引文格式：邓磊,毛智慧. 无人机载轻小型遥感器的林业应用进展研究[J]. 地理空间信息, 2024, 22(5): 1-13. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.05.001

无人机载轻小型遥感器的林业应用进展研究

邓　磊[1]，毛智慧[1]
（1. 首都师范大学 资源环境与旅游学院，北京 100048）

摘　要：聚焦于轻小型遥感器技术的发展，综述了无人机遥感技术在森林资源监测、健康评估和灾害管理等林业领域的应用进展。首先介绍了搭载于无人机的可见光、多光谱、高光谱、热红外和激光雷达等遥感器技术，阐述了其主要特性、显著优势和适用场景；然后深入探讨了这些遥感技术在林业管理中的具体应用，展示了其在提升森林监测效率和精确度以及在灾害响应和生态保护方面的重要作用；最后讨论了面临的主要挑战和发展需求，包括无人机平台的优化、遥感设备的改进、数据处理与信息提取技术的提升，强调了跨学科研究成果的综合应用对于推动遥感技术革新及其在林业中应用拓展的重要性；旨在为林业管理与研究人员提供一种全面的视角，审视无人机遥感技术的现状与未来趋势，进而支持森林资源的可持续管理与保护。

关键词：无人机；轻小型遥感器；遥感；森林；林业应用
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）05-0001-13

Application Developments of Miniature Imagers for UAV-based Remote Sensing in Forestry

DENG Lei[1], MAO Zhihui[1]
(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: In this paper, we focused on the advancements in lightweight and compact imagers for UAV-based remote sensing (RS), and comprehensively reviewed its application progress in forestry, such as forest resource monitoring, health assessment and disaster management. Firstly, we introduced several commonly-used imagers for UAVs, including visible-light, multi-spectral, hyper-spectral, thermal infrared, and LiDAR, and elucidated their main characteristics, significant advantages and suitable scenarios. Subsequently, we delved into the specific applications of UAV-based RS technologies in forestry management, and demonstrated their crucial role in enhancing forest monitoring efficiency and accuracy, as well as in disaster response and ecological protection. Finally, we discussed the main challenges and development needs, including optimization of UAV platforms, R&D of UAV-specific imagers, enhancement of data processing and information extraction technologies, and emphasized the importance of integrating interdisciplinary research findings to drive the innovation of RS technologies and their expanded application in forestry. This paper aims to provide a comprehensive perspective for forestry management and researchers to examine the current state and future trends of UAV-based RS technologies, thereby supporting the sustainable management and protection of forest resource.

Key words: UAV, miniature imagers, RS, forest, forestry application

林业涉及自然资源管理、生态保护和经济活动等诸多领域，具有森林资源监测与管理、病虫害监测与控制、森林火灾预防与管理、生态环境和气候变化研究、生物多样性维护以及森林规划与可持续发展等多样化的复杂需求。因此，林业调查不仅具有范围广、地形复杂、时效性强的特点，还需满足精度、连续性、生态影响、成本效益、可达性和安全性等多方面要求，对于调查和监测的要求非常高。早期的林业遥感依赖于卫星影像和有人驾驶飞机，但受限于较低的时、空分辨率和高昂的成本，难以完全满足林业调查的要求。随着轻小型遥感器的发展，无人机成为林业遥感的理想平台。它们能够搭载可见光、多光谱、高光谱、热红外、激光雷达（LiDAR）和合成孔径雷达（SAR）等多种遥感器，可以提供高分辨率、多维度的林业数据。无人机遥感技术的发展不仅提高了林业资源调查的效率和精度，还为森林健康评估、灾害预防和生态保护提供了新的工具和方法，展现出显著的经济效益[1-2]，如更高的时、空、谱分辨率使精细化的树种识别、生物量估算和林分结构分析等应用成为可能，显著提升了林业资源评估的精度和效率[3]；实时

收稿日期：2024-03-05。
项目来源：北京市教育委员会科学研究计划资助项目（KZ202210028045）。
第一作者简介：邓磊（1976—），博士，教授，研究方向为无人机遥感，E-mail：edenglei@139.com。

