根据光斑的大小分为大光斑(10~100 m)LiDAR 系统和小光斑(0.1~2 m)LiDAR 系统
地面回波(ground returns)	由地面返回的激光脉冲
惯性导航系统(inertial navigation system, INS)	LiDAR 系统的一个重要组分, 通过记录飞行平台的俯仰角、侧滚角和航向角信息, 提供激光器在三维空间中的姿态信息
强度(intensity)	返回的激光脉冲与发射的脉冲能量的比率
插值(interpolation)	在某范围内现有测量点基础上, 通过插值模型对未采样区域赋以估计值, 常用自然临点法、样条法和 Kriging 插值法等方法对 LiDAR 点云进行插值处理生成连续的数字高程或者是树冠高度模型
激光探测和测距(light detection and ranging, LiDAR)	也称激光测高(laser altimetry), 依靠激光实现对目标测距的主动遥感系统
非地面回波(non-ground returns)	一种激光脉冲的回波分类, 该脉冲由地面之上的物体反射, 如植被、建筑物等
点云(point cloud)	在同一空间参考系下表达目标空间分布和目标表面特性的海量点集合
点间距(posting distance)	LiDAR 数据在水平方向上的平均间隔
脉冲(pulse)	LiDAR 传感器产生并发射出去的激光脉冲
脉冲持续时间或宽度(pluse duration or width)	激光脉冲的持续时间, 通常被定义为脉冲前沿和后沿之间达到总能量 50%时所经历的时间, 通常以纳秒计(ns)
脉冲能量(pulse energy)	每个激光脉冲所释放的能量, 通常以微焦计( $\mu\text{J}$ )
脉冲重复率(pulse repetition rate)	每秒发射的独立脉冲的次数, 表达为千赫兹(kHz)
回波(return)	由目标物反射并且被 LiDAR 传感器上的探测器接收并记录的脉冲
扫描角或视场角(scan angle or field of view, FOV)	由传感器的扫描机制确定的扫描线的角度范围, 通常表达为角度
扫描频率(scan rate)	每秒钟在垂直航线方向上激光脉冲的发射频率, 通常记为赫兹(Hz)
扫描带宽(swath width)	传感器下方所扫过的地形的宽度, 主要由飞行高度和扫描角决定, 以米(m)来表达
不规则三角网(triangulated irregular network, TIN)	根据区域的有限个点集将区域划分为相等的三角面网络, 数字高程由连续的三角面组成, 三角面的形状和大小取决于不规则分布的测点的密度和位置, 能够避免地形平坦时的数据冗余, 又能按地形特征点表示数字高程特征
波形记录(waveform recording)	通过连续的回波信号进行采样, 获取发射脉冲与目标相互作用后的信号在时间轴上的振幅信息, 从而形成较为完整的波形剖面, 也被称为“全波形数据”
波长(wavelength)	电磁波的两个相邻波峰之间的距离, 近红外波段的激光常常运用在地形制图中, 常以纳米(nm)或微米( $\mu\text{m}$ )表示



得注意的是, GLAS 数据应用前需要进行大量的前期校准<sup>[38]</sup>。

近几年来, 基于地面激光雷达的研究正逐渐兴起。这是因为机载 LiDAR 在提供单木尺度和样方尺度的林木信息方面能力有限, 而且也无法准确反映树冠下层植被情况。不同于机载 LiDAR 激光自上而下的穿透方式, T-LiDAR 贴近地面而且能够自下而上进行扫描, 所以能够很准确地获得树木的位置、胸径(DBH)、株数等信息; 而且 T-LiDAR 能够扫描的范围覆盖叶片尺度到森林样方尺度, 因而能够填补人工测量单木水平到机载 LiDAR 勘测景观水平之间的尺度空缺<sup>[11]</sup>, 同时也可以弥补机载 LiDAR 在获取林下结构以及测量胸径等参数的不足。自 2003 年以来, T-LiDAR 在硬件设施和数据处理方面都取得了显著进展<sup>[39~42]</sup>, 但目前大部分提取算法的前提条件都是分离出地面点, 而算法的有效性很大程度上受限于森林内部结构的复杂程度。所以, 现在急需提出一种适用于不同复杂程度森林的算法, 这也是推动地面激光雷达在森林资源调查和生态学研究之中普及应用的关键因素<sup>[43]</sup>。

## 2 激光雷达技术在生态监测、模拟中的应用

### 2.1 高分辨率数字地形产品生成

地形历来都被视为生态学研究中的重要环境影响因子<sup>[44,45]</sup>。一方面, 它是划分立地条件<sup>1)</sup>的重要参考因素; 另一方面, 地形因子通过对光照、水分、土壤条件的再分配促使群落生境分化, 进而间接影响植物群落的物种多样性、蓄积量等生物特性。

地形的细微变化可以通过数字高程模型(digital elevation model, DEM)来描述。以往经常通过 GPS 和全站仪组合测量的作业方式建立<sup>[47]</sup>, 虽然这种方法可以得到单点或小范围亚米级精度的 DEM, 但实践证明, 此法受限于人工操作、自然条件等因素, 整体作业效率低, 作业流程时间长<sup>[48]</sup>。

机载激光雷达技术能够穿透森林快速获取高分

辨率的数字地形产品, 其分辨率可达厘米级, 极大地优于传统 DEM 数据(图 2)。正因如此, 目前 LiDAR 数据已经成为生成 DEM 的一种重要数据来源。DEM 的构建往往通过地面点插值生成。选择何种插值方法、插值生成数据的分辨率大小, 都会影响插值结果的有效性、稳定性和精确性。Guo 等人<sup>[49]</sup>的研究表明, 由 LiDAR 数据生成 DEM 时, 在同时考虑地形起伏程

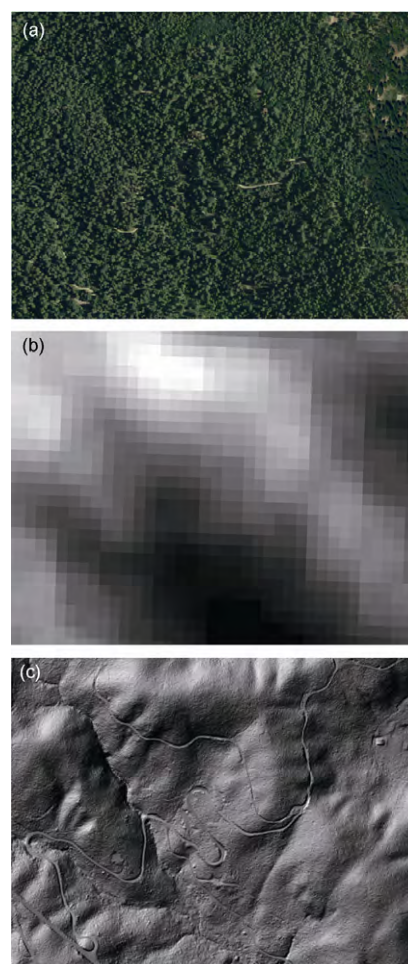


图 2 LiDAR 生成的 DEM 与其他数据 DEM 产品的效果对比

(a) 航空摄影拍摄的 1 m 分辨率航片; (b) 美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)生成的 30 m 分辨率 DEM 数据; (c) 机载 LiDAR 生成的 1 m 分辨率 DEM 数据

1) 立地条件又称“森林立地”或“立木环境”, 是林学术语, 指影响森林形成、生长发育、形态和生理活动的地形、气候、土壤、水文、生物、人为活动等各种外部环境条件的综合: (i) 地形, 包括海拔高度、坡向、坡形、坡度、微地形等; (ii) 气候, 包括光照、温度、水分等; (iii) 土壤, 包括土壤种类、土层厚度、腐殖质层厚度与腐殖质含量、土壤侵蚀度、质地、结构、紧实度、pH、石砾含量、母质种类及风化程度等; (iv) 水文, 包括地下水位深度与季节变化、地下水矿化度与盐分组成、有无季节性积水及其持续期、水淹可能性等; (v) 生物, 包括分布的植物种类、种的盖度、多度与优势种、群落类型以及病虫害状况等; (vi) 人为活动, 包括土地利用的历史沿革及现状、各种人为活动对上述环境因素的作用等。——摘编自《中国资源科学百科全书》<sup>[46]</sup>

度、激光点云密度以及插值精度的情况下,简单的插值方法,如反距离权重法(inverse distance weighted, IDW)、自然邻点法(natural neighbor, NN)和不规则三角网法(triangulated irregular network, TIN)更为高效;而基于 Kriging 的插值方法,如普通克里金(ordinary kriging, OK)和泛克里金(universal kriging, UK)则更为精确. 该项研究结果将有助于其他研究者在给定空间分辨率、点云密度和地形起伏程度条件下利用 LiDAR 数据生成 DEM 时做出合适的插值方法选择.

## 2.2 结构参数批量提取

森林资源调查的重要内容之一是测量样方内单

株木的树种、位置、高度(tree height)、胸径(DBH)、冠幅和样方的植株密度(stem density)、胸高断面积(basal area)等<sup>[5]</sup>. 与传统样方调查相比, LiDAR 技术最突出的特点是兼具细节与大尺度(图 3). T-LiDAR 可以选择“自下而上”的扫描方式,而且具有高点位密度和高精度的特点,所以林冠下层部分(如树干、枝叶)能够被清晰地记录下来,更加适合地面森林调查工作. 而机载、星载激光雷达“自上而下”扫描植被冠层,在记录森林垂直结构特征、提取冠层结构参数方面拥有巨大的潜力和优势. 可以说, LiDAR 生成了一个现实世界的“模型”,应用到林学与生态学中则是一个可以量测的真实三维群落. 如果能够从点云

