

•生物多样性监测网络专题•

生物多样性近地面遥感监测: 应用现状与前景展望

郭庆华^{1*} 刘 瑾¹ 李玉美^{1,2} 翟秋萍^{1,2} 王永财^{1,2} 吴芳芳^{1,2}
胡天宇¹ 万华伟³ 刘慧明³ 申文明³

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

2 (中国科学院大学, 北京 100049)

3 (环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100094)

摘要: 近年来中国生物多样性监测与研究网络(Sino BON)建设得到了快速发展, 为我国生物多样性长期监测和研究提供了良好的平台条件。其中, 以激光雷达技术为核心的近地面遥感平台, 作为Sino BON综合监测与管理中心的重要组成部分, 已研发形成了较为成熟的软、硬件技术体系, 可以提供林下地形建模, 林分高度、林分表面结构, 林窗或内部分界线, 郁闭度动态, 植被群落划分、群落内部精细空间结构, 单木高度与胸径, 冠层形态、周长和盖度, 物种识别, 亚米级三维景观图等数字产品, 从而能够为国家相关部门和研究单位开展多种时空尺度的生物多样性监测、评价和保护工作提供精准、高效的技术支持。本文首先介绍了遥感技术在生物多样性研究中的应用发展历史及最新趋势。然后在生物多样性遥感监测直接和间接两种方法研究进展基础之上, 总结了从遥感数据中可提取的重要生物多样性指标, 以及选择不同类型遥感数据源时需要考虑的时空尺度信息。在详细阐述NEON、CEOS、GEO BON等国际合作组织推动遥感技术开展生物多样性监测的过程中指明: 以无人机为代表的近地面遥感平台具有机动灵活、高效低廉和高分辨率的特点, 可在卫星平台、载人航空平台和地面常规调查平台之间架构起生物多样性信息尺度推绎不可或缺的中间桥梁, 将是未来生物多样性监测的一个重要手段。最后, 文章指出: Sino BON近地面遥感平台的逐步建设完善将为我国生物多样性监测提供全方位的立体量化信息, 在促进我国生物多样性监测网络向跨尺度等级动态系统监测、多源信息集成、智能决策与服务的平台方向发展意义重大。

关键词: 激光雷达; 高光谱遥感; 定量三维生境; 监测指标; 生物多样性制图

A near-surface remote sensing platform for biodiversity monitoring: perspectives and prospects

Qinghua Guo^{1*}, Jin Liu¹, Yumei Li^{1,2}, Qiuping Zhai^{1,2}, Yongcai Wang^{1,2}, Fangfang Wu^{1,2}, Tianyu Hu¹, Huawei Wan³, Huiming Liu³, Wenming Shen³

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

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Satellite Environmental Application Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100094

Abstract: In recent years, the Chinese Biodiversity Monitoring and Research Network (Sino BON) has developed rapidly, which provides an unprecedented platform for long-term biodiversity monitoring and research. The near-surface remote sensing (NsRS) platform, an important component of the Sino BON-Synthesis (Synthesis Center of Sino BON) and equipped with LiDAR (Light Detection and Ranging) as the core technique, has developed a mature technology system integrating hardware and software, which can provide digital products such as topographic modeling under forest, stand height, stand surface structure, gap or internal boundaries, canopy closure dynamics, vegetation community division, fine spatial structure

收稿日期: 2016-02-29; 接受日期: 2016-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(41471363)、国家重点研发计划(2016YFC0500202)

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

within the community, individual tree height and diameter at breast height, canopy morphology, circumference and cover, species identification, sub-meter three-dimensional landscape map and so on. Therefore it can be used to acquire multiple spatiotemporal scales of biodiversity observations and offer scientists and managers specialized and effective technical support for biodiversity evaluation and conservation. In this paper, we provide a comprehensive review on the history and recent development of remote sensing technology in biodiversity studies. Then, we summarize the important indices of biodiversity that can be extracted from remote sensing data based on the direct and indirect methods for remote sensing monitoring of biodiversity and suggest spatial and temporal scales that should be referenced against the selection of different types of remote sensing data. Next we describe in detail the application of the state-of-the-art NsRS platform at home and abroad and figure out that the near-surface remote sensing platform represented by unmanned aerial vehicle (UAV), characterized by flexibility, high efficiency, low cost and high resolution, will be an important means for biodiversity monitoring in the near future. Because it can act as an indispensable intermediate bridge between satellite platform, manned aviation platform and ground survey platform when conducting the biodiversity information scaling. Finally, based on currently available techniques and equipment of the NsRS platform, we conclude that further improvement of the platform construction will greatly help us to obtain three-dimensional quantitative habitat information. And it will be a long-term, significant step for the biodiversity observation network in China to have transformed into an intelligent decision and service platform with trans-scale hierarchy dynamic monitoring ability and multi-source information integration technology.

Key words: LiDAR; hyper-spectral remote sensing; quantitative three-dimensional habitat; monitoring index; biodiversity mapping

人类活动导致全球范围内生物多样性丧失、生态系统服务功能退化、全球气候变化等重大生态环境问题日趋严重(MA, 2005; IPCC, 2007; Brook et al, 2013)。20世纪90年代以来, 生物多样性保护开始成为国际社会广泛关注的重大议题。在科研实践和各种保护行动计划实施过程中, 社会各界普遍意识到: 需要对不同尺度生物多样性进行长期性、周期性和动态性的网络监测, 以帮助科研人员认知生物多样性变化的驱动因子并对其进行量化研究, 从而认识生物多样性变化的主导过程及其对生态系统功能和人类生产活动的反馈机制(李延梅等, 2009); 而且, 也只有通过这样的监测活动才能使生物多样性保护和持续利用实践建立在科学的基础之上, 使其真正变为有效的行动(马克平和钱迎倩, 1998; Magurran et al, 2010)。

中国是世界上生物多样性最丰富的12个国家之一, 但同时也是生物多样性受威胁最严重的国家之一(马克平, 2007)。2015年4月, 中共中央、国务院发布了《关于加快推进生态文明建设的意见》, 明确将“生物多样性丧失速度得到基本控制, 全国生态系统稳定性明显增强”确立为主要目标之一。2015年5月22日, 环境保护部陈吉宁部长在“国际生物多样性日”纪念大会上强调: “要清醒地认识到,

中国生物多样性退化的总体趋势尚未得到根本遏制, 仍面临严峻挑战和艰巨任务”。因此, 如何将中国的生物多样性监测尽快地推进到多尺度、量化的新时代, 既是实现生物多样性保护和科学合理利用的迫切愿望, 也是提高生态文明水平和可持续发展能力的迫切需求, 更是社会公众的殷切期盼。

然而, 这一愿景的实现必须突破来自多方面的制约, 其中最根本性的制约是缺乏可以直接观测生物多样性多尺度格局以及识别生物多样性变化驱动因子的技术手段。因植根于生态学研究范畴, 传统的生物多样性监测和保护工作主要还是基于地面调查方法而重点关注物种水平(Myers et al, 2000; Duro et al, 2007; 朱超等, 2015)。在样方或样地水平上的调查结果虽然在过去相当长一段时间内为物种丰富度和均匀度评估提供了准确的信息, 但是它们无法及时反映生态系统多样性的变化(Nicholson et al, 2009), 在获取大尺度土地覆盖、净初级生产力、干扰事件等反映生物多样性和生态系统结构功能的关键指标时呈现出局限性(郭庆华等, 2014; Pettorelli et al, 2014); 另外, 在评估和预测全球变化和人类活动影响下的生物多样性格局动态、揭示其响应机制以及探究生物多样性与生态系统稳定性关系等方面, 仅靠样点的监测结果很难有效地推

动决策层面保护措施制定。

自1972年美国国家航空航天局(the U.S. National Aeronautics and Space Administration, NASA)成功发射Landsat 1飞行器以来, 空间遥感技术在环境探测、生态制图、理解和预测生境变化方面发挥着越来越重要的作用。20世纪90年代前后, 科研人员就曾指出: 卫星影像具备即时性、系统性和可重复性, 在大尺度监测和评价生物多样性要素方面具有优势(Soulé & Kohm, 1989; Noss, 1990; Roughgarden et al, 1991)。卫星影像早期的应用主要侧重于土地利用和覆盖变化的监测, 例如, 监测森林砍伐导致热带亚马逊流域生境破碎化的状况(Skole & Tucker, 1993); 再如, 评估全球土地覆盖历史变迁从而揭示农田扩张致使野生动植物生境资源锐减(Ramankutty & Foley, 1999)。随着高分辨率的新型传感器的不断涌现, 以及运载工具覆盖地面、天空乃至宇宙空间, 形成了多层次、多视角、多领域的对地观测体系, 研究者更加意识到: 遥感技术在实施跨越不同时空尺度、不同组织水平的生物多样性

监测任务方面具有巨大潜力(图1) (Kerr & Ostrovsky, 2003; Running et al, 2004; Vierling et al, 2008; Davies & Asner, 2014)。借助该技术并配合常规地面调查, 使得对树木构件、单木、群落、景观、区域乃至全球尺度的生物多样性研究从对不同类型生态系统的定性描述过渡到定量研究成为可能。

目前从植物(Saatchi et al, 2008)到哺乳动物(Oindo et al, 2003)再到鸟类(Lavers & Haines-Young, 1997)、昆虫(Peterson et al, 2005)等的相关生物多样性研究应用的遥感产品均来自于卫星遥感平台, 例如30 m空间分辨率的Landsat数据以及250–1,000 m空间分辨率的MODIS数据。其优点是数据获取费用相对低廉, 能够提供区域、洲际乃至全球尺度的生物多样性信息, 监测区域可重复访问、数据一致性好并且能够及时、规律地更新(Gould, 2000)。但是其局限性也相当突出, 尤其体现在空间分辨率与局地调查数据以及时间分辨率与生态过程的时间尺度匹配方面(Wulder et al, 2004)。虽然过去10年间Quickbird、IKONOS、WorldView-2的出现能够提供



图1 不同时空尺度生物多样性遥感监测平台的选择
Fig. 1 The choice of remote sensing platforms for biodiversity monitoring according to different spatiotemporal scales

米级空间分辨率的数据,明显提升了遥感在实践中的应用能力,但它们还存在购买费用过高、倾角和几何形变、云层阴影干扰等问题(Loarie et al, 2007)。随着低空领域的开放,从理论上讲民用飞机平台似乎能够规避上述所有问题,实现监测调查的个性化定制服务,而且还能够搭载最新的主动遥感传感器激光雷达(light detection and ranging, LiDAR),以获取高精度地形信息以及生境垂直维度结构功能参数(Lefsky et al, 2002)。但事实上,仅购买航线一项费用就会让许多地区的常规监测因经费限制而无法开展。