监测能力在林火监控、病虫害侦测和干旱评估方面发挥着至关重要的作用，极大地降低了自然灾害可能造成的损失[4]；在生态监测与保护领域，无人机遥感技术能有效评估人类活动对环境的影响，监测保护区和生物多样性的变化，为生态保护提供新的视角[5-6]。可见，无人机遥感技术的进步对于林业管理、监测和保护具有深远影响，在推动林业应用向科学化、精细化和可持续化方向发展方面发挥着关键作用。

本文旨在分析无人机载轻小型遥感器在林业领域中的应用和发展态势，探讨其在林业应用中所起的作用和面临的挑战。首先阐述了各类轻小型遥感器（可见光、多光谱、高光谱、热红外、LiDAR和SAR）的特性，并分析了其优势与不足；然后探讨了它们在森林健康监测、森林结构测量与分析、灾害响应与风险管理、生态环境与气候变化研究、生物多样性与栖息地监测等领域的应用，展示了不同遥感器在拓展林业应用广度与深度方面的作用；最后展望了无人机遥感技术在林业应用中的发展趋势和面临的挑战。

1 无人机载遥感器发展概述

无人机主要包括固定翼、旋翼和复合翼3种类型，在林业领域得到了广泛应用。固定翼无人机具有较长的续航能力，适用于大范围监测，如SenseFly eBee系列[7]凭借其轻便和易操作的特点而被广泛使用；旋翼无人机具有更强的灵活性和精确的悬停能力，适用于精细监测和操作，尤其在复杂地形中表现突出，主要包括大疆精灵系列（Phantom 4 RTK/多光谱）[8-9]、经纬系列（Matrice 300/350/600）[10-12]等；而复合翼无人机如成都纵横CW系列[13]和深圳飞马V系列[14]等，兼具二者优点，能在有限空间起降的同时覆盖较大区域。

无人机可搭载不同类型的遥感器，根据采用电磁波谱段的不同，遥感器主要可分为可见光、多光谱、热红外、高光谱、LiDAR和SAR。可见光和多光谱成像技术可获取高分辨率图像，多用于森林覆盖、树种识别和健康状况评估；高光谱成像可提供更精细的光谱信息，适用于更精细的植被分析；热红外成像技术多用于监测森林火灾和评估植被水分状况；而作为主动遥感代表的LiDAR和SAR则在获取高精度地形和植被结构数据方面表现出色，特别是在森林结构参数和生物量估算等方面。这些遥感器的特点及其在林业中的典型应用范围见表1。

表1 不同类型遥感器的特点与典型林业应用

类型	特点	典型林业应用
可见光	在可见光谱范围内提供极高空间分辨率图像	森林测绘和清查、树种分类、砍伐监测评估
多光谱	捕捉不同波段的光谱信息，包括可见光和近红外光谱	森林测绘、树种分类、林木健康和疾病监测、生态保护
高光谱	提供高光谱分辨率的光谱信息，适用于细致的植被分析	树种分类、林木健康和疾病监测、生态保护、野生动物栖息地评估
热红外	依据物体的热辐射，监测地表温度和植被水分状态	森林火灾检测和管理、干旱评估
LiDAR	通过激光脉冲测量获取三维地形和植被结构信息	三维建模、森林测绘、生态保护、自然灾害评估
SAR	利用雷达波穿透云层和植被，提供全天候监测能力	森林测绘、自然灾害和人类影响评估、森林火灾检测和管理

1.1 可见光遥感器

可见光遥感器利用电磁波中400~700 nm的谱段对目标物的反射波谱进行成像，具有空间分辨率高、灰度特征明显、纹理信息丰富和直观易判读等特点，非常适合捕捉细节信息。早期的可见光遥感主要是将单反相机、微单相机等设备搭载于无人机之上，如佳能5D、索尼QX1L等，后逐步演变为以集成姿态控制和防抖功能的云台相机为主，如大疆的ZENMUSE X5S、P1和P4R等。

