

•生物多样性监测网络专题•

无人机在生物多样性遥感监测中的应用现状与展望

郭庆华^{1*} 吴芳芳^{1,2} 胡天宇¹ 陈琳海^{1,2} 刘 瑾¹
赵晓倩^{1,2} 高 上^{1,2} 庞树鑫¹

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)

摘要: 近十年, 无人机平台由于其灵活机动、成本低等优势在植被生态调查、资源环境监测、生物多样性保护等领域逐渐兴起。本文从生物多样性遥感监测应用角度首先介绍了无人机分类系统, 为具体工作开展过程中如何选择合适的载体和传感器提供了参考; 继而总结了不同类型无人机的适用性及其可搭载传感器的用途与区别。在此基础上, 针对无人机平台的高精度遥感信息具体应用案例, 就反映生物多样性变化并揭示其驱动机制方面的无人机遥感直接和间接指标的相关研究进展展开阐述。最后, 就目前无人机遥感技术在生物多样性监测领域的应用中存在的限制, 如软硬件结合匹配程度不够、部分设备过于昂贵、法律法规不完善、与传统生物多样性监测手段结合较弱等问题进行探讨。我们认为: 无人机遥感技术可以很好地弥补地面监测与航天、卫星遥感之间的尺度空缺, 更好地将监测点上的结果以准确、可靠的推绎方法扩展到区域尺度供决策分析使用。今后迫切需要进一步加大生物多样性近地面遥感监测项目建设的实施力度, 从整体上提高生物多样性热点区域应对变化的分析预警能力。

关键词: 无人机; 遥感; 传感器; 激光雷达; 多源数据

Perspectives and prospects of unmanned aerial vehicle in remote sensing monitoring of biodiversity

Qinghua Guo^{1*}, Fangfang Wu^{1,2}, Tianyu Hu¹, Linhai Chen^{1,2}, Jin Liu¹, Xiaoqian Zhao^{1,2}, Shang Gao^{1,2}, Shuxin Pang¹

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

2 University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: During the past decade, unmanned aerial vehicle (UAV) based remote sensing has been increasingly used in the fields of vegetation inventory, natural resource management, and biodiversity conservation, due to its low cost and high flexibility. In this study, we present a reference for the selection of UAV platforms and remote sensing sensors, by introducing a UAV classification system and summarizing applicability in biodiversity monitoring using remote sensing techniques. For each UAV platform category, we also introduce the characteristics and capabilities of different remote sensing sensors that can be supported. Moreover, through the combination of a case study which collected high-fidelity UAV-based remotely sensed data, we discuss current research progress using UAV-borne remote sensing data to derive direct and indirect biodiversity parameters. Finally, we discuss the current limitations of UAV-based remote sensing platforms for biodiversity monitoring, such as the existing gap between hardware and software, the high cost of certain components (e.g. the initial measurement unit), incomplete laws and regulations, and the disconnect with traditional biodiversity monitoring methods. In summary, we believe that UAV-based remote sensing platforms can greatly help to fill the gaps between terrestrial measurements and aerial/spaceborne measurements, and can increase the accuracy and reliability of upscaling point-based terrestrial measurements to the regional scale. There is a need to launch more projects that address building a UAV-based biodiversity monitoring

收稿日期: 2016-11-02; 接受日期: 2016-11-23

基金项目: 国家自然科学基金(41471363, 41401505)

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

network, and therefore improve our capability to analyze and forecast biodiversity changes in hotspots.

Key words: UAV; remote sensing; sensors; LiDAR; multi-source data

全球生态学界、生物多样性保护相关组织、各国政府部门一直在积极探索监测生物多样性变化的有效途径和方法,从而确认区域或更大尺度上生物多样性现状格局,预估其未来演化的可能趋势,以期为解决全球变化背景下的生物多样性丧失问题提供科学数据支撑(马克平, 1993; Poiani et al, 2000; Butchart et al, 2010; Stephenson et al, 2015)。随着对地观测体系的不断发展和完善,近地面遥感技术的出现为生物多样性监测带来了新的机遇,它能够为生物多样性监测提供相对较大范围、长时间序列、高时空分辨率的光谱、影像和激光雷达数据,被认为是生物多样性遥感监测的重要手段(马克平, 2015; 郭庆华等, 2016)。尤其是无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)遥感技术,由于其机动灵活、成本相对载人飞机平台低廉等优势,近10年在植被生态调查、资源环境监测、生物多样性保护等科研领域的应用日渐兴起(张园等, 2011; Koh & Wich, 2012; Anderson & Gaston, 2013)。而且,它最有可能让遥感技术走出无法提供大尺度精细数据的困境。

无人机是无人驾驶航空器的简称,由无线电控制系统自动导航完成飞行过程(李德仁和李明, 2014),它最早于20世纪20年代出现,用于军事侦察。无人机之所以能够在植被生态调查、资源环境保护、生物多样性监测等科研领域得到大量应用的主要原因在于:(1)无人机很好地弥补了区域遥感监测与样方调查之间的尺度空缺,是地面实测数据到大尺度间推演的桥梁;(2)随着移动终端的迅速发展以及电池、芯片、传感器等产业链的逐渐成熟,无人机硬件成本下降,并且微电子和计算机技术的发展也促使无人机飞控技术进一步完善;(3)小型和轻量化的各种高性能成像传感器开始搭载于无人机平台,实现了高空间、高时间、高光谱分辨率的对地观测;(4)行业内无人机平台数据的后处理软件增多并且成熟和商业化,如国外的Pix4D、Agisoft's PhotoScan、Erdas LPS,国内的DPGrid、PixelGrid、LiMapper等。此外,还有部分硬件厂商提供了与其无人机平台配套的软件。这种软硬件一体化的快速发展使得无人机平台逐渐从军事领域扩展到民用、

商用和科研领域(Colomina & Molina, 2014; Sandbrook, 2015)。

通过ISI Web of Science数据库搜索无人机平台在生态环境应用中的文献数量(图1)可以看出,文献数量总体呈现上升趋势,研究内容涉及地形建模、物种识别、森林结构参数提取、专题图制作、森林管理等。人们正在逐步认识到无人机遥感技术是应对生物多样性变化复杂、滞后、难以预测等监测技术挑战(傅伯杰等, 2007)的强有力工具。但是,在工作开展过程中如何根据需求选择合适的载体和传感器以及如何利用这些高精度的遥感信息,仍有待进一步探索。本文从生物多样性遥感监测应用角度首先介绍了无人机分类系统,以期为具体工作开展过程中如何选择合适的载体和传感器提供参考;然后总结不同类型无人机的适用性及其可搭载传感器的用途与区别。在此基础上,针对无人机平台的高精度遥感信息具体应用案例,就反映生物多样性变化并揭示其驱动机制方面的无人机遥感直接和间接指标的相关研究进展展开阐述。最后,就目前无人机遥感技术在生物多样性监测领域的应用中存在的限制进行探讨。

