



新一代遥感技术助力生态系统生态学研究

郭庆华* 胡天宇 马 勤 徐可心 杨秋丽 孙千惠 李玉美 苏艳军

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; 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 随着气候变化和人类活动的加剧, 生态系统正处于剧烈变化中, 生态学家需要从更大的时空尺度去理解生态系统过程 and 变化规律, 应对全球变化带来的威胁和挑战。传统地面调查方法主要获取的是样方尺度、离散的数据, 难以满足大尺度生态系统研究对数据时空连续性的要求。相比于传统地面调查方法, 遥感技术具有实时获取、重复监测以及多时空尺度的特点, 弥补了传统地面调查方法空间观测尺度有限的缺点。遥感通过分析电磁波信息从而识别地物属性和特征, 反演生态系统组成、能量流动和物质循环过程中的关键要素, 已逐渐成为生态学研究必不可少数据来源。近年来, 随着激光雷达、日光诱导叶绿素荧光等新型遥感技术以及无人机、背包等近地面遥感平台的发展, 个人化、定制化的近地面遥感观测逐渐成熟, 新一代遥感技术正在推动遥感信息“二维向三维”的转变, 为传统样地观测与卫星遥感之间搭建了尺度推绎桥梁, 这也给生态系统生态学带来了新的机遇, 推动生态系统生态学向多尺度、多过程、多学科、多途径发展。因此, 该文从生态系统生态学角度出发, 重点关注陆地生态系统中生物组分, 并分别从生态系统类型、结构、功能和生物多样性等方面, 结合作者在实际研究工作中的主要成果和该领域国际前沿动态, 阐述遥感技术在生态系统生态学中的研究现状并指出我国生态系统遥感监测领域发展方向及亟待解决的问题。

关键词 近地面遥感; 激光雷达; 无人机; 高光谱; 日光诱导叶绿素荧光

郭庆华, 胡天宇, 马勤, 徐可心, 杨秋丽, 孙千惠, 李玉美, 苏艳军 (2020). 新一代遥感技术助力生态系统生态学研究. 植物生态学报, 44, 418–435. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0206

Advances for the new remote sensing technology in ecosystem ecology research

GUO Qing-Hua*, HU Tian-Yu, MA Qin, XU Ke-Xin, YANG Qiu-Li, SUN Qian-Hui, LI Yu-Mei, and SU Yan-Jun

State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; and University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

As the increasing pressure caused by climatic changes and human activities, the structure and function of terrestrial ecosystems are undergoing dramatic changes. Understanding how ecosystem processes change at large spatial-temporal scales is crucial for dealing with the threats and challenges posed by global climate change. Traditional field survey method can obtain accurate plot-level ecosystem observations, but it is difficult to be used to address large-scale ecosystem patterns and processes because of spatial and temporal discontinuities. Compared to traditional field survey methods, remote sensing has the advantages of real-time acquisition, repeated monitoring and multi spatial-temporal scales, which can compensate for the shortcomings of traditional field observation methods. Remote sensing can be used to identify the type and characteristic of ground objects, and extract key ecosystem parameters, energy flow and material circulation through retrieving the information contained by electromagnetic signals. Remote sensing data have become an indispensable data source in ecological studies, especially at the ecosystem, landscape, regional or global scales. With the emergence of new remote sensing sensors (e.g., light detection and ranging, and solar-induced chlorophyll fluorescence) and near-surface remote sensing platforms (e.g., unmanned aerial vehicle and backpack), remote sensing is entering the three-dimensional era and the observation platform become more diverse. These three-dimensional, multi-source and time-series remote sensing data bring new opportunities to fully understand ecosystem processes across different spatial scales. This paper reviews the advances of the application of remote sensing in terrestrial ecosystem studies. Specifically, this study focuses on the derivation of biological factors from remote sensing data, including vegetation types, structures, functions and biodiversity of terrestrial ecosystems. We also summarize the current status of the remote

收稿日期Received: 2019-08-06 接受日期Accepted: 2019-10-14

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0503905)和中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-319-06)。Supported by the National Key R&D Program of China (2017YFC0503905), and the Key Deployment Project of the Chinese Academy of Sciences (KFZD-SW-319-06).

* E-mail: qguo@ibcas.ac.cn

sensing technology in ecosystem studies and suggest the future opportunities of ecosystem monitoring in China.

Key words near-surface remote sensing; lidar; unmanned aerial vehicle (UAV); hyperspectral; solar-induced chlorophyll fluorescence

Guo QH, Hu TY, Ma Q, Xu KX, Yang QL, Sun QH, Li YM, Su YJ (2020). Advances for the new remote sensing technology in ecosystem ecology research. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44, 418–435. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0206

生态系统是指在自然界中特定的空间内, 由植物、动物和微生物群落, 以及无机环境通过物质循环和能量流动相互作用而构成的一个动态、复杂的功能单元(Chapin III *et al.*, 2011)。自从Tansley (1935)提出生态系统概念以来, 生态学研究从关注单一物种与环境的关系逐渐向生物因子与环境因子整体关系转变。生态系统生态学的核心研究内容包括生态系统组成和属性、组织结构与功能、生态过程与格局变化等(于贵瑞, 2009), 通过获取生物因子和环境因子的相关信息, 进而研究环境因素与生物的相互作用、生态系统中能量流动和物质循环等规律。随着气候变化和人类活动加剧, 全球生态系统发生剧烈变化使得生态学家需要从更大的时空尺度去理解生态系统过程和变化规律, 从而应对全球变化带来的威胁和挑战。传统生态系统生态学的调查方法虽然能够获取精准的观测值, 但是由于观测尺度有限, 无法满足全球变化背景下更大空间尺度或更长时间尺度的观测需求。此外, 生态学本身也在向着更大尺度发展(Dumbrell *et al.*, 2016; 于振良等, 2017), 如景观生态学、全球生态学、宏观生态学等, 现有研究手段亟需融入新的技术手段。

遥感是一种非接触的探测技术, 通过传感器采集目标对象发出或反射的电磁波信息, 并对电磁波信息进行传输、变换和处理, 定性、定量地揭示被探测物体的形象和状态。不同地物因其物理性质和化学组成差异, 所反射、吸收和发射的电磁波信息不同, 遥感技术通过分析电磁波信息从而识别地物属性和特征, 反演生态系统的组成以及能量流动和物质循环过程中的关键要素。相比于传统地面调查方法, 遥感技术具有实时获取、重复监测以及多时空尺度的特点, 弥补了传统地面调查方法空间观测尺度有限的缺点, 为生态系统研究走向多尺度、多过程、多学科、多途径提供了关键观测技术(张扬建等, 2017)。

随着半导体、计算机、自动化和航天等技术的发展, 遥感传感器和运载平台迅速迭代更新, 使得遥感技术能够通过机器人、汽车、无人机、飞机和

卫星等平台, 搭载微波雷达、激光雷达、多/高光谱等各种传感器(图1), 实现对生态系统中生物和环境因子(地表温度、土壤含水量、降水量等)的高频次、长时序、多尺度的立体观测, 为生态系统生态学开展物质循环和能量流动等研究提供详实的观测资料(Pettorelli *et al.*, 2014)。本文从生态系统生态学角度出发, 重点综述遥感技术在陆地生态系统中获取生物因子信息的应用, 主要关注生态系统类型、结构、功能和生物多样性等方面, 阐述遥感技术在生态系统生态学中的研究现状, 并探讨我国生态系统遥感监测领域的发展方向及亟待解决的问题。

1 遥感技术在生态系统研究中的发展历史

光学遥感是最早应用于生态系统研究的技术, 可追溯到20世纪30年代, 主要用于监测生态系统类型及其变化。苏联是应用遥感技术较早的国家, E. B. 维诺格拉多夫教授是苏联最早将遥感技术应用于植被和生态系统研究的代表人物, 他将航空航天遥感技术应用于干旱和半干旱区植被的指示性研究(陈昌笃, 1986)。1972年, 美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发射了第一颗Landsat卫星, 其获取的光谱信息被用于植被生物物理参数的提取(如叶面积指数、覆盖度等)以及生长状况的监测(Chen & Cihlar, 1996; Gao, 1996; Cohen & Goward, 2004; Hansen *et al.*, 2013)。自Landsat系列卫星和MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)卫星共享数据以来, 卫星遥感技术极大地推动了生态系统研究在景观、区域、全球等尺度的发展(Kerr & Ostrovsky, 2003; Chambers *et al.*, 2007)。随着卫星遥感数据的积累, 长时序的遥感观测数据及其产品为研究生态系统对气候变化的响应提供了重要的数据支持(Pettorelli *et al.*, 2005)。

光学遥感(RGB相机、多光谱、高光谱成像仪)获取的主要是生态系统水平方向的光谱信息, 能够定量提取生态系统的生化组分并实现生产力监测, 却难以精准获取生态系统垂直结构信息(表1)。随着

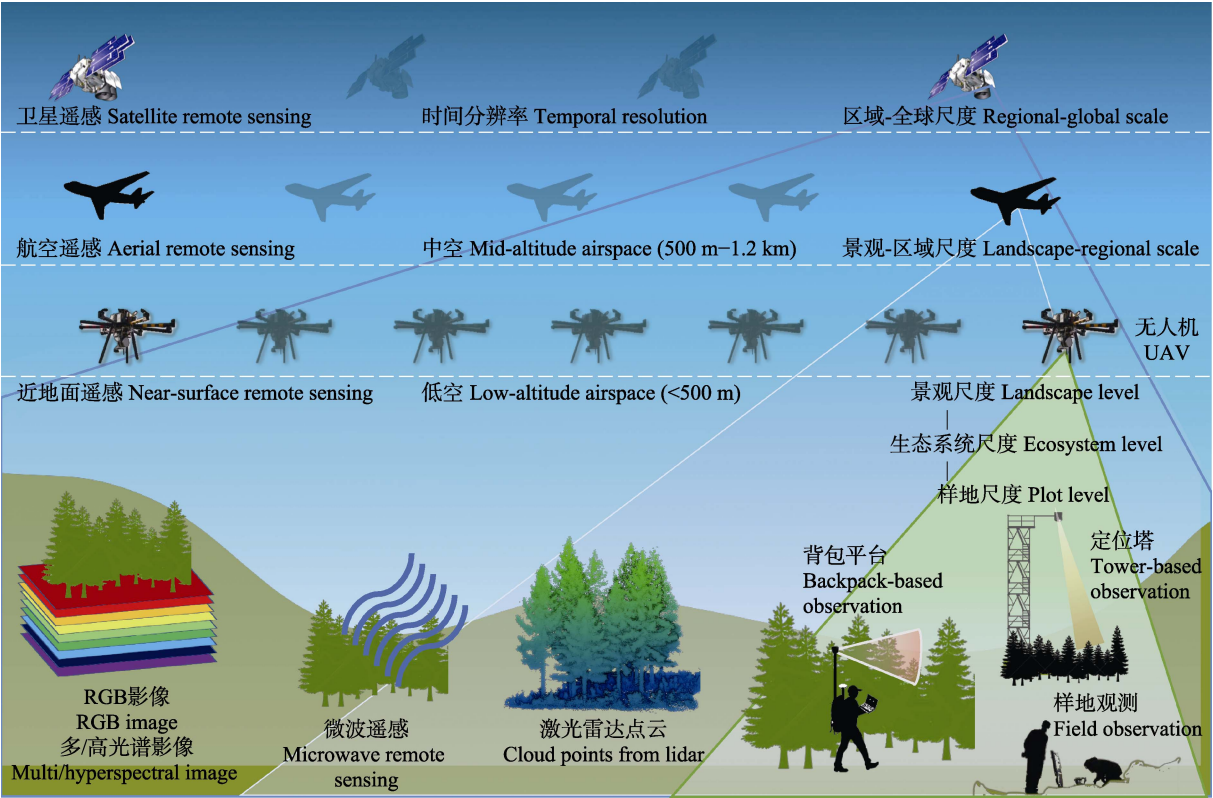


图1 多尺度、多平台的生态系统遥感监测概念图。
Fig. 1 Illustration of ecosystem monitoring with different sensors aboard various remote sensing platforms. UAV, unmanned aerial vehicle.