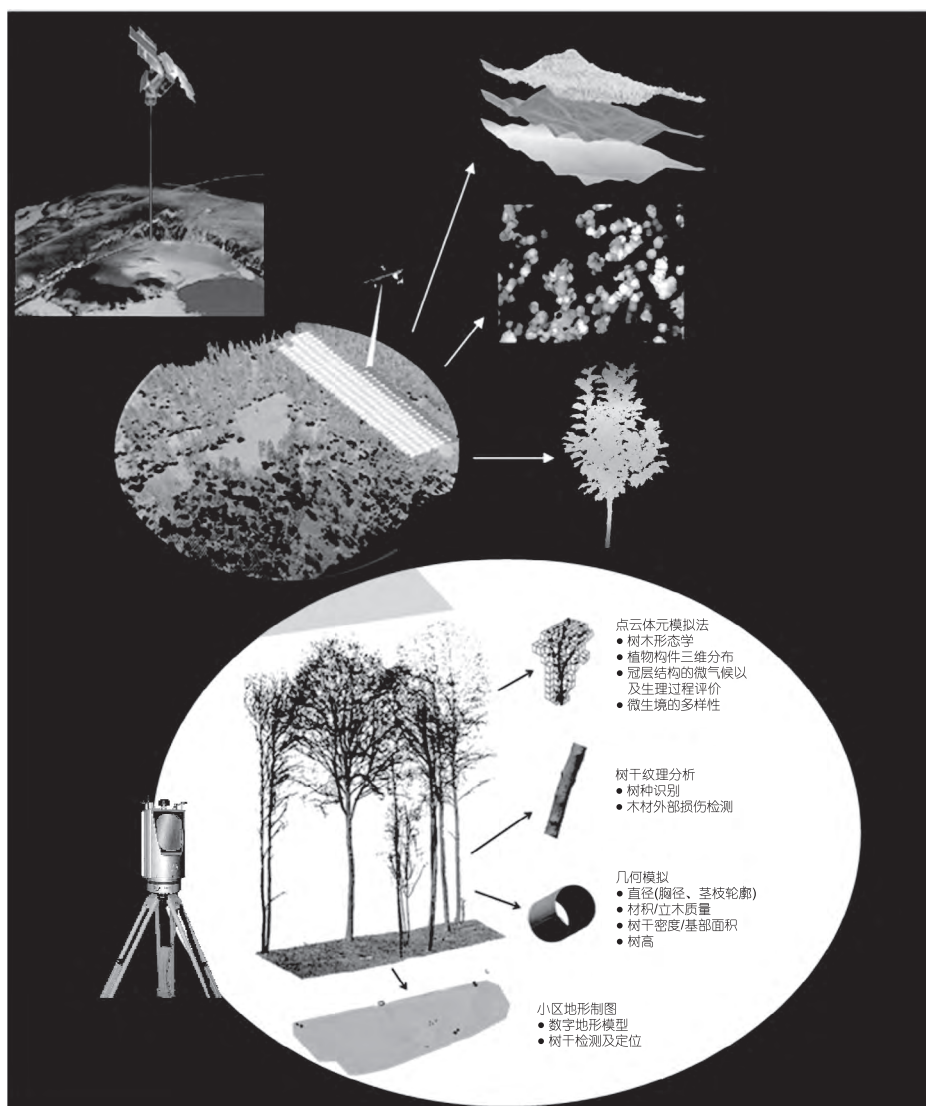


图 3 不同尺度激光雷达系统及其产品应用

ICESat2 示意图摘自 NASA LiDAR Technologies, Capabilities and Global Missions; T-LiDAR 扫描图片摘自 Dassot 等人<sup>[11]</sup>



数据中精确地分割出每一棵树,那么这一技术将极大地革新传统森林资源调查方法并细化生态模型输入参数内容。

一般来说,从 LiDAR 扫描的离散点云数据中提取结构参数的思路都是先基于一定的算法实现单木识别,然后再在此基础上进行树高、胸径、胸高断面、冠幅的提取计算和植株密度统计等。单木识别思路大体分为两种:(i)先分离出地面点和植被点,生成 DEM 和数字表面模型(digital surface model, DSM),二者差值建立冠层高度模型(canopy height model, CHM),进而对 CHM 数字图像依据计算机图形学方法进行区域分割处理,达到单木树冠识别的目的。代表算法有局部最大焦点滤波法(local maximum focal filter)<sup>[50]</sup>和分水岭分割算法(watershed segmentation)<sup>[51,52]</sup>等。因为这些算法均以 CHM 为基础,而插值生成 CHM 的过程往往会因各种因素引入许多误差<sup>[49]</sup>,如点的密度不够大等问题,所以导致算法的精确性极大地依赖于 CHM 的精细程度;(ii)直接进行点云分割。Li 等人<sup>[53]</sup>的算法是直接从点云入手,依据创建的点分类规则进行单木提取(图 4),识别率达 86%,准确率为 94%。这种算法利用了所有点云信息,避免了因插值产生 DEM 和 DSM 误差,将成为未来单木识别算法的研究方向。

全波形激光雷达系统通过数字化记录仪对整个回波进行采样,获取发射脉冲与目标相互作用后的信号在时间轴上的振幅信息,形成较为完整的波形剖面。全波形激光雷达数据不仅能获取距离信息,而且能利用后向散射特征分析目标的垂直分布,推断目标的结构和物理特性<sup>[54]</sup>。波形激光雷达系统根据光斑大小主要分为两类:(i)光斑大小在 0.2~3 m,具有较高脉冲重复频率的商用小光斑波形激光雷达系统;(ii)光斑大小在 8~70 m,脉冲重复频率较低、脉冲能量较强的大光斑波形激光雷达系统。小光斑系统获取的点云数据密度和数据精度较高,能够反映地表和林木的细节信息,并且可以标识出单木特征<sup>[15]</sup>;但是由于光斑较小和采取扫描式工作方式往往容易错失部分树顶信息,发射脉冲能量较弱也很难穿透密集的林下植被,获取大范围的数据通常需要多次飞行,存在数据获取成本偏高、数据量偏大等局限,有可能限制其在大面积森林空间结构信息提取中的应用。而大光斑系统则部分弥补了小光斑系统的缺陷,其优势体现在随着光斑的增大和发射脉

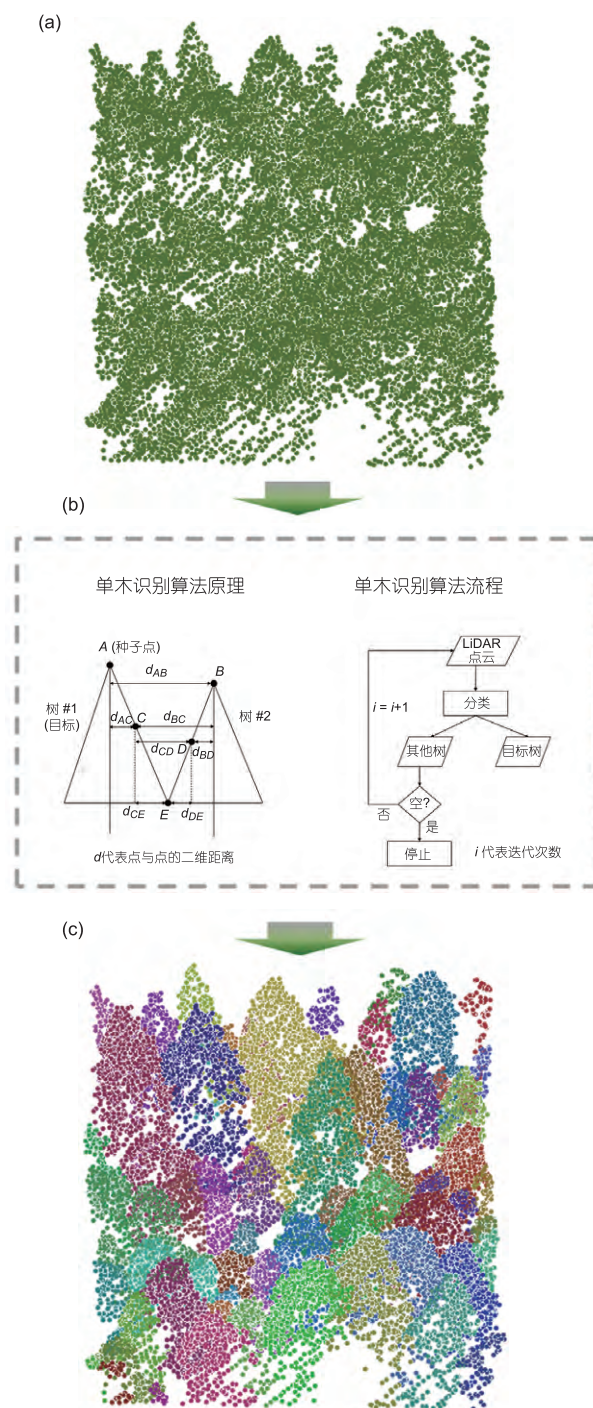


图 4 依据创建的点分类规则进行单木识别<sup>[53]</sup>

(a) 原始点云数据; (b) 单木切割算法的原理示意图和流程图;  
(c) Sierra Nevada 山脉混合针叶林样地的点云切割效果图

冲能量的增强,激光雷达系统获取大面积森林冠层空间结构信息的能力也明显增强;但大光斑波形数据精度略低,而且大光斑激光雷达传感器在空间上

采样不连续,无法达到无缝覆盖<sup>[15]</sup>.由于获取数据尺度的差异,大光斑和小光斑数据的处理与应用方式也不同.大光斑数据一般通过波形模拟和波形分解得到不同散射体的波形特征量<sup>[55]</sup>,最为常用的是基于高斯函数对回波波形拟合分解,进行林分尺度的冠层结构参数提取<sup>[56]</sup>;而小光斑数据由于数据量较大,已有的大部分研究都是先把全波形数据转换成离散点云数据,将提取的波形特征作为点云的属性值,然后再按已有的离散模型结合波形数据的相关特征参数进行后期数据处理分析,实现树种识别、冠幅和树冠体积等信息的提取<sup>[57,58]</sup>.

(i) 树高. 树高是反映材积和林地质量的重要参数.某些树木因为太高,在地面取样时存在困难,调查人员只能通过建立其与胸径的关系间接推测.能够获取高度信息是激光雷达技术区别于传统遥感技术的最主要特点,现有研究也较多.树高提取方法依不同激光雷达系统而异,既可在单木尺度上进行,也可以在更大范围内获取植被冠层平均高度信息.