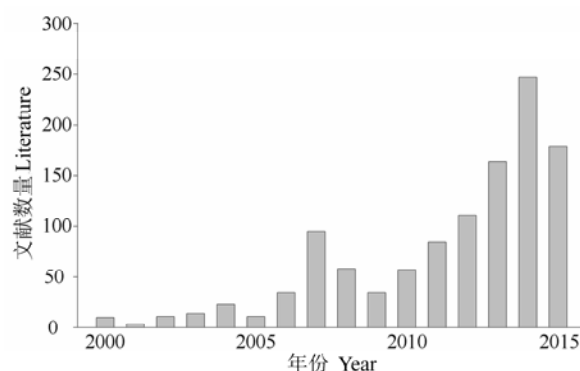


图1 无人机在生态环境应用中的文献数量变化趋势

Fig. 1 The trend of literature quantity of UAV applied in ecological environment

1 无人机遥感技术简介

20世纪80年代以来,在以信息技术为核心的高

科技革命发展推动下, 无人机性能得以大幅度提升, 从续航时间到载重负荷方面都产生了质的飞跃。以其为载体搭载精、高、轻等不同类型的传感器逐渐在农业生产、环境保护、地籍调查等民用领域得以广泛应用。无人机遥感技术集无人自动驾驶飞行器技术、通信技术、遥感技术、导航技术(Global Positioning System, GPS)、姿态测量技术(Inertial Measurement Unit, IMU)于一体, 能够快速获取空间信息的技术(附录1)。在无人机与各类型传感器集成的无人机-遥感整体系统组成中, 无人机作为传感器搭载平台, 其飞行高度、载荷能力、续航时间、导航精度以及起降方式等对数据影响较大, 因此, 性能稳定的飞行平台是获取高质量数据的重要保障。当前无人机主要采用质量轻但稳定性强的碳纤维复合材质作为机身材料, 同时为满足载荷需求, 机身也已出现车厢式, 并配备有伞降回收等保障措施。在航测任务执行之前, 须按照相关规定向有关部门申请空域以及航飞权, 获得批复后, 方可进行无人机航测数据采集作业。在此之后依据搜集的测区资料及实地踏勘工作进行飞行规划, 主要包括航线设计、GPS基站的设置规划以及传感器参数的设置。基于以上准备进行实地航测时, 平台、传感器与地面控制站依靠无线电遥测遥控技术实现飞行控制管理和数据实时采集和回传。即无人机飞行平台将根据自身接收的GPS信息以及无人机系统控制地面站上传的航线数据进行平台启动, 并启动相应遥感传感器单元按照设定参数进行数据的采集, 同步地将数据记录于存储终端。在整个飞行阶段, 无人机平台和数据存储单元实时地反馈其状态信息, 操作人员可以通过地面控制平台实时监测整个系统的运行状态。无人机航测飞行之后, 需要对各类型数据进行下载和分类存储, 并按照要求对采集的遥感数据进行解算和处理, 及时地对数据进行质量评估, 若不达标, 则需要根据实际情况进行数据补测。在完成满足精度需求的遥感数据回传后, 应建立起海量数据的存储及管理系统以便于快捷有效的后处理(附录2)。

科研领域中, 无人机遥感平台主要用于获取局地-景观尺度的遥感数据, 与传统星载和机载平台数据相比具有以下优势(图2): (1)更高的空间分辨率, 能够更好地与地面调查数据衔接。星载遥感平台数据一般为全球覆盖, 免费获取的光学遥感数据

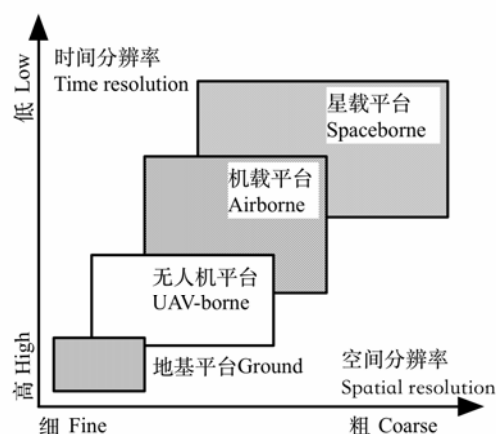


图2 无人机在生物多样性监测中的尺度示意

Fig. 2 The scale of UAV applied in biodiversity remote sensing monitoring

最高空间分辨率为10 m (Sentinel-2), 而米级分辨率通常为付费数据 (WorldView-3, QuickBird-2 和 Ikonos-2等); 星载平台获取的激光雷达数据为直径约70 m的离散点, 生成的数据产品空间分辨率最高为70 m。机载遥感平台通常获取区域尺度数据, 光学遥感数据的空间分辨率一般为亚米级; 机载小光斑激光雷达发射的光斑大小为亚米级, 每平方米获取10个左右的激光点, 生成的数据产品空间分辨率最高为亚米级。无人机平台获取的光学遥感数据空间分辨率高达厘米级别; 无人机平台搭载小光斑激光雷达每平米可获取上百个激光点, 生成的数据产品空间分辨率能达到厘米级别。(2)更高的时间分辨率, 能够满足遥感动态观测需求。遥感数据的空间分辨率取决于各平台对观测区域的回访时间: 大部分资源卫星回访时间在1天以上, 部分商用卫星通过增加卫星数量的方式提高时间分辨率; 机载平台对观测区域的回访时间一般在小时级别; 无人机平台的回访时间通常在分钟级别, 甚至可以定点实时观测。(3)搭载多种传感器和较低的数据获取费用, 能够满足定制化遥感需求。卫星平台一般根据特定观测目的进行设置, 搭载的传感器固定; 虽然可选择多个卫星来满足特定研究数据需求, 但是不同卫星数据存在时空分辨率不一致等问题, 给后期使用带来困难。机载平台和无人机平台均可以选择多种传感器(高分相机、多/高光谱成像仪、激光雷达扫描仪)获取时空匹配的多源数据, 但是由于机载平台费用较高, 无法满足同一区域的长期观测。另外,

相对于机载平台, 无人机平台还可以搭载热红外成像仪, 而且新传感器扫描的成本也较低; 机载平台通常只能匹配顶端传感器系统, 新增数据源的成本过高。21世纪是无人机蓬勃发展的时期, 越来越多的无人机品牌备受瞩目。国外品牌主要有法国 Parrot、德国 AscTec 和 Microdrones、美国 3D Robotics。国内以大疆创新为代表, 其先后推出了 Phantom、“悟”系列, 还有广州亿航智能科技有限公司旗下知名的 Ghost 系列以及北京数字绿土科技有限公司自主开发的 LiAir 系列等。更多信息参见国家遥感中心无人机遥感系统信息库 (<http://159.226.110.196/uva/Default.aspx>)。简而言之, 不同类型的无人机平台各有所长, 在具体研究开展时应综合多种因素进行合理选择和方案规划。

2 生物多样性遥感应用中无人机类型和传感器的选择

随着无人机生产厂商的增多、售价逐渐降低, 以及无人机知识普及和操控难度降低, 近年来越来越多生态学、林学等非遥感领域研究人员开始接触和购置无人机设备用于野外调查并开展相关研究。由于大多数传统生态学研究人员的遥感知识较为薄弱, 面对种类繁多的无人机以及各式传感器, 需要掌握一些基本原则以便于更好地开展生物多样性研究。

2.1 无人机类别选择

无人机根据尺寸、重量、飞行高度、系统组成的不同存在多种分类体系, 目前常用的为基于尺寸的分类和基于结构的分类 (Colomina & Molina, 2014)。尺寸的大小决定了无人机载荷能力、续航时间和飞行高度。基于尺寸的分类通常借鉴军用无人机分类系统, 如 Watts 等 (2012) 根据尺寸、飞行高度、续航和飞行方式对无人机进行了归类; Anderson 和 Gaston (2013) 按飞行距离、高度和续航将无人机分为微型、小型、中型和大型。根据上述分类标准来看, 文献中用于生物多样性监测、森林调查研究的无人机均属于微型或小型。从监管角度, 我国民用航空局飞行标准司也对无人机进行了分类, 根据重量分为微型、轻型、小型和大型无人机, 对于轻型无人机在飞行速度和高度方面有单独规定 (表1)。无人机作为一种飞行器, 其飞行也受到航空类法律法规管制。由于大多数生物多样性研究区域处在人烟稀少的空旷地区, 从目前法律法规来看, 微型无人机 (空机重量 ≤ 7 kg) 只须由控制人员自行负责, 无须证照管理, 因而该级别的无人机是作为生物多样性遥感应用的首选。