表2 典型可见光遥感器性能参数

遥感器	有效像素	分辨率	遥感器尺寸/mm	重量/kg
Canon 5D Mark II	2 110万	5 616×3 744	35.9×24.0	0.81
Sony QX1L	2 010万	5 456×3 632	23.2×15.4	0.158
DJI ZENMUSE X5S	2 080万	5 280×3 956	17.3×13.0	0.461
DJI ZENMUSE P1	4 500万	8 192×5 460	35.9×24.0	0.80
DJI P4R	2 000万	5 472×3 648	13.2×8.8	1.39

由表2可知，可见光遥感器的优势在于其高分辨率特性，厘米级GSD已被广泛采用，如Nevalainen P[15]等利用无人机产生的摄影测量点云准确识别了深度超过20 cm车辙路径；Huang H[16]等利用GSD为2.5 cm的RGB影像实现了对苗圃中桂花树和罗汉松树的树冠检测；Moran C J[17]等利用RGB影像区分出了厘米级的烧损树冠。随着近年来应用需求的不断深入，毫米级GSD也得到广泛的应用，如Wallace L[18]等利用2.5 mm的影像监测桉树林的植被覆盖变化，误差不超过6%；Castilla G[19]等研究了3.5 mm、7.5 mm和3 cm分辨率对树苗高度估算的影响，发现毫米级GSD可有效估算针叶树苗的高度；Wang L[20]等发现使用6.9 mm的无

人机影像可以实现东部红杉的早期检测和定位；Lopatin E[21]等利用2.22 mm的无人机影像实现了对云杉幼苗的准确检测和缺失区域的定位。在获取毫米级GSD时，无人机的飞行高度通常很低（几米到十几米），对于飞行环境较复杂的林业应用来说，飞行安全问题尤为重要。另外，飞行高度过低导致单张照片的视场过小，拍摄的照片数量将显著增加，更重要的是，在森林这种匀质场景中通常会形成大量的弱纹理区域，从而带来影像拼接难度大、数据处理效率低等问题。

1.2　多光谱遥感器

多光谱遥感器具有光谱信息丰富、实时性好、数据量小等特点，对于理化参数提取、林木长势和健康状况分析等应用较有利。多光谱遥感器通过滤光片或分光器等方式将入射的可见光/近红外电磁波信号分成若干个窄波段光束，然后分别成像在相应的探测器上，一次拍摄可得到多幅不同光谱波段的影像，在保持较高空间分辨率的前提下提高了光谱分辨率。随着成像技术的发展和成本的降低，近年来涌现出很多优秀的多光谱遥感器，如Tetracam的MCA系列相机（Tetracam Inc.，Chatsworth，CA，USA），Micasense的RedEdge和Altum相机（Micasensen Inc.，Seattle，WA，USA），Parrot的Sequoia相机（Parrot Inc.，Paris，France）以及与无人机系统高度集成化的大疆P4 Multispectral相机（SZ DJI Technology Co.，Shenzhen，China）等（表3）。

表3　典型多光谱遥感器性能参数

遥感器	通道数	分辨率	中心波长（波宽）/nm	焦距/mm	重量/kg
Mini-MCA6	6	1 280×1 024	490（10）、550（10）、680（10）、720（10）、800（10）、900（20）	9.6	0.7
RedEdge MX	5	1 280×960	475（32）、560（27）、668（14）、717（12）、842（57）	5.4	0.23
MicaSense Altum	5	2 064×1 544	475（32）、560（27）、668（14）、717（12）、842（57）	7.84	0.40
Parrot Sequoia	4	1 280×960	550（40）、660（40）、735（10）、790（40）	3.98	0.07
P4M	5	1 600×1 300	450（32）、560（32）、650（32）、730（32）、840（52）	5.74	1.48
MS600 V2	6	1 280×960	450（35）、555（25）、660（20）、720（10）、750（15）、840（35）	5.2	0.27