表1 不同传感器的技术优势及其主要应用领域
Table 1 Summary of advantages and applications of five major remote sensing sensors

传感器 Sensor	技术优势 Advantage	主要应用领域 Application
RGB 相机 RGB camera	获取高空间分辨率的颜色和纹理信息 Capturing color and texture at high spatial resolution	生态系统类型、植被状况、物候 Ecosystem type, vegetation monitoring, phenology
多光谱/高光谱成像仪 Multi-spectral/ hyperspectral scanner	获取数个或上百个波段的反射率信息 High spectral resolution; obtaining of several or hundreds spectral bands' reflectance	生态系统类型、物种分类、生化组分、植被健康、 物候 Ecosystem type, species classification, biochemical composition, vegetation health, phenology
微波雷达 Microwave radar	全天候, 对林冠具有一定的穿透性, 能够获取部分地下信息 All-weather; limited penetrating vegetation canopy; capturing below- ground information	地形、蓄积量、树高、生物量 Topographic information, stand volume, tree height, biomass
叶绿素荧光扫描仪 Solar-induced chlorophyll fluorescence scanner	获取日光诱导的叶绿素荧光信息 Collecting solar-induced chlorophyll fluorescence	初级生产力、物候、胁迫监测 Gross primary production, phenology, stress monitor- ing
激光雷达扫描仪 Lidar scanner	对林冠具有穿透性, 获取精细地形、丰富植被三维信息 Penetrating vegetation canopy; obtaining fine terrain and 3D vegetation information	地形、胸径、树高、叶面积指数、生物量 Topographic information, diameter at breast height, tree height, leaf area index, biomass

激光雷达和微波雷达等主动遥感技术的出现, 因其对植被具有穿透能力, 主动遥感已经成为获取生态系统垂直结构信息的重要手段(表1), 被广泛应用于包括树木定位、树高估算和生物量预测等研究领域(Lefsky *et al.*, 2002; Lim *et al.*, 2003; Houghton, 2005; 庞勇等, 2005; 郭庆华等, 2014, 2018)。微波遥感可以获取部分森林垂直结构信息, 在反演森林蓄

积量和生物量时常受饱和问题困扰, 但是探地雷达能够穿透地面, 获取激光雷达无法获取的地下粗根生物量及分布(Hruska *et al.*, 1999; Butnor *et al.*, 2001)。

近十年来, 以无人机平台为代表的近地面遥感技术兴起并逐渐成熟, 使得原本由对地观测计划或重大研究项目等才能运转的生态系统遥感观测, 逐

渐转变成个人和研究团体也能直接开展。近地面遥感技术能够提供高精度的光谱、影像和激光雷达数据,并且可以弥补卫星遥感与传统调查之间的尺度空缺问题(郭庆华等, 2016)。同时,新兴遥感技术的出现也为研究生态系统过程提供了更直接的监测数据,如日光诱导叶绿素荧光技术(solar-induced Chlorophyll fluorescence, SIF),并逐渐成为监测生态系统总初级生产力的新方法(Frankenberget al., 2011; Guanter et al., 2014)。遥感技术的发展为生态系统研究提供了多源、多尺度、长时序的遥感数据,使遥感监测成为了生态系统研究中不可替代的技术手段。

2 遥感技术在生态系统生态学研究中的应用进展

2.1 生态系统类型

生态系统类型是最早利用遥感技术获取的生态系统要素之一,也是开展不同尺度生态格局变化、碳氮循环模拟以及生态系统服务评估等研究的基础。从陆地生态系统分类体系来看,高级别的生态系统类型可以简单等于土地覆盖信息,根据遥感反演的土地覆盖数据结合气候、地形等影响植被分布的要素可用于生成更低级别的生态系统类型。早期的土地覆被信息获取主要基于航片,根据不同地物在光谱曲线上的反射率信息差异,采用监督(最大似然、神经网络、支持向量机、贝叶斯网络、决策树分类、随机森林等算法)或非监督(如ISODATA、K-means等算法)的分类方法,实现影像中的森林、灌丛、草地、湖泊、农田等信息的提取。随着卫星遥感技术的发展,生态系统类型信息的获取从局地 and 景观尺度逐渐向区域和全球尺度发展。在国际地圈生物圈计划(International Geosphere-Biosphere Programme, IGBP)的支持下, Loveland和Belward (1997)基于1992和1993年AVHRR的植被指数数据根据IGBP的土地覆被分类方案,制成了全球首个1 km的土地覆盖数据集。随着卫星资源的丰富、分类方法的迭代以及地面数据的积累,全球土地覆盖集日益增多而且空间分辨率越来越精细。GLC2000项目基于SPOT4遥感数据开发了1 km全球土地覆盖数据集;MODIS卫星每年能够更新一次全球土地覆盖数据产品(Bartholomé & Belward, 2005);Chen等(2015)提出POK分类框架,利用Landsat及其类似的

卫星遥感数据构建了全球30 m的地表覆被数据集;Gong等(2019)利用2015年在30 m分辨率的卫星数据获取的样本,迁移建模生产了2017年全球10 m的地表覆被数据集。

近年来,得益于机载和无人机机载等遥感技术的发展,使得获取更精细的生态系统类型信息成为可能。传统卫星遥感由于空间分辨率和光谱分辨率有限,只能在植被型或植被亚型的层级去描述生态系统类型。机载遥感和无人机遥感技术获取的空间分辨率往往是厘米级或亚米级,结合高光谱成像仪能够实现群系级别的生态系统类型信息获取。Cochrane (2000)利用高光谱扫描仪测定热带雨林内11个物种的光谱反射率,分析反射率的空间特征信息发现高光谱技术能够很好地用于物种的识别。激光雷达技术的出现,使得地表三维信息的直接获取成为可能,让传统光学遥感中的灌丛和森林误分难题迎刃而解。Sankey和Bond (2011)利用激光雷达数据结合地面调查数据在爱达荷州绘制了5种灌丛群落类型的空间分布图。融合三维信息和光谱信息后,遥感技术能够为生态学家开展研究提供更丰富的生态系统类型信息。Naidoo等(2012)利用机载高光谱和激光雷达数据实现了稀疏草原中更精细的树种信息提取。Su等(2016a)在美国加利福尼亚州内华达山脉利用机载激光雷达数据和航空相片,基于贝叶斯和K-means聚类的非监督分类方法实现了植被类型的绘制,其最终结果表明,融入激光雷达数据的分类效果相较于传统方法更加精确,且可以划分更多类型。

除了生态系统类型的空间分布格局研究,生态系统的类型演变也是遥感技术在该方向上的热点问题。由于气候变化、人类活动加剧等因素,不同尺度的生态系统类型和格局正在发生剧烈的演变(Turner et al., 2007)。长时序、周期性的卫星遥感为研究不同尺度的生态系统类型演变提供了宝贵的数据源,通过变化检测识别生态系统类型在时空尺度上的分布和属性变化,结合气候因子、极端天气事件、人类活动等因子,评估气候变化和干扰对生态系统格局的影响,揭示生态系统格局研究的驱动机制。Hansen等(2010, 2013)分别利用2000–2005年MODIS数据和2000–2012年Landsat影像数据,绘制了全球森林分布的动态,揭示了不同区域森林面积变化的驱动机制。Dong等(2013)利用长时间序列的多光谱数据反映物候信息,从植被物候差异入手实

现了天然林与橡胶经济林的区分。Tao等(2015)利用1977–2010年近2 200幅的Landsat影像, 全面评估了蒙古高原湖泊在过去30年间的变化, 发现蒙古高原湖泊在过去30年间呈快速消退状态, 且中国内蒙古与蒙古国湖泊消退程度及其驱动机制明显不同。Wang等(2017, 2018)利用PALSAR和Landsat影像分析了红刺柏(*Juniperus formosana*)在1984–2010年间如何侵入草地生态系统。

2.2 生态系统功能

生态系统功能是指生态系统内部及其与外部环境之间的联系与作用, 主要表现为能量流动、物质循环和信息传递, 它决定了生态系统提供服务的质量和总量(Odum & Barrett, 1971)。遥感技术的快速发展为生态系统功能方面的研究带来了新的机遇, 其通过分析电磁波信息从而识别地物属性和特征, 反演生态系统能量流动和物质循环过程中的关键要素, 如植被指数、生化组分、生产力等(Chen & Cihlar, 1996; Kokaly *et al.*, 2009; Skidmore *et al.*, 2010)。

植被指数是对植被状况描述最简单、最有效的参数, 常用于指示各类生态系统的健康状况以及受干扰程度。自从归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, *NDVI*)被提出后, *NDVI*作为一个重要指标被广泛用于生态系统研究, 如生态系统恢复(Viedma *et al.*, 1997)、生态系统退化(Wessels *et al.*, 2004)等。由于光学遥感只能获取二维平面的信息, *NDVI*在植被低覆盖度区域或高生物量区域存在不准确或饱和问题。因此, 大量用于克服这些障碍的其他植被指数被提出, 如适用于低覆盖度区域的土壤调节植被指数(Soil-Adjusted Vegetation Index, *SAVI*)(Qi *et al.*, 1994), 能够缓解一定饱和效应的增强植被指数(Enhance Vegetation Index, *EVI*)。长时间序列的植被指数为研究区域尺度乃至全球尺度生态系统过程提供了重要的数据支持(Pettorelli *et al.*, 2005)。分析时间序列*NDVI*数据可以提取生态系统关键物候信息, 如返青、生长季盛期、生长季末期等, 结合气候因子可以揭示不同生态系统对气候变化的响应(Zhang *et al.*, 2003; Wieneke *et al.*, 2016; Piao *et al.*, 2019)。然而, 光学遥感易受观测条件(如云、雪等)和自身传感器的影响, 其提取的物候信息仍具有很大的不确定性(Tucker *et al.*, 2005; White *et al.*, 2009)。