按照机械结构组成和飞行原理, 无人机可划分为固定翼和多旋翼 (表2)。由于飞行原理的特性, 固定翼无人机比多旋翼无人机能够飞得更快、更高并且载荷大、续航时间长; 固定翼无人机需要一定面

表1 不同尺寸无人机参数对比 (参考《民用无人驾驶航空器系统驾驶员管理暂行规定》; Anderson & Gaston, 2013)
Table 1 Comparison the characterization of different UAV sizes (refer to the Interim Provisions on the Administration of Civil Unmanned Aircraft System Pilot; Anderson & Gaston, 2013)

	微型无人机 Mini UAV	轻型无人机 Light UAV	小型无人机 Small UAV	大型无人机 Large UAV
空机重量 Weight (kg)	< 7	7–116	$\leq 5,700$	> 5,700
载荷大小 Payload (kg)	< 5	5–30	≤ 50	200–900
续航时间 Flying time (h)	< 1	< 2	< 10	< 48
最大飞行高度 Max flying height (km)	< 0.25	< 1	< 4	3–20

表2 固定翼和多旋翼无人机对比
Table 2 Comparison of fixed- and rotating-wing UAV

	固定翼 Fixed-wing	多旋翼 Rotating-wing
优势 Advantage	飞行速度快、航程远、航时长、载荷大、空中最大飞行高度更高 Faster in flying speed, longer in flying time and distance, larger in payload, and higher in max flying height	起飞环境要求低, 不受场地限制; 能悬停, 可长时间观测某个静止目标; 操作简单、维护方便 Less requirements in takeoff and landing place, hover in place and observe, and easy to operate and maintain.
局限性 Limitation	操作相对困难, 受场地限制较多 More difficult in operation, and more requirements in takeoff and landing place	载荷小、续航时间短 Lower in payload and shorter in flying time

积的开阔平坦区域用于起飞和降落。虽然固定翼无人机可以通过弹射设备解决起飞的操作难度和场地要求,但是降落时仍受限制。多旋翼无人机作为近几年兴起的类型,具备可悬停观测、操作简单、起飞环境要求低(1 m×1 m或2 m×2 m的空地)等优点。目前,多旋翼无人机以4轴、6轴和8轴旋翼为主,旋翼的多少决定了无人机的稳定性和载荷大小。根据现有研究,固定翼无人机一般用于大范围(>1 km²)的环境监测,而多旋翼主要应用于面积较小(<1 km²)的森林调查和精细植被类型调查等。由于大多数生物多样性研究在森林区域,往往不具备固定翼无人机起飞和降落场地,而多旋翼无人机操作简单且对起降场地要求不高,非常适合研究人员自行在样区长期、高频率地采集遥感数据。

2.2 无人机传感器类型的选择

无人机平台可搭载的传感器类型与传统机载平台一致,包括光学遥感、微波遥感和激光雷达遥

感传感器。但是受无人机载荷大小的限制,适用于无人机的传感器没有传统机载平台丰富(表3,图3)。目前,无人机平台的微波遥感传感器还处于研究开发阶段,商用产品很少,在生物多样性监测领域暂时未见相关应用报道。

光学遥感传感器包括高分相机、多光谱成像仪、高光谱成像仪和热成像仪,4种传感器分别记录不同电磁波段反射率,从而获取地物信息,其最终数据为黑白或彩色的二维影像。由于价格便宜和后期处理简单等优势,高分相机在无人机平台应用最为广泛。高分相机获取的是可见光波段范围内的RGB影像信息,空间分辨率极高,均在亚米级别;提取影像中的颜色和纹理可用于植被制图、物种分类和林窗分析。Getzin等(2012)通过无人机高分影像提取的林窗参数估算林下植物生物多样性信息。

多光谱成像仪和高光谱成像仪均是获取可见光和近红外波段的信息,大部分多光谱成像仪只获

表3 不同传感器的应用案例和优劣对比
Table 3 Advantages and limitation of different sensors and the application

传感器 Sensor	原始数据 Raw data	应用案例 Application	优势 Advantage	局限性 Limitation
高分相机 High-resolution camera	二维图像, 包含颜色信息 2D image, RGB bands	草地监测(Bareth et al, 2015)、林火监测(Merino et al, 2012)、野生动物研究(Jones et al, 2006)、地形产品生成(Mancini et al, 2013) Grassland monitoring (Bareth et al, 2015), wildfire detection (Merino et al, 2012), wildlife research (Jones et al, 2006), and terrain products generation (Mancini et al, 2013)	价格便宜、数据处理技术相对成熟 Cheap in hardware and mature in data post-processing	成像质量受天气条件影响; 光谱信息有限 The imaging quality is affected by the weather condition, and limited in spectral information
多光谱成像仪 Multi spectrum sensor	二维图像, 包含几个离散波段的光谱信息 2D image, several spectral bands	冠层截获的光合有效辐射研究(Guillen-Climent et al, 2012); 精准农业(De Biasio et al, 2011) Photosynthetically available radiation interception in canopy (Guillen-Climent et al, 2012). Precision agriculture (De Biasio et al, 2011)	能够获取光谱信息, 反演常用植被指数 Easy to retrieval vegetation index	同物异谱、同谱异物现象造成数据解译困难 Difficult in classification due to synonyms spectrum phenomenon and same spectrum different object phenomenon
高光谱成像仪 Hyperspectral sensor	二维图像, 能够获取近百个波段的光谱信息 2D image, hundred spectral bands	病虫害监测(Näsi et al, 2015) 冠层生化参数反演(Zarco-Tejada et al, 2013) Pest monitoring (Näsi et al, 2015) Deriving canopy biochemical parameter	光谱分辨率高, 有利于精确反演各种生化参数 Higher in spectral resolution, easier to the precise derive biochemical parameters	数据量大, 数据处理分析难度大 Large in data size and difficult in data processes and analysis
热红外相机 Thermal infrared sensor	二维图像, 包含温度信息 2D image, contains temperature information	干旱胁迫响应研究(Bendig et al, 2012)、冠层水分胁迫研究(Bellvert et al, 2013)、动物监测(Israel, 2011) Plant response to drought (Bendig et al, 2012), water deficiency in canopy (Bellvert et al, 2013), and animal monitoring (Israel, 2011)	能够获取温度信息, 可以识别部分动物 Obtain temperature information and detect some animals	温度变化易受周围环境影响 Affected by the environment temperature
激光雷达扫描仪 LiDAR sensor	点云数据, 包含三维地理坐标 Point cloud, with 3D geographic coordinates	森林参数提取(许子乾等, 2015)、变化监测(Wallace et al, 2012a) Forest parameters extraction (Xu et al, 2015), and change detection (Wallace et al, 2012a)	高精度, 受外界环境因素影响小; 可反演植被三维形态结构参数。 High precision, rarely influenced by the external environment; able to retrieve three dimensional shape and structure parameters of vegetation	无法获取纹理、光谱信息 Unable to obtain texture and spectral information