多光谱遥感器通常以DN值的方式记录电磁波信息，对于需要进行高精度定量反演的林业应用而言，通常需保证其辐射精度的准确性，但不同的光照条件和天气状况会影响图像的辐射校正精度。目前主流的多光谱遥感器（MicaSense Altum、DJI P4M）都配备有太阳辐照度遥感器，能够更准确地捕获长时间飞行过程中光照的变化，从而保证其具有较高的辐射精度。在几何精度方面，由于绝大多数多光谱遥感器都采用多镜头成像方式，因此不同波段影像之间存在位置偏移，尤其是飞行高度较低（空间分辨率较高）时这种几何偏差不容忽视。另外，森林所处环境的复杂性，如树种差异、林下冠层和复杂地形等，均可能导致光谱信号的混淆，使得从无人机多光谱图像中准确解译和提取林木参数变得更加困难。针对不同的林业应用，通常需要配置具有不同波段（组合）的多光谱遥感器；但能够指导实际应用的波段选择方面的研究尚不充分，因此各类商用多光谱遥感器在中心波长和波段宽度的设置方面存在差异。尽管也有部分产品（MCA系列和MS600等）具备可定制/更换波段的可能性，但由于技术和成本等方面的限制，这种灵活性在实际应用中并未得到充分体现。

1.3　高光谱遥感器

高光谱遥感器具有“图谱合一”的优势，非常适合精细的林木生化参数分析和病虫害检测等应用。高光谱遥感器能够获取一系列（一般数百个）具有窄而连续光谱波段的影像，每个像素都能提供一条几乎连续的光谱曲线，可实现很高的光谱和辐射测量精度。按照分光原理，高光谱遥感器可分为色散型和干涉型等[22]；按照工作方式，可分为推扫式和摆扫式[22]。为了适应无人机遥感的需要，高光谱遥感器在轻小型化方面取得了长足进步，推出了一系列实用产品，如Headwall的Hyperspec系列（Headwall Photonics Inc.，Bolton，MA，USA）、Resonon的Pika系列（Resonon Inc.，Bozeman，MT，USA）和Cubert的S185、UHD系列（Cubert GmbH，Ulm，Germany）等（表4）。

无人机高光谱遥感应用于林业时要考虑载荷与续航能力、飞行稳定性与环境适应性、数据处理分析复杂度以及技术集成与标准化等方面的问题。首先，无人机载荷与续航能力是影响其高光谱遥感应用的关键因素。由于高光谱遥感器及其辅助设备（高精度IMU等）的重量和能耗较大，且其视场角通常较小，直接影响了无人机的飞行时间和覆盖范围；此外，

表4 典型高光谱遥感器性能参数

遥感器	光谱范围/nm	光谱分辨率/nm	光谱通道数	成像方式	重量/kg
Pika XC2	400~1 000	1.3	447	推扫式	2.2
Nano-Hyperspec	400~1 000	6	270	推扫式	0.5
GaiaSky-Mini3-VN	400~1 000	5±0.5	448	推扫式	1.2
Cubert S185	450~950	4	125	框幅式	0.47
Rikola	500~900	10	380	框幅式	0.72
SPECIM FX17	900~1 700	8	224	推扫式	1.7

由于价格昂贵，大多数商用高光谱遥感器主要覆盖400~1 000 nm的波长范围，采用全波段（400~2 500 nm）的较少，限制了对某些更敏感、更具区分度的重要生化指标的检测能力[23]。其次，飞行稳定性和环境适应性也会影响高光谱数据的质量，需要考虑如何适应不同的光照条件、气象条件和地形条件，比如飞行期间光照变化、大气条件、地面反射特性、遥感器的非均匀响应等因素会使实验室条件下获取的辐射定标参数不再适用，进而对光谱质量造成影响[24]。最后，高光谱数据的处理和分析方面的挑战也不容小觑，大数据量和复杂的分析方法对数据压缩技术和先进算法提出了更高的要求，因此需借助机器学习与深度学习等方法以提取具有价值的信息。