生化组分是体现生态系统活力和衡量生态系统

特征的重要指标, 也是反映生产能力、环境适应性等属性的重要植物功能性状。早期卫星遥感技术主要用于反演大尺度的生化组分, 受空间分辨率和光谱分辨率影响能够反演的生化组分要素有限, 主要为叶片中含量较高的部分生化组分, 如叶绿素(Daughtry *et al.*, 2000)和类胡萝卜素(Datt, 1998)。高光谱遥感技术的发展使得定量精确反演生态系统植被冠层中的各种生化组分成为可能, 除各种叶绿素含量外, 木质素、纤维素含量(Kokaly *et al.*, 2009), 氮、磷、钾、镁、钙等元素含量(Mutanga & Skidmore, 2004; Ramoelo *et al.*, 2013), 含水量(Cheng *et al.*, 2006)及多酚类含量(Skidmore *et al.*, 2010)等均能被提取。近年来, 融合高光谱与激光雷达数据的生化组分反演研究日益增长, 一方面使得遥感可以获取个体水平的生化组分(Feret & Asner, 2012), 另一方面能够从反演方法上消除冠层结构对生化组分反演的干扰(Knyazikhin *et al.*, 2013)。个体尺度生化组分是链接地面观测数据与遥感反演的生化组分的关键, 机载和无人机载高光谱与激光雷达数据的融合使得生态系统尺度、景观尺度和区域尺度的生化组分获取成为了可能。

总初级生产力(Gross Primary Productivity, *GPP*)是表征生态系统物质生产和能量流动的关键因子。基于遥感的生产力监测可分为两类, 一类是基于遥感植被指数的统计模型, 另一类是基于经典的光能利用率模型(Landsberg *et al.*, 1997; Running *et al.*, 2000; Zhao *et al.*, 2005)。Potter等(1993)提出了Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA)模型, 证明了光学遥感具有表征生态系统生产力的潜力, 并在*GPP*的估算中得到了广泛应用。然而, 在植被覆盖度高的地区, 基于光学遥感反演的植被指数易受饱和效应的影响, 且对环境压力引起的光合反应变化并不敏感, 不能直接作为植物真实光合作用的指示器(Li *et al.*, 2018b)。近年来, SIF成为直接估测*GPP*的更为可靠的一种方法, 研究发现与传统的植被指数相比, SIF更能直接地揭示植物的实际光合作用状况, 更早地监测植被健康状况变化以及环境胁迫的影响(Guanter *et al.*, 2014; Frydenvang *et al.*, 2015; Sun *et al.*, 2017)。

2.3 生态系统结构

遥感观测技术能够获取生态系统的形态结构, 主要包括各种生物成分或群落的水平结构、垂直结

构和时空分布格局。光学遥感是最早应用于获取生态系统结构参数的技术手段, 由于其对植被的穿透性不足, 主要获取水平方向上的生态系统结构信息, 如覆盖度、叶面积指数、林窗参数等(Chen & Cihlar, 1996; Gao, 1996; Hansen *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2015)。随着具有植被冠层穿透能力的微波遥感和激光雷达遥感技术出现, 获取垂直方向上的生态系统结构信息成为了可能, 因此这两种技术被广泛应用于树高、胸径、生物量等参数的提取(Lefsky *et al.*, 2002; Lim *et al.*, 2003; 郭庆华等, 2014)。

覆盖度主要指单位面积内植被垂直投影面积所占的比率, 是常用于评估生态系统质量的关键参数。光学遥感反演覆盖度常采用像元二分法, 即每个像元都可分解为纯植被和纯土壤两部分, 每个像元的NDVI由纯植被和纯土壤的NDVI线性相加得到, 输入纯植被和纯土壤的NDVI即可估算覆盖度。该方法使用起来十分简单, 但缺点也很明显, 获取的覆盖度易饱和, 反演的准确度常受选择的纯植被和纯土壤的NDVI影响。激光雷达技术也常用于反演森林覆盖度(Morsdorf *et al.*, 2006; Vepakomma *et al.*, 2008)。与光学遥感不同, 激光雷达反演覆盖度的原理更贴近地面观测, 即根据激光束打到植被和地面的比例, 准确度更高(Smith *et al.*, 2009)。高空间分辨率的覆盖度信息可以用于提取另一水平方向上重要的结构信息——林窗。林窗主要由冠层乔木的死亡或移除等原因引起, 是森林生态系统演替研究中必不可少的要素(Watt, 1947; Yamamoto, 1992)。传统林窗调查主要基于林下摄影的方法, 常因其光照条件和视角等原因, 获取的林窗参数不准确且调查效率低下, 难以满足生态系统尺度的林窗动态研究(Tanaka & Nakashizuka, 1997; Koukoulas & Blackburn, 2004)。无人机影像和激光雷达的出现, 使得快速获取林窗信息成为可能, 为森林稳定程度评估、生态系统演替规律等研究提供了大量的数据支持(Weishampel *et al.*, 2000; Drake *et al.*, 2002; Vepakomma *et al.*, 2008)。

叶面积指数(LAI)是指单位面积上植株叶片单侧总面积(Chen & Cihlar, 1996), 它不但是植被冠层非常重要的结构参数, 而且也是动态植被模型、水文模型、陆地表面过程模型等模型中重要的生物物理参数(Morsdorf *et al.*, 2009)。早期叶面积指数反演主要利用NDVI和地面数据构建统计模型实现反演,

其反演精度受传感器、植被类型、时间及地理位置等因素影响, 而且模型通用性不强(Carlson & Ripley, 1997)。遥感反演森林植被叶面积指数逐步发展为半经验统计模型和基于辐射传输模型。受光学遥感限制, 当LAI大于3或4时, 植被光谱反射率出现饱和, 敏感性下降, 常常导致LAI被低估现象(Spanner *et al.*, 1990; Baret & Guyot, 1991)。激光雷达获取的三维结构信息可以计算出孔隙率, 结合比尔-朗伯定律、米勒公式等即可实现LAI的反演推导。激光雷达技术的出现, 尤其是地基激光雷达, 使得从机理上去反演LAI成为了可能, 如反演叶倾角、方位角以及聚集系数(Li *et al.*, 2016, 2017)等, 而且能够提供随植被高度剖面变化的分层LAI, 为更精细的生态系统过程研究提供关键参数(Richardson *et al.*, 2009b; Zhao & Popescu, 2009)。此外, 不同激光雷达平台获取的点云数据能够反演单木-样地-景观尺度的LAI, 从而解决由于尺度差异导致LAI难以验证的问题。

植被高度是生态系统结构在垂直方向上最重要的一个参数, 植物在高度上的分化形成了生态系统中植物群落的分层现象, 反映了不同植物对光的利用程度。植被高度也是计算森林地上生物量, 反映地表粗糙度, 构建生态模型等的基础信息。长期以来, 植物高度一直都是难以准确获取的生态参数, 无论是采用地面调查或者遥感方法。早期研究中, 植被高度主要是利用光学遥感获取的植被指数和不同波段的反射率信息, 结合地形等辅助因子构建统计模型来间接获取(Hall *et al.*, 1995)。然而, 由于光学传感器对森林冠层的穿透能力有限, 在茂密的森林区域具有强烈的饱和效应, 这使得树高估计充满了不确定性(McCombs *et al.*, 2003; Donoghue & Watt, 2006)。还有不少研究人员通过高分辨率影像中树木阴影的长度, 结合卫星的太阳高度角推算出树木的高度(Montesano *et al.*, 2017), 但是该方法适用性有限, 只能适用于树木稀疏的林区。目前, 遥感反演树高主要是基于极化干涉合成孔径雷达和激光雷达, 其中基于物理机理的极化干涉合成孔径雷达技术可实现大面积森林高度测量(Kellndorfer *et al.*, 2004; 陈尔学等, 2007), 但微波信号的接收与解译易受背景地形的起伏干扰, 反演的结果具有较大的不确定性。激光雷达能够获取精确的森林高度信息(Nilsson, 1996; Naesset & Okland, 2002), 并常作为

观测真值使用,但是激光雷达唯一的缺陷是难以获取全球无缝隙连续观测,通常需要借助其他遥感数据生成空间连续的树高分布(Lefsky, 2010; Simard *et al.*, 2011; Su *et al.*, 2017)。近年来,随着无人机近地面遥感技术的发展,利用无人机摄影测量技术和激光雷达技术可以对地物三维重构,实现树高的提取(Zarco-Tejada *et al.*, 2014; Wachholz de Souza *et al.*, 2017; Nuijten *et al.*, 2019)。

生物量是反映生态系统结构和功能状况最直接的参数,与生态系统碳储量、生产力等密切相关(Luyssaert *et al.*, 2008),也是生态系统碳汇潜力评估的重要基础(Fang *et al.*, 2001)。地上生物量遥感反演方法从基于单源数据的简单回归方法(Goel, 1988),基于微波散射机理模型的反演方法(Sun & Ranson, 1995),逐渐发展到基于多源数据融合的非参数化反演方法(人工神经网络、支持向量机和随机森林等)(Letoan *et al.*, 1992; Tan *et al.*, 2007)。对于植被冠层结构比较单一的草地和农田生态系统,利用光学遥感获取的植被指数参数、光谱反射率和纹理信息与实际测量的生物量建立反演模型,可以较为准确地估算大范围的地上生物量分布(Tucker *et al.*, 1985; Piao *et al.*, 2007; Jia *et al.*, 2016)。但是,对于垂直结构复杂(林冠交错且分层)的森林生态系统,尤其是热带雨林,光学遥感很难精准地反演生物量。微波遥感可以获取部分森林垂直结构信息,常利用后向散射系数与树高、胸径和树干生物量的相关性来反演生物量(Letoan *et al.*, 1992; Ranson & Sun, 1994; Thurner *et al.*, 2014),但是在高生物量区域仍常受饱和和问题困扰。激光雷达能直观、定量地反映森林群落垂直结构,并提取树高、胸径、冠幅等森林结构参数,与实测生物量建模或直接反演单木生物量,实现大范围的森林地上生物量的精确估算,目前未见其具有饱和效应的报道(Lefsky *et al.*, 1999; Hyppa *et al.*, 2001; Popescu *et al.*, 2003)。近年来,随着星载多源遥感数据的丰富,如光学影像、微波雷达和激光雷达数据,以及海量地面实测数据的积累,各种机器学习方法的出现,使得准确反演国家和全球尺度地上生物量成为可能(Saatchi *et al.*, 2011; Hu *et al.*, 2016; Su *et al.*, 2016b; Huang *et al.*, 2019)。与地上生物量相比,传统遥感技术无法穿透地面难以获取地下信息,常常只能利用根冠比来估算地下生物量。探地雷达的出现使得连续观测地下信息成为

可能,探地雷达发出的微波能够穿透地面,利用粗根等物质的后向反射强度信息即可反演地下粗根的生物量及分布(Hruska *et al.*, 1999; Butnor *et al.*, 2001),但是该方法在使用上具有一定的局限性,更适合草地和灌丛生态系统,且反演算法的通用性和精度易受土壤基质和土壤含水量的影响。

2.4 生物多样性

生物多样性是多样化生命实体表现出的特征,包括所有植物、动物、微生物以及所有的生态系统及其形成的各种生态过程(马克平, 1993)。生物多样性的多少可以直接反映该地区的生态服务功能和物质能量交换的频率,是生态系统评价的一项重要指标。近年来,遥感在生物多样性研究中的应用逐渐增多,获取数据的方式包括通过不同的空间尺度平台如卫星遥感、航空遥感和近地面遥感,或者搭载着不同的传感器如相机、高光谱、热红外以及激光雷达,监测对象包括草地、森林、湿地等生态系统及其内部生存的动植物。