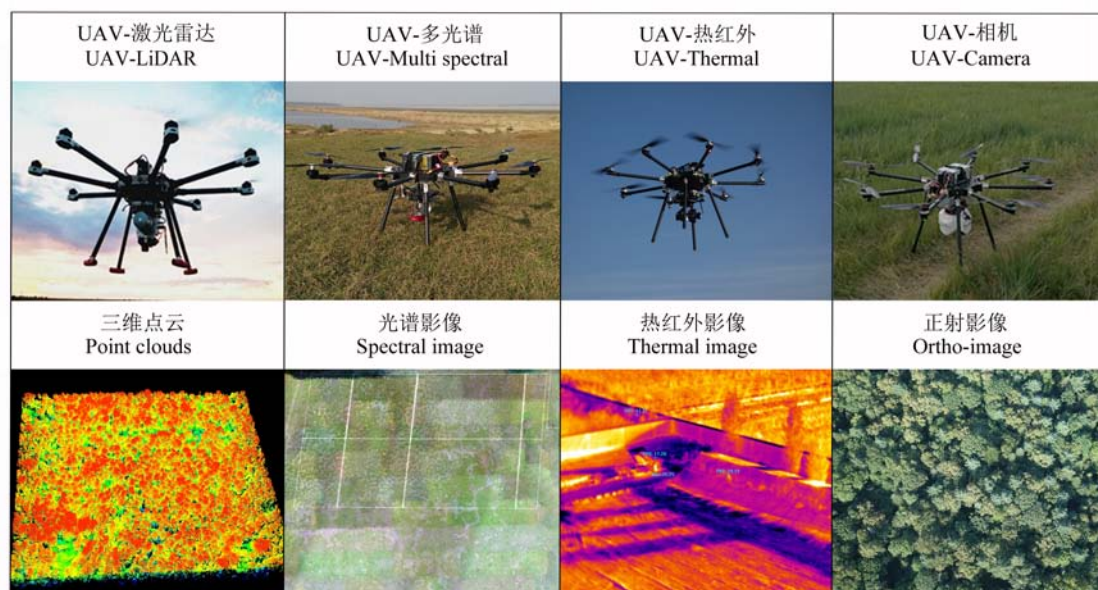


图3 不同无人机遥感平台及其相应遥感数据

Fig. 3 Different UAV-RS platforms and its corresponding data

取5个波段信息,而高光谱成像仪可获取100个或更多的波段信息。与高分相机相比,多光谱成像仪和高光谱成像仪只在空间分辨率上逊于高分相机,但是它们能获取不同波段的反射率信息,能够更好地应用于植被制图、物种分类研究;高光谱影像还可以反演植物生化组分,更好地开展生物多样性维持机制研究。高光谱成像仪分为推扫式和画幅式,由于无人机存在机身震动、飞行过程易受气流扰动等现象,导致推扫式在实际应用中往往出现数据量巨大、拼接质量差或无法拼接等缺陷。

热成像仪获取的是热红外波段信息,反映了地物的温度信息,被广泛用于作物抗旱性、植被蒸发、生态系统热交换等研究,在生物多样性领域主要利用动物和植物的体温差异,识别出目标动物,对动物的种类和种群数量进行估算。Gonzalez等(2016)利用热红外相机识别出澳大利亚草原上的袋鼠、鹿、兔子等动物,并成功估算了实验区森林中考拉的分布状况和数量。空间分辨率是光学遥感数据的精细衡量指标,其主要受飞行高度、传感器镜头参数和感光元件尺寸影响。在实际选择光学遥感传感器时还要考虑单张影像覆盖的范围:在大尺度的生物多样性研究中,需要将拍摄的所有影像拼接成一幅大范围影像;单张影像覆盖的范围越大,一方面

可以减少影像数量,降低作业时间和航飞风险,另一方面可以提高重叠率,增加影像拼接的稳健性。

激光雷达遥感传感器根据其计时原理分为脉冲式和相位式,现有的无人机载激光雷达扫描仪均为脉冲式,其获得的数据为三维点云数据和全波形数据。与光学遥感相比,激光雷达的特点是能获得地物精细的三维信息(图4)。利用点云数据可以构建研究区域的精细地形和反演植被结构参数(树高、覆盖度、叶面积指数等),构建动植物精细生境信息,进而结合地面实测的物种分布信息估算更大尺度的生物多样性分布信息。如Jorg和Roland (2009)利用机载激光雷达提供的三维生境信息与实地收集的甲虫信息具有很高的相关性,利用这些参数绘制整个山区甲虫的分布,极大地降低了实地调查成本。利用单木分割算法可以从点云数据分离出每棵树的点云并计算其相关结构参数(树高、冠幅、枝下高),结合地面调查数据可识别出单木树种从而实现植物多样性大尺度监测。Holmgren和Persson (2004)在挪威只用机载激光雷达获取的单木数据和地面实测数据,成功识别了挪威云杉(*Picea abies*)和苏格兰松(*Pinus sylvestris*)。与光学遥感传感器的空间分辨率指标类似,激光雷达点密度是点云数据精细程度的衡量指标,主要取决于无人机的飞行速

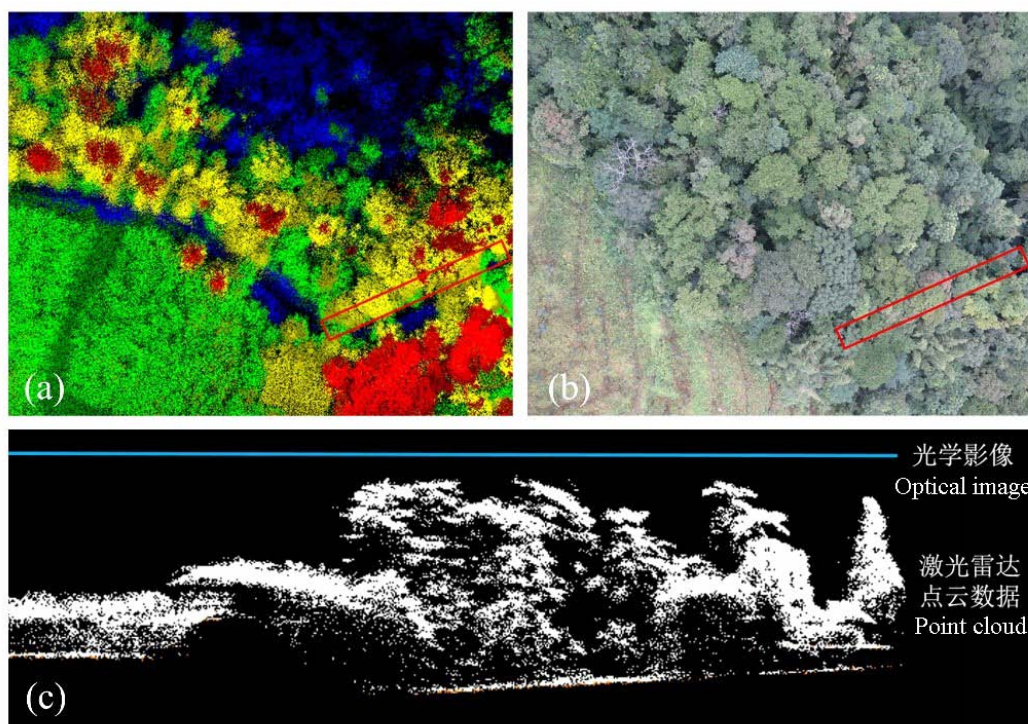


图4 激光雷达点云数据和传统光学影像数据比较。(a)无人机激光雷达点云数据;(b)无人机影像数据;(c)点云剖面图。

Fig. 4 Comparison of LiDAR point cloud data and traditional optical image. (a) UAV LiDAR data; (b) UAV optical image data; (c) Point cloud profile.