1.4 热红外遥感器

热红外遥感器可探测物体的热辐射，常用于监测地表/冠层温度和水分，在火灾监测、干旱评估以及野生动物监测方面显得尤为重要。热红外遥感器的核心部件是热红外探测器，民用领域多采用非制冷的凝视型焦平面阵列探测器（FPA），其工作原理类似于CMOS/CCD，不过它响应的是热量而不是光。成像时，由光学系统接收被测目标的红外辐射能量，整个视场内景物的每一个微景元对应焦平面上红外探测器（二维）阵列的各光敏元件（像素），整幅热红外图像一次完成。按照工作温度可分为制冷型和非制冷型，按照成像器件的物理特性可分为电阻型、铁电型和热释电型。近年来，热红外遥感器在高可靠性、小型化和一体化方面取得了巨大进步，典型设备包括FLIR的VUE系列、Workswell的WIRIS Pro以及大疆公司的禅思系列等（表5）。

表5 典型非制冷型热红外遥感器性能参数

遥感器	像元尺寸/μm	分辨率	测温范围/℃	热灵敏度/mk	重量/kg
FLIR Duo Pro R	17	640×512	高增益：-25~+135 低增益：-40~+550	<50	0.32
FLIR Vue Pro R 640	17	640×512	-55~+90	<50	0.11
WIRIS Pro	17	640×512	-25~+150 -40~+550	<50	0.45
ICI 8640 P	17	640×512	-40~+80	<20	0.75
ZENMUSE XT	17	640×512	高增益：-25~+135 低增益：-40~+550	<50	0.27

目前热红外遥感器性能仍受探测精度（热灵敏度）、空间分辨率和探测范围等方面的限制。在林业精细化管理和监测需求日益增长的背景下，这些限制直接影响了热红外遥感技术在林业应用中的适用性和效果。另外，在获取热红外遥感数据时，还会受飞行高度、气象条件、地形遮挡等环境因素影响，如山区不稳定的气流和多变的天气条件可能会降低热红外数据的质量和准确性，且复杂的林区地形对无人机的飞行路径和数据获取提出了更高的要求。如何妥善处理这些数据，减少飞行高度、环境温度变化等因素带来的影响，提升信息提取的准确性与效率，成为又一重要挑战。

1.5 LiDAR遥感器

LiDAR技术能够精确描绘三维地形和植被结构，对于树高、树冠密度等垂直和水平森林结构的测量极为有效。无人机载LiDAR能够获取飞行轨迹下方特定视场范围内的三维扫描数据，并通过测量信号传播时间来确定与目标之间的相对距离，通过特定解算处理生成具有三维空间坐标信息和带有回波强度/光谱的点云数据。

LiDAR扫描仪发射激光测量脉冲和接收目标回波信号是数据采集过程最重要的两个环节。对于每束激光脉冲来说，它会覆盖到一定区域范围，该范围内可能包含不同的地物，这些地物对激光脉冲反射的强度值不同，因此LiDAR遥感器可接收到的地物回波的强弱和数目也将不同。离散LiDAR多采用单束多回波技术，能够采集到（有限的）各次回波的时间和强度信息；全波形LiDAR可记录经过多种介质传输后返回的整个回波波形，因此不仅包括反射地物的空间位置，

还可利用从中提取的振幅、脉冲宽度和后向散射截面等信息分析地物目标中的形状、反射率、组分和相互关联关系等。无人机载LiDAR已步入实用化阶段，出现了一系列高性价比的轻小型LiDAR产品，主要包括奥地利的Riegl、美国的Velodyne以及我国的大疆和数字绿土等（表6）。

表6　典型无人机载LiDAR遥感器性能参数

遥感器	波长/nm	扫描角	最大探测距离/m	测量精度	重量/kg
Riegl VUX-1	1 550	330°	920	10 mm	3.6
Velodyne HDL-32E	905	40°（+10.67°~-30.67°）	100	<2 cm	1.0
Velodyne VLP-16	905	30°（-15°~+15°）	120	±3 cm	0.83
ZENMUSE L1	905	重复扫描：70.4°×4.5° 非重复扫描：70.4°×77.2°	450	3 cm@100 m	0.93
ZENMUSE L2	905	重复扫描：70°×3° 非重复扫描：70°×75°	450	2 cm@150 m	0.91
LiAir 300	905	40.3°（-20.8°~+19.5°）	300	±1 cm	1.1