遥感获取生物多样性信息主要有两类监测方法:直接监测和间接反演。直接监测是直接识别物种或群落类型及其分布、多度,这类方法对遥感数据的空间分辨率和光谱分辨率有相当高的要求。Nagendra等(2010)将IKONOS和Quickbird卫星获取的多波段和高空间分辨率影像数据用于物种识别和物种分类,以监测其丰富度及物种分布状况。Zhao等(2018)利用激光雷达和高光谱数据,提取单木尺度上的结构信息和生化组分信息,将具有相似性状的单木聚类当作单个树种,并在此基础上计算生物多样性指标辛普森和香农指数。目前直接监测主要针对大型动物和稀疏的植被开展,从茂密的森林地区直接识别出全部植物物种的个体仍比较困难。间接反演是通过遥感数据衍生一些指标或变量,然后与野外观测数据结合构建模型预测生物多样性。这些指标或变量被认为或证实与生物多样性密切相关,如NDVI、EVI等。St-Louis等(2006)研究了半干旱区正射影像中的纹理信息与鸟类多样性的关系,发现纹理信息是用于刻画鸟类生境,反映鸟类多样性的重要工具。Carlson等(2007)基于高光谱影像可以获取森林冠层结构的色素、叶绿素、水分、氮等生化组分的含量,更好地预测森林多样性。Hobi等(2017)基于MODIS得到的各种植被指数,如EVI、NDVI等,判断了哪些植被指数可以更好地指示植被生产力,

从而预测鸟类的多样性。生境多样性也常用于表征物种多样性, 尤其是动物多样性, 生境变化是导致动物类群变化的主要因素 (Hernandez-Stefanoni, 2006)。激光雷达为监测生境状态及变化提供了重要数据源, 尤其是提供了传统光学遥感无法获取的微地形和垂直结构信息 (Davies & Asner, 2014)。Bergen 等 (2009) 利用激光雷达和微波遥感获取三维结构监测生物多样性和生境的变化。Lesak 等 (2011) 通过分析机载激光雷达获取的结构信息, 来揭示鸣禽的物种丰富度与森林结构的关系, 发现冠层高度、冠层中部高度和点密度具有重要的指示作用。Guo 等 (2017) 利用无人机激光雷达获取的森林结构参数来监测与生物多样性密切相关的生境变化。

3 遥感在生态系统生态学研究的机遇与挑战

3.1 遥感在生态系统研究中的尺度问题

尺度是生态学研究中的核心问题之一, 生态系统的结构、功能和过程在不同尺度上得出的研究结论往往差别很大 (Levin, 1992)。获取不同时空尺度的生态系统信息, 是理解生态系统研究中尺度效应的基础, 也是揭示不同尺度的生态过程、构建多尺度生态模型的前提 (Chave, 2013)。卫星遥感、航空遥感和近地面遥感能够提供不同时空尺度的遥感观测信息, 为生态系统研究复杂生态过程的尺度外推、解决大尺度的生态学问题提供信息和技术途径 (Turner *et al.*, 2003)。卫星遥感具有全球尺度、长时序、多类型的特点, 常用于获取局地-区域-全球尺度的生态系统结构和功能相关信息。近年来, 长时序的遥感数据常被用于研究全球变化下区域-全球尺度的生态系统物候变化 (Stoeckli *et al.*, 2008)、生态系统过程响应 (Frank *et al.*, 2015) 和空间格局演变 (Gillanders *et al.*, 2008)。但是, 卫星遥感难以直接获取物种数量和群落组成等信息用于生态系统尺度的研究。与卫星遥感相比, 航空遥感没有固定的轨道和过境周期, 具有一定的灵活性, 可以在所需的时间和特定区域获取景观-局地范围的遥感数据。相较于卫星遥感的多源数据, 航空遥感能够直接提供时空一致的多源遥感数据, 如激光雷达和高光谱, 获取刻画生态系统所需的精细三维生境 (Hyde *et al.*, 2006; Vierling *et al.*, 2008; Davies & Asner, 2014), 生物物理参量 (Koetz *et al.*, 2006), 生物化学参量 (Stagakis *et al.*, 2010; Casas *et al.*, 2014), 以及生物

量 (Clark *et al.*, 2011) 等要素, 研究生态系统组成、结构和功能 (Getzin *et al.*, 2014; Lausch *et al.*, 2016), 评估生态系统状况和质量 (Ayanu *et al.*, 2012)。近地面遥感观测的尺度更贴近传统地面观测, 一方面为生态系统尺度研究提供重要的数据支持, 另一方面为复杂生态过程的尺度外推提供重要的桥梁。此外, 尺度问题还存在于不同数据源之间, 尤其是地面观测与卫星遥感数据。虽然卫星数据可以提供大尺度的生态系统信息, 但是往往缺乏尺度匹配的数据用于验证和校定, 目前大量研究仍直接用样方尺度的数据去验证千米级的遥感数据, 如生物量、*LAI* 等, 最终导致结果存在较大误差。为了降低不同数据进行尺度转换的误差, 通常使用中间尺度的数据做桥梁, 例如航空遥感和近地面遥感数据。

3.2 近地面遥感在生态系统生态学中的前景

生态系统生态学研究需要来自生物和非生物等多方面的观测数据, 不断更新和发展的遥感技术为全面、精细、长期地开展生态系统生态学研究提供了数据基础和技术储备。近地面遥感是近几年来兴起的遥感技术, 主要指利用低空飞行的无人机、飞艇以及地面上固定或移动的载具, 如塔台、脚架、汽车、人等, 来获取遥感数据 (郭庆华等, 2016)。与传统的卫星遥感和航空遥感相比, 近地面遥感观测尺度更小, 可获取生态系统-景观尺度的高时空分辨率遥感信息 (图2), 为地面观测、航空遥感和卫星遥感之间搭建起信息推绎的可靠桥梁 (李德仁和李明, 2014), 为实现生态系统“天-空-地”的全面观测提供遥感平台的补充和支撑。无人机机动灵活, 受自然环境的约束小且成本低, 易操作, 在群落结构的分布格局及其动态监测 (Jung *et al.*, 2012; Palminteri *et al.*, 2012), 物种识别 (Vermeulen *et al.*, 2013; Husson *et al.*, 2014), 生境调查 (Pimm *et al.*, 2015; Hamylton, 2017), 生物多样性监测 (Tews *et al.*, 2004; Getzin *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2016) 和生态系统管理 (Richardson *et al.*, 2009a; Otero *et al.*, 2018) 等方面得到了广泛的应用。依托于样地监测的高塔, 通过搭载相机、激光雷达、叶绿素荧光等传感器能够对样地尺度的生态系统物候、垂直结构和生产力等实现高频次的监测 (Hilker *et al.*, 2011), 从新的视角揭示生态系统物候、结构和生产力年际间的动态变化, 更深刻地理解生态系统过程及其形成机制。地面固定或移动式遥感观测尺度与传统地面调查一致,

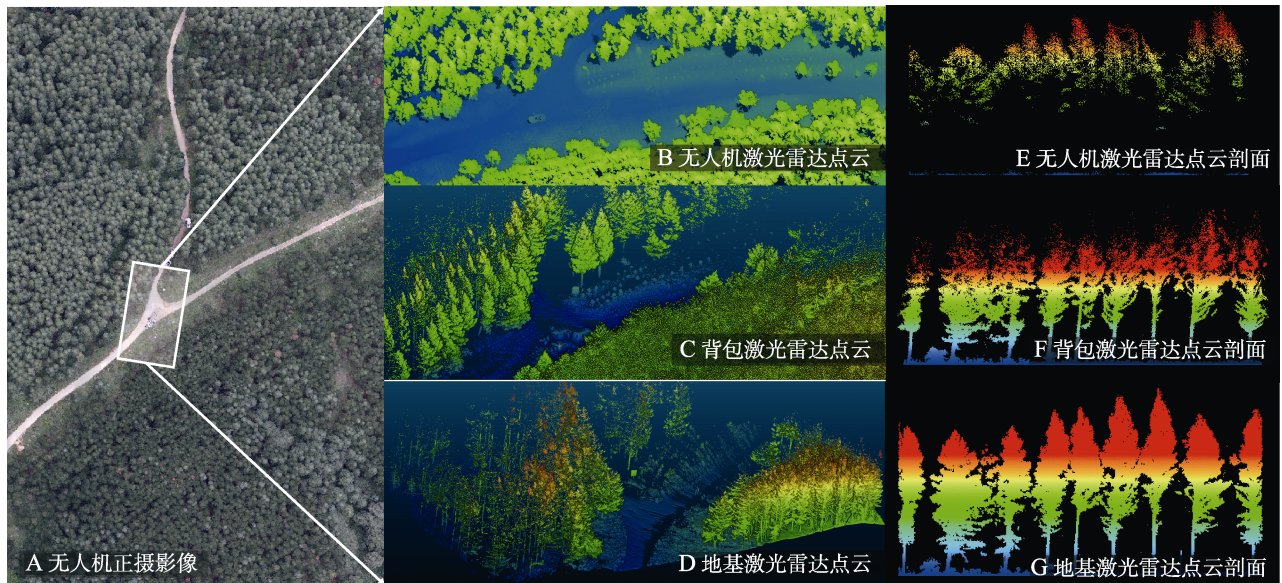


图2 近地面遥感平台在森林生态系统获取的数据示意图。激光雷达数据中颜色代表高程的高低, 蓝色代表低, 红色代表高。
Fig. 2 Image and lidar data of ecosystem monitoring with near-surface remote sensing. **A**, Aerial image obtained by drone. **B**, Lidar data acquired by drone. **C**, Lidar data acquired by backpack. **D**, Lidar data acquired by terrestrial laser scanner. **E**, **F**, **G**, Profile of pervious three lidar data. The color of lidar data represent the information of elevation, blue is low and red is high.

获取的遥感数据精度最高, 部分监测数据有望代替传统地面调查, 如背包和基地激光雷达获取的胸径和树高信息(Dassot *et al.*, 2011; Srinivasan *et al.*, 2015; Brede *et al.*, 2017)。此外, 探地雷达、地基和背包激光雷达能够无损地获取一些通过破坏性采样才能得到的参数, 如粗根分布和生物量、树木精细枝干结构等。近地面遥感的各平台有机结合将实现全方位、多尺度、定量化的生态系统监测, 为更深刻地理解生态系统结构和过程提供数据支持。

3.3 我国生态系统遥感观测处于快速发展阶段

遥感技术已被国内学者广泛用于生态系统的组成、结构与功能等方面的研究, 但是生态系统观测中遥感观测技术的应用不算广泛, 正处于起步后的快速发展阶段。中国生态系统研究网络(Chinese Ecosystem Research Network, CERN)已经成为世界上最大的一个生态系统观测研究网络(Fu *et al.*, 2010), 除了利用定点的物候相机监测物候信息外, 其他方式的生态系统遥感观测技术在整个网络观测要素系统中正处于探索阶段。相较于国外, 美国国家生态观测网络建立之初就考虑了利用机载观测平台监测其核心站点(Kampe *et al.*, 2010), 获取激光雷达、高光谱和高分辨率影像等遥感数据, 用于研究土地利用、气候等的变化和入侵物种的活动所引起的生态系统响应。受其思想影响, 中国生物多样性监测网络(Sino BON)在建设时设立了近地面遥感