无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)遥感新技术的出现,使得任意时间内收集足够精细空间分辨率的影像和空间数据成为可能。该遥感平台提供的遥感数据便于实现多源数据融合,从而允许跨尺度生态过程的研究设计得以实现(尤其适合填补介于机载平台和地面固定平台调查取样的时空尺度空缺)。与卫星和载人飞机等航空航天地面信息采集平台相比,无人机近地面遥感平台凭借其影像获取速度快、覆盖面积大、应用周期短、影像清晰度高(精度可达到厘米级)、便于解析、受自然环境约束小、成本低、操作容易、运行和维护成本低等特点,充分弥补了传统卫星遥感和普通航空遥感的不足(刘倩等, 2016),将是生物多样性监测领域未来发展的方向。

目前,我国开展的生物多样性网络监测项目对生境或生态系统的调查主要还是以地面测量为主,工作量大、体力劳动强度大、周期长、时效性差。虽然也有少量项目采用遥感方法进行了基于景观指数或者植被指数以及光谱异质性的生物多样性监测研究(方彬等, 2007; 高宁, 2008^①; 梁大双, 2011^②)。但总体而言,生物多样性生境监测在跨尺度监测既定目标格局(包括水平和垂直两个方向)与动态把握方面尚未形成体系。因此,中国生物多样性监测与研究网络(Chinese Biodiversity Monitoring and Research Networks, Sino BON)综合监测管理中心(Synthesis Center of Sino BON, Sino BON-Synthesis)将于“十三五”期间建立以激光雷达和高光谱影像传

感器为主的UAV近地面遥感生物多样性监测平台,旨在为当前生物多样性监测和研究中亟需但是严重缺乏的生境的三维结构和质量提供定量描述。该平台将协同传统光学遥感平台以及地面调查监测展开多台站、多生境、多尺度的联网研究,使得我们能够通过观测、模拟和实验相结合的方法,确定生物多样性格局变化最重要的基本过程,为不同尺度的多样性空间大格局分析、环境驱动机制研究,不同景观共性规律的发现和验证提供数据支撑和实验研究条件。

本文拟简要介绍生物多样性遥感监测方法,重点说明使用近地面遥感平台进行生物多样性监测的国内外应用现状,最后展望未来生物多样性近地面遥感监测的发展方向、关键科学问题以及工作重心。遥感领域的新技术很可能从数据类型、数据收集和处理方式等方面的转变积极推动生物多样性创新研究的产生。

1 生物多样性遥感监测方法简介

Turner等(2003)将遥感技术定量和模拟生物多样性的方法分为直接和间接两种途径。直接法是直接识别物种或群落类型及其分布、多度,对遥感数据的空间分辨率和光谱分辨率有相当高的要求,是该领域未来的发展方向;间接法是通过遥感数据衍生一些指标或变量,而这些指标或变量被认为或证实是与生物多样性密切相关的,然后结合野外采样构建模型来预测物种分布以及多样性格局,目前这种方法是生物多样性遥感的应用主流。

1.1 直接法

早期该方向的应用研究都是利用卫星影像数据生成土地覆盖分类信息,在此基础上区分植被类型并计算斑块数量和面积、边界密度、Shannon多样性等一系列景观指数,围绕森林砍伐等干扰引起生境丧失和景观破碎化导致的物种丰富度降低这一问题,来预测物种应对这些变化的抗风险能力并对此展开评价(Westman et al, 1989; Stoms & Estes, 1993)。基于景观指数分析的生物多样性监测制图方法适合较大空间尺度(胡海德等, 2012),从20世纪80年代开始到90年代末得到广泛应用。但是进入2000年后,一些学者从环境因子(Griffiths et al, 2000)、遥感数据空间分辨率(Saura, 2004)和土地覆盖分类结果精度(Langford et al, 2006)、斑块内部质量信息

① 高宁 (2008) 红树林高分辨率遥感监测技术研究. 硕士学位论文, 山东科技大学, 山东青岛.

② 梁大双 (2011) 森林植物多样性遥感监测应用研究. 硕士学位论文, 北京林业大学, 北京.

(Gillespie, 2005)等角度, 指出单纯应用这种方法得到的生物多样性信息精度难以保证。

随着遥感影像数据空间分辨率和光谱分辨率的不断提高, 可直接建立光谱辐射值与样地调查得到的物种分布模式的相关关系, 这种研究方式特别适用于物种丰富度较高的小范围区域(Nagendra, 2001)。该方法的特别之处还在于: 它最有可能通过区分地物的特殊光谱特征解决基于遥感技术的个体物种识别这一难题(Wulder et al, 2004)。该方法的理论基础是光谱变异性与物种丰富度和多样性有很好的相关关系, 即光谱异质性假说(Palmer et al, 2002)。因为光谱异质性可以作为栖息地异质性的指标, 而异质性高的栖息地理论上允许更多的物种存在。Asner和Martin (2009)利用植被化学性质和植被光谱反射率间的回归分析关系, 确定了热带森林的各类植被分布。Carlson等(2007)将高光谱数据应用于夏威夷雨林的冠层多样性研究中, 探究了木本植物物种多样性与高光谱遥感数据光谱变异性的关系, 并进一步分析了叶片生理生化指标(如水分、色素、氮含量等)的变化与高光谱数据的光谱变异之间的关系。研究认为叶片的光谱变异主要是由于叶片理化性质的种间差异导致, 该结论明确将有机体的理化性质与遥感数据相结合, 是光谱变异理论的重要进展(胡海德等, 2012)。叶片理化性质类信息的可获性有助于更好地使用遥感手段直接进行树种分类, 进而提高了遥感技术直接测度生物多样性的能力。但目前仅利用单一来源的遥感数据获得的分类效果在实际应用中与需求还存在较大差距。

近年来, 基于多源遥感数据融合的生物多样性研究越来越受到重视, 比如高光谱数据反演植被冠层生化指标结合主动传感器提取冠层结构参数(郭庆华等, 2014)。高光谱影像在光谱维度方面能达到纳米级分辨率, 可以提供地物细节特征区分信息, 根据光谱差异分析不同的物种组成。激光雷达点云(point cloud)数据能提取树高、枝下高、林冠体积等, 可以从生活型、生长型角度反映物种差异。二者的有效结合可以实现数据优势互补, 增强遥感技术直接定量生物多样性的实际应用效果。已有研究表明, 激光雷达点云数据与高光谱数据的结合在林冠树种识别、地上生物量估算、目标树种高度提取、冠层孔隙分析及阴影去除等研究中都有了成功的应用(Asner et al, 2008; Lucas et al, 2008)。Voss和

Sugumaran (2008)将激光雷达数据和AISA高光谱数据相结合, 对4个落叶树种和3个常绿树种进行了分类, 激光雷达数据的加入使得阴影效应得以去除, 其提供的高程信息使得高矮植被得以区分, 最终使得基于秋季和夏季扫描获取的数据分类精度都提高了19%。Sugumaran和Voss (2007)以及Johansen等(2010)则基于面向对象和回归分析的分类方法, 将激光雷达获取的强度和高度信息加入到光谱数据的图像分割中, 使分类精度提高了12–24%。除了上述两类数据融合的方法外, 目前研究中还有利用基于支持向量机、最大似然法和随机森林等的监督分类和半监督分类方法融合激光雷达和多光谱数据进行群落和物种分类(Dalponte et al, 2008; Colgan et al, 2012; Féret & Asner 2012; Leutner et al, 2012; Ceballos et al, 2015)。在最新的研究中, Zhao等(2016b)在激光雷达数据进行单木分割的基础上, 利用光谱信息进行物种多样性的分析取得了较好的效果。另外, 还有研究提出了一种基于贝叶斯和K-均值的自动聚类算法的非监督分类方法(Su et al, 2016a), 其分类效果相比于单纯应用高光谱信息的分类结果更加精确。

综上所述, 激光雷达和高光谱数据的结合使用将会是研究生物多样性的有力工具。但两类数据的融合利用仍处于初步研究阶段, 需要探究新的数据融合利用方式, 进而发挥其在生物多样性监测中的优势。

1.2 间接法

相对于直接监测, 间接途径主要是利用遥感技术获取4类环境遥感变量进行生物多样性的间接估算与模拟。监测内容主要包括: (1)气候和地形; (2)生产力; (3)生境状况; (4)干扰等。这些变量在不同环境背景下的重要程度表现不同。

气候决定区域和全球尺度上的生物多样性格局已是共识(Hawkins et al, 2003)。气候变量主要是温度和降水两方面, 通常采用年均温、年降水量和潜在或实际蒸发量等。在不考虑地形变量的情况下, 仅基于气候因子的物种多样性预测精度就可以达到70–88% (Duro et al, 2007)。而地形已被很好地证实是解释区域、景观生物多样性差异的关键变量(Rosenzweig, 1995; Irl et al, 2015)。常选的参数有高程、地形复杂度指数(topographic complexity)、太阳辐射强度。针对目前常用的SRTM (shuttle radar

topography mission)全球数字高程模型DEM (digital elevation model)数据在植被覆盖地区(特别是森林覆盖的山区)偏高的问题, Su和Guo (2014)、Su等(2015)利用机载激光雷达数据分析了不同植被结构参数对DEM的影响, 建立了一种矫正SRTM DEM数据的方法, 为全球尺度DEM产品的改进提供了方法上的突破。

净初级生产力(*NPP*)和总初级生产力(*GPP*)是大尺度生物多样性格局的另一重要驱动因子。这主要是基于生产力与物种丰富度存在正相关关系, 即: 生产力高的地区相较于生产力低的地区能够为更多竞争的共存物种提供更丰富的资源, 从而支撑更为庞大的生物类群和种群规模。如Kooistra等(2008)利用遥感估算的*NPP*结合植被动态模型模拟莱茵河下游洪泛平原的生物多样性, 取得了较好的效果。由于植被指数与生物量 and 生产力显著相关并更易于计算, 更多研究直接采用归一化植被指数(*NDVI*)、增强型植被指数(*EVI*)、光合有效辐射吸收比率(*fPAR*)等表征植被光合作用能力的指标进行生物多样性研究, 而且这些指数被证实更容易建立起物种丰富度地面调查数据和基于遥感估测的植被生产功能之间的关系模型(Belote et al, 2011)。Krishnaswamy等(2009)采用基于马氏距离的多时相归一化植被指数代替直接的反射率数据, 能够以单一、连续的量化标尺定量描述森林类型的变化。也有研究发现了*NDVI*与动物多样性的简单关系, 如Seto等(2004)探讨了TM卫星*NDVI*与北美地区鸟类和蝴蝶多样性的关系。而对于半干旱地区, *EVI*更适合代替*NDVI*预测生物多样性。这是由于*EVI*考虑了蓝波段, 与*NDVI*相比其对土壤和大气影响不敏感; 同时随着林分密度增加, 当*NDVI*趋于饱和时*EVI*仍继续保持对植被的敏感性(魏彦昌等, 2008)。但后续研究发现生物多样性和生产力关系的确立要依赖于空间尺度的选择(Belote et al, 2011)。另外, 在进行大尺度生物多样性监测评估分析时需要考虑多尺度数据的综合应用, 即需要将地面数据、近地面遥感数据、机载与卫星数据结合在一起, 利用尺度转换方法使表征生产力的变量数据达到无缝覆盖。关于尺度推绎的不同工作思路以及具体方法可以分别参考Li等(2015)、Su等(2016b)和Zhao等(2016a)。需要注意的是: 树冠交叠是利用机载激光雷达数据估测地上生物量时必须考虑的因素, 它对分割算法