高性能LiDAR系统能够提供高精度的地形和植被结构数据，但成本高昂，操作和维护也需要专业技能[25]。在复杂林区内进行高质量数据采集时，无人机的续航能力和稳定性至关重要，然而这往往与其系统成本正相关。由于不同的飞行高度、速度和路径都会对LiDAR数据采集的效率和精度产生重要影响，因此应针对不同的林业应用需求选用合适的设备和飞行方案。此外，不同的林冠覆盖度、林下植被和地形复杂性对LiDAR数据的质量和解析能力提出了挑战。例如，林冠的密集覆盖可能限制了LiDAR信号到达地面的能力，影响地形数据的获取和林下植被的识别[26]。不同森林类型（针叶林、阔叶林）和不同生长阶段也对LiDAR数据解译提出了不同的要求。在数据处理方面，需要强大的计算能力才能对LiDAR产生的大量点云数据进行滤波、分类、去噪、特征提取等处理。此外，从点云数据中提取有用的林业信息（树高、胸径、林分密度）需要复杂的算法和模型，这不仅需要大量的计算资源，还需具有深厚的林业知识和遥感技术经验。

1.6　SAR遥感器

无人机载SAR在林业遥感的应用中尚不普遍。究其原因，首先是设备的复杂性导致SAR系统的重量和体积较大，对无人机的载荷能力和续航时间提出了更高的要求[27]，且SAR系统的高能耗进一步限制了无人机的作业范围，尤其是在需要长时间覆盖广阔森林区域的任务中；其次是SAR数据的处理和解析复杂性高，如不同类型的森林和环境因素（湿度、地形）对SAR信号的反射和散射特性具有不同影响，需对雷达机理有深入的理解并进行复杂的数据处理和分析才能区分和识别不同的森林特征[28]，这些都需要特定算法和大量计算资源；最后是对于某些林业应用，光学和红外遥感器等其他遥感技术可能更具实用性和经济性。可见，尽管SAR系统具有独特优势，但在目前阶段仍需考虑其局限性和替代技术的可行性，因此后文将不再赘述。

2　无人机遥感技术的林业应用

轻小型遥感器的飞速发展使得无人机遥感技术在林业应用中取得了质的飞跃，从而使以往难以实现的精细化监测与管理任务得以高效而精确地实施，不仅极大提升了林业应用的效率和精度，也为林业研究和实践带来了新的可能性。本文将围绕森林健康监测、森林结构测量与分析、灾害响应与风险管理、生态环境与气候变化研究、生物多样性与栖息地监测等领域对近年来的应用进展进行梳理和分析。

2.1　森林健康监测

森林冠层健康情况的变化可能会导致特定的光谱特性变化，如叶片颜色变化、光谱特征和冠层结构异常等，这些变化可被具有高空间、高光谱分辨率的遥感器有效捕捉，极大地提高了早期识别和干预的可能性，为森林营养缺乏评估、病虫害检测和防治等提供了强有力的工具。无人机载多/高光谱遥感器已被证明能够通过检测植被光谱反射率的微小变化，识别由于营养缺乏而引起的植被生理变化，是评估森林营养缺乏的有效工具。例如，Cheng J[29]等结合多光谱影像和三维辐射传输模型，对苹果园中单木树冠的叶绿素含量进行了估算；Wang Y[30]等利用无人机多光谱技术快速准确地监测出核桃树冠层的氮浓度，为果树养分快速监测提供了方法和理论支持；Yin S[31]等将高光谱图像与LiDAR和辐射传输模型相结合，准确评估了银杏