平台, 主要利用无人机开展生态系统监测。近年来, 我国无人机遥感监测技术发展迅猛, 并不断应用到各种生态学研究。但受我国法律法规影响, 如何合理合法地利用无人机在长期样地开展动态监测研究仍在试验和探索中。此外, 受国内卫星数据的获取途径限制, 在更大尺度的生态系统遥感观测研究中, 我国学者主要还是依靠国外提供的免费卫星遥感数据。

4 生态系统遥感的前沿发展方向

目前, 生态系统研究正在从单一过程研究到多过程耦合研究, 从定性描述到定量表达, 从系统模拟到科学预测逐步发展(于贵瑞, 2009)。遥感技术作为生态系统监测的重要手段, 其所具有的连续的时空领域观测能力, 为生态系统生态学的研究与发展提供了丰富的数据源(Kerr & Ostrovsky, 2003; Chambers *et al.*, 2007)。目前, 以遥感技术为支撑的生态系统研究多集中在以下几个方面: (1)生态系统的遥感分类和变化监测; (2)生态系统结构和过程参数的遥感反演; (3)生态系统干扰因素的遥感监测。已有研究多集中于应用单一遥感数据源解决单一尺度的生态系统问题, 如何利用多源遥感数据对生态系统进行综合分析是目前的研究趋势和发展方向。与此同时, 新型遥感技术(如激光雷达和叶绿素荧光)为解决传统生态系统难题提供了重要的数据支

撑。因此, 基于目前生态系统遥感监测的研究现状和发展趋势以及我国已有的研究基础, 建议优先发展以下领域:

(1)多源、长时序的生态系统遥感观测数据融合研究

随着遥感观测平台的丰富、传感器的多样化、对地观测技术的发展, 用于刻画生态系统的遥感数据呈指数增长。然而, 实现多源数据融合和长时序遥感数据构建仍存在一定的困难: 不同平台数据的时空尺度差异问题, 不同传感器获取的数据融合问题, 同系列卫星遥感的传感器变化问题等。如何开发算法解决多源数据融合问题, 充分发挥各种遥感数据的优势, 挖掘长时序遥感数据信息, 实现生态系统多时相、多尺度的动态监测, 是未来生态系统遥感监测研究的难点和热点。与此同时, 随着遥感大数据时代的来临, 其所带来海量数据的存储、管理、计算、分析, 原有数据处理和挖掘技术难以满足需求, 如何结合云计算和大数据分析, 实现生态遥感数据的智能处理和大尺度生态系统过程机制挖掘, 都是未来遥感技术在生态系统研究应用的重要发展方向。例如, 谷歌公司推出的Google Earth Engine云计算平台提供了全球尺度的地理空间分析服务(Gorelick *et al.*, 2017), 并被用于大尺度的植被变化研究(Hansen *et al.*, 2013), 而且凭借谷歌云平台的算力模型运算速度远超过传统方法。

(2)新数据推动生态系统理论的新认知

激光雷达和日光诱导叶绿素荧光等新兴遥感技术的出现和发展, 为生态系统研究提供了新的数据源。激光雷达为生态系统生态学研究提供了传统手段难以获取的从米级到毫米级的精细三维结构信息, 让生态学家能够从更精细的树木构型, 如枝干长度、夹角、分枝数量等, 去分析、验证已有生态学理论, 全面地认知森林的物质生产规律。同时, 激光雷达技术也为构建高精度冠层结构信息的真实三维场景提供了可能, 促进了传统二维空间的辐射传输模型向三维的转化。利用激光雷达获取的真实场景, 基于八叉树体素化、蒙特卡罗光线追踪的三维辐射模型可以模拟真实的三维能量分布(Li *et al.*, 2018a), 结合精细的树木结构能够直接、定量地去理解光的分布如何影响树木生长和竞争。叶绿素荧光遥感为生态系统生产力的直接估测提供了更为可靠的新方法, 而且还能较传统植被指数更早地揭示植被

健康状况变化以及环境胁迫的影响。如何充分利用激光雷达提供的精细三维信息和日光诱导叶绿素荧光提供的光合信息, 结合三维辐射传输模型以全新的视角开展生态系统的物质分配、能量流动研究, 推动生态系统生态学从经验统计走向定量计量不断发展。

(3)融入近地面遥感的生态系统观测体系

随着5G通信、物联网(IoT)、无线传感器网络、无人控制系统等新技术的发展, 生态系统联网观测迎来了一次新的技术发展。目前, 生态观测研究网络逐渐向基于物联网技术的自动观测、融合地面和遥感观测的多尺度监测发展, 如美国国家生态观测网络和澳大利亚生态观测研究网络等。自1988年开始建立, 中国生态系统研究网络至今已形成由44个观测台站组成, 涵盖不同生态系统类型的观测网络, 我国学者也在探讨如何将集卫星、航空飞机、无人机、地面遥感于一体的立体观测融入到现有技术体系中。近年来, 随着国内高新企业的崛起, 无人控制系统和无人机载荷迅速迭代更新(廖小罕等, 2016), 无人机、无人飞艇、无人车和无人船等各种自动化观测载具陆续出现, 能够实现定制、动态的水、陆、空移动观测, 扩大生态学研究的监测范围(张菁等, 2019)。如何以生态观测研究站为中心借助5G、物联网技术实现在线监测, 融入无人控制系统实现多尺度遥感观测, 完善“天-空-地”全面立体的生态系统观测体系, 是生态系统观测发展所面临的一个重大挑战。

(4)大数据范式的生态遥感研究

随着各种数据的迅猛增长, 数据密集型科学发现已经成为科学发现的新范式, 并逐渐在各个学科出现。大数据时代的研究离不了海量数据的获取, 随着遥感概念、技术和设备的泛化, 遥感观测不再只是国家机构、研究组织的独占品, 遥感逐渐开始“个人化”“小型化”。智能手机作为个人遥感时代最重要的终端, 通过“花伴侣”“绿途”等APP拍摄照片获取专业物种和植被信息, 其上传的照片数据经过清洗、归类、分析, 能够为生态学家的研究提供海量的数据(Teacher *et al.*, 2013)。国外学者利用公众用手机收集的荒地-城镇交界处(WUI)区域内的照片和位置信息分析森林结构判断火险区域(Ferster & Coops, 2014, 2016), 国内学者也在尝试利用“绿途”植被信息采集分析APP收集和整理照片数据, 提取

照片中包含的植被群系和位置信息,用于绘制植被类型分布图。这类APP为大数据时代科学观测提供了新方式,能够极大地提升观测范围的广度,丰富生态学家的研究数据。另一方面日益完善的全球对地观测系统,通过各种平台联动、协同观测,实现对全球陆地的立体观测和动态监测,为生态学理论的发现和研究提供海量的遥感数据;结合大数据技术从海量信息挖掘可用信息,提升对生态系统结构和过程的理解,降低生态模型的不确定性。国内学者利用星载激光雷达获取全球上万个森林树高分布信息,分析探讨了树高分布的限制因子,发现树高与可用水量间存在先上升后下降的相关关系,过多的水量对树木生长具有一定的抑制作用,修正了其他学者对树高与水分可用性关系的认知(Tao *et al.*, 2016)。

参考文献

- Ayanu YZ, Conrad C, Nauss T, Wegmann M, Koellner T (2012). Quantifying and mapping ecosystem services supplies and demands: a review of remote sensing applications. *Environmental Science & Technology*, 46, 8529–8541.
- Baret F, Guyot G (1991). Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35(2–3), 161–173.
- Bartholomé E, Belward AS (2005). GLC2000: a new approach to global land cover mapping from earth observation data. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 1959–1977.
- Bergen KM, Goetz SJ, Dubayah RO, Henebry GM, Hunsaker CT, Imhoff ML, Nelson RF, Parker GG, Radeloff VC (2009). Remote sensing of vegetation 3-D structure for biodiversity and habitat: review and implications for lidar and radar spaceborne missions. *Journal of Geophysical Research*, 114, G00E06. DOI:10.1029/2008JG000883.
- Brede B, Lau A, Bartholomeus HM, Kooistra L (2017). Comparing RIEGL RiCOPTER UAV LiDAR derived canopy height and DBH with terrestrial LiDAR. *Sensors*, 17, 2371. DOI: 10.3390/s17102371.
- Butnor JR, Doolittle JA, Kress L, Cohen S, Johnsen KH (2001). Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States. *Tree Physiology*, 21, 1269–1278.
- Carlson KM, Asner GP, Hughes RF, Ostertag R, Martin RE (2007). Hyperspectral remote sensing of canopy biodiversity in Hawaiian lowland rainforests. *Ecosystems*, 10, 536–549.
- Carlson TN, Ripley DA (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62, 241–252.
- Casas A, Riaño D, Ustin SL, Dennison P, Salas J (2014). Estimation of water-related biochemical and biophysical vegetation properties using multitemporal airborne hyperspectral data and its comparison to MODIS spectral response. *Remote Sensing of Environment*, 148, 28–41.
- Chambers JQ, Asner GP, Morton DC, Anderson LO, Saatchi SS, Espírito-Santo FDB, Palace M, Souza Jr C (2007). Regional ecosystem structure and function: ecological insights from remote sensing of tropical forests. *Trends in Ecology & Evolution*, 22, 414–423.
- Chapin III FS, Matson PA, Vitousek PM (2011). *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer, New York.
- Chave J (2013). The problem of pattern and scale in ecology: What have we learned in 20 years? *Ecology Letters*, 16(s1), 4–16.
- Chen CD (1986). Aerospace monitoring of ecosystems—Introduction of the new soviet book. *Remote Sensing Information*, (1), 42. [陈昌笃 (1986). 生态系统的航空航天监测——苏联新书介绍. 遥感信息, (1), 42.]
- Chen EX, Li ZY, Pang Y, Tian X (2007). Polarimetric synthetic aperture radar interferometry based mean tree height extraction technique. *Scientia Silvae Sinicae*, 43(4), 66–70. [陈尔学, 李增元, 庞勇, 田昕 (2007). 基于极化合成孔径雷达干涉测量的平均树高提取技术. 林业科学, 43(4), 66–70.]
- Chen J, Chen J, Liao AP, Cao X, Chen LJ, Chen XH, He CY, Han G, Peng S, Lu M, Zhang WW, Tong XH, Mills J (2015). Global land cover mapping at 30 m resolution: a POK-based operational approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103, 7–27.
- Chen JM, Cihlar J (1996). Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images. *Remote Sensing of Environment*, 55, 153–162.
- Cheng YB, Zarco-Tejada PJ, Riaño D, Rueda CA, Ustin SL (2006). Estimating vegetation water content with hyperspectral data for different canopy scenarios: relationships between AVIRIS and MODIS indexes. *Remote sensing of Environment*, 105, 354–366.
- Clark ML, Roberts DA, Ewel JJ, Clark DB (2011). Estimation of tropical rain forest aboveground biomass with small-footprint lidar and hyperspectral sensors. *Remote Sensing of Environment*, 115, 2931–2942.
- Cochrane MA (2000). Using vegetation reflectance variability for species level classification of hyperspectral data. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 2075–2087.
- Cohen WB, Goward SN (2004). Landsat's role in ecological applications of remote sensing. *BioScience*, 54, 535–545.
- Dassot M, Constant T, Fournier M (2011). The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: application fields, benefits and challenges. *Annals of Forest Science*, 68, 959–974.