的选择和体积变量的选取都有重要影响(Tao et al, 2014)。

在局地、景观等小尺度范围, 如土地覆盖类型较为稳定的原始森林地区, 生境数量、布局和质量(类型、结构等)等因素对物种的分布、丰富度和多度影响更为显著。其中生境垂直维度的信息是解释和预测生物多样性的关键因子(MacArthur, 1960; Davies & Asner, 2014)。在该尺度范围开展的生物多样性遥感监测对数据的精细程度要求也更高。另外, 传统的光学遥感影像及航片的不足之处就在于难以描绘生境的三维结构特征(Levick & Rogers, 2008)。而生物多样性研究中亟需但是严重缺乏关于生境的三维结构和质量的定量描述, 如植被冠层高度、冠层生物量, 尤其是生物量垂直分布剖面轮廓(vertical biomass profiles)、枝下高、真实叶面积指数(true leaf area index)、材积等。因此, 仅依靠光学遥感已经不能完全满足生境数量和质量描述的需要。

激光雷达技术的兴起和发展把遥感空间分析成功地拓展到了三维领域, 点云和波形数据提供的扫描区域精确的三维位置和结构信息被视为提高生物多样性测量精度的一个有效补充(Mücher et al, 2013)。机载激光雷达数据可以刻画地形和植被的三维结构, 即动物栖息地信息, 也就可以间接估测动物多样性(Simonson et al, 2014)。Goetz等(2010)利用激光雷达数据计算的冠层垂直结构信息分析了一种热带鸟类的分布特征并指出: 由激光雷达数据获得的森林结构数据是确定鸟类多样性的关键参数, 由此建立了鸟类丰富度与森林结构的关系模型, 成功预测了该种鸟类在全美的分布情况(Goetz et al, 2014)。Muller和Brandl (2009)利用激光雷达数据预测山区的森林甲虫种群, 发现激光雷达数据获取的环境变量与实地调查结果具有较高的一致性, 不仅表明激光雷达技术可实时高效地评价复杂山区或结构复杂的森林栖息地, 并且能够很好地建立大尺度上遥感观测数据与实地调查数据之间的关系。Vihervaara等(2015)结合地面调查鸟类栖息情况与机载激光雷达数据获得的森林植被信息, 开展了景观尺度上的生物多样性评估, 提出两种数据结合的方法可作为量化生物多样性必需指标(essential biodiversity variables, EBV) (Pereira et al, 2013)的一个重要途径。

干扰发生在一系列时空尺度上,也具有不同的强度,通常在提高植被地区的空间异质性方面发挥着关键作用。遥感技术在监测生态系统干扰事件尤其是对于火、砍伐以及飓风等事件导致的立木更新、景观破碎化方面很有优势(Duro et al, 2007)。更多关于遥感数据如何应用于动植物生物多样性的研究可参见Kuenzer等(2014)。另外,从遥感数据中可提取哪些重要生物多样性指标,以及对于不同类型遥感数据源选择时需要考虑的时空尺度建议参考表1。

2 近地面遥感平台在生物多样性监测中的应用现状

生物多样性正经历着前所未有的快速变化(Ceballos et al, 2010),使得对生物多样性的认知也变得更为复杂和困难。已有研究显示:与人口增长、文化变迁、政治和经济有关的土地利用变化会直接导致生物生境的减小和重组,这将是造成21世纪生物多样性丧失的最强驱动力(Sala et al, 2000);物种分布和丰富度的变化最终将会影响生物地球化学循环中的土壤、水和大气化学组成(Vitousek et al, 1997),进而影响生态系统功能和服务的变化。而这些变化又具有长期、复杂、后果滞后和难以预测的特点(MA, 2005)。国际社会已取得广泛共识:只有借助遥感、地理信息系统、全球定位系统、数据智能化处理技术及虚拟环境等新技术、新方法,从单站点的定位观测转向台站网络观测综合集成方向发展,才能使生物多样性监测对一些基本规律的认识拓展到区域、国家层面的应用。于是,一些国家、国际组织和国际合作项目建立的国家、区域甚至全球尺度的观测、监测和信息共享网络,像NEON (the National Ecological Observation Network)、CEOS (the Committee on Earth Observation Satellites)、GEO BON (the Group on Earth Observations-Biodiversity Observation Network)等都在努力募集资金、协调遥感和地面数据的同期配合收集,希望能促进会议和工作组聚焦推动遥感技术在生物多样性监测和保护中的应用。

NEON作为综合性以及跨学科、跨尺度生物学研究全国联网平台,结合基于站点数据与遥感数据和现有洲际尺度的数据集(如卫星数据),生成了一系列数据产品用于探究生态系统在空间和时间维

度的变化。NEON的任务之一是提供区域景观和植被的详细航片拍摄数据,这一目标是通过称为“机载观测平台”助力完成的。机载观测平台(airborne observation platform, AOP)主要由三架搭载仪器的飞机构成,在专家指定和常规模式下对NEON所有计划的样地点进行航拍,其搭载的仪器主要包括可见光至短波红外光谱区域的成像光谱仪、波形激光测距仪(waveform-LiDAR)、高分辨率数码相机(Johnson, 2009)。AOP的仪器配置能够提供观测区域的土地利用、植被结构、植被的生物化学和生物物理特性以及由于土地利用、气候等的变化和入侵物种的活动所引起的生态系统响应。

GEO BON是国际生物多样性计划(DIVERSITAS)、世界自然保护联盟(IUCN)和美国国家航空航天局(NASA)等国际和地区性组织在2008年成立的生物多样性监测和保护平台。其目标是构建一个全球性平台来整合和共享生物多样性监测数据和信息,为生物多样性数据整合和分析提供工具,并给生物多样性保护决策提供更多的服务和支持。GEO BON的第七工作组专门进行整合遥感数据和基于遥感数据的生物多样性监测方法和模型的开发。其目的是在全球范围内通过合理布设样点,整合各个样点的遥感观测资料,加强同NASA在内的国际遥感数据主要提供者之间的联系,在不同的时空尺度上建立遥感生物多样性监测数据整合中心,并结合遥感生物信息、土地利用变化数据、气候数据、监测站点信息数据,制定相关数据使用规范和模型并提供以下信息:(1)生物多样性变化指示信息;(2)需要优先监测和保护的生物多样性重点区域;(3)基于遥感监测的生物多样性保护计划;(4)生物多样性资源变化趋势;(5)生态系统服务(GEO BON, 2008)。

EU BON (European Biodiversity Observation Network)于2012年12月成立,建立在GBIF、LifeWatch、EBONE等已有项目基础上,是GEO BON成员中的实质性组成部分。其目标是借助于新的生物多样性与生态系统服务政府间科学-政策平台(Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, IPBES)获取数据,有效地处理和分析数据,并给相关人员和团体提供措施来保护生物多样性。EU BON会提供最新的从局地到全球尺度的实地观测数据和遥感数据,并致

表1 生物多样性遥感监测的主要内容

Table 1 Remote sensing monitoring contents for biodiversity

	传感器(S星载 A机载) Sensor Space (S)/ Airborne (A)	传感器类型 Sensor type	空间分辨率 Spatial resolution	光谱分辨率 Spectral resolution	重访时间 Revisit time	监测内容 Monitoring Contents		
直接方法 Direct approaches								
物种组成 Species composition	TM/ETM + (S)	可见光 O	30–120 m	PAN (ETM+), VNIR (4), SWIR (2), TIR (1)	16 d	冠层及物种信息 Canopy and species informations		
	HYPERION (S)	可见光 O	30 m	400–2,500 nm (242 band)	16 d			
	IKONOS (S)	可见光 O	1–4 m	PAN, VNIR (4 band)	3 d			
	Quickbird (S)	可见光 O	0.6–2.4 m	PAN, VNIR (4 band)	2.5–5.6 d			
	AVIRIS (A)	可见光 O	20 m	380–2,500 nm (224 band), 400–1,010 nm (32 band)	N/A			
	CASI (A)	可见光 O	1 m	385–1,050 nm (288 band)	N/A			
土地覆盖 Land cover	MODIS (S)	可见光 O	250–1,000 m	400 nm–14.4 μm, 36 band	1–2 d	土地分类 Land cover classification		
	TM/ETM + (S)	可见光 O	30–120 m	PAN (ETM+), VNIR (4), SWIR (2), TIR (1)	16 d			
	ASTER (S)	可见光 O	15/30/90 m	VNIR (4), SWIR (6), TIR (5)	16 d	物种分布 Species distribution		
	IKONOS (S)	可见光 O	1–4 m	PAN, VNIR (4 band)	3 d			
	Quickbird (S)	可见光 O	0.6–2.4 m	PAN, VNIR (4 band)	2.5–5.6 d			
间接方法 Indirect approaches								
初级生产力 Primary productivity	MODIS (S)	可见光 O	250–1,000 m	400 nm–14.4 μm, 36 band	1–2 d	植被绿度 Vegetation greenness		
	ASTER (S)	可见光 O	90 m	VNIR (4), SWIR (6), TIR (5)	16 d			
	TM/ETM + (S)	可见光 O	30–120 m	PAN (ETM+), VNIR (4), SWIR (2), TIR (1)	16 d	生产力 Productivity		
	ALI (S)	可见光 O	10/30 m	PAN, VNIR (8), SWIR (1), MIR (1)	16 d			
	HYPERION (S)	可见光 O	30 m	400–2,500 nm (242 band)	16 d	植物健康监测 Plant health monitoring		
	IKONOS (S)	可见光 O	1–4 m	PAN, VNIR (4 band)	3 d			
	Quickbird (S)	可见光 O	0.6–2.4 m	PAN, VNIR (4 band)	2.5–5.6 d			
	AVIRIS	可见光 O	20 m	380–2,500 nm (224 band), 400–1,010 nm (32 band)	N/A			
	CASI (A)	可见光 O	1 m	385–1,050 nm (288 band)	N/A			
	降水 Rainfall	CERES (S)	可见光 O	20 km	Microwave	<1 d	降水 Rainfall	
		AMSRE (S)	被动微波 PM	5–50 km	Microwave	1–2 d		
土壤湿度 Soil moisture	AMSRE (S)	被动微波 PM	5–50 km	Microwave	1–2 d	地表湿度、干旱程 度 Soil moisture, Aridity		
物候 Phenology	MODIS (S)	可见光 O	250–1,000 m	400 nm–14.4 μm, 36 band	1–2 d	开花结果周期 Flower/fruit cycles		
	TM/ETM + (S)	可见光 O	30–120 m	PAN, VNIR (8), SWIR (1), MIR (1)	16 d			
	ASTER (S)	可见光 O	15/30/90 m	VNIR (4), SWIR (6), TIR (5)	16 d	物候事件探测 Phenological events monitoring		
	ALI (S)	可见光 O	10/30 m	PAN, VNIR (8), SWIR (1), MIR (1)	16 d			
	HYPERION (S)	可见光 O	30 m	400–2,500 nm (242 band)	16 d			
	IKONOS (S)	可见光 O	1–4 m	PAN, VNIR (4 band)	3 d			
	Quickbird (S)	可见光 O	0.6–2.4 m	PAN, VNIR (4 band)	2.5–5.6 d			
	生境 结构 Habitat structure	地形 Topography	SRTM (S)	雷达 R	30/90 m	Microwave	N/A	数字高程 Digital elevation model
			ASTER (S)	可见光 O	15/30/90 m	VNIR (4), SWIR (6), TIR (5)	16 d	
			IKONOS (S)	可见光 O	1–4 m	PAN, VNIR (4 band)	3 d	
		冠层垂 直结构 Vertical canopy structure	GLAS (S)	激光雷达 L	直径~70 m	LiDAR	N/A	冠层结构和 生物量估算 Canopy structure and biomass estimation
Airborne LiDAR (A)			激光雷达 L		LiDAR	N/A		
GLAS (S)			激光雷达 L	直径~70 m	LiDAR	N/A		

O, Optical; PM, Passive microwave; R, Radar; L, LiDAR.