Simonse 等人<sup>[59]</sup>最早采用霍夫变换(Hough transformation)从 T-LiDAR 扫描的点云数据中识别树干形状,测量从树干基部到树冠下方位置处树干的高度,取得了精度良好的结果(约 1 cm 误差).但是,采用此法估算树冠上部枝干高度时误差水平较高,这是由树冠内部枝条遮挡导致扫描效果欠佳造成的<sup>[60,61]</sup>.后来,Bienert 等人<sup>[62]</sup>形成了点聚类搜寻法(point cluster search)分离树干、最小二乘圆环拟合法(least square circle fitting)测量识别树干直径、多项式建模平滑法(polynomial model smoothing)测量冠层内部树干高度的一整套改进算法.针对小光斑激光雷达数据进行样地尺度树高提取所用的估测变量多是基于点云分位高度数据.Næsset<sup>[63]</sup>把机载激光雷达获取的林分均高与对应的 36 个林分实测树高数据对比分析后发现,二者之间的相关性高达 91%.庞勇等人<sup>[31]</sup>利用低密度和高密度的机载 LiDAR 点云数据,分别进行了林分平均高度反演的对比研究,结果表明,分位数法可以很好地进行林分均高的估计,但不同点云密度的反演结果差异不大.由波形数据实现树高提取是 Parker 等人<sup>[64]</sup>首次验证的,他们利用 SLICER 数据成功提取了不同树龄(从幼林到成熟林)、不同树冠类型的 5 个林区的树高.Blair 等人<sup>[65]</sup>介绍了 LVIS 在估测树高和树冠结构上的优势.Sun 等人<sup>[66]</sup>利用 LVIS 数据验证了 GLAS 数据提取树高的

可靠性,并发现二者波形数据提取的树高信息高度相关.邢艳秋和王立海<sup>[67]</sup>以长白山林区为例评估了大光斑激光雷达在坡地反演森林冠层高度的能力,认为在地形坡度不大于 15°的地区,GLAS 波形能够比较合理地反演森林冠层高度.在 Lefsky 等人<sup>[68]</sup>开发的“地形指数法”基础上,董立新<sup>[69]</sup>进行了改进,并提出了“质心-地形指数法”,提高了 GLAS 数据在坡度较大地区的森林冠顶高度反演精度.但是,研究结果普遍显示,由 LiDAR 提取的树高往往低于真实水平.低估原因依激光雷达系统不同略有差异.对于小光斑机载激光雷达系统和地面激光雷达系统而言,或者因为点云相对密度不够致使激光脉冲击中树顶位置的几率较小<sup>[70]</sup>,或者因为树木分布过于密集相互遮挡致使对树顶或树底的判断有误<sup>[71]</sup>,导致树高被低估现象发生.对于大光斑激光雷达系统来说,产生的树高低估现象主要因为光斑覆盖范围内地形和多棵树木的信号叠加.针对这些问题,还有待继续开发更多算法,提升树高估算精度.

(ii) 胸径. T-LiDAR 能够实现树木胸径的直接提取.首先,将点云分到一定大小的水平栅格单元中,每个单元中具有最低垂直方向坐标的点被确定为地面点<sup>[58,71]</sup>,内插生成数字地形模型(digital terrain model, DTM),这一步骤是后续信息提取的基础.然后,提取树干点云,进而确定立木位置和 DBH.这一过程常采用的方法是提取点云数据中距离地面 1.25~1.35 m 的所有点,利用形状识别技术在截取的数据层中检测所有的圆环点集(circular point clusters),由圆环点集拟合生成圆环确立树干,进而确定树的位置并计算 DBH.这些方法在 T-LiDAR 早期提取单木参数的研究应用中取得了良好的效果,后被广泛使用并扩展到测定不同高度位置的树干直径<sup>[72]</sup>.现在,Gorte 和 Pfeifer<sup>[73]</sup>提出了更为高级的算法,首先把点云覆盖区域划分成多个大小一致的三维体元空间,把点云投影到其中,然后采用形态学方法和连接性分析得到树干的三维(three dimensional, 3D)拓扑结构骨架,再利用 3D 结构元素和连接分析通过形态学操作提取树干和主要树枝,继而可以测量任何位置处的直径以及长度.

胸径也能够通过机载激光雷达数据估算,已有研究多是通过建立 LiDAR 提取的树高与地面实测 DBH 数据之间的异速生长关系间接反推胸径<sup>[74]</sup>.但此种方法因为涉及多层公式递推计算过程,得到的



结果往往误差极大<sup>[75]</sup>。也有研究者尝试用新的算法,如 $k$ 值最邻近邻(the  $k$ -most similar neighbor,  $k$ -MSN)算法、随机森林(random forest, RF)算法等,希望实现直接从机载激光雷达点云数据中提取 DBH 信息<sup>[75,76]</sup>。然而,使用机载激光雷达数据直接获取树木胸径的有效性以及精确性不容乐观,因为其自上而下的扫描方式就决定了这一结果。

(iii) 树冠结构。树冠通过影响光合作用和蒸散过程在植物与环境的相互影响适应过程中扮演重要角色。因此,冠层结构的改变能够敏锐反映出植物对其逆境胁迫的应变与适应。但是一直以来,冠层三维结构的复杂性导致实现其准确测量极具挑战。激光雷达技术具备的高采集速率和大范围监测能力,使其成为描述林冠复杂三维结构特征的有效工具,并能比传统技术更为迅速地确定林冠结构参数<sup>[9,32,77]</sup>。

激光雷达最直接获取的冠层结构参数便是 CHM,基于 CHM 就可以得到冠幅大小。Popescu 等人<sup>[50]</sup>通过拟合从最高点到邻域像元的一条 4 次曲线,进而通过找到该曲线的突变点来确定冠幅,并取得了较好的结果。总体比较,利用点云数据进行冠幅直接测量的研究并不多。Li 等人<sup>[53]</sup>提出,利用新的树冠分割算法从点云提取单木后,将属于该树的点云投影至二维平面,通过建立凸包(convex hull)也能获得冠幅大小。

森林冠层垂直和水平结构多样性可间接由冠层覆盖度(canopy cover)或者林窗空隙(gap fraction, GF)指数反映。Fleck 等人<sup>[78]</sup>基于 Leica HDS 4500 获得了一个落叶林样地的点云数据,使用 Leica Cyclone 软件虚拟树冠投影后与经典的 8-点冠层投影法相比,结果相关性达到了 0.9。T-LiDAR 在测量冠层的林窗空隙特征指数时,其结果甚至可与从鱼镜头拍摄的全天空照片(hemispherical photographs)结果相媲美<sup>[79]</sup>。Jupp 等人<sup>[80]</sup>、Strahler 等人<sup>[81]</sup>用全波形红外激光扫描仪估测这一指标时也获得同样的结论。

## 2.3 功能参数建模反演

激光雷达技术具有较强的获取森林三维结构的能力,而且获得的冠层结构参数与森林蓄积量、地上生物量具有很强的相关性,这无疑为大面积森林光合作用能力评估、生物量和碳储量估算提供了良好的手段。Lefsky 等人<sup>[82]</sup>比较了单时相和多时相 Landsat TM(thematic mapper)、SLICER、高分辨率 ADAR (airborne data acquisition and registration)和高光谱

AVIRIS (airborne visible-infrared imaging spectrometer)等传感器定量估算林分结构的结果后发现,LiDAR 估测胸高断面面积、高度和蓄积量等参数的精度比其他数据源高得多;激光雷达传感器的另一个特点是不存在光学遥感数据和微波雷达数据中光谱或信号饱和问题。所以,对于监测、模拟热带雨林等林分结构复杂、生物量高的地区具有显著优势。

(i) 叶面积指数(leaf area index, LAI)。叶面积指数(可以定义为单位地面面积上所有叶子表面积的总和(全部表面 LAI),也可以定义为单位面积上所有叶子向下投影的面积总和(单面 LAI)<sup>[83]</sup>),是反映森林冠层光合作用能力、群落生长状况的一个重要生物物理参数,垂直方向上的 LAI 格局更可用于元素循环、生境多样性、物种多样性等方面的研究<sup>[84,85]</sup>。已有许多直接或间接评价 LAI 的方法,如使用商业辐射分析仪直接测算 LAI,或是利用异速生长方程、凋落物取样分析或者光学遥感间接推算枝叶面积<sup>[11]</sup>。这些常规的技术仅通过广泛和昂贵的采样使 LAI 估计保持在可接受的误差限度内。LiDAR 数据的优势在于,它可以获得任意尺度的 LAI,可以在任意位置获取 LAI,避免了鱼镜头法因摄影位置选择而带来的误差,更为重要的是它能够获取垂直方向上 LAI 的连续变化。

目前,利用 LiDAR 进行 LAI 推算的研究越来越多,所用数据涵盖了离散点云与全波形类型,而且基于机载平台与地面平台均有应用。基于机载平台的 LAI 估算,大多数是通过建立林窗空隙(GF)与 LAI 的关系求得。Mosdorf 等人<sup>[86]</sup>利用小光斑机载雷达数据,基于多重回波建立了 GF 与 LAI 的计算公式,经与实测数据对比,结果较好。Richardson 等人<sup>[87]</sup>将 GF 代入 Beer-Lambert 方程进行 LAI 的估计,并比较了不同方法提取 LAI 的精度(图 5)。Tang 等人<sup>[88]</sup>利用 LVIS 全波形数据,基于几何光学-辐射传输(geometric optical-radiative transfer, GORT)混合模型估算出了 La Selva 热带雨林的垂直方向 LAI 连续变化曲线。事实上,最精准的测算叶面积指数的方法极有可能是利用 T-LiDAR 扫描,基于三维体元空间方法投影点云数据,然后利用辐射传输模型计算叶面积指数。Hosoi 和 Omasa<sup>[89]</sup>用这种方法计算了 LAI 和叶面积密度(leaf area density, LAD, 每单位体积的单叶总面积),他们的研究结果证实即使是对于密集、并呈非随机状态分布的树叶,该方法都可以实现 LAI 和 LAD 的精

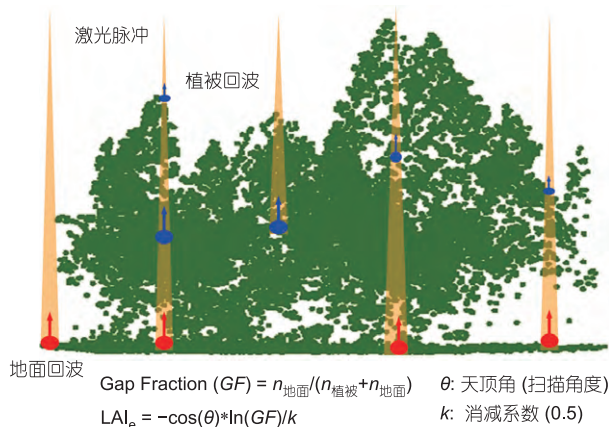


图 5 激光脉冲回波示意以及 GF, LAI 指数计算公式<sup>[87]</sup>

确计算。而且，他们的进一步研究认为，非光合组织的区分、叶倾角的分布、入射激光束的数量以及由天顶角确定的入射激光束垂直平面上单位叶面积的平均投影面积 4 个因素对于提高估算精度至关重要<sup>[90]</sup>。