- Datt B (1998). Remote sensing of chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, chlorophyll *a+b*, and total carotenoid content in eucalyptus leaves. *Remote sensing of Environment*, 66, 111–121.
- Daughtry C, Walthall C, Kim M, De Colstoun EB, McMurtry III J (2000). Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 74, 229–239.
- Davies AB, Asner GP (2014). Advances in animal ecology from 3D-LiDAR ecosystem mapping. *Trends in Ecology & Evolution*, 29, 681–691.
- Dong JW, Xiao XM, Chen BQ, Torbick N, Jin C, Zhang GL, Biradar C (2013). Mapping deciduous rubber plantations through integration of PALSAR and multi-temporal Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 134, 392–402.
- Donoghue DNM, Watt PJ (2006). Using LiDAR to compare forest height estimates from IKONOS and Landsat ETM+ data in Sitka spruce plantation forests. *International Journal of Remote Sensing*, 27, 2161–2175.
- Drake JB, Dubayah RO, Clark DB, Knox RG, Blair JB, Hofton MA, Chazdon RL, Weishampel JF, Prince SD (2002). Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar. *Remote Sensing of Environment*, 79, 305–319.
- Dumbrell AJ, Kordas RL, Woodward G (2016). Large-scale ecology: model systems to global perspectives//Dumbrell AJ, Kordas RL, Woodward G. *Advances in Ecological Research: Vol 55*. Academic Press, Oxford. 2–663.
- Fang JY, Chen AP, Peng CH, Zhao SQ, Ci LJ (2001). Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 292, 2320–2322.
- Feret JB, Asner GP (2012). Semi-Supervised methods to identify individual crowns of lowland tropical canopy species using imaging spectroscopy and LiDAR. *Remote Sensing*, 4, 2457–2476.
- Ferster CJ, Coops NC (2014). Assessing the quality of forest fuel loading data collected using public participation methods and smartphones. *International Journal of Wildland Fire*, 23, 585–590.
- Ferster CJ, Coops NC (2016). Integrating volunteered smartphone data with multispectral remote sensing to estimate forest fuels. *International Journal of Digital Earth*, 9, 171–196.
- Frank D, Reichstein M, Bahn M, Thonicke K, Frank D, Mahecha MD, Smith P, van der Velde M, Vicca S, Babst F, Beer C, Buchmann N, Canadell JG, Ciais P, Cramer W, Ibrom A, Miglietta F, Poulter B, Rammig A, Seneviratne SI, Walz A, Wattenbach M, Zavala MA, Zscheischler J (2015). Effects of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: concepts, processes and potential future impacts. *Global Change Biology*, 21, 2861–2880.
- Frankenberg C, Fisher JB, Worden J, Badgley G, Saatchi SS, Lee JE, Toon GC, Butz A, Jung M, Kuze A, Yokota T (2011). New global observations of the terrestrial carbon cycle from GOSAT: patterns of plant fluorescence with gross primary productivity. *Geophysical Research Letters*, 38, L17706. DOI: 10.1029/2011GL048738.
- Frydenvang J, van Maarschalkerweerd M, Carstensen A, Mundus S, Schmidt SB, Pedas PR, Laursen KH, Schjoerring JK, Husted S (2015). Sensitive detection of phosphorus deficiency in plants using Chlorophyll *a* fluorescence. *Plant Physiology*, 169, 353–361.
- Fu BJ, Li SG, Yu XB, Yang P, Yu GR, Feng RG, Zhuang XL (2010). Chinese ecosystem research network: progress and perspectives. *Ecological Complexity*, 7, 225–233.
- Gao BC (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58, 257–266.
- Getzin S, Nuske RS, Wiegand K (2014). Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) to quantify spatial gap patterns in forests. *Remote Sensing*, 6, 6988–7004.
- Getzin S, Wiegand K, Schoening I (2012). Assessing biodiversity in forests using very high-resolution images and unmanned aerial vehicles. *Methods in Ecology and Evolution*, 3, 397–404.
- Gillanders SN, Coops NC, Wulder MA, Gergel SE, Nelson T (2008). Multitemporal remote sensing of landscape dynamics and pattern change: describing natural and anthropogenic trends. *Progress in Physical Geography-Earth and Environment*, 32, 503–528.
- Goel NS (1988). Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. *Remote Sensing Reviews*, 4(1), 1–212.
- Gong P, Liu H, Zhang MN, Li CC, Wang J, Huang HB, Clinton N, Ji LY, Li WY, Bai YQ (2019). Stable classification with limited sample: transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017. *Science Bulletin*, 64, 370–373.
- Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D, Moore R (2017). Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27.
- Guanter L, Zhang Y, Jung M, Joiner J, Voigt M, Berry JA, Frankenberg C, Huete AR, Zarco-Tejada P, Lee J-E, Moran MS, Ponce-Campos G, Beer C, Camps-Valls G, Buchmann N, Gianelle D, Klumpp K, Cescatti A, Baker JM, Griffis TJ (2014). Global and time-resolved monitoring of crop photosynthesis with chlorophyll fluorescence. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111, 1327–1333.
- Guo QH, Liu J, Tao SL, Xue BL, Li L, Xu GC, Li WK, Wu FF, Li YM, Chen LH, Pang SX (2014). Perspectives and prospects of LiDAR in forest ecosystem monitoring and modeling. *Chinese Science Bulletin*, 59, 459–478. [郭庆

- 华, 刘瑾, 陶胜利, 薛宝林, 李乐, 徐光彩, 李文楷, 吴芳芳, 李玉美, 陈琳海, 庞树鑫 (2014). 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*, 59, 459–478.]
- Guo QH, Su YJ, Hu TY, Liu J (2018). *LiDAR Principles, Processing and Applications in Forest Ecology*. Higher Education Press, Beijing. [郭庆华, 苏艳军, 胡天宇, 刘瑾 (2018). 激光雷达森林生态应用——理论、方法及实例. 高等教育出版社, 北京.]
- Guo QH, Su YJ, Hu TY, Zhao XQ, Wu FF, Li YM, Liu J, Chen LH, Xu GC, Lin GH, Zheng Y, Lin YQ, Mi XC, Fei L, Wang XG (2017). An integrated UAV-borne lidar system for 3D habitat mapping in three forest ecosystems across China. *International Journal of Remote Sensing*, 38, 2954–2972.
- Guo QH, Wu FF, Hu TY, Chen LH, Liu J, Zhao XQ, Gao S, Pang SX (2016). Perspectives and prospects of unmanned aerial vehicle in remote sensing monitoring of biodiversity. *Biodiversity Science*, 24, 1267–1278. [郭庆华, 吴芳芳, 胡天宇, 陈琳海, 刘瑾, 赵晓倩, 高上, 庞树鑫 (2016). 无人机在生物多样性遥感监测中的应用现状与展望. *生物多样性*, 24, 1267–1278.]
- Hall FG, Shimabukuro YE, Huemmrich KF (1995). Remote-sensing of forest biophysical structure using mixture decomposition and geometric reflectance models. *Ecological Applications*, 5, 993–1013.
- Hamylton SM (2017). Mapping coral reef environments: a review of historical methods, recent advances and future opportunities. *Progress in Physical Geography*, 41, 803–833.
- Hansen MC, Potapov PV, Moore R, Hancher M, Turubanova SA, Tyukavina A, Thau D, Stehman SV, Goetz SJ, Loveland TR, Kommareddy A, Egorov A, Chini L, Justice CO, Townshend JRG (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342, 850–853.
- Hansen MC, Stehman SV, Potapov PV (2010). Quantification of global gross forest cover loss. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107, 8650–8655.
- Hernandez-Stefanoni JL (2006). The role of landscape patterns of habitat types on plant species diversity of a tropical forest in Mexico. *Biodiversity and Conservation*, 15, 1441–1457.
- Hilker T, Gitelson A, Coops NC, Hall FG, Black TA (2011). Tracking plant physiological properties from multi-angular tower-based remote sensing. *Oecologia*, 165, 865–876.
- Hobi ML, Dubinin M, Graham CH, Coops NC, Clayton MK, Pidgeon AM, Radeloff VC (2017). A comparison of Dynamic Habitat Indices derived from different MODIS products as predictors of avian species richness. *Remote Sensing of Environment*, 195, 142–152.
- Houghton R (2005). Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Global Change Biology*, 11, 945–958.
- Hruska J, Čermák J, Šustek S (1999). Mapping tree root systems with ground-penetrating radar. *Tree Physiology*, 19, 125–130.
- Hu T, Su Y, Xue B, Liu J, Zhao X, Fang J, Guo Q (2016). Mapping global forest aboveground biomass with spaceborne lidar, optical imagery, and forest inventory data. *Remote Sensing*, 8, 565. DOI: 10.3390/rs8070565.
- Huang HB, Liu CX, Wang XY, Zhou XL, Gong P (2019). Integration of multi-resource remotely sensed data and allometric models for forest aboveground biomass estimation in China. *Remote Sensing of Environment*, 221, 225–234.
- Husson E, Hagner O, Ecke F (2014). Unmanned aircraft systems help to map aquatic vegetation. *Applied Vegetation Science*, 17, 567–577.
- Hyde P, Dubayah R, Walker W, Blair JB, Hofton M, Hunsaker C (2006). Mapping forest structure for wildlife habitat analysis using multi-sensor (LiDAR, SAR/InSAR, ETM plus, Quickbird) synergy. *Remote Sensing of Environment*, 102, 63–73.
- Hyypä J, Kelle O, Lehtikainen M, Inkinen M (2001). A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39, 969–975.
- Jia WX, Liu M, Yang YH, He HL, Zhu XD, Yang F, Yin C, Xiang WM (2016). Estimation and uncertainty analyses of grassland biomass in Northern China: comparison of multiple remote sensing data sources and modeling approaches. *Ecological Indicators*, 60, 1031–1040.
- Jung K, Kaiser S, Boehm S, Nieschulze J, Kalko EKV (2012). Moving in three dimensions: effects of structural complexity on occurrence and activity of insectivorous bats in managed forest stands. *Journal of Applied Ecology*, 49, 523–531.
- Kampe T, Johnson B, Kuester M, Keller M (2010). NEON: the first continental-scale ecological observatory with airborne remote sensing of vegetation canopy biochemistry and structure. *Journal of Applied Remote Sensing*, 4, 043510. DOI: 10.1117/1.3361375.
- Kellndorfer J, Walker W, Pierce L, Dobson C, Fites JA, Hunsaker C, Vona J, Clutter M (2004). Vegetation height estimation from shuttle radar topography mission and national elevation datasets. *Remote Sensing of Environment*, 93, 339–358.
- Kerr JT, Ostrovsky M (2003). From space to species: ecological applications for remote sensing. *Trends in Ecology & Evolution*, 18, 299–305.
- Knyazikhin Y, Schull MA, Stenberg P, Möttus M, Rautiainen M, Yang Y, Marshak A, Latorre Carmona P, Kaufmann RK, Lewis P, Disney MI, Vanderbilt V, Davis AB, Baret F, Jacquemoud S, Lyapustin A, Myneni RB (2013).