力于开发模型用于高度整合各尺度、各站点的生物多样性观测数据(Häuser, 2016)。

上述观测网络项目多采用星载平台和载人航空遥感平台作为生物多样性遥感数据获取源。虽然目前来看, 无人机载荷能力与有人航空遥感平台相比稍显逊色(表2), 但是以固定翼UAV、无人机旋翼机和垂直起降UAV等为代表的平台既能克服载人航空遥感受制于长航时、恶劣气象条件、危险环境等的影响, 又能提供多角度高分辨率影像以弥补卫星因天气和时间无法获取目标区域遥感信息的空缺, 还能避免地面遥感工作范围小、视野窄、工作量大等不利因素(李德仁和李明, 2014)。UAV作为一种小型自制飞行系统, 具有机动灵活、高效低廉和高分辨率的特点, 可作为卫星影像与航片的一个折中选择, 是生物多样性调查研究的一个很好的数据获取平台(Gademer et al, 2010)。Getzin等(2012, 2014)利用UAV搭载高光谱传感器和高清相机, 通过获得详细的林隙分布数据揭示了干扰模式与植物多样性的强相关性, 并反映了森林结构的动态变化情况。Zhang等(2016)通过对物种丰富的亚热带森林20 ha大样地数据的整合性分析发现: 无人机提取的冠层变量能够对局地景观水平的生物多样性格局分布给出充分解释, 尤其是在支持林窗动态主导所观察到的森林生物多样性假说方面。该研究提

供了令人信服的证据, 无人机能够以低成本为长期生态监测提供大量有价值的高分辨率数据。

Sino BON正是看到了近地面遥感平台作为生物多样性研究的数据源(马克平, 2015), 可更好地提供生态系统现状及相关物种多样性的评价, 量化生物多样性的退化程度, 实现传统地面监测难以实现的大尺度分析(Nagendra et al, 2013), 而在“十三五”期间大力建设无人机近地面遥感平台, 进行生物多样性调查、监测和研究。该平台将通过硬件平台的研发, 实现通过激光雷达扫描仪、全球定位系统(GPS)和惯性测量装置(IMU)搭建地面激光雷达手持移动扫描系统和无人机载激光雷达以及高光谱系统, 将自下而上(地基平台)和自上而下(天基平台)两种数据获取手段有机结合, 获取中国大陆地区大型地带性植被类型监测样地生境的全方位、多尺度、多源遥感数据; 同时开发有效的去噪、数据融合算法, 实现多尺度多源数据的高效、精准、自动化数据预处理和参数提取的数据分析系统; 最终形成林下地形建模, 林分高度、林分表面结构, 林窗或内部分界线, 郁闭度动态, 植被群落划分、群落内部精细空间结构, 单木高度与胸径, 冠层形态、周长和盖度, 物种识别, 亚米级三维景观图, 环境因子沿纬度梯度不同生境的时间序列数据集等数字产品(图2)。

表2 机载平台与无人机平台所搭载的激光雷达和高光谱传感器性能对比

Table 2 The performance comparison of the LiDAR and hyperspectral sensor mounted on airborne platform and unmanned aerial vehicle (UAV)

平台		参数 Parameter					
类型	常用品牌	扫描模式(针对激光雷达)/光谱范围(nm)(针对高光谱)	扫描距离(m) (针对激光雷达)/光谱分辨率(nm)(针对高光谱)	回波信息(针对激光雷达)/波段数(针对高光谱)	视场角	扫描频率/帧频	重量
Platform type	Representative brands	Scanning pattern (for LiDAR)/Spectral range (nm) (for spectral imager)	Distance (m) (for LiDAR)/Spectral resolution (nm) (for spectral imager)	Return times (for LiDAR)/Band number (for spectral imager)	FOV (Field of view) (°)	Frequency (hz)/ Frame rate (fps)	Weight (kg)
激光雷达 LiDAR							
机载 Airborne	Leica ALS70-CM	正弦形/三角形/单向	1,848 (max)	未定义 Unlimited	0-75	200	45
	LiteMapper6800	平行线扫描	3,000 (max)	未定义 Unlimited	60	158 120 80-400	36
无人机 UAV	Velodyne HDL-32E	32激光器	100	1	(H) 360 (V) 41	5-20	2
	RIEGL VQ-820-GU	单扫描线	≥1,000	多次回波	(H) 60 (V) N/A	520 (max)	9.5
高光谱成像仪 Spectral imager							
机载 Airborne	CASI-1500	365-1,050	< 3.5	288	40	333	25
	AISA eagle	400-970	3.3	244/60	39.7/29.9/60	50/80	6.5
无人机 UAV	BayspecOCI-UAV-2000	600-1000	12-15	25	16	120	0.18
	Cubert UHD-185	450-950	4	125	可选 Optional	20	0.47

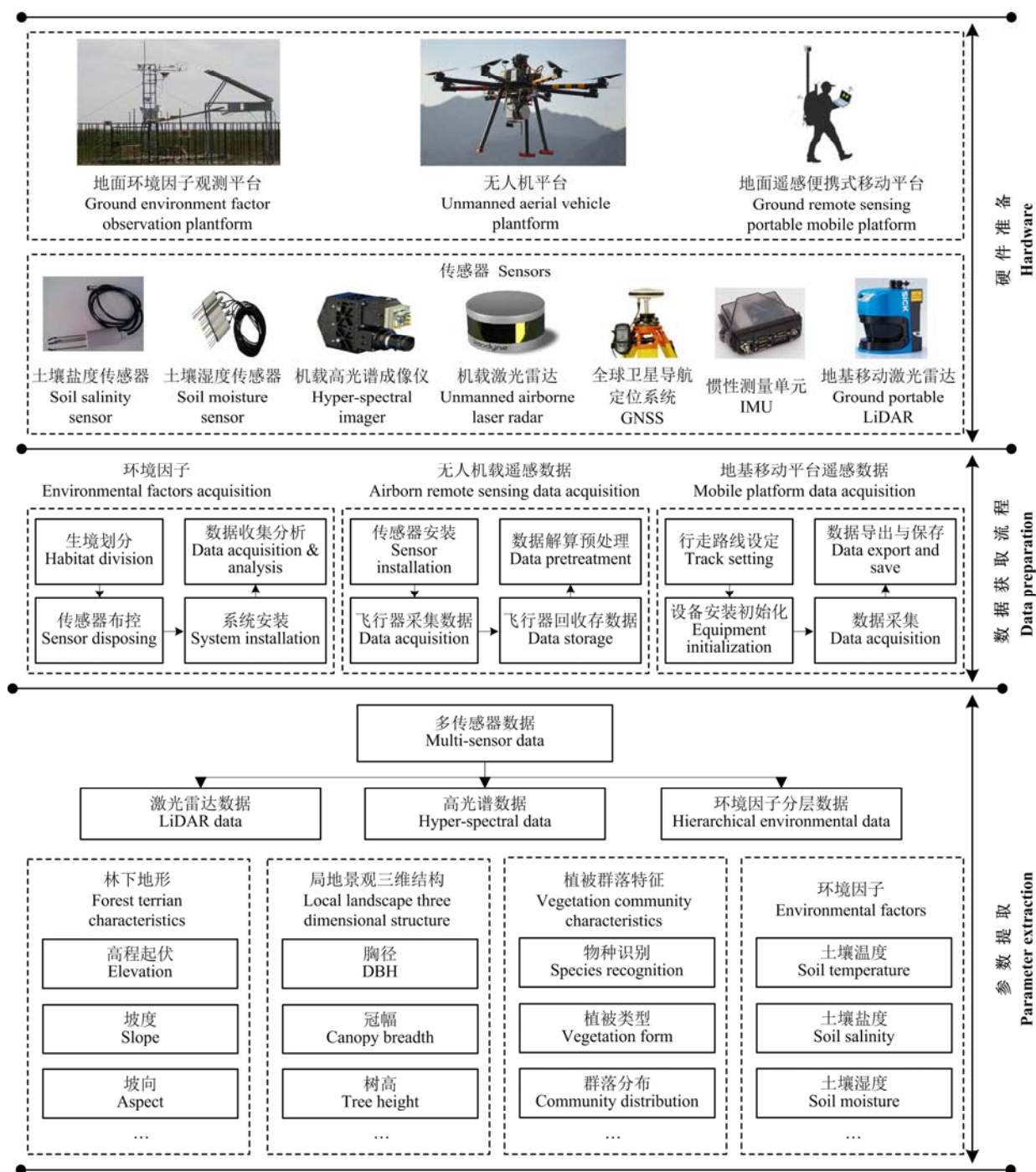


图2 近地面遥感监测总体技术路线

Fig. 2 The technical route of the near-surface remote sensing monitoring platform

在“十三五”近地面遥感平台建设初期, Sino BON综合监测管理中心将选择典型有代表性的9个森林地带性植被监测站点进行主要的监测任务布局, 同时选取10个草原和荒漠的重要群落类型监测站点作为辅助站点(图3)。在平台建设过程中, 为满足用户对扫描数据准确性和完整性的高要求, 追求

数据获取的高效性和扫描角度的互补性是该平台开发研究的重要目标, 涉及的1个核心技术问题就是多源传感器的硬件集成(图4)。所谓“核心”主要体现在4个方面: (1)单传感器检校和多源传感器的集成检校; (2)多源传感器时间同步; (3)多传感器工作状态实时监控, 特别是多源数据的实时压缩、打包、