(ii) 材积和蓄积量。材积和蓄积量是森林经营中常用的评价指标。材积是单木水平用语，指活立木树干部分的总体积；森林蓄积量指一定森林面积上活立木的总材积，是反映国家或地区森林资源总规模的基本指标之一，也是反映森林资源丰富程度的重要依据，往往与生物多样性高度相关。

传统获取材积的最直接方法是将树木采伐后分段计算体积，该方法破坏性强、效率低、在特殊地段实施存在困难。材积的间接计算方法是通过建立不同树种材积与树高、胸径的异速生长关系来获取。地面激光雷达在获取材积方面有着令人兴奋的优势，甚至可以不用进行树高、胸径的测量，而直接通过建立树的真实三维空间模型，然后积分精确计算单木材积。这种方法既可以在单木尺度上实现，又可以在景观尺度上进行。基于地面激光雷达数据提出的一种材积算法已被 Treemetrics 公司接受，集成在 AutoStem<sup>TM</sup> 软件中；Murphy<sup>[92]</sup>利用这一软件进行了道格拉斯冷杉(Douglas-fir)立木的材积量计算，通过与实测数据对比，材积仅被低估了 5%(因为树高低估造成)。另外，Lefsky 和 McHale<sup>[93]</sup>通过自己的算法，基于地面激光雷达扫描的三维点云数据建立了单木的三维模型，并进一步通过一定算法提取出了树干部分的体积。材积的精确测定为蓄积量的精确计算做好了准备，进而可以用于生物量的估算。

(iii) 生物量。区域尺度的森林生物量反演是研

究碳循环的重要组成部分，因此，利用激光雷达数据估测森林地上生物量已成为森林遥感研究的热点问题。现有研究多通过回归分析建模用于整个研究区内森林地上生物量估算<sup>[28,94]</sup>。前期研究表明，所有回波的平均高度、植被回波的平均高度以及它们各自的变动系数、分位高度等信息为有用的建模变量<sup>[95-97]</sup>。Næsset 和 Gobakken<sup>[98]</sup>考虑到森林生物量与郁闭度的关系，在百分位高度变量组基础上，增加了密度变量组，同时引入立地、龄级等作为虚变量，树种组成作为连续变量构建回归模型，其  $R^2$  能够达到 0.7 以上。Zhao 等人<sup>[99]</sup>另外新提出两个估算生物量模型，分别利用树冠高度分布(canopy height distribution, CHD)和树冠高度分位数(canopy height quantile, CHQ)函数建模，结果表明，这两个模型都能够精确地估计生物量，并且预测结果在各种尺度的表现都基本一致，其中  $R^2$  为 0.80~0.95，均方根误差(root mean square error, RMSE)为  $1.43 \times 10^7 \sim 3.37 \times 10^7 \text{ g/hm}^2$ 。需要特别指出的是，进行不同尺度生物量估算时，选择不同的异速生长模型，将产生显著不同的模拟结果(如模型解释的变异程度、模型选择的变量以及各个变量的重要性)<sup>[100]</sup>。

星载激光雷达结合光学遥感数据在大空间尺度的植被分布和生物量估测上将会发挥巨大作用。Baccini 等人<sup>[101]</sup>利用 MODIS 和 GLAS 数据对非洲热带森林地区进行生物量反演，并制成首张非洲热带生物量分布图。董立新等人<sup>[37]</sup>建立了复杂地形条件下利用 GLAS 和 ETM 联合反演森林地上生物量的神经网络模型。另外，利用 LiDAR 估算森林地上生物量的不确定性分析也越来越为研究者重视。Saatchi 等人<sup>[102]</sup>将 GLAS 数据与 MODIS, QuikSCAT 等数据相结合，对全球热带国家和地区进行了森林生物量估测，并给出了生物量反演的不确定性分析图。减少估算结果不确定性的关键是要确定引起不确定性的原因，模拟其积累和传播方式，并对输出结果的不确定性进行量化；然后根据引起不确定性的主要原因修正估算过程，进一步提高估算精度<sup>[103]</sup>。

(iv) 碳储量。估计区域森林有机碳库一直是森林生态系统碳循环研究的热点问题。目前，无论哪一尺度的森林碳储量估算，都是通过直接或间接测定森林植被生产量与生物现存量再乘以生物量中碳元素的含量得到。目前，国外应用 LiDAR 数据估测碳储量的研究刚刚起步。大多利用小光斑机载激光雷达数据进行碳储量的估算，可分为直接建立碳储量

与激光雷达数据之间的回归模型和由激光雷达数据得到树高、生物量、冠层高度信息与碳储量建立关系间接估测碳储量<sup>[104]</sup>两类。碳储量的数据来自于国际碳储量观测数据或者实地调查数据。

Stephens 等人<sup>[105]</sup>利用小光斑机载激光雷达数据在新西兰人工林进行了碳储量的研究,在样地水平上建立碳储量与激光雷达数据(波高比例、脉冲密度、雷达扩散标准差、地面回波百分比、相关系数、峰值、偏度等)的多元回归模型,模拟精度可达到 71%,如果在回归模型中引入冠层结构信息,模拟精度可达到 80%,进一步在模型中引入树密度信息后,模拟精度可达到 87%。机载激光雷达系统将会越来越广泛地应用于小范围森林地上碳汇研究;而星载激光雷达系统的发展,将为大面积森林碳汇监测提供有力支持。因此,在为国际社会制定、实施促进碳减排措施等人类减缓、扭转气候变化影响的应用方面,激光雷达将扮演重要角色。

### 3 激光雷达面临的挑战以及未来研究热点展望

#### 3.1 激光雷达技术面临的挑战

激光雷达数据的获取、处理成本相对较高,同时需要对海量数据进行存储和图像处理,技术要求相对较高;而且激光雷达理论体系有待进一步完善,数据及分析处理软件缺乏等,都限制了激光雷达的应用。

(i) 海量数据存储、组织与管理。激光雷达数据的信息量巨大,往往以 terabytes(TB)计算,而且获取成本在目前的遥感手段中是比较高的。如此海量的数据存储本身就需要占用巨大的空间,而且更为关键的是要对其进行调用、处理、分析,将会产生更大的空间需求。为解决此难题,目前已有研究开始就激光雷达的数据压缩问题进行探讨<sup>[106-108]</sup>,这也是目前激光雷达研究的一个前沿问题。对于数据成本来说,业界的普遍观点是,此问题只是暂时性的,随着科技水平的不断提高,未来激光雷达必将在价格与仪器本身大小方面实现“轻量化”。

(ii) 回波强度信息应用潜力亟待挖掘。在郁闭度较高的森林中(如热带雨林),机载激光雷达所获取的点云数据多分布在冠层表面,能够接收到穿透冠层内部的回波信号较少。这一缺憾可以通过加大扫描密度弥补,但也会产生另外新的问题,即重复扫描

会使作业成本骤增。有研究表明,波形数据具有较好的穿透冠层能力,但目前学术界以及整个行业对于解析波形数据的算法比较单调。有研究指出,强度信息可用于物种分类,而且能够取得令人满意的效果<sup>[58,109,110]</sup>。但总体而言,对强度信息的讨论研究刚刚起步,如何充分挖掘强度信息的应用潜力,可能会成为未来激光雷达的一个新研究方向。

(iii) 数据处理算法、软件稀缺。准确估算森林生态系统(特别是大尺度范围内)各类型参数,涉及地面数据采集、遥感数据源建模及精度验证等问题,过程非常复杂。对于不同区域的森林生态系统,其模型参数都不相同,建模方法也不尽相同。如何进一步更好地利用数学工具,将更多的方法如人工智能、空间统计学等融入森林生态系统参数估算,建立合适的激光雷达估算模型?怎样结合各地区森林生理生态特征,找到不同森林类型的共同性,将估算模型推广到大区域森林生态系统,并提高大尺度森林参数遥感估算精度?这些都是激光雷达参数定量化研究的难点。另外,LiDAR 估算森林参数的地面验证一直是个难题。具体来说,LiDAR 数据能够达到厘米甚至毫米级别的精度,其他方法往往难以达到相同的精度水平,而且在空间定位以及分辨率的匹配方面也存在困难。因此,遥感数据与地面调查样地尺度的差异,造成了验证的困难及不确定性。因此,构建标准的地面验证体系有助于提高不同研究的可对比性。

激光雷达数据在森林生态系统参数提取方面目前还没有真正全流程、一体化处理的软件可用。而要开发适用于生态、林业等相关领域的专业激光雷达数据处理系统还将经历漫长时间。而且,现有的软件功能多只限于数据显示或简单分类。另外,对于波形数据而言,现行的硬件和数据处理方法还无法充分利用能量信息。无疑这给激光雷达的推广应用设置了很大的障碍。另一方面,激光三维扫描系统在硬件方面发展迅速。随着图形处理器(graphic processing unit, GPU)与并行处理技术成本的下降与普及,未来借助 GPU 与并行技术处理点云数据的效率将被提升数十倍甚至更高(图 6)。这会极大地提高计算机对海量点云数据的处理和利用,必将进一步凸显 LiDAR 技术具有的优势。