- Hyperspectral remote sensing of foliar nitrogen content. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110, E185. DOI: 10.1073/pnas.1210196109
- Koetz B, Morsdorf F, Sun G, Ranson KJ, Itten K, Allgower B (2006). Inversion of a lidar waveform model for forest biophysical parameter estimation. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3, 49–53.
- Kokaly RF, Asner GP, Ollinger SV, Martin ME, Wessman CA (2009). Characterizing canopy biochemistry from imaging spectroscopy and its application to ecosystem studies. *Remote Sensing of Environment*, 113, S78–S91.
- Koukoulas S, Blackburn GA (2004). Quantifying the spatial properties of forest canopy gaps using LiDAR imagery and GIS. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 3049–3071.
- Landsberg JJ, Prince SD, Jarvis PG, McMurtrie RE, Luxmoore R, Medlyn BE (1997). Energy conversion and use in forests: an analysis of forest production in terms of radiation utilisation efficiency (ϵ). Shimoda H, Gholz HL, Nakane K. *The Use of Remote Sensing in the Modeling of Forest Productivity*. Springer, Dordrecht. 273–298.
- Lausch A, Bannehr L, Beckmann M, Boehm C, Feilhauer H, Hacker JM, Heurich M, Jung A, Klenke R, Neumann C, Pause M, Rocchini D, Schaepman ME, Schmidtlein S, Schulz K, Selsam P, Settele J, Skidmore AK, Cord AF (2016). Linking Earth Observation and taxonomic, structural and functional biodiversity: local to ecosystem perspectives. *Ecological Indicators*, 70, 317–339.
- Lefsky MA (2010). A global forest canopy height map from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer and the Geoscience Laser Altimeter System. *Geophysical Research Letters*, 37, L15401. DOI: 10.1029/2010GL043622.
- Lefsky MA, Cohen WB, Parker GG, Harding DJ (2002). Lidar remote sensing for ecosystem studies: lidar, an emerging remote sensing technology that directly measures the three-dimensional distribution of plant canopies, can accurately estimate vegetation structural attributes and should be of particular interest to forest, landscape, and global ecologists. *BioScience*, 52, 19–30.
- Lefsky MA, Harding D, Cohen WB, Parker G, Shugart HH (1999). Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA. *Remote Sensing of Environment*, 67, 83–98.
- Lesak AA, Radeloff VC, Hawbaker TJ, Pidgeon AM, Gobakken T, Contrucci K (2011). Modeling forest songbird species richness using LiDAR-derived measures of forest structure. *Remote Sensing of Environment*, 115, 2823–2835.
- Letoan T, Beaudoin A, Riom J, Guyon D (1992). Relating forest biomass to SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30, 403–411.
- Levin SA (1992). The problem of pattern and scale in ecology. *Ecology*, 73, 1943–1967.
- Li DR, Li M (2014). Research advance and application prospect of unmanned aerial vehicle remote sensing system. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 39, 505–513. [李德仁, 李明 (2014). 无人机遥感系统的研究进展与应用前景. 武汉大学学报(信息科学版), 39, 505–513.]
- Li WK, Guo QH, Tao SL, Su YJ (2018a). VBRT: a novel voxel-based radiative transfer model for heterogeneous three-dimensional forest scenes. *Remote Sensing of Environment*, 206, 318–335.
- Li X, Xiao JF, He BB (2018b). Chlorophyll fluorescence observed by OCO-2 is strongly related to gross primary productivity estimated from flux towers in temperate forests. *Remote Sensing of Environment*, 204, 659–671.
- Li YM, Guo QH, Su YJ, Tao SL, Zhao KG, Xu GC (2017). Retrieving the gap fraction, element clumping index, and leaf area index of individual trees using single-scan data from a terrestrial laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 130, 308–316.
- Li YM, Guo QH, Tao SL, Zheng G, Zhao KG, Xue BL, Su YJ (2016). Derivation, validation, and sensitivity analysis of terrestrial laser scanning-based leaf area index. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 42, 719–729.
- Liao XH, Zhou CH, SU FZ, Lu HY, Yue HY, Gou JP (2016). The mass innovation era of UAV remote sensing. *Journal of Geo-information Science*, 18, 1439–1448. [廖小罕, 周成虎, 苏奋振, 卢海英, 岳焕印, 侯吉平 (2016). 无人机遥感众创时代. 地球信息科学学报, 18, 1439–1448.]
- Lim K, Treitz P, Wulder M, St-Onge B, Flood M (2003). LiDAR remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography*, 27(1), 88–106.
- Loveland TR, Belward A (1997). The IGBP-DIS global 1 km land cover data set, DISCover: first results. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 3289–3295.
- Luyssaert S, Schulze ED, Boerner A, Knohl A, Hessenmoeller D, Law BE, Ciais P, Grace J (2008). Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*, 455, 213–215.
- Ma KP (1993). On the concept of biodiversity. *Chinese Biodiversity*, 1, 20–22. [马克平 (1993). 试论生物多样性的概念. 生物多样性, 1, 20–22.]
- McCombs JW, Roberts SD, Evans DL (2003). Influence of fusing lidar and multispectral imagery on remotely sensed estimates of stand density and mean tree height in a managed loblolly pine plantation. *Forest Science*, 49, 457–466.
- Montesano PM, Neigh C, Sun G, Duncanson L, van den Hoek J, Ranson KJ (2017). The use of sun elevation angle for stereogrammetric boreal forest height in open canopies. *Remote Sensing of Environment*, 196, 76–88.
- Morsdorf F, Koetz B, Meier E, Itten KI, Allgower B (2006). Estimation of LAI and fractional cover from small footprint airborne laser scanning data based on gap

DOI: 10.17521/cjpe.2019.0206

- fraction. *Remote Sensing of Environment*, 104, 50–61.
- Morsdorf F, Nichol C, Malthus T, Woodhouse IH (2009). Assessing forest structural and physiological information content of multi-spectral LiDAR waveforms by radiative transfer modelling. *Remote Sensing of Environment*, 113, 2152–2163.
- Mutanga O, Skidmore AK (2004). Integrating imaging spectroscopy and neural networks to map grass quality in the Kruger National Park, South Africa. *Remote Sensing of Environment*, 90, 104–115.
- Naesset E, Okland T (2002). Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve. *Remote Sensing of Environment*, 79, 105–115.
- Nagendra H, Rocchini D, Ghate R, Sharma B, Pareeth S (2010). Assessing plant diversity in a dry tropical forest: comparing the utility of Landsat and IKONOS satellite images. *Remote Sensing*, 2, 478–496.
- Naidoo L, Cho MA, Mathieu R, Asner G (2012). Classification of savanna tree species, in the Greater Kruger national park region, by integrating hyperspectral and LiDAR data in a random forest data mining environment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 69, 167–179.
- Nilsson M (1996). Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system. *Remote Sensing of Environment*, 56, 1–7.
- Nuijten RJG, Coops NC, Goodbody TRH, Pelletier G (2019). Examining the multi-seasonal consistency of individual tree segmentation on deciduous stands using digital aerial photogrammetry (DAP) and unmanned aerial systems (UAS). *Remote Sensing*, 11, 739. DOI: 10.3390/rs11070739.
- Odum EP, Barrett GW (1971). *Fundamentals of Ecology*. Saunders, Philadelphia.
- Otero V, van de Kerchove R, Satyanarayana B, Martinez-Espinosa C, Bin Fisol MA, Bin Ibrahim MR, Sulong I, Mohd-Lokman H, Lucas R, Dandouh-Guebas F (2018). Managing mangrove forests from the sky: forest inventory using field data and unmanned aerial vehicle (UAV) imagery in the Matang mangrove forest Reserve, peninsular Malaysia. *Forest Ecology and Management*, 411, 35–45.
- Palminteri S, Powell GVN, Asner GP, Peres CA (2012). LiDAR measurements of canopy structure predict spatial distribution of a tropical mature forest primate. *Remote Sensing of Environment*, 127, 98–105.
- Pang Y, Li ZY, Chen EX, Sun GQ (2005). Lidar remote sensing technology and its application in forestry. *Scientia Silvae Sinicae*, 41(3), 129–136. [庞勇, 李增元, 陈尔学, 孙国清 (2005). 激光雷达技术及其在林业上的应用. 林业科学, 41(3), 129–136]
- Pettorelli N, Laurance WF, O'Brien TG, Wegmann M, Nagendra H, Turner W (2014). Satellite remote sensing for applied ecologists: opportunities and challenges. *Journal of Applied Ecology*, 51, 839–848.
- Pettorelli N, Vik JO, Mysterud A, Gaillard J-M, Tucker CJ, Stenseth NC (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20, 503–510.
- Piao SL, Fang JY, Zhou LM, Tan K, Tao S (2007). Changes in biomass carbon stocks in China's grasslands between 1982 and 1999. *Global Biogeochemical Cycles*, 21, GB2002. DOI: 10.1029/2005GB002634.
- Piao SL, Liu Q, Chen AP, Janssens IA, Fu YS, Dai JH, Liu LL, Lian X, Shen MG, Zhu XL (2019). Plant phenology and global climate change: current progresses and challenges. *Global Change Biology*, 25, 1922–1940.
- Pimm SL, Alibhai S, Bergl R, Dehgan A, Giri C, Jewell Z, Joppa L, Kays R, Loarie S (2015). Emerging technologies to conserve biodiversity. *Trends in Ecology & Evolution*, 30, 685–696.
- Popescu SC, Wynne RH, Nelson RF (2003). Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29, 564–577.
- Potter CS, Randerson JT, Field CB, Matson PA, Vitousek PM, Mooney HA, Klooster SA (1993). Terrestrial ecosystem production—A process model-based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 7, 811–841.
- Qi J, Chehbouni A, Huete AR, Kerr YH, Sorooshian S (1994). A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 48, 119–126.
- Ramoelo A, Skidmore AK, Schlerf M, Heitkönig IMA, Mathieu R, Cho MA (2013). Savanna grass nitrogen to phosphorous ratio estimation using field spectroscopy and the potential for estimation with imaging spectroscopy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23, 334–343.
- Ranson KJ, Sun GQ (1994). Mapping biomass of a northern forest using multifrequency SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32, 388–396.
- Richardson AD, Braswell BH, Hollinger DY, Jenkins JP, Ollinger SV (2009a). Near-surface remote sensing of spatial and temporal variation in canopy phenology. *Ecological Applications*, 19, 1417–1428.
- Richardson JJ, Moskal LM, Kim S-H (2009b). Modeling approaches to estimate effective leaf area index from aerial discrete-return LiDAR. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1152–1160.
- Running SW, Thornton PE, Nemani R, Glassy JM (2000). Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system//Sala OE, Jackson RB, Mooney HA, Howarth RW. *Methods in Ecosystem Science*. Springer, New York. 44–57.
- Saatchi SS, Harris NL, Brown S, Lefsky M, Mitchard ETA, Salas W, Zutta BR, Buermann W, Lewis SL, Hagen S,