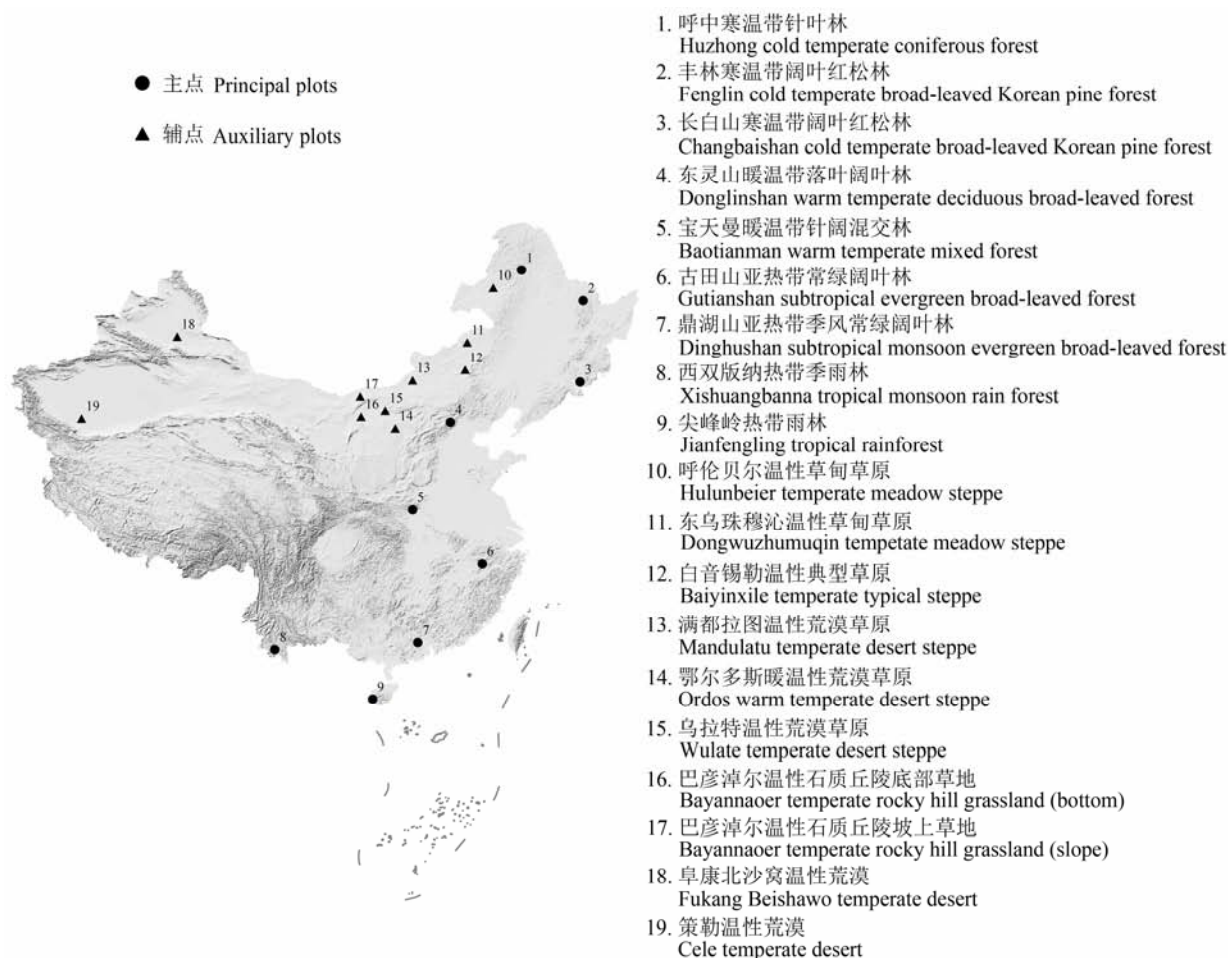


图3 近地面遥感监测网络初期建设布局

Fig. 3 The overall arrangement of the near-surface remote sensing platform for biodiversity monitoring in its initial construction

存储等处理技术; (4)多源数据的解算、时空匹配与融合。另外1个核心技术就是反映生物多样性信息的EBV核心参数提取算法。我们考虑的EBV遥感核心参数分为3个类别, 包括植被三维结构参数(如树高、胸径、枝下高、冠幅等)、植被功能性参数(如LAI、地上生物量)和植被群落类型。以激光雷达点云数据处理为例, 从提出鲁棒性强的滤波算法(Zhao et al, 2016b) (图5), 到选用最适合的插值方式生成数字地形模型和冠层高度模型(CHM) (Guo et al, 2010), 再到直接针对点云分割而进行的单木识别系列算法(Li et al, 2012; Lu et al, 2014; Tao et al, 2015), 以及单木的树高、冠幅、胸径和枝下高等结构参数提取(图6)等, 我们团队已经形成了一整套获取生境和植被三维结构、功能参数的技术流程方法。

这种借助遥感前沿技术和空间分析手段实施

“自上而下”(天基平台)与“自下而上”(地基平台)相结合的近地面遥感监测理念, 全方位完整地立体定量生态系统生物多样性, 以实现定量管理为目标, 形成与国际接轨的生物多样性遥感监测技术方法标准, 统一采样、分析、计算等操作规范, 保证遥感监测信息的可比性, 将实质性促进科研与管理相关部门之间的有效信息交换, 也将大力推动生物多样性研究深入开展。

3 近地面遥感平台未来发展前景

我国的生物多样性保护工作已取得了长足进步, 但面临的形势依然严峻: 我国生物资源本底不清, 监测监管能力不足; 资源过度利用、工程建设导致一些生态系统功能不断退化、部分物种濒危程度加剧; 气候变化严重影响着物种生存和生物资源的可持续利用。经验表明, 当目标被准确定义并且对有

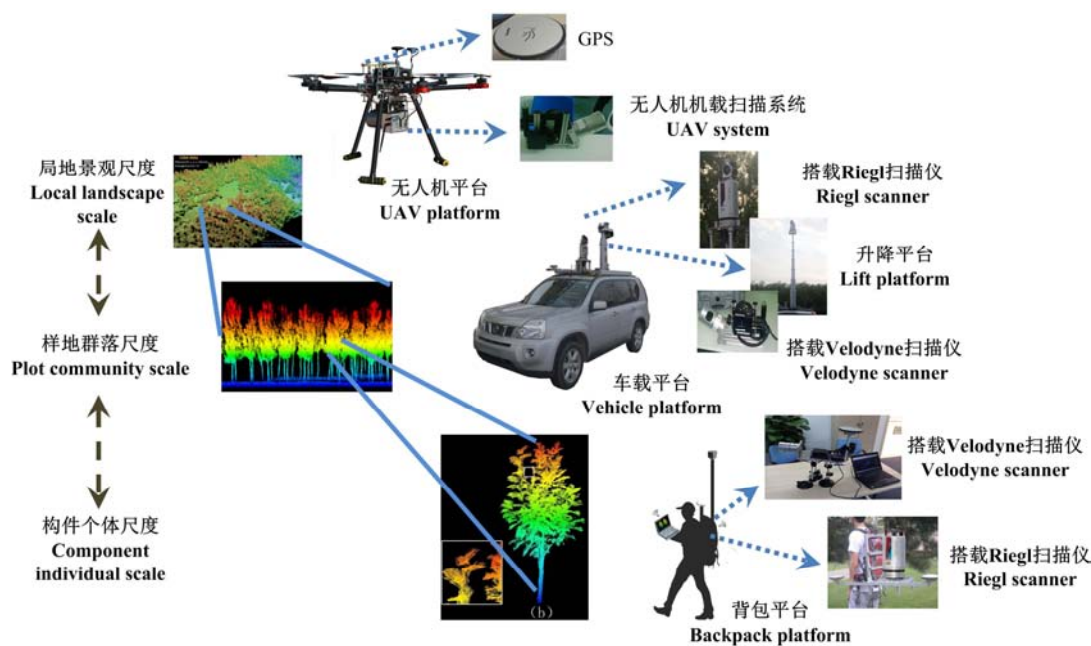


图4 集成平台细节以及获取数据示意

Fig. 4 Details of the integration platforms and their acquired corresponding data

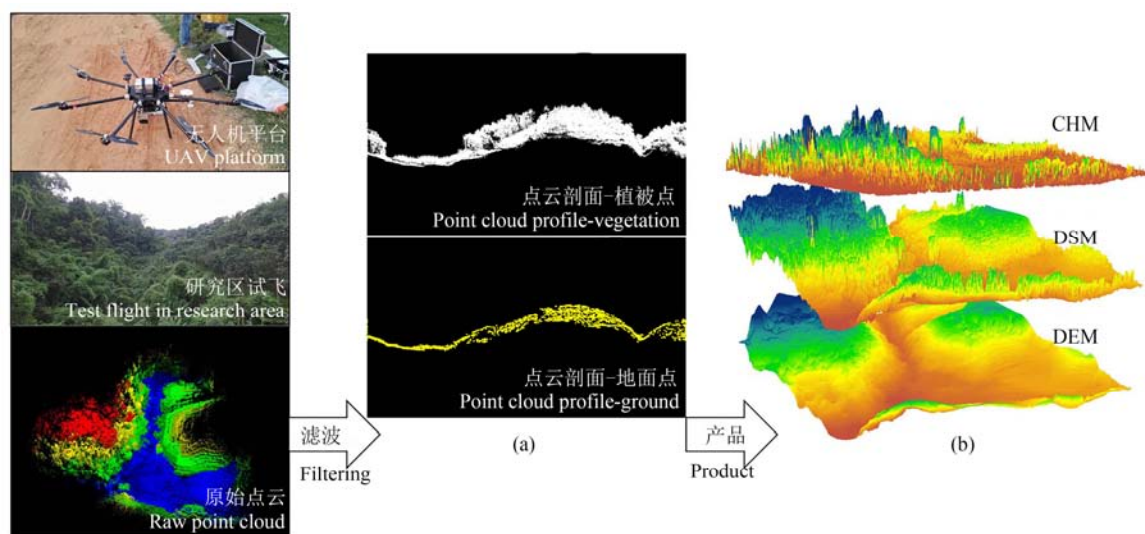


图5 滤波和产品模型效果图。(a)滤波; (b) DEM、DSM和CHM模型效果图。

Fig. 5 Filtering and modeling results: (a) Filtering results; (b) DEM (Digital elevation model), DSM (Digital surface model) and CHM (Canopy height model) products.