度和激光发射频率: 飞行速度越快、激光发射频率越低,获得的点密度越低,其生成的产品空间分辨率和精度也越低。选择无人机激光雷达扫描仪需要特别注意设备的最大测距范围,尤其是在地形落差较大的研究区应用时,往往会由于测距不够导致数据收集不全或增加无人机坠机风险。

总而言之,传感器的选择需要结合领域的具体研究内容和研究区特性来定: 对动物空间分布研究而言,激光雷达扫描仪提供的三维信息是最好的选择; 对植物空间分布研究而言,光学遥感传感器更适合,在植物种类比较少的寒带区域高分相机就能胜任,对于物种数量繁多的亚热带、热带区域则需要同时使用高光谱成像仪和激光雷达扫描仪。

3 无人机平台在生物多样性遥感监测中的应用进展

受遥感数据空间分辨率限制,传统生物多样性遥感监测应用主要集中在单个树种或生境制图、生物多样性与遥感数据间的关系模型以及与野外调查数据结合直接进行生物多样性描述指标制图(徐

文婷和吴炳方, 2005)等方面。与传统遥感手段相比,无人机获取的影像数据和三维点云数据具有更高的时空分辨率,基于长期、高频率的无人机遥感数据能够更深入地开展生物多样性监测,如: 植物物种分布和植被制图、生物多样性反演、生境监测,开拓更多传统生物多样性遥感监测方法无法实现的监测应用,如入侵物种监测、野生动物监测等。

(1)植物物种分布和植被制图。物种分布区鉴定以及植被覆盖类型划分对植被空间分布和对特定环境的适应性研究具有重要意义(Franklin, 1995; 李珍存等, 2006; Kelly et al, 2011; McDowell et al, 2015)。Kaneko和Nohara (2014)对比了载人飞机和无人机获取的影像数据在植被制图中的应用,并探讨了无人机遥感平台在植被资源调查方面的可行性。该研究基于无人机航拍影像清晰地分辨了植物的数量和形状,精细划分了不同物种的分布范围,得到高精度的植被分类图。冯家莉等(2015)采用无人机影像数据进行了红树林树种分类的研究,从而为红树林资源管理和保护提供了数据支撑。

(2)入侵物种监测。外来入侵物种也是生物多样

性监测和保护研究的重要方向之一。无人机遥感由于具备极高的空间分辨率,能够突破传统遥感方法的局限,直接识别入侵物种及其分布的空间范围。

Gini等(2014)用无人机平台获取了意大利北部一个公园的可见光和近红外影像并对其进行分类,成功地检测出非本土树种。Wan等(2014)在广西北海尝试基于多期无人机数据的互花米草入侵监测,很好地揭示了其变化规律。

(3)生物多样性反演。传统的生物多样性遥感监测研究多是间接地建立数据和多样性之间的关系模型,间接反映生物多样性。主要通过遥感数据反演与生物多样性相关的指标或变量(如地形、植被指数、光谱特性等),结合野外实测数据构建数学模型,预测物种分布以及多样性格局(徐文婷和吴炳方, 2005)。Getzin等(2012)在德国的落叶阔叶林样地用无人机获取了高分影像数据(分辨率约7 cm),并从中提取每个单独林窗计算其面积、周长和面积比、形状复杂度指数等7个指数,同时结合地面长期观测数据,分析发现林窗形状复杂度指数是与生物多样性相关性最高的变量,利用这些林窗参数可以很好地反映区域生物多样性。

(4)生境监测。生境信息可间接反映生物多样性因素,植被结构参数在评价生物物种栖息地和预测物种分布中起着重要的作用,特别是下层植被对物种的分布具有较大影响(Hyyppä et al, 2000; Kayitakire et al, 2006);地形信息对环境内动植物、物种分布也有重要影响(Wilson et al, 2013; Franklin et al, 2013; 郭庆华等, 2014; 赵雪等, 2015)。激光雷达扫描仪能够穿透林冠,获取涵盖林冠和林下的垂直三维信息,并广泛应用于森林参数反演(Popescu & Wynne, 2004; Lu et al, 2014)。与机载平台相比,无人机操作灵活,飞行高度低,能获取更高的点云密度且不受云层影响,无人机激光雷达在森林垂直结构,尤其是林下植被结构监测较机载平台更有优势。亚热带生物群落演替速度快,生物多样性极高,是众多动植物物种的栖息地,通过对点云数据进行处理,对森林进行分层结构和垂直结构的分析,实现生境三维结构和质量的定量描述,并结合地面调查数据评估生境内鸟类的多样性(Tattoni et al, 2012; Davies & Asner, 2014)。

(5)野生动物监测。野生动物是生物多样性的的重要组成部分,就其监测而言面临的挑战包括空间分

布范围广、种群密度低、对干扰敏感,以及栖息地难以到达等。传统遥感由于受空间分辨率的影响,通常无法直接观测到动物的信息。基于遥感的野生动物直接监测较少,主要集中于栖息地生境制图上,或利用栖息地的变化探究动物多样性的变化规律。无人机平台的出现为野生动物监测提供了真正有效的解决方案。Gonzalez等(2016)利用无人机同步获取研究区的热红外和RGB视频,完成了对研究区所有野生动物的计数、跟踪和分类。与实测数据对比发现,在20 m、30 m和60 m高度处,对考拉(*Phascolarctos cinereus*)的识别率均能达到100%。具体到今后的动物监测研究,应注重选择合适的无人机和传感器设备,尽量减少对动物的干扰(Hodgson & Koh, 2016)。

综上,与星载、机载遥感监测手段相比,无人机遥感具有高分辨率、高精度、灵活性强的优势,同时可以克服传统野外调查手段周期性长、时效性差、难以大面积覆盖等缺点,为直接测量和建模推断动植物各种特征参数提供了全新的手段,有望从数据类型、数据采集和处理方式等多个方面推动生物多样性研究的巨大变革。

4 无人机遥感面临的技术挑战和研究展望

4.1 无人机遥感面临的技术挑战

无人机遥感平台所具有的独特优势使其能够有效弥补航空、卫星遥感平台在分辨率和时效性方面的不足。然而,在生物多样性监测领域该技术仍然面临着一些技术挑战:

(1)平台的系统集成性和稳定性有待进一步提升。生物多样性研究涉及森林、湿地、草地等多种多样的生态系统类型,尤其是当无人机平台作业于茂密林区和无人区时会由于脱离操控者视野而存在潜在坠机风险。因此,系统的智能避障能力、飞行安全性和稳定性仍需要进一步提高。固定翼和多旋翼一体化的新型无人机利用多旋翼起飞降落、固定翼高速飞行两种模式间的切换,兼具了多旋翼的垂直起降优势和固定翼的续航和速度性能,有望成为无人机平台新的发展方向(赵长辉等, 2014)。

(2)基于无人机平台的多源数据后处理软件有待开发。飞行姿态不稳定导致的影像畸变校正,多源传感器数据的配准以及海量数据的自动化处理是当前无人机遥感面临的一大难题。目前可用一些

通用软件处理无人机获取的数据,如Pix4D, PhotoScan和LiMapper等软件,功能主要包括无人机光学影像的拼接,基础地形产品的生成以及三维建模和可视化。针对无人机多源数据的融合和森林结构参数提取的专用软件仍有待开发。

(3)行业相关法律法规有待进一步完善。无人机行业的蓬勃发展在带来经济效益的同时,也存在着坠落伤人、侵犯隐私等潜在问题。因此,针对于保护区域、大型样地以及敏感区域的相关作业条例需要进一步完善,从而形成一套系统化的行业标准。

(4)基于无人机平台的遥感数据分析应用能力有待提升。地面调查作为生态学研究的重要手段,具有不可替代的作用(郝占庆等, 2008; 张春雨等, 2009; 张冕等, 2014)。无人机遥感一定程度上提高了数据获取的时效性,但无法完全替代传统手段。加之无人机平台的“自上而下”的作业方式,密林区的林下数据往往由于遮挡存在缺失。因此,结合不同监测手段的优势互为补充和验证,可为生物多样性相关研究提供更丰富的信息。

4.2 研究展望

随着生物多样性的保护和管理逐渐受到各国专家学者的重视,获取长时间序列、高空间分辨率的基础数据是推动相关研究顺利开展的重要保障。无人机平台在生物多样性遥感监测领域具有广阔的应用前景,未来可能需要着重从以下方面拓展:

(1)激光雷达数据的应用普及。当前,无人机在生物多样性领域中的应用以二维的高分影像为主,具有三维信息的激光雷达技术并未普及应用。一方面,激光雷达和惯性导航系统价格过高,多数研究单位和团队无法负担;另一方面,激光雷达遥感知识普及不足,无法将激光雷达获取的三维数据有机结合到传统生物多样性研究中。作者所在课题组利用自主研发无人机激光雷达平台,与生物多样性研究团队合作获取无人机激光雷达数据以及开展激光雷达应用培训普及相关知识,努力推动无人机激光雷达在传统生物多样性研究中的应用。随着Flash LiDAR和Geiger LiDAR等新一代激光雷达设备的出现和激光雷达技术的进一步普及,未来无人机激光雷达遥感技术的使用将进一步推动生物多样性遥感监测研究。

(2)多源数据的高效获取。由于生物多样性监测具有时空尺度效应,宏观、大尺度、常态性的监测

更有助于揭示生物多样性变化过程的内在驱动因子和机制。在今后生物多样性的网络监测研究中,无人机平台以其高机动性、时效性和低成本等优势,可用于长期动态的区域遥感监测数据收集,进一步开展多台站、多层次、多生境的生物多样性联网研究。此外,随着新型传感器的不断研发和改进,当前研究中面临的一些问题也有望逐步得以解决。

(3)多源数据融合。数据融合是指同一区域不同遥感数据或遥感数据与非遥感数据之间的匹配融合,包括不同传感器的遥感数据融合和不同时相的遥感数据融合。通过多源数据融合能够弥补单一数据源的不足,实现各种数据源的优势互补。数据融合在生物多样性监测中的应用已相继开展,如多光谱数据和全色影像融合、SAR (Synthetic Aperture Radar)和光学影像融合,以及遥感数据与地面通量塔数据结合的升尺度研究(Huang et al, 2009; Souza-Filho et al, 2009; Anderson & Gaston, 2013)。通过多源数据融合能够实现空间分辨率、光谱分辨率和时间分辨率的相互补充,可提高定量反演的精度,为生物多样性监测提供更系统、科学和有效的支撑。

5 结语

生物多样性保护和持续利用是一个国家生态文明建设的重要组成部分,是衡量一个国家可持续发展能力的重要指标。由于生物多样性受到前所未有的破坏和威胁,如何采取有效措施进行生物多样性监测成为各国广泛关注的焦点。目前国际社会已经取得了广泛的共识: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监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在区域、国家层面应用,为相关部门的政策拟定、实施提供更为有效可靠的数据支持。因此,长期动态监测对于生物多样性保护和管理至关重要,中国生物多样性监测与研究网络(Sino BON)将建立以激光雷达扫描仪、成像光谱仪、高分辨率相机为主要传感设施的无人机近地面遥感监测平台。我们相信,未来十年无人机遥感技术以其部署灵活、安全性高、数据分辨率高等优势,将在生物多样性监测领域得到更加广泛而深入的应用。

参考文献

- Anderson K, Gaston KJ (2013) Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11, 138–146.
- Bareth G, Bolten A, Hollberg J, Aasen H, Burkart A, Schellberg J (2015) Feasibility study of using non-calibrated UAV-based RGB imagery for grassland monitoring: case study at the Rengen Long-term Grassland Experiment (RGE), Germany. *DGPf Tagungsband*, 24, 1–7.
- Bellvert J, Zarco-Tejada PJ, Girona J, Fereres E (2014) Mapping crop water stress index in a 'Pinot-noir' vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. *Precision Agriculture*, 15, 361–376.
- Bendig J, Bolten A, Bareth G (2012) Introducing a low-cost mini-UAV for thermal-and multispectral-imaging. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39, 345–349.
- Butchart SHM, Walpole M, Collen B, Strien A, Scharlemann JPW, Almond REA, Baillie JEM, Bomhard B, Brown C, Bruno J, Carpenter KE, Carr GM, Chanson J, Chenery AM, Csirke J, Davidson NC, Dentener F, Foster M, Galli A, Galloway JN, Genovesi P, Gregory RD, Hockings M, Kapos V, Lamarque JF, Leverington F, Loh J, McGeoch MA, McRae L, Minasyan A, Morcillo MH, Oldfield TEE, Pauly D, Quader S, Revenga C, Sauer JR, Skolnik B, Spear D, Stanwell-Smith D, Stuart SN, Symes A, Tierney M, Tyrrell TD, Vié JC, Watson R (2010) Global biodiversity: indicators of recent declines. *Science*, 328, 1164–1168.
- Colomina I, Molina P (2014) Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97.
- Davies AB, Asner GP (2014) Advances in animal ecology from 3D-LiDAR ecosystem mapping. *Trends in Ecology & Evolution*, 29, 681–691.
- De Biasio M, Arnold T, Leitner R (2011) UAV based multi-spectral imaging system for environmental monitoring. *tm-Technisches Messen Plattform für Methoden, Systeme und Anwendungen der Messtechnik*, 78, 503–507.
- Feng JL, Liu K, Zhu YH, Li Y, Liu L, Meng L (2015) Application of unmanned aerial vehicles to mangrove resources monitoring. *Tropical Geography*, 35(1), 35–42. (in Chinese with English abstract) [冯家莉, 刘凯, 朱远辉, 李勇, 柳林, 蒙琳 (2015) 无人机遥感在红树林资源调查中的应用. *热带地理*, 35, 35–42.]
- Franklin J (1995) Predictive vegetation mapping: geographic modelling of biospatial patterns in relation to environmental gradients. *Progress in Physical Geography*, 19, 474–499.
- Franklin J, Davis FW, Ikegami M, Syphard AD, Flint LE, Flint AL, Hannah L (2013) Modeling plant species distributions under future climates: how fine scale do climate projections need to be? *Global Change Biology*, 19, 473–483.
- Fu BJ, Niu D, Yu GR (2007) The roles of ecosystem observation and research network in earth system science. *Progress in Geography*, 26, 1–16. (in Chinese with English abstract)
- [傅伯杰, 牛栋, 于贵瑞 (2007) 生态系统观测研究网络在地球系统科学中的作用. *地理科学进展*, 26(1), 1–16.]
- Getzin S, Wiegand K, Schöning I (2012) Assessing biodiversity in forests using very high-resolution images and unmanned aerial vehicles. *Methods in Ecology and Evolution*, 3, 397–404.
- Gini R, Passoni D, Pinto L, Sona G (2014) Use of unmanned aerial systems for multispectral survey and tree classification: a test in a park area of northern Italy. *European Journal of Remote Sensing*, 47, 251–269.
- Gonzalez LF, Montes GA, Puig E, Johnson S, Mengersen K, Gaston KJ (2016) Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and Artificial Intelligence Revolutionizing Wildlife Monitoring and Conservation. *Sensors*, 16, 1–18.
- Guillen-Climent ML, Zarco-Tejada PJ, Berni JAJ, North PRJ, Villalobos FJ (2012) Mapping radiation interception in row-structured orchards using 3D simulation and high-resolution airborne imagery acquired from a UAV. *Precision Agriculture*, 13, 473–500.
- Guo QH, Liu J, Li YM, Zhai QP, Wang YC, Wu FF, Hu TY, Wan HW, Liu HM, Shen WM (2016) A near-surface remote sensing platform for biodiversity monitoring: perspectives and prospects. *Biodiversity Science*, 24, 1249–1266. (in Chinese with English abstract) [郭庆华, 刘瑾, 李玉美, 翟秋萍, 王永财, 吴芳芳, 胡天宇, 万华伟, 刘慧明, 申文明 (2016) 生物多样性近地面遥感监测: 应用现状与前景展望. *生物多样性*, 24, 1249–1266.]
- 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.]
- Hao ZQ, Li BH, Zhang J, Wang XG, Ye J, Yao XL (2008) Broad-leaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest plot in Changbaishan (CBS) of China: community composition and structure. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 32, 238–250. (in Chinese with English abstract) [郝占庆, 李步杭, 张健, 王绪高, 叶吉, 姚晓琳 (2008) 长白山阔叶红松林样地 (CBS): 群落组成与结构. *植物生态学报*, 32, 238–250.]
- Hodgson JC, Koh LP (2016) Best practice for minimising unmanned aerial vehicle disturbance to wildlife in biological field research. *Current Biology*, 26, 404–405.
- Holmgren J, Persson Å (2004) Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sensing of Environment*, 90, 415–423.
- Huang S, Crabtree RL, Potter C, Gross P (2009) Estimating the quantity and quality of coarse woody debris in Yellowstone post-fire forest ecosystem from fusion of SAR and optical data. *Remote Sensing of Environment*, 113, 1926–1938.
- Hyypä J, Hyypä H, Inkinen M, Engdahl M, Linko S, Zhu