- Petrova S, White L, Silman M, Morel A (2011). Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108, 9899–9904.
- Sankey TT, Bond P (2011). LiDAR-based classification of sagebrush community types. *Rangeland Ecology & Management*, 64, 92–98.
- Simard M, Pinto N, Fisher JB, Baccini A (2011). Mapping forest canopy height globally with spaceborne lidar. *Journal of Geophysical Research*, 116, G04021. DOI:10.1029/2011jg001708.
- Skidmore AK, Ferwerda JG, Mutanga O, van Wieren SE, Peel M, Grant RC, Prins HHT, Balcik FB, Venus V (2010). Forage quality of savannas—Simultaneously mapping foliar protein and polyphenols for trees and grass using hyperspectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, 114, 64–72.
- Smith AMS, Falkowski MJ, Hudak AT, Evans JS, Robinson AP, Steele CM (2009). A cross-comparison of field, spectral, and lidar estimates of forest canopy cover. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 35, 447–459.
- Spanner MA, Pierce LL, Peterson DL, Running SW (1990). Remote-sensing of temperate coniferous forest leaf-area index—The influence of canopy closure, understory vegetation and background reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 11, 95–111.
- Srinivasan S, Popescu SC, Eriksson M, Sheridan RD, Ku N-W (2015). Terrestrial laser scanning as an effective tool to retrieve tree level height, crown width, and stem diameter. *Remote Sensing*, 7, 1877–1896.
- Stagakis S, Markos N, Sykioti O, Kyparissis A (2010). Monitoring canopy biophysical and biochemical parameters in ecosystem scale using satellite hyperspectral imagery: an application on a *Phlomis fruticosa* Mediterranean ecosystem using multiangular CHRIS/PROBA observations. *Remote Sensing of Environment*, 114, 977–994.
- St-Louis V, Pidgeon AM, Radeloff VC, Hawbaker TJ, Clayton MK (2006). High-resolution image texture as a predictor of bird species richness. *Remote Sensing of Environment*, 105, 299–312.
- Stoeckli R, Rutishauser T, Dragoni D, O’Keefe J, Thornton PE, Jolly M, Lu L, Denning AS (2008). Remote sensing data assimilation for a prognostic phenology model. *Journal of Geophysical Research*, 113, G04021. DOI: 10.1029/2008jg000781.
- Su YJ, Guo QH, Fry DL, Collins BM, Kelly M, Flanagan JP, Battles JJ (2016a). A vegetation mapping strategy for conifer forests by combining airborne LiDAR data and aerial imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 42, 1–15.
- Su YJ, Guo QH, Xue BL, Hu TY, Alvarez O, Tao SL, Fang JY (2016b). Spatial distribution of forest aboveground biomass in China: estimation through combination of spaceborne lidar, optical imagery, and forest inventory data. *Remote Sensing of Environment*, 173, 187–199.
- Su YJ, Ma Q, Guo QH (2017). Fine-resolution forest tree height estimation across the Sierra Nevada through the integration of spaceborne LiDAR, airborne LiDAR, and optical imagery. *International Journal of Digital Earth*, 10, 307–323.
- Sun GQ, Ranson KJ (1995). A 3-dimensional radar backscatter model of forest canopies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33, 372–382.
- Sun Y, Frankenberg C, Wood JD, Schimel DS, Jung M, Guanter L, Drewry DT, Verma M, Porcar-Castell A, Griffiths TJ, Gu L, Magney TS, Kohler P, Evans B, Yuen K (2017). OCO-2 advances photosynthesis observation from space via solar-induced chlorophyll fluorescence. *Science*, 358, eaam5747. DOI: 10.1126/science.aam5747.
- Tan K, Piao SL, Peng CH, Fang JY (2007). Satellite-based estimation of biomass carbon stocks for northeast China’s forests between 1982 and 1999. *Forest Ecology and Management*, 240(1–3), 114–121.
- Tanaka H, Nakashizuka T (1997). Fifteen years of canopy dynamics analyzed by aerial photographs in a temperate deciduous forest, Japan. *Ecology*, 78, 612–620.
- Tansley AG (1935). The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology*, 16, 284–307.
- Tao SL, Fang JY, Zhao X, Zhao SQ, Shen HH, Hu HF, Tang ZY, Wang ZH, Guo QH (2015). Rapid loss of lakes on the Mongolian Plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112, 2281–2286.
- Tao SL, Guo QH, Li C, Wang ZH, Fang JY (2016). Global patterns and determinants of forest canopy height. *Ecology*, 97, 3265–3270.
- Teacher AGF, Griffiths DJ, Hodgson DJ, Inger R (2013). Smartphones in ecology and evolution: a guide for the app-rehensive. *Ecology and Evolution*, 3, 5268–5278.
- Tews J, Brose U, Grimm V, Tielborger K, Wichmann MC, Schwager M, Jeltsch F (2004). Animal species diversity driven by habitat heterogeneity/diversity: the importance of keystone structures. *Journal of Biogeography*, 31, 79–92.
- Turner M, Beer C, Santoro M, Carvalhais N, Wutzler T, Schepaschenko D, Shvidenko A, Komptter E, Ahrens B, Levick SR, Schmullius C (2014). Carbon stock and density of northern boreal and temperate forests. *Global Ecology and Biogeography*, 23, 297–310.
- Tucker CJ, Pinzon JE, Brown ME, Slayback DA, Pak EW, Mahoney R, Vermote EF, El Saleous N (2005). An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 4485–4498.

- Tucker CJ, Vanpraet CL, Sharman MJ, Vanittersum G (1985). Satellite remote-sensing of total herbaceous biomass production in the senegalese sahel: 1980–1984. *Remote Sensing of Environment*, 17, 233–249.
- Turner BL, Lambin EF, Reenberg A (2007). The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104, 20666–20671.
- Turner DP, Ritts WD, Cohen WB, Gower ST, Zhao MS, Running SW, Wofsy SC, Urbanski S, Dunn AL, Munger JW (2003). Scaling gross primary production (GPP) over boreal and deciduous forest landscapes in support of MODIS GPP product validation. *Remote Sensing of Environment*, 88, 256–270.
- Vepakomma U, St-Onge B, Kneeshaw D (2008). Spatially explicit characterization of boreal forest gap dynamics using multi-temporal lidar data. *Remote Sensing of Environment*, 112, 2326–2340.
- Vermeulen C, Lejeune P, Lisein J, Sawadogo P, Bouche P (2013). Unmanned aerial survey of elephants. *PLOS ONE*, 8, e54700. DOI: 10.1371/journal.pone.0054700.
- Viedma O, Meliá J, Segarra D, Garcia-Haro J (1997). Modeling rates of ecosystem recovery after fires by using Landsat TM data. *Remote Sensing of Environment*, 61, 383–398.
- Vierling KT, Vierling LA, Gould WA, Martinuzzi S, Clawges RM (2008). Lidar: shedding new light on habitat characterization and modeling. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6(2), 90–98.
- Wachholz de Souza CH, Camargo Lamparelli RA, Rocha JV, Graziano Magalhaes PS (2017). Height estimation of sugarcane using an unmanned aerial system (UAS) based on structure from motion (SfM) point clouds. *International Journal of Remote Sensing*, 38, 2218–2230.
- Wang J, Xiao XM, Qin YW, Dong JW, Geissler G, Zhang GL, Cejda N, Alikhani B, Doughty RB (2017). Mapping the dynamics of eastern redcedar encroachment into grasslands during 1984–2010 through PALSAR and time series Landsat images. *Remote Sensing of Environment*, 190, 233–246.
- Wang J, Xiao XM, Qin YW, Doughty RB, Dong JW, Zou ZH (2018). Characterizing the encroachment of juniper forests into sub-humid and semi-arid prairies from 1984 to 2010 using PALSAR and Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 205, 166–179.
- Watt AS (1947). Pattern and process in the plant community. *Journal of Ecology*, 35(1–2), 1–22.
- Weishampel JF, Blair JB, Knox RG, Dubayah R, Clark DB (2000). Volumetric lidar return patterns from an old-growth tropical rainforest canopy. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 409–415.
- Wessels KJ, Prince S, Frost P, van Zyl D (2004). Assessing the effects of human-induced land degradation in the former homelands of northern South Africa with a 1 km AVHRR NDVI time-series. *Remote Sensing of Environment*, 91, 47–67.
- White MA, de Beurs KM, Didan K, Inouye DW, Richardson AD, Jensen OP, O'Keefe J, Zhang G, Nemani RR, van Leeuwen WJD, Brown JF, de Wit A, Schaepman M, Lin X, Dettinger M, Bailey AS, Kimball J, Schwartz MD, Baldocchi DD, Lee JT, Lauenroth WK (2009). Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982–2006. *Global Change Biology*, 15, 2335–2359.
- Wieneke S, Ahrends H, Damm A, Pinto F, Stadler A, Rossini M, Rascher U (2016). Airborne based spectroscopy of red and far-red sun-induced chlorophyll fluorescence: implications for improved estimates of gross primary productivity. *Remote Sensing of Environment*, 184, 654–667.
- Yamamoto SI (1992). The gap theory in forest dynamics. *Botanical Magazine-Tokyo*, 105, 375–383.
- Yu GR (2009). *Frontier Scientific Issues of Human Activity and Ecosystem Change*. Higher Education Press, Beijing. [于贵瑞 (2009). 人类活动与生态系统变化的前沿科学问题. 高等教育出版社, 北京.]
- Yu ZL, Ge JP, Yu GR, Zhang DY, Fang JY, Kang L, Fu BJ, Jiao NZ (2017). *The Present Situation and Development Trend of Ecology*. Higher Education Press, Beijing. [于振良, 葛剑平, 于贵瑞, 张大勇, 方精云, 康乐, 傅伯杰, 焦念志 (2017). 生态学的现状与发展趋势. 高等教育出版社, 北京.]
- Zarco-Tejada PJ, Diaz-Varela R, Angileri V, Loudjani P (2014). Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods. *European Journal of Agronomy*, 55, 89–99.
- Zhang J, Hu JB, Lian JY, Fan ZG, Ouyang XJ, Ye WH (2016). Seeing the forest from drones: testing the potential of lightweight drones as a tool for long-term forest monitoring. *Biological Conservation*, 198, 60–69.
- Zhang J, Sun QH, Ye Z, Yang MH, Zhao XX, Ju YZ, Hu TY, Guo QH (2019). New technology of ecological remote sensing: light small unmanned aerial vehicle (UAV). *Tropical Geography*, 39, 604–615. [张菁, 孙千惠, 叶震, 杨默含, 赵晓霞, 巨袁臻, 胡天宇, 郭庆华 (2019). 生态遥感新锐——轻小型无人机的应用. 热带地理, 39, 604–615.]
- Zhang XY, Friedl MA, Schaaf CB, Strahler AH, Hodges JCF, Gao F, Reed BC, Huete A (2003). Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84, 471–475.
- Zhang YJ, Fan CK, Huang K, Liu YJ, Zu JX, Zhu JT (2017). Opportunities and challenges in remote sensing applications to ecosystem ecology. *Chinese Journal of Ecology*, 36,

- 809–823. [张扬建, 范春捆, 黄珂, 刘瑶杰, 俎佳星, 朱军涛 (2017). 遥感在生态系统生态学上应用的机遇与挑战. 生态学杂志, 36, 809–823.]
- Zhao KG, Popescu S (2009). Lidar-based mapping of leaf area index and its use for validating GLOBCARBON satellite LAI product in a temperate forest of the southern USA. *Remote Sensing of Environment*, 113, 1628–1645.
- Zhao MS, Heinsch FA, Nemani RR, Running SW (2005). Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. *Remote Sensing of Environment*, 95, 164–176.
- Zhao YJ, Zeng Y, Zheng ZJ, Dong WX, Zhao D, Wu BF, Zhao QJ (2018). Forest species diversity mapping using airborne LiDAR and hyperspectral data in a subtropical forest in China. *Remote Sensing of Environment*, 213, 104–114.

特邀编委: 温学发 编辑: 赵 航