#### 3.2 激光雷达技术未来研究热点展望

(i) 生境多样性立体化定量评价。目前,地球



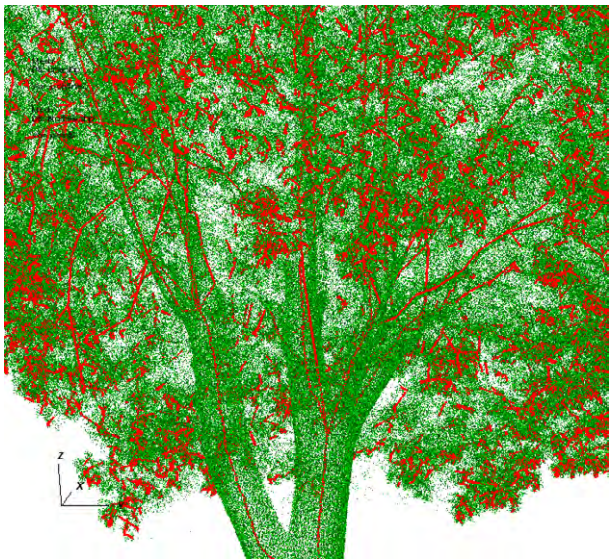


图 6 基于 T-LiDAR 数据自动提取树干、枝叶结构参数

上 3/4 物种聚集的地区正经历着空前规模的土地利用变化<sup>[111]</sup>。已有研究表明,土地利用变化将是导致 21 世纪陆地生物多样性丧失的最强劲驱动因子<sup>[112]</sup>, 因为其直接导致生境破碎化、生境丧失、物种灭亡和入侵物种扩散。而生物多样性是维持生态系统结构稳定、服务功能完备的重要因素,对生物多样性的影响势必引起生态系统结构与功能的重大改变。但令人遗憾的是,传统遥感方法仅能从平面角度描述物种生境格局,现在严重缺乏关于生境三维结构、质量的定量描述(如植被冠层高度(canopy height)、冠层生物量(canopy biomass),尤其是生物量垂直分布剖面轮廓(vertical biomass profiles)、冠底高度(canopy base height)等)<sup>[113]</sup>、物种对于栖息生境要求的三维刻画和模拟<sup>[110]</sup>以及生态系统改变的位置、幅度、速率<sup>[111]</sup>等相关信息和能够提供这些必需信息的有效观测技术手段。Butchart 等人<sup>[114]</sup>指出,目前无法对全球生境破碎化趋势做出准确判断。而 LiDAR 技术的逐步成熟,将极大推动生境多样性立体化定量评价方面的研究工作,有利于珍稀濒危物种栖息地的识别和保护。

早在 20 世纪七八十年代就有生态学家指出,树木个体大小(高度、胸径)差异大的群落往往预示着此生境的生物多样性更高。LiDAR 获取的数据验证了上述理论。如 Goetz 等人<sup>[115]</sup>在落叶林中的研究与 Clawges 等人<sup>[116]</sup>在针阔混交林中的研究表明,群落垂直方向结构的多样性与鸟类的多样性呈显著正相关;Lesak 等人<sup>[117]</sup>利用 LiDAR 获取的群落三维信息,

分析了不同高度区间鸟类的多样性与 LiDAR 变量的相关性,发现 LiDAR 信息均具有较好的解释能力。冠层高度数据可以作为林鸟栖息地质量模型的直接输入变量<sup>[118]</sup>。Broughton 等人<sup>[119]</sup>结合 LiDAR 数据与其他相关数据,发现了沼泽山雀(*Poecile palustris*)偏好选择成熟、且林下具有有灌层的地方作为栖息地;Kuffner 等人<sup>[120]</sup>基于 EAARL(experimental advanced airborne research lidar)数据研究发现,珊瑚礁的粗糙程度和褶皱程度与鱼类的丰度与多度均呈正相关;Zhao 等人<sup>[121]</sup>由 LiDAR 数据提取的生境变量能够有效反映鱼貂(California Fisher, *Martes pennanti*)对生境的选择标准,该研究表明, LiDAR 在刻画哺乳动物生境方面同样拥有巨大潜力;Nelson 等人<sup>[122]</sup>利用先验知识(即狐狸松鼠(*delmarva fox aquirel*)喜好林分密度较大且林下较空旷的地方作为栖息地),从 LiDAR 数据中预测了此物种的潜在生境,进而提出了保护其潜在生境的相应措施。这些研究充分显示了 LiDAR 在生物多样性模拟和监测应用中的广阔前景。

(ii) 真实森林三维景观重建。上文重点讲述了 LiDAR 如何进行常规测量、估算用于森林生态学研究 和森林经营管理的常用指标。而 LiDAR 能够进行更为复杂、高级的应用——真实三维景观重建(图 7)。虽然目前该项技术在森林景观水平上的应用研究相对较少,但是它有可能是揭示复杂多样生态系统结构与其功能之间相互作用机制的最为有效的手段;而且,它能为环境影响评价中的视觉效果评价(visual impact)提供全新的技术支撑。因此,下面将主要描述 LiDAR 技术在树木、森林复杂三维结构重建中的应用。

地面激光雷达数据最有可能实现对构件多样、形状复杂的植物的真实三维重建。自 2003 年以来,已经发展了很多方法用于树形态和轮廓的重建。目前,重建林木形状的最新方法就是将点云数据放置在由立体像元构成的空间中进行图形拓扑<sup>[73,93]</sup>。这一技术令识别树干和搭建枝条框架以及评价它们之间的关联度成为可能。在 Xu 等人<sup>[123]</sup>的研究中,利用与树干结构一致的点云数据合成细的枝干(利用双向过程探测),得到了较好的树干轮廓。利用叶的模型在这一轮廓上添加树叶,得到枝叶茂盛的树模型。这一过程高度依赖于扫描质量,因此大多数研究在重建长满叶子的树结构时不仅只依靠 T-LiDAR 数据<sup>[11]</sup>。

重建真实森林三维景观的另一个潜在应用是改

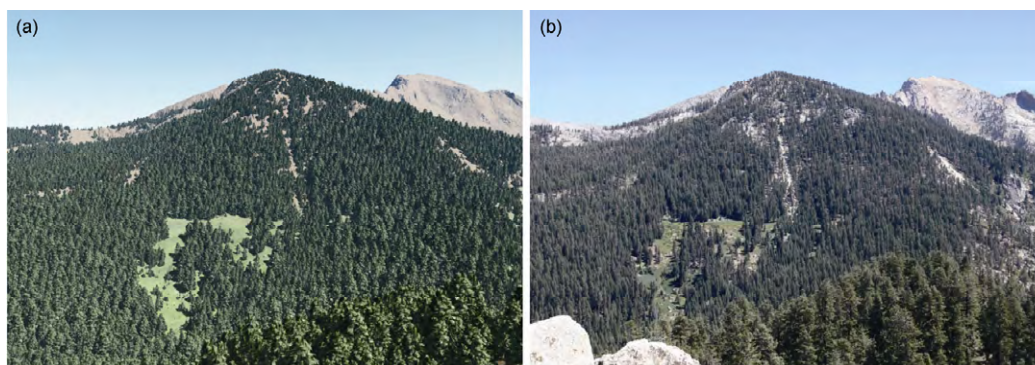


图7 森林景观可视化模拟效果对比  
(a) LiDAR 模拟结果; (b) 实景照片

进辐射传输模型。辐射传输是重要的物理过程,其直接决定了植被光合作用和蒸发过程。以往的辐射传输模型并没有过多考虑森林垂直方向上的异质性,往往假设森林在垂直方向上是同质的,这与现实不符。由于植被冠层结构复杂,传统方法很难获取数据,因此在许多生物物理模型中只是将植被当作单层对待<sup>[124]</sup>,对植被冠层内部的过程做简单化处理。在一些多层生物物理模型中不考虑植被在垂直方向上的异质性,而只是将植被分层均一化处理<sup>[125]</sup>。LiDAR 可以实现植被枝叶结构的三维重建,因而可以更加详细地刻画植被冠层(如叶量、枝叶角度)在垂直方向上的分布变化(如结构参数、叶面积密度等),这就为更加详细的辐射传输模型的开发提供了可能,从而可以很好地改进生物物理模型对碳水循环的模拟。Côté 等人<sup>[126]</sup>通过 T-LiDAR 数据重建了针叶树结构和光辐射的模型。利用 Optech ILRIS-3D 扫描仪对没有遮挡的树进行多站扫描;通过反射率的不同分开叶和枝干;利用曲线连接算法提取和枝干吻合的点云数据建立树干和第一层枝的结构;利用最短路线算法,将作为细分支元素的叶的点云数据添加到树干的轮廓模型上;接着将树嵌入到三维立体像元中,利用光线追踪算法进行分析。这一技术可以根据相应的立体像元对光线的阻隔数量,在枝干的轮廓模型上添加辐射特征。最后将生成的真实三维模型放在辐射传输模型中,计算反射特征和林冠结构对光的传输特性,发现与标准的测量(鱼镜头)结果有较好的吻合性<sup>[11]</sup>。

(iii) LiDAR 数据与多源遥感数据融合。随着遥感技术的发展,包括光学遥感、微波雷达、激光雷达、航空像片等多源遥感数据均已应用于森林类型、分布

与结构功能特征的监测与信息提取<sup>[127]</sup>。但是,不同遥感数据具有各自的特点。例如,传统光学遥感影像在获取大尺度水平结构参数方面有一定优势,但其穿透性差无法反演垂直结构参数,并且在获取森林生物量信息时敏感性差、易饱和;高光谱传感器由于超细的窄波段设计,其光谱响应比宽波段的多光谱数据更灵敏,可更好地描述植被特征实现冠层生物物理参数和化学参数的估测,但在区分光谱特征相似的树种时仍然受限;LiDAR 可以获取高精度的三维空间结构信息,但提供的光谱信息有限。所以,激光雷达数据如果能与其他遥感数据结合充分发挥多源遥感数据的优势,将有助于实现地物信息的获取和分类,有利于生态系统各项参数指标估算精度的提高,以及生态监测、模拟整体功能的加强。因而在当前如何有效地将 LiDAR 数据与多源遥感数据相融合进行生态学研究是一热点问题。

由于不同的遥感数据源具有不同的时空尺度分辨率,即使是 LiDAR 系统本身基于不同的平台得到的数据精细程度也不一致,所以如何有效联立卫星、飞机、地面 LiDAR 的协同观测数据构建太空、天空、地面一体化监测体系实现数据采集的无缝融合是首要问题;其次,在匹配光谱信息时如何将具有多尺度、多时相特征的数据源在空间上配准是影像融合的前提;最后,采用何种算法将多源影像有机结合以降低不确定性和误差、产生比单一信息源更精确可靠的估计和判断是更为关键的难点。不过从长远来看,研发生产兼具多光谱和高光谱性能的激光雷达扫描仪将有助于从根本上解决这些问题。

利用遥感技术进行森林树种分类一直都是遥感领域的应用热点,但仅利用单一遥感数据源实现这



一目标的效果并不理想,因为在野外进行物种分类鉴定本身就需要考证物种形态表征方面非常细微的差别才能完成. LiDAR 能够提供亚米级空间扫描分辨率,配合高分辨率相机提供扫描目标的真彩色纹理或者其他光谱信息,为利用遥感技术进行物种识别提供了可能. Haala 等人<sup>[128]</sup>以及 Reulke 和 Haala<sup>[129]</sup>利用 Zoller+Fröhlich 出品的 IMAGER 5003 扫描得到的点云数据配合高分全景影像数据基于树干结构分析进行了物种鉴定方面的尝试研究. 研究思路是,将同步得到的影像数据通过控制点和摄影几何模型(camera geometrical model)与点云数据配准、重合;再基于高斯曲率特征对点云数据进行分割以获取树干表面点云;最后,通过模糊熵方法(fuzzy entropy approach)<sup>[130]</sup>分割提取影像中的树干纹理特征. 结果表明,该方法能够实现对研究中选择的 5 个树种进行显著区分. 一旦实现利用遥感技术进行植被类型甚至物种信息的区分,将有助于提高大尺度生态系统参数的估算精度. Chen 等人<sup>[131]</sup>在这方面已经进行了初步尝试,他们利用机载激光雷达数据和航片提取的植被类型数据,估算了美国加利福尼亚州研究区内的森林地上生物量. 加入植被类型混合效应建模后的估算精度比仅利用激光雷达数据建模的估算精度高 5%,均方根误差降低 10%.