- YH (2000) Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes. *Forest Ecology and Management*, 128, 109–120.
- Israel M (2011) A UAV-based roe deer fawn detection system. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 38, 1–5.
- Jones IV GP, Pearlstine LG, Percival HF (2006) An assessment of small unmanned aerial vehicles for wildlife research. *Wildlife Society Bulletin*, 34, 750–758.
- Jörg M, Roland B (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.
- Kaneko K, Nohara S (2014) Review of effective vegetation mapping using the UAV (Unmanned Aerial Vehicle) method. *Journal of Geographic Information System*, 6, 733–742.
- Kayitakire F, Hamel C, Defourny P (2006) Retriving forest structure variables based on image texture analysis and IKONOS-2 imagery. *Remote Sensing of Environment*, 102, 390–401.
- Kelly M, Tuxen KA, Stralberg D (2011) Mapping changes to vegetation pattern in a restoring wetland: finding pattern metrics that are consistent across spatial scale and time. *Ecological Indicators*, 11, 263–273.
- Koh LP, Wich SA (2012) Dawn of drone ecology: low-cost autonomous aerial vehicles for conservation. *Conservation Letters*, 5, 121–132.
- 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. (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.]
- Li ZC, Ma MG, Zhang F, Jiang ZR (2006) The dynamic analysis of vegetation pattern in the northwest of China. *Remote Sensing Technology and Application*, 21, 332–337. (in Chinese with English abstract) [李珍存, 马明国, 张峰, 蒋志荣 (2006) 1982–2003年中国西北地区植被动态变化格局分析. *遥感技术与应用*, 21, 332–337.]
- Lu XC, Guo QH, Li WK, 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.
- Ma KP (1993) On the concept of biodiversity. *Biodiversity Science*, 1, 20–22. (in Chinese) [马克平 (1993) 试论生物多样性的概念. *生物多样性*, 1, 20–22.]
- Ma KP (2015) Biodiversity monitoring in China: from CForBio to Sino BON. *Biodiversity Science*, 23, 1–2. [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.]
- Mancini F, Dubbini M, Gattelli M, Stecchi F, Fabbri S, Gabbianelli G (2013) Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: the structure from motion approach on coastal environments. *Remote Sensing*, 5, 6880–6898.
- McDowell NG, Coops NC, Beck PSA, Chambers JQ, Gango-damage C, Hicke JA, Huang C, Kennedy R, Krofcheck DJ, Litvak M, Meddens AJH, Muss J, Negrón-Juarez R, Peng CH, Schwantes AM, Swenson JJ, Vernon LJ, Williams AP, Xu CG, Zhao MS, Running SW, Allen CD (2015) Global satellite monitoring of climate-induced vegetation disturbances. *Trends in Plant Science*, 20, 114–123.
- Merino L, Caballero F, Martinez R, Maza I, Ollero A (2010) Automatic forest fire monitoring and measurement using unmanned aerial vehicles. In: VI International Conference on Forest Fire Research (ed. Viegas DX), pp. 1–15.
- Näsi R, Honkavaara E, Lyytikäinen-Saarenmaa P, Blomqvist M, Litkey P, Hakala T, Viljanen N, Kantola T, Tanhuanpää T, Holopainen M (2015) Using UAV-based photogrammetry and hyperspectral imaging for mapping bark beetle damage at tree-level. *Remote Sensing*, 7, 15467–15493.
- Poiani KA, Richter BD, Anderson MG, Richter HE (2000) Biodiversity conservation at multiple scales: functional sites, landscapes, and networks. *BioScience*, 50, 133–146.
- Popescu SC, Wynne RH (2004) Seeing the trees in the forest: using lidar and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70, 589–604.
- Sandbrook C (2015) The social implications of using drones for biodiversity conservation. *Ambio*, 44, 636–647.
- Souza-Filho PWM, Goncalves FD, Rodrigues SWP, Costa FR, Miranda FP (2009) Multi-sensor data fusion for geomorphological and environmental sensitivity index mapping in the Amazonian mangrove coast, Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI56, 1592–1596.
- Stephenson PJ, Burgess ND, Jungmann L, Loh J, O'Connor S, Oldfield T, Reidhead W, Shapiro A (2015) Overcoming the challenges to conservation monitoring: integrating data from in-situ reporting and global data sets to measure impact and performance. *Biodiversity*, 16, 68–85.
- Tattoni C, Rizzolli F, Pedrini P (2012) Can LiDAR data improve bird habitat suitability models? *Ecological Modelling*, 245, 103–110.
- Wallace L, Lucieer A, Watson C (2012a) Assessing the feasibility of UAV-based LiDAR for high resolution forest change detection. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 499–504.
- Wan H, Wang Q, Jiang D, Fu J, Yang Y, Liu X (2014) Monitoring the invasion of *Spartina alterniflora* using very high resolution unmanned aerial vehicle imagery in Beihai, Guangxi (China). *The Scientific World Journal*, 2014, 1–8.
- Watts, AC, Ambrosia VG, Hinkley EA (2012) Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: classification and considerations of use. *Remote Sensing*, 4, 1671–1692.
- Wilson JW, Sexton JO, Jobe RT, Haddad NM (2013) The relative contribution of terrain, land cover, and vegetation structure indices to species distribution models. *Biological Conservation*, 164, 170–176.