关问题选择了合适遥感技术的时候, 遥感是非常有用的工具(岳天祥, 2000)。然而, 遥感技术在生物多样性领域的潜力远未达到被深度挖掘综合利用的程度。结合国际发展趋势, 我们认为近地面遥感平台在我国生物多样性监测和保护中具有广阔的应用前

景, 未来其发展应主要集中于以下3个方面:

(1) 三维生境结构获取与真三维景观重建。激光雷达技术能定量描述植被冠层高度、体积、生物量、冠层高度轮廓线、冠底高度等垂直维度结构参数, 从而能为物种分布生境提供更综合全面的描述和

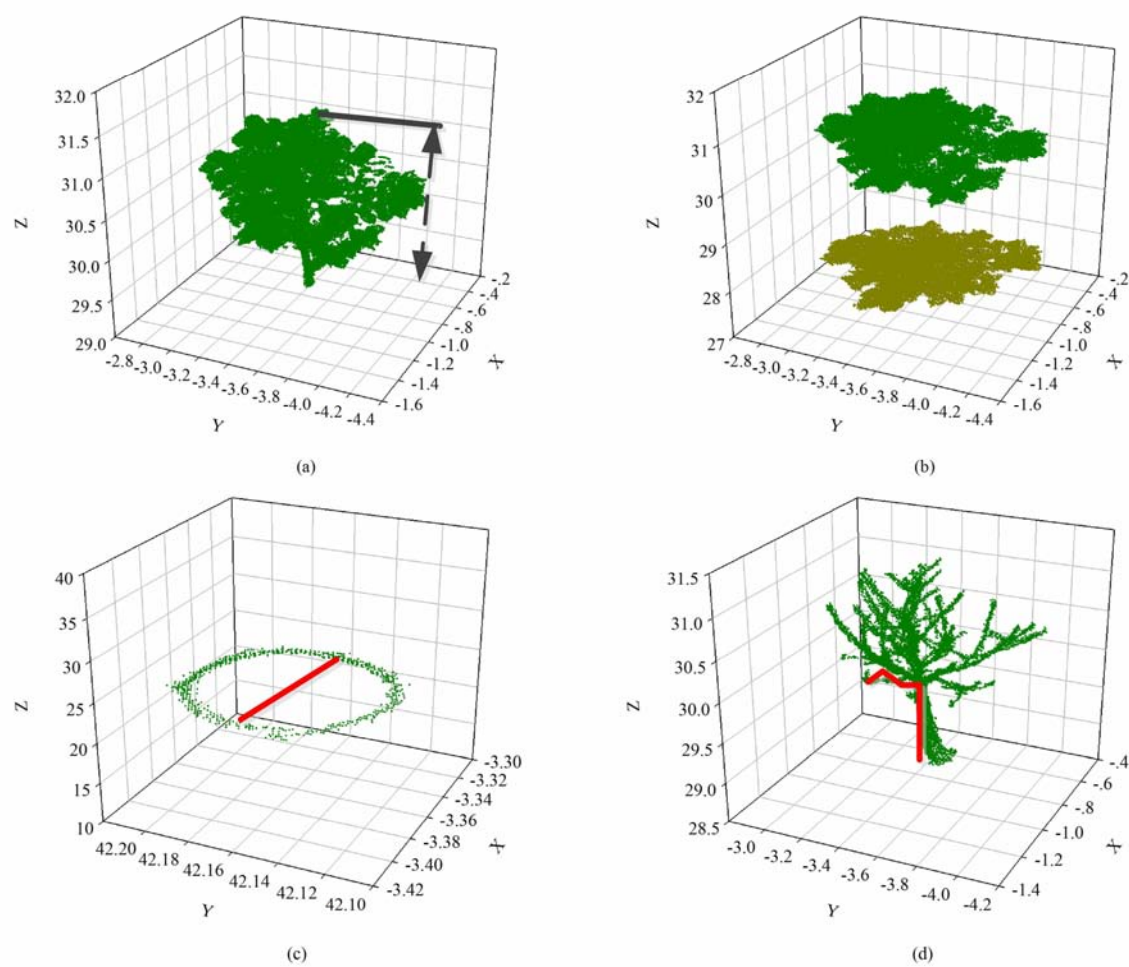


图6 三维立体生境量化参数提取示意图。(a)树高; (b)冠幅; (c)胸径; (d)枝下高。
Fig. 6 Three-dimensional quantitative habitat information extraction. (a) Tree height; (b) Crown size; (c) DBH (diameter at breast height); (d) Canopy base height.

评价(郭庆华等, 2014)。利用这些参数, 借助计算机图形、图像处理和可视化技术可以重建真实三维景观。重建出的植物对象是现实存在的、原位的、地理位置准确的。这一研究方向对于改进传统辐射传输模型, 发展加入真正垂直结构分层模块的生态模型, 从而提高生物物理模型对碳水循环模拟的可靠性提供解决方案, 同时将在辅助森林经营管理以及森林景观规划设计等方面具有重大应用价值。

(2)物种分布预测及模型改进。在全球变暖的背景下, 物种分布变化将给生物圈带来重大影响, 众多研究表明, 物种分布格局变化受气候变化等众多因素的驱动, 物种动态变化过程也异常复杂。因此, 不同尺度的物种分布格局和变化过程是物种分布研究的关键。物种分布模型可用来估计物种的真实

和潜在的分布区, 在生物多样性评估、生态恢复、物种迁移、生境保护、自然保护区规划和生态系统分布模拟等方面具有重要应用。在种群分布模型研究中, 整合种群动态过程与物种迁移过程来模拟功能群和群落结构将是未来物种分布模型的重要发展方向(李国庆等, 2013)。近地面遥感平台多传感器、多台站的扫描方式, 可在水平尺度、垂直水平、景观尺度上为物种动态监测提供多源遥感数据, 特别是三维生境监测数据, 将有利于提高物种分布模型模拟的精度(Zellweger et al, 2013, 2014), 改善不同尺度的物种动态格局演变模拟预测的可信度。

(3)海量数据获取和多源数据融合。随着地面联网观测技术及遥感技术的发展, 多源数据联合使用应用于生物多样性区域监测是一种发展趋势。这些

不同类型的数据源包括光学遥感、微波雷达、激光雷达、航空像片以及地面调查数据等。只有将地面数据、近地面遥感、机载和星载数据结合在一起分析挖掘信息,才能发挥不同传感器各自的优势作用,克服不足。例如光学遥感在大尺度水平结构和生物物理、化学参数的估测方面具有优势,但在获取生境垂直结构信息方面存在不足;LiDAR可以获得DEM信息、植被三维结构信息,而在光谱信息方面存在不足;地面调查数据精度高,但是因其空间范围小、时间序列短,在区域尺度或较大范围内应用存在困难。目前备受关注的将被动光谱信息和主动激光雷达数据结合起来的“多光谱激光雷达技术”在一定程度上弥补二者的不足,这项技术的发展和运用将是生物多样性遥感研究的一次质的飞跃。除观测技术的发展外,依据模式识别、大数据、人工智能等科学计算方法的数据融合技术也将逐步改善光谱数据、激光雷达数据和地面数据空间和时间不匹配等问题,极大扩展不同数据源的探测能力,并提高各个数据源信息准确率。因此观测技术和数据融合技术的发展将极大改善各个数据源的不足,这将助力于生物多样性整合性研究和生物多

样性保护,在此基础上联合多种数据建立生物多样性监测专题数据库,通过模型模拟提供多时序、高质量的数据产品,以便于进一步深度数据挖掘时获得更加准确、详实、可信的计算结果。

4 结语

Sino BON正在建设以激光雷达传感器为基础并集成高光谱等传感器的近地面遥感平台(图7),它对物种生境的三维结构进行精细刻画和定量描述,尤其为预测物种分布、探明物种资源选择机理和评估生境质量提供了有效的技术手段。多传感器集成技术不仅可获取植被三维结构信息,而且能够反演冠层理化特征信息,这为实现基于遥感技术的物种识别、植被分类提供了可靠的数据来源;以样地作为基本扫描单元,结合多台站、多尺度联合观测方式,研究物种在局地、景观和区域尺度上的分布特征和规律,能够为探究生物多样性演变过程及其内在机理提供条件,并为评价和保护生物多样性提供更多的智力支持。

虽然目前我国在生物多样性遥感监测网络建设方面与国外还存在一定差距,但值得庆幸的是,

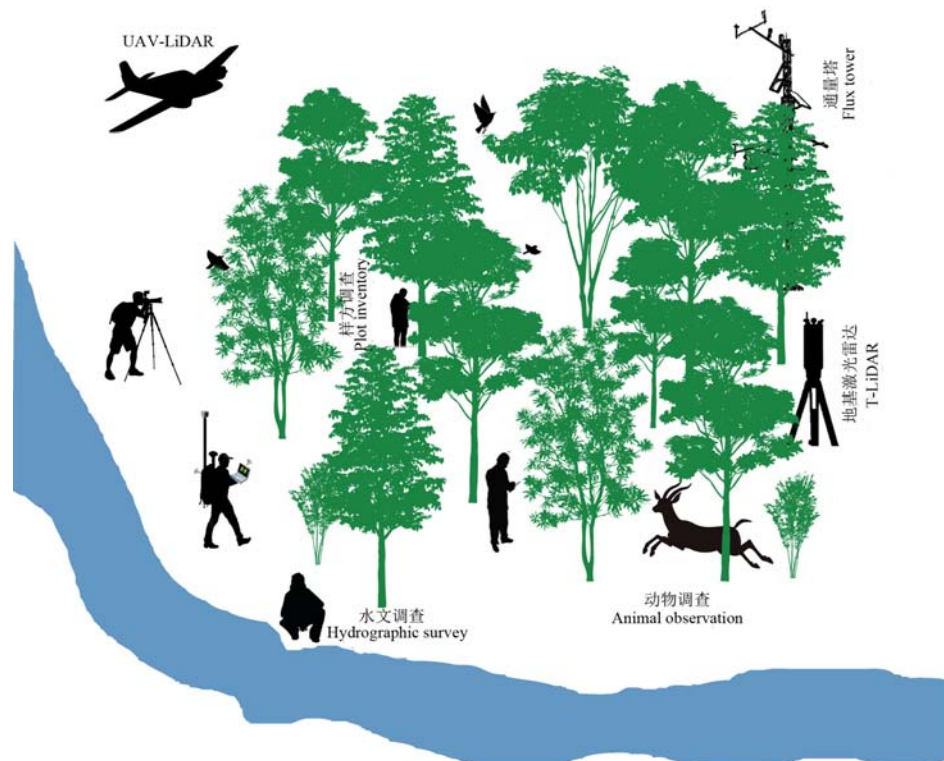


图7 生物多样性近地面遥感监测整体构想

Fig. 7 The whole idea of building the near-surface remote sensing platform for biodiversity monitoring

国家各部委、院局各相关单位都意识到加强这项工作建设的重要性和紧迫性, 并已布局实施。而且 CForBio 在这方面已积累了大量的基础工作。相信随着 Sino BON 近地面遥感平台生物多样性监测和研究能力的不断加强, 中国作为生物多样性大国 (生物多样性居世界第八位、居北半球第一位) (李延梅等, 2009), 也能跻身于生物多样性保护和研究强国之列, 在参与国际生物多样性各类研究、计划和战略行动中发挥重要作用, 进一步深化国际交流与合作。