LiDAR 数据与其他遥感数据融合的一个潜在应用是制作新一代的数字化植被图. 20 世纪 70 年代,中国植被图绘制工作在侯学煜先生主持下取得了实质性进展;在此基础上,张新时先生编研的 1:100 万中国植被图问世并取得了广泛的应用<sup>[132]</sup>. 但是受当时技术条件所限,植被图绘制使用的遥感数据分辨率较为粗糙,植被类型的解译并不完全准确. 现在,激光雷达技术的发展可以提供厘米级的植被三维结构信息,如果融合具有多光谱波段的高光谱遥感数据,通过面向对象分类算法的实现,完全有可能绘制出集植被类型、高度、物种构成、分布范围等信息于统一系统的新一代数字植被图. 更为重要的是,激光雷达提供的三维空间信息可以极大地提高植被分类精度,用于获取地貌或生活型的多样性,如乔木、灌木、草本、藤本、垫状植物等,从而进一步丰富植被图的涵盖内容.

在发展精准农业方面,基于 LiDAR 与高光谱影像、热红外遥感成像、荧光分析等影像技术监测植物长势、形态和生理变化将具备很大的应用潜力. 植物

在生长过程中要经受来自各种生物(如疾病、昆虫)和非生物(环境胁迫)方面的影响. 例如,可以利用高精度的 T-LiDAR 获得监测对象的三维结构,同时通过纹理映射方法将同步电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)相机拍摄的自然彩色信息添加到扫描得到的三维结构图像上,清晰精确地测量作物和蔬菜播种后其茎叶构件大小和形状随时间的变化情况;还可通过三维显示的形状,捕捉到水分、养分、病虫害等胁迫导致的作物叶片倾斜、卷曲、萎蔫等形态响应<sup>[133]</sup>. 另外,结合荧光分析、高光谱、热红外遥感成像技术还能够精确测量植物不同组织结构的叶绿素荧光强度、植物因环境胁迫导致的气孔导度和蒸腾速率变化等生理生态指标<sup>[133]</sup>.

## 4 结语

一项斥资 4.34 亿美元的“霓虹计划(The National Ecological Observatory Network, NEON)”科学项目已由美国国家科学基金会启动,该项目计划在遍及全美的 60 个工程地点布设 1.5 万个传感器,将会收集到超过 500 多种生态研究所需的数据,用以建立大气圈和生物圈之间与土地利用、土地覆盖以及植被变化相关的重要反馈机制,并揭示气候变化、生物多样性、外来物种入侵和新增疾病(如西尼罗河病毒)之间的相互影响作用. 生态数据收集方式的变迁将极大地提高生态学家的工作效率,改变其留给普通大众的经验学科的印象,通过更好地了解政策对环境的效应并实施有助于减缓全球气候变化带来不良影响的措施,最终促成区域可持续发展能力的提升. 因此,本文认为,未来生态系统观测网络的发展趋势必将围绕构建数字生态系统(digital ecosystem)而展开.

数字生态系统即生态系统信息化,是以计算机技术、多媒体技术和大规模存储技术为基础,以宽带网络为纽带,综合运用遥感、地理信息系统、全球定位系统、遥测、仿真-虚拟、无线传感器、野外观测等技术,对生态系统进行以空间信息为核心的多时空和多元素的三维定量描述(包括生态系统构成要素的形状、格局、异质性、生物多样性以及不同组分之间的能量、物质和信息交换过程等),从而实现利用信息技术手段在网络虚拟现实加载生态系统的过去、现在和未来的全部内容(图 8).

激光雷达具有的(i)快速性;(ii)非破坏性;(iii)穿透性;(iv)主动性;(v)高密度、高精度;





图8 数字生态系统

(vi) 数字化、自动化<sup>[134]</sup>这些优良特性能够为数字生态系统建设的顺利进行提供可靠的技术保障。而且, 激光雷达遥感在多尺度空间范围内以及偏远、险峻地区获取精确性高而且全面的三维空间数据表现出的优越性是传统人力监测手段和被动光学遥感技术所无法比拟的。随着激光雷达技术的不断推广和数据处理软件商业化程度的提高, 它必定能为决策部门调控、优化人与环境关系, 推进生态文明建设, 实现人类社会永续发展提供有力支持。

**致谢** 感谢审稿人为本文提出的修改意见以及中国地质大学(武汉)徐世武副教授在做图方面给予的帮助。

## 参考文献

- 1 Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, et al. Human domination of earth's ecosystems. *Science*, 1997, 277: 494–499
- 2 Duro D C, Coops N C, Wulder M A, et al. Development of a large area biodiversity monitoring system driven by remote sensing. *Prog Phys Geog*, 2007, 31: 235–260
- 3 陈昌笃. 论地生态学. *生态学报*, 1986, 6: 289–294
- 4 宫鹏. 拓展与深化中国全境的环境变化遥感应用. *科学通报*, 2012, 57: 1379–1387
- 5 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范. *生物多样性*, 2009, 17: 533–548
- 6 Busby F E, Cox C A. *Rangeland Health: New Methods to Classify, Inventory and Monitor Rangelands*. Washington: National Academy of Sciences Press, 1994
- 7 West N E, Smith E L. Improving the monitoring of rangelands. *Rangelands*, 1997, 19: 9–14
- 8 Dai T, Wiegert R G. Ramet population dynamics and net aerial primary productivity of *spartina alterniflora*. *Ecology*, 1996, 77: 276–288
- 9 Lefsky M A, Cohen W B, Parker G G, et al. Lidar remote sensing for ecosystem studies. *Bioscience*. 2002, 52: 19–30
- 10 Vierling K T, Vierling L A, Gould W A, et al. Lidar: Shedding new light on habitat characterization and modeling. *Front Ecol Environ*, 2008, 6: 90–98
- 11 Dassot M, Constant T, Fournier M. The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: Application fields, benefits and challenges. *Ann Forest Sci*, 2011, 68: 959–974
- 12 Lim K, Treitz P, Wulder M, et al. LiDAR remote sensing of forest structure. *Prog Phys Geog*, 2003, 27: 88–106
- 13 Wang K, Franklin S E, Guo X, et al. Remote sensing of ecology, biodiversity and conservation: A review from the perspective of remote sensing specialists. *Sensors*, 2010, 10: 9647–9667
- 14 Wulder M A, Bater C W, Coops N C, et al. The role of LiDAR in sustainable forest management. *Forest Chron*, 2008, 84: 807–826
- 15 马利群, 李爱农. 激光雷达在森林垂直结构参数估算中的应用. *世界林业研究*, 2011, 24: 41–45
- 16 Hickman G D, Hogg J E. Application of an airborne pulsed laser for near shore bathymetric measurements. *Remote Sens Environ*, 1969, 1: 47–58
- 17 陈文革, 黄铁侠, 卢益民. 机载海洋激光雷达发展综述. *激光技术*, 1998, 22: 147–152
- 18 Hoge F E, Swift R N, Frederick E B. Water depth measurement using an airborne pulsed neon laser system. *Appl Optics*, 1980, 19: 871–883
- 19 Arp H, Griesbach J C. Mapping in tropical forests: A new approach using the laser APR. *Photogramm Eng Remote Sens*, 1982, 48: 91–100
- 20 Krabill W B, Collins J G, Link L E, et al. Airborne laser topographic mapping results. *Photogramm Eng Remote Sens*, 1984, 50: 685–694
- 21 Nelson R, Krabill W, Maclean G. Determining forest canopy characteristics using airborne laser data. *Remote Sens Environ*, 1984, 15: 201–212
- 22 熊辉丰. 激光雷达. 北京: 中国宇航出版社, 2007
- 23 隋立春, 张宝印. Lidar 遥感基本原理及其发展. *测绘科学技术学报*, 2006, 23: 127–129