- Xu WT, Wu BF (2005) Progress on measuring forest biodiversity with remote sensing technique. *Acta Ecologica Sinica*, 25, 1199–1204. (in Chinese with English abstract) [徐文婷, 吴炳方 (2005) 遥感用于森林生物多样性监测的进展. *生态学报*, 25, 1199–1204.]
- Xu ZQ, Cao L, Ruan HH, Li WZ, Jiang S (2015) Inversion of subtropical forest stand characteristics by integrating very high resolution imagery acquired from UAV and LiDAR point-cloud. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39(7), 694–703. (in Chinese with English abstract) [许子乾, 曹林, 阮宏华, 李卫正, 蒋圣 (2015) 集成高分辨率 UAV 影像与激光雷达点云的亚热带森林林分特征反演. *植物生态学报*, 39(7), 694–703.]
- Zarco-Tejada PJ, Guillén-Climent M, Hernández-Clemente R, Catalina A, González M, Martín P (2013) Estimating leaf carotenoid content in vineyards using high resolution hyperspectral imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV). *Agricultural and Forest Meteorology*, 171, 281–294.
- Zhang CY, Zhao XH, Zhao YZ (2009) Community structure in different successional stages in north temperate forests of Changbai Mountains, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 33, 1090–1100. (in Chinese with English abstract) [张春雨, 赵秀海, 赵亚洲 (2009) 长白山温带森林不同演替阶段群落结构特征. *植物生态学报*, 33, 1090–1100.]
- Zhang M, Mi XC, Jin GZ (2014) Composition and spatial patterns of the Liangshui spruce-fir valley forest in the Xiao Hinggan Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 59, 2377–2387. (in Chinese with English abstract) [张觅, 米湘成, 金光泽 (2014) 小兴安岭凉水谷地云冷杉林群落组成与空间格局. *科学通报*, 59, 2377–2387.]
- Zhang Y, Tao P, Liang SX, Liang WL (2011) Research on application of UAV RS techniques in forest inventories. *Journal of Southwest Forestry University*, 31(3), 49–53. (in Chinese with English abstract) [张园, 陶萍, 梁世祥, 梁万里 (2011) 无人机遥感在森林资源调查中的应用. *西南林学院学报*, 31(3), 49–53.]
- Zhao CH, Yang WB, Li B, Yang G (2014) Composite aircraft with fixed wing and four-rotor-wing combined. In: *Proceedings of the Fifth China Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Conference* (eds Chinese Aeronautical Society), pp. 39–44. China Aviation Publishing Media Co., Ltd, Beijing. (in Chinese) [赵长辉, 杨五兵, 李波, 杨光 (2014) 固定翼四旋翼复合飞行器. (第五届)中国无人机大会论文集 (主编: 中国航空学会), 39–44. 中航出版传媒有限责任公司, 北京.]
- Zhao X, Xu LN, Jin GZ (2015) Effect of topography on shrub regeneration in a mixed broadleaved-Korean pine forest in the Xiaoxing'an Mountains. *Biodiversity Science*, 23, 767–774. (in Chinese with English abstract) [赵雪, 徐丽娜, 金光泽 (2015) 地形对典型阔叶红松林灌木更新的影响. *生物多样性*, 23, 767–774.]

(责任编辑: 唐志尧 责任编辑: 时意专)

附录 Supplementary Material

附录1 无人机遥感系统作业流程图

Appendix 1 Flowchart of UAV Remote sensing system operation

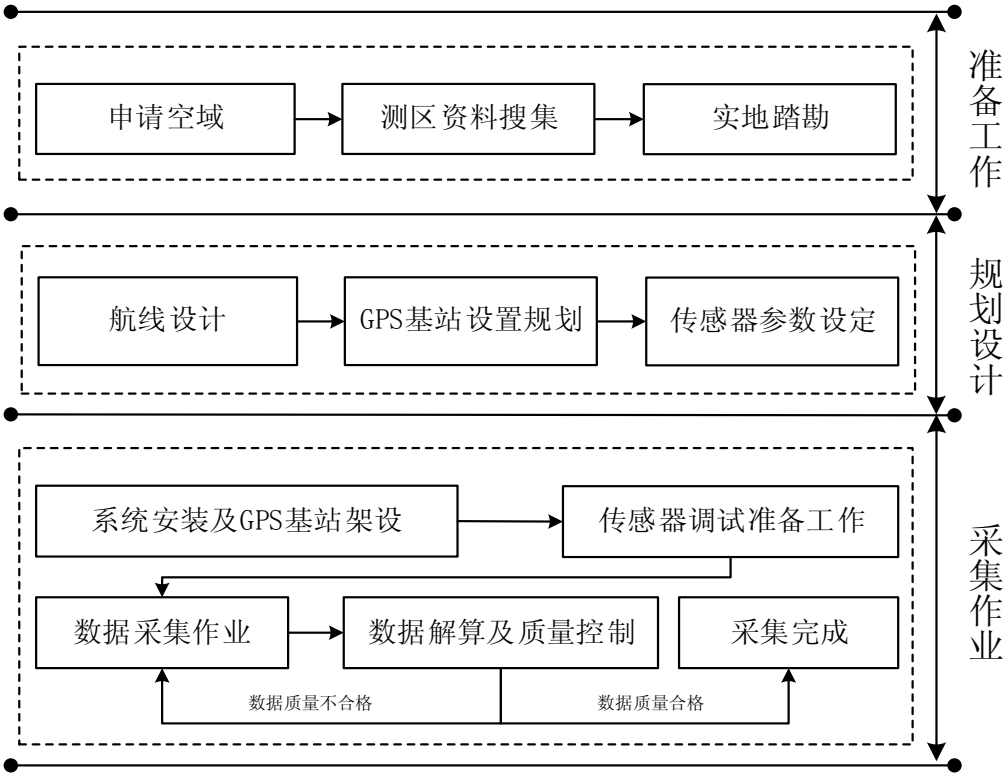
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016105-1.pdf>

附录2 无人机遥感系统组成框架图

Appendix 2 Flowchart of UAV Remote sensing system components

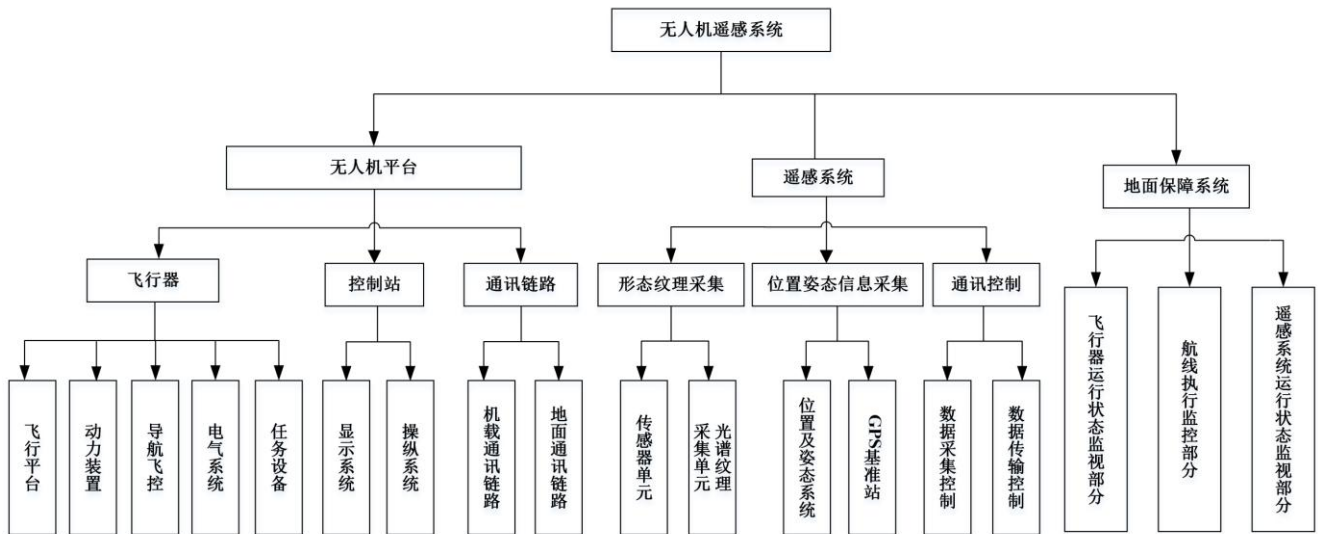
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016105-2.pdf>

郭庆华, 吴芳芳, 胡天宇, 陈琳海, 刘瑾, 赵晓倩, 高上, 庞树鑫. 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 2016, 24 (11): 1267–1278. <http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016105-1.pdf>



附录1 无人机遥感系统作业流程图
Appendix 1 Flowchart of UAV Remote sensing system operation

郭庆华, 吴芳芳, 胡天宇, 陈琳海, 刘瑾, 赵晓倩, 高上, 庞树鑫. 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 2016, 24 (11): 1267–1278. <http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016105-2.pdf>



附录2 无人机遥感系统组成框架图

Appendix 2 Flowchart of UAV Remote sensing system components