林冠层中的色素含量分布，发现了不同树龄间色素含量在空间分布上的差异；Zhou K[32]等基于无人机高光谱点云数据发现基于叶片氮含量和结构信息的归一化植被指数在估计银杏林冠层叶黄酮含量方面表现更好，为叶黄酮分布的精确测量提供了新方法；Lin C[33]等采用高光谱检测算法和异常检测器探讨了通过新生长树叶情况来检测树木生长、树木胁迫甚至气候变化的可行性。可见，无人机载多/高光谱遥感提供了比传统地面调查更快、更广泛的监测手段，对于指导森林管理和营养补给计划具有重要价值。

在森林病虫害检测领域，由于特定疾病会导致植被某些特定光谱特征发生变化，而这些变化可被具有高空间、高光谱分辨率的遥感器有效捕获。例如，Zhang N[34]等基于无人机高光谱影像识别松毛虫引起的森林损害程度，准确率达到95.23%；Liu Y[35]等利用高光谱识别出遭受毛状松象早期感染的云南松的光谱变量和模型；Ma Y[36]等提出了利用无人机高光谱图像精确监测云南松遭受松墨天牛蛀蚀程度的方法，准确率超过94%。值得注意的是，成本较低的多光谱技术在该领域也有优异表现，如Huo L[37]等利用多光谱无人机图像检测了欧洲云杉小皮甲的早期感染；Liao K[38]等利用多光谱遥感器对桉树林的病害级别（轻微、中度和严重）进行了区分，整体精度达到90.1%；Windrim L[39]等利用机器学习技术成功开发了一种检测单木健康状况的多光谱识别方法。综上，无人机遥感技术可揭示病虫害在森林中的早期迹象，并为监测病虫害扩散动态、制定防治措施提供及时的信息。

2.2 森林结构测量与分析

无人机载LiDAR技术为估计森林结构提供了独特能力，得到的高密度三维点云数据可用于重建森林三维结构，进而精准估算树高、冠幅、密度/覆盖度和胸径等参数[40]，为森林清查提供全面信息。Yin D[41]等利用无人机LiDAR数据对红树林的树高和冠幅进行了准确检测和测量；Picos J[42]等自动统计了具有不规则形状和多树干的林木数量，结果与人工解释结果高度一致；Wallace L[43]等研究LiDAR点云密度和不同算法对树木检测准确性的影响发现，研究区中98%的树木能被正确检出，且点云密度的增加可显著改善算法的精度。无人机LiDAR还被用于树种识别和冠层间隙率估算，展示出在精确森林管理和规划方面的潜力[44-47]。此外，LiDAR也被证明是森林地上生物量估算的有效工具[48-50]。需要注意的是，除了LiDAR能够提供结构信息，利用影像结合SfM方法[51-52]也可以得到点云数据并从中得到森林结构参数，如Ota T[53]等通过SfM方法处理航空影像，成功估算了热带森林的地上生物量；Webster C[54]等构建森林的热红外三维点云模型发现，尽管热红外图像分辨率较低，但仍能准确解析森林结构，为环境景观的热测量提供有效的技术手段。

无人机的高分辨率和多/高光谱成像优势也为树种分类和林分结构分析提供了前所未有的细节和精度，如Nevalainen O[55]等利用无人机高光谱成功地在复杂的森林环境中区分了多个树种，展示了无人机遥感在提高树种分类精度方面的潜力；Qin H[56]等利用高光谱技术解决了亚热带阔叶林个体树种分类困难的问题，总体准确率达到91.8%；Cao J[57]等通过高光谱影像和高度信息对淇澳岛的红树林物种进行了物种分类；Sankey T[58]等利用无人机高分辨率热红外影像评估了弗里蒙特杨木在不同种群和基因型之间的表现差异，可有效区分植被种群和基因型。此外，无人机影像还可用于识别林下植被和林分密度，为森林管理和保护提供重要信息[59-61]。