- 24 Lefsky M A, Harding D, Cohen W B, et al. Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern maryland, USA. *Remote Sens Environ*, 1999, 67: 83–98
- 25 Lefsky M A, Cohen W B, Acker S A, et al. Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests. *Remote Sens Environ*, 1999, 70: 339–361
- 26 Drake J B, Dubayah R O, Clark D B, et al. Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar. *Remote Sens Environ*, 2002, 79: 305–319
- 27 Drake J B, Dubayah R O, Knox R G, et al. Sensitivity of large-footprint lidar to canopy structure and biomass in a neotropical rainforest. *Remote Sens Environ*, 2002, 81: 378–392
- 28 Drake J B, Knox R G, Dubayah R O, et al. Above-ground biomass estimation in closed canopy neotropical forests using lidar remote sensing: Factors affecting the generality of relationships. *Glob Ecol Biogeogr*, 2003, 12: 147–159
- 29 Maltamo M, Packalen P, Yu X, et al. Identifying and quantifying structural characteristics of heterogeneous boreal forests using laser scanner data. *For Ecol Manage*, 2005, 216: 41–50
- 30 Koetz B, Sun G, Morsdorf F, et al. Fusion of imaging spectrometer and lidar data over combined radiative transfer models for forest canopy characterization. *Remote Sens Environ*, 2007, 106: 449–459
- 31 庞勇, 李增元, 谭炳香, 等. 点云密度对机载激光雷达林分高度反演的影响. *林业科学研究*, 2008, 21 (增刊): 14–19
- 32 刘清旺, 李增元, 陈尔学, 等. 利用机载激光雷达数据提取单株木树高和树冠. *北京林业大学学报*, 2008, 30: 83–89
- 33 Jakubowski M K, Guo Q, Collins B, et al. Predicting surface fuel models and fuel metrics using lidar and cir imagery in a dense, mountainous forest. *Photogramm Eng Remote Sens*, 2013, 79: 37–49
- 34 李松. 星载激光测高仪发展现状综述. *光学与光电技术*, 2004, 2: 4–6
- 35 李然, 王成, 苏国中, 等. 星载激光雷达的发展与应用. *科技导报*, 2007, 25: 58–63
- 36 Lefsky M A. A global forest canopy height map from the moderate resolution imaging spectroradiometer and the geoscience laser altimeter system. *Geophys Res Lett*, 2010, 37: 1–5
- 37 董立新, 吴炳方, 唐世浩. 激光雷达 GLAS 与 ETM 联合反演森林地上生物量研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 2011, 47: 703–710
- 38 Pang Y, Lefsky M A, Andersen H E, et al. Validation of the ICESat vegetation product using crown-area-weighted mean height derived using crown delineation with discrete return lidar data. *Can J Remote Sens*, 2008, 34: S471–S484
- 39 Hopkinson C, Chasmer L, Young-Pow C, et al. Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. *Can J For Res-Rev Can Rech For*, 2004, 34: 573–583
- 40 Liang X, Litkey P, Hyypia J, et al. Automatic stem mapping using single-scan terrestrial laser scanning. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2012, 50: 661–670
- 41 Huang H, Li Z, Gong P, et al. Automated methods for measuring DBH and tree heights with a commercial scanning lidar. *Photogramm Eng Remote Sens*, 2011, 77: 219–227
- 42 罗旭, 冯仲科, 邓向瑞, 等. 三维激光扫描成像系统在森林计测中的应用. *北京林业大学学报*, 2007, 29 (增刊): 82–87
- 43 李丹, 庞勇, 岳彩荣. 地基激光雷达在森林参数反演中的应用. *世界林业研究*, 2012, 25: 34–39
- 44 李博. 普通生态学. 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 1993
- 45 孙儒泳, 李博, 诸葛阳, 等. 普通生态学. 北京: 高等教育出版社, 1993
- 46 孙鸿烈. 中国资源科学百科全书. 北京: 石油大学出版社, 2000
- 47 成菲, 杨建勇. 提高热带雨林地区地形测量技术探讨. *科技创新与应用*, 2012: 18–19
- 48 刘静, 陈涛, 张培震, 等. 机载激光雷达扫描揭示海原断裂带微地貌的精细结构. *科学通报*, 2013, 58: 41–45
- 49 Guo Q, Li W, Yu H, et al. Effects of topographic variability and lidar sampling density on several DEM interpolation methods. *Photogramm Eng Remote Sens*, 2010, 76: 701–712
- 50 Popescu S C. Estimating biomass of individual pine trees using airborne lidar. *Biomass Bioenerg*, 2007, 31: 646–655
- 51 Persson A, Holmgren J, Soderman U. Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogramm Eng Remote Sens*, 2002, 68: 925–932
- 52 Chen Q, Baldocchi D, Gong P, et al. Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data. *Photogramm Eng Remote Sens*, 2006, 72: 923–932
- 53 Li W, Guo Q, Jakubowski M K, et al. A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud. *Photogramm Eng Remote Sens*, 2012, 78: 75–84
- 54 段祝庚, 肖化顺. 机载激光雷达森林参数估算方法综述. *林业资源管理*, 2011, (4): 117–121
- 55 刘清旺, 李增元, 陈尔学, 等. 森林冠层探测激光雷达的波形特征分析. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41: 1670–1678
- 56 Simard M, Pinto N, Fisher J B, et al. Mapping forest canopy height globally with spaceborne lidar. *J Geophys Res*, 2011, 116: G04021

- 57 Pirotti F. Analysis of full-waveform lidar data for forestry applications: A review of investigations and methods. *iForest-Biogeosci Forest*, 2011, 4: 100–106
- 58 Heinzl J, Koch B. Exploring full-waveform lidar parameters for tree species classification. *Int J Appl Earth Obs Geoinf*, 2011, 13: 152–160
- 59 Simonse M, Aschoff T, Spiecker H, et al. Automatic determination of forest inventory parameters using terrestrial laser scanning. In: Hyypä J, Naesset E, Olsson H, et al, eds. *Proceeding of the Scand Laser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests*. Umeå: Institutionen of Forest Resource Management, Swedish University of Agricultural, 2003
- 60 Henning J G, Radtke P J. Detailed stem measurements of standing trees from ground-based scanning lidar. *Forest Sci*, 2006, 52: 67–80
- 61 Maas H G, Bienert A, Scheller S, et al. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. *Int J Remote Sens*, 2008, 29: 1579–1593
- 62 Bienert A, Scheller S, Keane E, et al. Tree detection and diameter estimations by analysis of forest terrestrial laser scanner point clouds. In: *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and Silvilaser 2007*, Espoo, Sept 12–14, 2007
- 63 Næsset E. Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 1997, 52: 49–56
- 64 Parker G G, Lefsky M A, Harding D J. Light transmittance in forest canopies determined using airborne laser altimetry and in-canopy quantum measurements. *Remote Sens Environ*, 2001, 76: 298–309
- 65 Blair J B, David L R, Michelle A H. The laser vegetation imaging sensor: A medium-altitude, digitisation-only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 1999, 54: 115–122
- 66 Sun G, Ranson K J, Kimes D S, et al. Forest vertical structure from GLAS: An evaluation using LVIS and SRTM data. *Remote Sens Environ*, 2008, 112: 107–117
- 67 邢艳秋, 王立海. 基于 ICESat-GLAS 完整波形的坡地森林冠层高度反演研究——以吉林长白山林区为例. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2009, 34: 696–700
- 68 Lefsky M A, Harding D J, Keller M, et al. Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: 1–4
- 69 董立新. 基于多源遥感数据的三峡库区森林冠层高度与生物量估算方法研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2008. 1–10
- 70 Holmgren J, Nilsson M, Olsson H. Simulating the effects of lidar scanning angle for estimation of mean tree height and canopy closure. *Can J Remote Sens*, 2003, 29: 623–632
- 71 杨伯钢, 冯仲科, 罗旭, 等. Lidar 技术在树高测量上的应用与精度分析. *北京林业大学学报*, 2007, 29 (增刊): 78–81
- 72 Aschoff T, Thies M, Spiecker H. Describing forest stands using terrestrial laser scanning. In: *Proceedings of Commission V, XXth ISPRS Congress*. Istanbul, 2004
- 73 Gorte B, Pfeifer N. Structuring laser-scanned trees using 3D mathematics morphology. *Int Arch Photogramm Remote Sens*, 2004, 35: 929–933
- 74 Jensen J L R, Humes K S, Conner T, et al. Estimation of biophysical characteristics for highly variable mixed-conifer stands using small-footprint lidar. *Can J For Res-Rev Can Rech For*, 2006, 36: 1129–1138
- 75 Vauhkonen J, Korpela I, Maltamo M, et al. Imputation of single-tree attributes using airborne laser scanning-based height, intensity, and alpha shape metrics. *Remote Sens Environ*, 2010, 114: 1263–1276
- 76 Yu X, Hyypä J, Vastaranta M, et al. Predicting individual tree attributes from airborne laser point clouds based on the random forests technique. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 2011, 66: 28–37
- 77 Henning J G. Modeling forest canopy distribution from ground-based laser scanner data. Doctor Dissertation. Blacksburg: the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005
- 78 Fleck S, Obertreiber N, Schmidt I, et al. Terrestrial lidar measurements for analysis canopy structure in an old-growth forest. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 2007, 36: Part 3/W52
- 79 Danson F M, Giacosa C, Armitage R P. Two-dimensional forest canopy architecture from terrestrial laser scanning. In: *Proceedings of the ISPRS Working Group VII/1 Workshop ISPRSRS*, 2007. <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/7-C50/papers/T28.pdf>
- 80 Jupp D L B, Culvenor D S, Lovell J L, et al. Estimating forest lai profiles and structural parameters using a ground-based laser called ‘Echidna®’. *Tree Physiol*, 2009, 29: 171–181
- 81 Strahler A H, Jupp D L B, Woodcock C E, et al. Retrieval of forest structure parameters using a ground-based lidar instrument (Echidna®). *Remote Sens Environ*, 2008, 34: S426–S440
- 82 Lefsky M A, Cohen W B, Spies T A. An evaluation of alternate remote sensing products for forest inventory, monitoring, and mapping of Douglas-fir forests in western Oregon. *Can J Forest Res*, 2001, 31: 78–87