参考文献

- Asner GP, Knapp DE, Kennedy-Bowdoin T, Jones MO, Martin RE, Boardman J, Hughes RF (2008) Invasive species detection in Hawaiian rainforests using airborne imaging spectroscopy and LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, 112, 1942–1955.
- Asner GP, Martin RE (2009) Airborne spectranomics: mapping canopy chemical and taxonomic diversity in tropical forests. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7, 269–276.
- Belote R, Prisley S, Jones RH, Fitzpatrick M, de Beurs K (2011) Forest productivity and tree diversity relationships depend on ecological context within mid-Atlantic and Appalachian forests (USA). *Forest Ecology and Management*, 261, 1315–1324.
- Brook BW, Ellis EC, Perring MP, Mackay AW, Blomqvist L (2013) Does the terrestrial biosphere have planetary tipping points? *Trends in Ecology & Evolution*, 28, 396–401.
- 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.
- Ceballos G, Davidson A, List R, Pacheco J, Manzano-Fischer P, Santos-Barrera G, Cruzado J (2010) Rapid decline of a grassland system and its ecological and conservation implications. *PLoS ONE*, 5, e8562.
- Ceballos A, Hernández J, Corvalán P, Galleguillos M (2015) Comparison of airborne LiDAR and satellite hyperspectral remote sensing to estimate vascular plant richness in deciduous Mediterranean forest of Central Chile. *Remote Sensing*, 7, 2692–2714.
- Colgan M, Baldeck CA, Féret JB, Asner GP (2012) Mapping savanna tree species at ecosystem scales using support vector machine classification and BRDF correction on airborne hyperspectral and LiDAR data. *Remote Sensing*, 4, 3462–3480.
- Davies AB, Asner GP (2014) Advances in animal ecology from 3D-LiDAR ecosystem mapping. *Trends in Ecology & Evolution*, 29, 681–691.
- Dalponte M, Bruzzone L, Gianelle D (2008) Fusion of hyperspectral and LIDAR remote sensing data for classification of complex forest areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46, 1416–1427.
- Duro DC, Coops NC, Wulder MA, Han T (2007) Development of a large area biodiversity monitoring system driven by remote sensing. *Progress in Physical Geography*, 31, 235–260.
- Fang B, Chen B, Zhang Y (2007) Research on scale selection and mapping of inspecting biologic diversity using remote sensing. *Geography and Geo-Information Science*, 23(6), 78–81. (in Chinese with English abstract) [方彬, 陈波, 张元 (2007) 生物多样性遥感监测尺度选择及制图研究. *地理与地理信息科学*, 23(6), 78–81.]
- Féret J-B, 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.
- Gademer A, Petitpas B, Mobaied S, Beaudoin L, Riera B, Roux M, Rudant JP (2010) Developing a low cost vertical take off and landing unmanned aerial system for centimetric monitoring of biodiversity—the Fontainebleau forest case. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 99, 600–603.
- 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, Schoning I (2012) Assessing biodiversity in forests using very high-resolution images and unmanned aerial vehicles. *Methods in Ecology and Evolution*, 3, 397–404.
- Gillespie TW (2005) Predicting woody-plant species richness in tropical dry forests: a case study from south Florida, USA. *Ecological Applications*, 15, 27–37.
- Goetz SJ, Steinberg D, Betts MG, Holmes RT, Doran PJ, Dubayah R, Hofton M (2010) Lidar remote sensing variables predict breeding habitat of a Neotropical migrant bird. *Ecology*, 91, 1569–1576.
- Goetz SJ, Sun M, Zolkos S, Hansen A, Dubayah R (2014) The relative importance of climate and vegetation properties on patterns of North American breeding bird species richness. *Environmental Research Letters*, 9, 2033–2053.
- Gould W (2000) Remote sensing of vegetation, plant species richness, and regional biodiversity hotspots. *Ecological Applications*, 10, 1861–1870.
- Griffiths GH, Lee J, Eversham BC (2000) Landscape pattern and species richness; regional scale analysis from remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 2685–2704.
- Group on Earth Observations-Biodiversity Observation Network (GEO BON) (2008) Working Group7: *In-situ* and remote-sensing integration. <http://geobon.org/working-groups/working-group-7-in-situ-remote-sensing-integration-integration-and-modelling-across-scales/>. (accessed on 2016-8-10)
- Guo Q, Li W, Yu H, Alvarez O (2010) Effects of topographic variability and lidar sampling density on several DEM interpolation methods. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 76, 701–712.
- 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. (in Chinese with English abstract) [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.]
- Hawkins BA, Field R, Cornell HV, Currie DJ, Guegan JF, Kaufman DM, Kerr JT, Mittelbach GG, Oberdorff T, O'Brien EM, Porter EE, Turner JRG (2003) Energy, water, and broad-scale geographic patterns of species richness. *Ecology*, 84, 3105–3117.
- Häuser CL (2016) EU BON-achievements and future challenges for biodiversity observation networks. https://ec.europa.eu/easme/sites/easme-site/files/gepw_plenary_eu-bon_haeuser.pdf/. (accessed on 2016-8-10)
- Hu HD, Li XY, Du YF, Zheng HF, Du BX, He XY (2012) Research advances in biodiversity remote sensing monitoring. *Chinese Journal of Ecology*, 31, 1591–1596. (in Chinese with English abstract) [胡海德, 李小明, 杜宇飞, 郑海峰, 都本绪, 何兴元 (2012) 生物多样性遥感监测方法研究进展. *生态学杂志*, 31, 1591–1596.]
- IPCC (2007) Climate change 2007: synthesis report. Contribution of Working Group I, II and III to the Fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Intergovernmental Panel on Climate Change (eds Core Writing Team RKP, Reisinger A), Geneva, Switzerland, 104.
- Irl SDH, Harter DEV, Steinbauer MJ, Gallego PD, Maria FPJ, Jentsch A, Beierkuhnlein C (2015) Climate vs. topography-spatial patterns of plant species diversity and endemism on a high-elevation island. *Journal of Ecology*, 103, 1621–1633.
- Johansen K, Phinn S, Witte C (2010) Mapping of riparian zone attributes using discrete return LiDAR, QuickBird and SPOT-5 imagery: assessing accuracy and costs. *Remote Sensing of Environment*, 114, 2679–2691.
- Johnson B (2009) National ecological observatory network: Airborne Observation Platform (AOP). http://www.neon-science.org/sites/default/files/document-files/107%20AOP_v3_c1.pdf/. (accessed on 2016-8-10)
- Kerr JT, Ostrovsky M (2003) From space to species: ecological applications for remote sensing. *Trends in Ecology & Evolution*, 18, 299–305.
- Kooistra L, Wamelink W, Schaepman-Strub G, Schaepman M, van Dobben H, Aduka U, Batelaan O (2008) Assessing and predicting biodiversity in a floodplain ecosystem: assimilation of net primary production derived from imaging spectrometer data into a dynamic vegetation model. *Remote Sensing of Environment*, 112, 2118–2130.
- Krishnaswamy J, Bawa KS, Ganeshaiah KN, Kiran MC (2009) Quantifying and mapping biodiversity and ecosystem services: utility of a multi-season NDVI based Mahalanobis distance surrogate. *Remote Sensing of Environment*, 113, 857–867.
- Kuenzer C, Ottinger M, Wegmann M, Guo H, Wang C, Zhang J, Dech St, Wikelski M (2014) Earth observation satellite sensors for biodiversity monitoring: potentials and bottlenecks. *International Journal of Remote Sensing*, 35, 6599–6647.
- Langford WT, Gergel SE, Dietterich TG, Cohen W (2006) Map misclassification can cause large errors in landscape pattern indices: examples from habitat fragmentation. *Ecosystems*, 9, 474–488.
- Lavers CP, Haines-Young RH (1997) Displacement of *dunlin* *Calidris alpina schinzii* by forestry in the flow country and an estimate of the value of moorland adjacent to plantations. *Biological Conservation*, 79, 87–90.
- Lefsky MA, Cohen WB, Parker GG, Harding DJ (2002) Lidar remote sensing for ecosystem studies. *BioScience*, 52, 19–30.
- Levick S, Rogers K (2008) Patch and species specific responses of savanna woody vegetation to browser exclusion. *Biological Conservation*, 141, 489–498.
- Leutner BF, Reineking B, Müller J, Bachmann M, Beierkuhnlein C, Dech S, Wegmann M (2012) Modelling forest α -diversity and floristic composition—on the added value of LiDAR plus hyperspectral remote sensing. *Remote Sensing*, 4, 2818–2845.
- 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, 540. (in Chinese with English abstract) [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, 540.]
- Li GQ, Liu CC, Liu YG, Yang J, Zhang XS, Guo K (2013) Advances in theoretical issues of species distribution models. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 4827–4835. (in Chinese with English abstract) [李国庆, 刘长成, 刘玉国, 杨军, 张新时, 郭柯 (2013) 物种分布模型理论研究进展. *生态学报*, 33, 4827–4835.]
- Li L, Guo Q, Tao S, Kelly MG, Xu G (2015) Lidar with multi-temporal MODIS provide a means to upscale predictions of forest biomass. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 102, 198–208.
- Li W, Guo Q, Jakubowski MK, Kelly MG (2012) A new method for segmenting individual trees from the Lidar point cloud. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 78, 75–84.
- Li YM, Niu D, Zhang ZQ, Qu JS (2009) Review of international scientific programmes and frontiers of biodiversity. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 2115–2123. (in Chinese with English abstract) [李延梅, 牛栋, 张志强, 曲建升 (2009) 国际生物多样性研究科学计划与热点述评. *生态学报*, 29, 2115–2123.]
- Liu Q, Liang ZH, Fan HF (2016) The development of UAV remote sensing and its application in geo-information related industries. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 39(6), 167–169. (in Chinese with English abstract) [刘倩, 梁志海, 范慧芳 (2016) 浅谈无人机遥感的发展及其行业应用. *测绘与空间地理信息*, 39(6), 167–169.]
- Loarie SR, Joppa LN, Pimm SL (2007) Satellites miss