- 83 方秀琴, 张万昌. 叶面积指数(LAI)的遥感定量方法综述. 国土资源遥感, 2003, (3): 58–62
- 84 Jukes M R, Ferris R, Peace A J. The influence of stand structure and composition on diversity of canopy Coleoptera in coniferous plantations in Britain. *Forest Ecol Manag*, 2002, 163: 27–41
- 85 Swatantran A, Dubayah R, Roberts D, et al. Mapping biomass and stress in the Sierra Nevada using lidar and hyperspectral data fusion. *Remote Sens Environ*, 2011, 115: 2917–2930
- 86 Morsdorf F, Koetz B, Meier E, et al. Estimation of LAI and fractional cover from small footprint airborne laser scanning data based on gap fraction. *Remote Sens Environ*, 2006, 104: 50–61
- 87 Richardson J J, Moskal L M, Kim S H. Modeling approaches to estimate effective leaf area index from aerial discrete-return LIDAR. *Agric For Meteorol*, 2009, 149: 1152–1160
- 88 Tang H, Dubayah R, Swatantran A, et al. Retrieval of vertical LAI profiles over tropical rain forests using waveform lidar at La Selva, Costa Rica. *Remote Sens Environ*, 2012, 124: 242–250
- 89 Hosoi F, Omasa K. Voxel-based 3-D modeling of individual trees for estimating leaf area density using high-resolution portable scanning lidar. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2006, 44: 3610–3618
- 90 Hosoi F, Omasa K. Factors contributing to accuracy in the estimation of the woody canopy leaf area density profile using 3D portable lidar imaging. *J Exp Bot*, 2007, 58: 3463–3473
- 91 Acuna M, Murphy G, Rombousts J. Determining Radiata pine tree value and log product yields using terrestrial LiDAR and optimal bucking in South Australia. In: 2009 Council on Forest Engineering (COFE) Conference Proceedings “Environmentally Sound Forest Operations, Lake Tahoe, June 15–18, 2009
- 92 Murphy G. Determining stand value and log product yields using terrestrial lidar and optimal bucking: A case study. *J For*, 2008, 106: 317–324
- 93 Lefsky M, McHale M. Volume estimates of trees with complex architecture from terrestrial laser scanning. *J Appl Remote Sens*, 2008, 2: 1–19
- 94 Asner G P, Mascaro J, Muller-Landau H C, et al. A universal airborne lidar approach for tropical forest carbon mapping. *Oecologia*, 2012, 168: 1147–1160
- 95 Nelson R, Oderwald R, Gregoire T G. Separating the ground and airborne laser sampling phases to estimate tropical forest basal area, volume, and biomass. *Remote Sens Environ*, 1997, 60: 311–326
- 96 Lim K, Treitz P, Baldwin K, et al. Lidar remote sensing of biophysical properties of tolerant northern hardwood forests. *Can J Remote Sens*, 2003, 29: 658–678
- 97 Lim K S, Treitz P M. Estimation of above ground forest biomass from airborne discrete return laser scanner data using canopy-based quantile estimators. *Scand J Forest Res*, 2004, 19: 558–570
- 98 Næsset E, Gobakken T. Estimation of above- and below-ground biomass across regions of the boreal forest zone using airborne laser. *Remote Sens Environ*, 2008, 112: 3079–3090
- 99 Zhao K, Popescu S, Nelson R. Lidar remote sensing of forest biomass: A scale-invariant estimation approach using airborne lasers. *Remote Sens Environ*, 2009, 113: 182–196
- 100 Zhao F, Guo Q H, Kelly M. Allometric equation choice impacts lidar-based forest biomass estimates: A case study from the Sierra National Forest, CA. *Agric For Meteorol*, 2012, 165: 64–72
- 101 Baccini A, Laporte N, Goetz S J, et al. A first map of tropical Africa’s above-ground biomass derived from satellite imagery. *Environ Res Lett*, 2008, 3: 1–8
- 102 Saatchi S S, Harris N L, Brown S, et al. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108: 9899–9904
- 103 黄从红, 张志永, 张文娟, 等. 国外森林地上部分碳汇遥感监测方法综述. *世界林业研究*, 2012, 25: 20–26
- 104 王宏钰, 沈欢. 国内外森林碳储量估测研究现状. *科技信息*, 2012, 77
- 105 Stephens P R, Watt P J, Loubser D, et al. Estimation of carbon stocks in New Zealand planted forests using airborne scanning LiDAR. In: *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*. Espoo, Sept 12–14, 2007. 389–394
- 106 杨玲, 刘春, 吴杭彬, 等. 顾及矢量特征的机载 lidar 点云数据压缩方法. *地理与地理信息科学*, 2009, 25: 25–29
- 107 Oryspayev D, Sugumaran R, DeGroote J, et al. LiDAR data reduction using vertex decimation and processing with GPGPU and multicore CPU technology. *Comput Geosci*, 2012, 43: 118–125
- 108 Cao N, Zhu C, Kai Y, et al. A method of background noise reduction in lidar data. *Appl Phys B-Lasers O*, 2013, 113: 115–123
- 109 Vaughn N R, Moskal L M, Turnblom E C. Tree species detection accuracies using discrete point lidar and airborne waveform lidar. *Remote Sens*, 2012, 4: 377–403

- 110 Yao W, Krzystek P, Heurich M. Tree species classification and estimation of stem volume and DBH based on single tree extraction by exploiting airborne full-waveform LiDAR data. *Remote Sens Environ*, 2012, 123: 368–380
- 111 Hall F G, Bergen K, Blair J B, et al. Characterizing 3D vegetation structure from space: Mission requirements. *Remote Sens Environ*, 2011, 115: 2753–2775
- 112 Sala O E, Chapin F S I, Armesto J J, et al. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 2000, 287: 1770–1774
- 113 Weise D R, Biging G S. A qualitative comparison of fire spread models incorporating wind and slope effects. *Forest Sci*, 1997, 43: 170–180
- 114 Butchart S H M, Walpole M, Collen B, et al. Global biodiversity: Indicators of recent declines. *Science*, 2010, 328: 1164–1168
- 115 Goetz S, Steinberg D, Dubayah R, et al. Laser remote sensing of canopy habitat heterogeneity as a predictor of bird species richness in an eastern temperate forest, USA. *Remote Sens Environ*, 2007, 108: 254–263
- 116 Clawges R, Vierling K, Vierling L, et al. The use of airborne lidar to assess avian species diversity, density, and occurrence in a pine/aspen forest. *Remote Sens Environ*, 2008, 112: 2064–2073
- 117 Lesak A A, Radeloff V C, Hawbaker T J, et al. Modeling forest songbird species richness using lidar-derived measures of forest structure. *Remote Sens Environ*, 2011, 115: 2823–2835
- 118 Hinsley S A, Hill R A, Gaveau D L A, et al. Quantifying woodland structure and habitat quality for birds using airborne laser scanning. *Funct Ecol*, 2002, 16: 851–857
- 119 Broughton R K, Hinsley S A, Bellamy P E, et al. Marsh Tit *Poecile palustris* territories in a British broad-leaved wood. *Ibis*, 2006, 148: 744–752
- 120 Kuffner I B, Brock J C, Grober-Dunsmore R, et al. Relationships between reef fish communities and remotely sensed rugosity measurements in Biscayne National Park, Florida, USA. *Environ Biol Fish*, 2007, 78: 71–82
- 121 Zhao F, Sweitzer R A, Guo Q, et al. Characterizing habitats associated with fisher den structures in the Southern Sierra Nevada, California using discrete return lidar. *For Ecol Manage*, 2012, 280: 112–119
- 122 Nelson R, Keller C, Ratnaswamy M. Locating and estimating the extent of Delmarva fox squirrel habitat using an airborne LiDAR profiler. *Remote Sens Environ*, 2005, 96: 292–301
- 123 Xu H, Gosset N, Chen B. Knowledge and heuristic based modeling of laser-scanned trees. *ACM T Graphic*, 2007, 26: 19
- 124 Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, et al. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMS. Part I: Model formulation. *J Clim*, 1996, 9: 676–705
- 125 Baldocchi D D, Meyers T P. On using eco-physiological, micrometeorological and biogeochemical theory to evaluate carbon dioxide, water vapor and gaseous deposition fluxes over vegetation. *Agric For Meteorol*, 1998, 90: 1–26
- 126 Côté J F, Widłowski J L, Fournier R A, et al. The structural and radiative consistency of three-dimensional tree reconstructions from terrestrial lidar. *Remote Sens Environ*, 2009, 113: 1067–1081
- 127 汤旭光, 刘殿伟, 王宗明, 等. 森林地上生物量遥感估算研究进展. *生态学杂志*, 2012, 31: 1311–1318
- 128 Haala N, Reulke R, Thies M, et al. Combination of terrestrial laser scanning with high resolution panoramic images for investigations in forest applications and tree species recognition. In: *Proceedings of the ISPRS working group V/1, 'Panoramic Photogrammetry Workshop'*. Dresden, Germany, 19–22 February 2004
- 129 Reulke R, Haala N. Tree species recognition with fuzzy texture parameters. In: Klette R, Žunić J, eds. *Combinatorial Image Analysis*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. 607–620
- 130 Kundu M K, Pal S K. Automatic selection of object enhancement operator with quantitative justification based on fuzzy set theoretic measures. *Pattern Recogn Lett*, 1990, 11: 811–829
- 131 Chen Q, Laurin G V, Battles J J, et al. Integration of airborne lidar and vegetation types derived from aerial photography for mapping aboveground live biomass. *Remote Sens Environ*, 2012, 121: 108–117
- 132 中国科学院中国植被图编辑委员会. 中华人民共和国植被图(1:1000000). 北京: 地质出版社, 2007
- 133 Omasa K, Hosoi F, Konishi A. 3D lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure. *J Exp Bot*, 2007, 58: 881–898
- 134 王永波. 基于地面 LiDAR 点云的空间对象表面重建及其多分辨率表达. 南京: 东南大学出版社, 2011

## Perspectives and prospects of LiDAR in forest ecosystem monitoring and modeling

GUO QingHua<sup>1</sup>, LIU Jin<sup>1</sup>, TAO ShengLi<sup>1,2</sup>, XUE BaoLin<sup>1</sup>, LI Le<sup>1</sup>, XU GuangCai<sup>1</sup>, LI WenKai<sup>1</sup>, WU FangFang<sup>1</sup>, LI YuMei<sup>1</sup>, CHEN LinHai<sup>1</sup> & PANG ShuXin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China;

<sup>2</sup> Department of Ecology, College of Urban and Environmental Science, Peking University, Beijing 100871, China

Light Detection And Ranging (LiDAR) is an active remote sensing technology for acquiring high resolution 3D terrain and vegetation structure parameters over multiple tempo-spatial scales, which can help to accurately monitor and model forest ecosystem dynamics. Consequently it plays an important role in understanding the impact of such dynamics on the carbon cycle and global climate change, and promoting biodiversity conservation. In this paper, we review the concepts and recent developments of LiDAR and explore the application of LiDAR in generating terrain models (e.g. digital elevation and digital surface models) and retrieving forest biophysical parameters (e.g. individual tree locations, leaf area index, volumes, biomass and carbon stocks). Finally, we present challenges for LiDAR in forestry applications, and suggest three major research issues for future study. We believe that there is an inevitable trend to constructing a digital ecosystem research network via combining spaceborne, airborne, and ground-based sensor measurements in an integrated platform, where LiDAR can provide an accurate and efficient solution for capturing 3D environmental variables. Thus, LiDAR will contribute to improving the relationship between man and nature in decision-making processes and eventually realizing a harmonious coexistence.

**remote sensing, plant communities, ecosystem, biodiversity, point cloud**

doi: 10.1360/972013-592