- environmental priorities. *Trends in Ecology & Evolution*, 22, 630–632.
- Lu X, Guo Q, Li W, Flanagan J (2014) A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 94, 1–12.
- Lucas RM, Lee AC, Bunting PJ (2008) Retrieving forest biomass through integration of CASI and LiDAR data. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 1553–1577.
- Ma KP (2007) Biodiversity change scenarios and conservation hotspots. In: *Lectures in Modern Ecology (III) Advances and Key Topics* (eds Wu JG, Ge JP, Han XG, Yu ZL, Zhang DY), pp. 268–284. Higher Education Press, Beijing. (in Chinese with English abstract) [马克平 (2007) 生物多样性变化预测与保护重点地区的确定. 见: 现代生态学讲座 (III) 学科进展与热点论题(郭建国, 葛剑平, 韩兴国, 于振良, 张大勇 编著), pp. 268–284. 高等教育出版社, 北京.]
- Ma KP (2015) Biodiversity monitoring in China: from CForBio to Sino BON. *Biodiversity Science*, 23, 1–2. (in Chinese) [马克平 (2015) 中国生物多样性监测网络建设: 从 CForBio到Sino BON. 生物多样性, 23, 1–2.]
- Ma KP, Qian YQ (1998) Biodiversity conservation and its research progress. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 4, 96–100. (in Chinese with English abstract) [马克平, 钱迎倩 (1998) 生物多样性保护及其研究进展. 应用与环境生物学报, 4, 96–100.]
- MacArthur R (1960) On the relative abundance of species. *The American Naturalist*, 94, 25–36.
- Magurran AE, Baillie SR, Buckland ST, Dick JM, Elston DA, Scott EM, Smith RI, Somerfield PJ, Watt AD (2010) Long-term datasets in biodiversity research and monitoring: assessing change in ecological communities through time. *Trends in Ecology & Evolution*, 25, 574–582.
- MA (Millennium Ecosystem Assessment) (2005) *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC.
- Mücher S, Roupioz L, Kramer H, Wolters M, Bogers M, Lucas R, Bunting P, Petrou Z, Kosmidou V, Manakos I, Padoa-Schioppa E, Ficetola GF, Bonardi A, Adamo M, Blonda P (2013) LiDAR as a valuable information source for habitat mapping. In: *Gi_Forum 2013: Creating the Gisociety* (eds Jekel T, Car A, Strobl J, Griesebner G), pp. 520–523. Herbert Wichmann Verlag, Berlin/Offenbach.
- Muller J, Brandl R (2009) Assessing biodiversity by remote sensing in mountainous terrain: the potential of LiDAR to predict forest beetle assemblages. *Journal of Applied Ecology*, 46, 897–905.
- Myers N, Mittermeier RA, Mittermeier CG, da Fonseca GAB, Kent J (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403, 853–858.
- Nagendra H (2001) Using remote sensing to assess biodiversity. *International Journal of Remote Sensing*, 22, 2377–2400.
- Nagendra H, Lucas R, Honrado JP, Jongman RHG, Tarantino C, Adamo M, Mairota P (2013) Remote sensing for conservation monitoring: assessing protected areas, habitat extent, habitat condition, species diversity, and threats. *Ecological Indicators*, 33, 45–59.
- Nicholson E, Mace GM, Armsworth PR, Atkinson G, Buckle S, Clements T, Ewers RM, Fa JE, Gardner TA, Gibbons J, Grenyer R, Metcalfe R, Mourato S, Muuls M, Osborn D, Reuman DC, Watson C, Milner-Gulland EJ (2009) Priority research areas for ecosystem services in a changing world. *Journal of Applied Ecology*, 46, 1139–1144.
- Noss RF (1990) Indicators for monitoring biodiversity—a hierarchical approach. *Conservation Biology*, 4, 355–364.
- Oindo BO, Skidmore AK, de Salvo P (2003) Mapping habitat and biological diversity in the Maasai Mara ecosystem. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 1053–1069.
- Palmer MW, Earls PG, Hoagland BW, White PS, Wohlgemuth T (2002) Quantitative tools for perfecting species lists. *Environmetrics*, 13, 121–137.
- Pereira HM, Ferrier S, Walters M, Geller GN, Jongman RHG, Scholes RJ, Bruford MW, Brummitt N, Butchart SHM, Cardoso AC, Coops NC, Dulloo E, Faith DP, Freyhof J, Gregory RD, Heip C, Hoft R, Hurtt G, Jetz W, Karp DS, McGeoch MA, Obura D, Onoda Y, Pettorelli N, Reyers B, Sayre R, Scharlemann JPW, Stuart SN, Turak E, Walpole M, Wegmann M (2013) Essential biodiversity variables. *Science*, 339, 277–278.
- Peterson AT, Martinez-Campos C, Nakazawa Y, Martinez-Meyer E (2005) Time-specific ecological niche modeling predicts spatial dynamics of vector insects and human dengue cases. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 99, 647–655.
- Pettorelli N, Safi K, Turner W (2014) Satellite remote sensing, biodiversity research and conservation of the future. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369, 1–5.
- Ramankutty N, Foley JA (1999) Estimating historical changes in global land cover: croplands from 1700 to 1992. *Global Biogeochemical Cycles*, 13, 997–1027.
- Rosenzweig ML (1995) *Species Diversity in Space and Time*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Roughgarden J, Running SW, Matson PA (1991) What does remote-sensing do for ecology? *Ecology*, 72, 1918–1922.
- Running SW, Nemani RR, Heinsch FA, Zhao MS, Reeves M, Hashimoto H (2004) A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *BioScience*, 54, 547–560.
- Saatchi S, Buermann W, Ter SH, Mori S, Smith TB (2008) Modeling distribution of Amazonian tree species and diversity using remote sensing measurements. *Remote Sensing of Environment*, 112, 2000–2017.
- Sala OE, Chapin FS, Armesto JJ, Berlow E, Bloomfield J, Dirzo R, Huber-Sanwald E, Huenneke LF, Jackson RB, Kinzig A, Leemans R, Lodge DM, Mooney HA, Oesterheld M, Poff NL, Sykes MT, Walker BH, Walker M, Wall DH (2000) Biodiversity—global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 287, 1770–1774.
- Saura S (2004) Effects of remote sensor spatial resolution and

- data aggregation on selected fragmentation indices. *Landscape Ecology*, 19, 197–209.
- Seto KC, Fleishman E, Fay JP, Betrus CJ (2004) Linking spatial patterns of bird and butterfly species richness with Landsat TM derived NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 4309–4324.
- Simonson WD, Allen HD, Coomes DA (2014) Applications of airborne lidar for the assessment of animal species diversity. *Methods in Ecology and Evolution*, 5, 719–729.
- Skole D, Tucker C (1993) Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978 to 1988. *Science*, 260, 1905–1910.
- Soulé ME, Kohm KA (1989) *Research Priorities for Conservation Biology*. Island Press, Washington, DC.
- Stoms DM, Estes JE (1993) A remote-sensing research agenda for mapping and monitoring biodiversity. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 1839–1860.
- Su Y, Guo Q (2014) A practical method for SRTM DEM correction over vegetated mountain areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 87, 216–228.
- Su Y, Guo Q, 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 Y, Guo Q, Ma Q, Li W (2015) SRTM DEM correction in vegetated mountain areas through the integration of spaceborne LiDAR, airborne LiDAR, and optical imagery. *Remote Sensing*, 7, 11202–11225.
- Su Y, Guo Q, Xue B, Hu T, Alvarez O, Tao S, Fang J (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.
- Sugumaran R, Voss M (2007) Object-oriented classification of LIDAR-fused hyperspectral imagery for tree species identification in an Urban environment. In: 2007 Urban Remote Sensing Joint Event, pp. 1–6. IEEE, Paris.
- Tao S, Guo Q, Li L, Xue B, Kelly M, Li W, Xu G, Su Y (2014) Airborne lidar-derived volume metrics for aboveground biomass estimation: a comparative assessment for conifer stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 198, 24–32.
- Tao S, Wu F, Guo Q, Wang Y, Li W, Xue B, Hu X, Li P, Tian D, Li C, Yao H Li Y, Xu G, Fang J (2015) Segmenting tree crowns from terrestrial and mobile LiDAR data by exploring ecological theories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 110, 66–76.
- Turner W, Spector S, Gardiner N, Fladeland M, Sterling E, Steininger M (2003) Remote sensing for biodiversity science and conservation. *Trends in Ecology & Evolution*, 18, 306–314.
- 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, 90–98.
- Vihervaara P, Mononen L, Auvinen AP, Virkkala R, Lu Y, Pippuri I, Packalen P, Valbuena R, Valkama J (2015) How to integrate remotely sensed data and biodiversity for ecosystem assessments at landscape scale. *Landscape Ecology*, 30, 501–516.
- Vitousek PM, Aber JD, Howarth RW, Likens GE, Matson PA, Schindler DW, Schlesinger WH, Tilman D (1997) Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications*, 7, 737–750.
- Voss M, Sugumaran R (2008) Seasonal effect on tree species classification in an urban environment using hyperspectral data, LiDAR, and an object-oriented approach. *Sensors*, 8, 3020–3036.
- Wei YC, Wu BF, Zhang XW, Du X (2008) Advances in remote sensing research for biodiversity monitoring. *Advances in Earth Science*, 23, 924–931. (in Chinese with English abstract) [魏彦昌, 吴炳方, 张喜旺, 杜鑫 (2008) 生物多样性遥感研究进展. *地球科学进展*, 23, 924–931.]
- Westman WE, Strong LL, Wilcox BA (1989) Tropical deforestation and species endangerment: the role of remote sensing. *Landscape Ecology*, 3, 97–109.
- Wulder MA, Hall RJ, Coops NC, Franklin SE (2004) High spatial resolution remotely sensed data for ecosystem characterization. *BioScience*, 54, 511–521.
- Yue TX (2000) Discussion on studying biodiversity by remote sensing. *Biodiversity Science*, 8, 343–346. (in Chinese with English abstract) [岳天祥 (2000) 生物多样性遥感研究方法浅议. *生物多样性*, 8, 343–346.]
- Zellweger F, Braunisch V, Baltensweiler A, Bollmann K (2013) Remotely sensed forest structural complexity predicts multi species occurrence at the landscape scale. *Forest Ecology and Management*, 307, 303–312.
- Zellweger F, Morsdorf F, Purves RS, Braunisch V, Bollmann K (2014) Improved methods for measuring forest landscape structure: LiDAR complements field-based habitat assessment. *Biodiversity and Conservation*, 23, 289–307.
- Zhang J, Hu J, Lian J, Fan Z, Ouyang X, Ye W (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.
- Zhao X, Guo Q, Su Y, Xue B (2016a) Improved progressive TIN densification filtering algorithm for airborne LiDAR data in forested areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 117, 79–91.
- Zhao Y, Zeng Y, Zhao D, Wu B, Zhao Q (2016b) The optimal leaf biochemical selection for mapping species diversity based on imaging spectroscopy. *Remote Sensing*, 8, 1–16, doi:10.3390/rs8030216.
- Zhu C, Fang Y, Zhou KX, Mu SJ, Jiang JL (2015) IUCN red list of ecosystems: a new tool for biodiversity conservation. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 2826–2836. (in Chinese with English abstract) [朱超, 方颖, 周可新, 穆少杰, 蒋金亮 (2015) IUCN生态系统红色名录——一种新的生物多样性保护工具. *生态学报*, 35, 2826–2836.]

(责任编辑: 唐志尧 责任编辑: 黄祥忠)