2.3 灾害响应与风险管理

无人机热红外遥感技术能够检测林区的温度异常，在森林火灾监测和评估中发挥至关重要的作用。在火灾发生初期检测到热点，有助于识别潜在的火灾爆发，并可用于评估火灾后森林健康和恢复情况。例如，Hendel I[62]等通过分析3种航空或无人机上安装的热红外遥感器的成本效益、热学精度、空间精度、范围和分辨率发现，热红外遥感技术可在不同环境条件下以不同方式应用于森林火灾的早期检测；Al-Kaff A[63]等利用无人机热红外遥感在火灾早期进行了有效的热点检测。多光谱遥感器能够识别和评估森林中的受损区域，如Talucci A C[64]等证明了多光谱遥感器在火灾后植被恢复评估中的应用价值。这些技术为火灾前的风险评估、火灾期间的动态监测以及火灾后的损失评估提供了精确的数据支持。

在台风、洪涝等极端天气事件后，无人机遥感技术能够迅速评估受影响区域的植被损害程度和林分结构变化。高光谱遥感器提供的详细光谱信息有助于识别受损植被的类型和程度，而高空间分辨率的可见光遥感器则能捕捉到林木倒伏和林冠破坏的直观图像。这些信息对于快速响应和制定有效的恢复策略至关重要。Arturo Vizcaya-Martinez D[65]等展示了无人机遥感在台风后快速评估森林损害以及辅助恢复计划制定中的潜力；Li B[66]等通过无人机LiDAR成功分析了洪涝前后森林地形的变化和水文动态，为洪涝灾害风险管

理提供了重要信息，对于理解自然灾害对森林生态系统的影响、评估植被损失以及规划防灾减灾措施具有重要意义。此外，通过定期监测，无人机还可追踪受损森林的恢复进程，评估恢复措施的效果。

2.4　生态环境与气候变化研究

无人机遥感已被应用于评估森林生态系统的碳循环研究中。多光谱和高光谱可以准确估计不同的植被指数和叶面积指数等理化参数，这对量化光合活性和生物量至关重要[67-68]。此外，LiDAR能够精确测量森林结构和生物量，为碳储量评估提供有价值的数据[69]，如Liu H[70]等利用无人机LiDAR对南方人工林的森林结构参数进行了评估；Cao L[71]等对比了采用无人机激光雷达与数字航空摄影测量点云指标在亚热带人工林森林结构属性预测模型中的准确性；Teixeira Da Costa M B[72]等利用无人机LiDAR绘制了热带森林地上生物量图。因此，无人机遥感技术可高分辨率、高成本效益地监测森林中的碳动态，有助于更好地了解它们在全球碳循环中的作用。

无人机遥感技术还为森林地区的水文过程和土壤监测提供了独特的能力。热红外遥感器可用于评估植被的蒸散率、土壤水分含量、土壤侵蚀和压实，LiDAR可深入了解土壤地形和微地貌特征，从而深入了解森林生态系统的水分和土壤环境[73]，如Domlija P[74]等基于无人机LiDAR量化了土壤侵蚀率，并评估了退化森林生态系统中侵蚀控制措施的有效性。此外，可见光和近红外遥感器相结合能够绘制河岸带和湿地区域的地图，也可用于绘制土壤特性图，如有机质含量、土壤湿度和养分水平，为水土资源管理及其质量评估提供有价值的信息，如王棣[75]等利用基于无人机的多光谱图像来评估热带森林中的土壤养分动态；Fraser B T[76]等采用多光谱图像评估了针叶林的水分胁迫，为深入了解生态系统的水分调节能力提供了可能。

在森林生态系统与气候变化方面，无人机遥感同样发挥着至关重要的作用。多/高光谱和热红外遥感器可以检测植被中胁迫和干扰的早期迹象，如干旱引起的树叶损失和温度异常[77]，Sankey T[78]等利用无人机热红外遥感监测由干旱导致的植被胁迫，从而深入了解气候变化对森林生态系统的影响。LiDAR能够量化由气候引起的干扰所导致的森林结构变化和生物多样性损失，如Gao Q[79]等利用LiDAR评估了飓风对森林结构和成分的影响，验证了小型无人机遥感在气候变化影响评估中的作用。无人机遥感为监测和减轻气候变化对森林生态系统的影响、支持适应性管理战略和保护工作提供了不可或缺的数据支持。

在量化人类活动对森林生态环境的影响方面，可见光/多光谱遥感器通过捕捉森林覆盖和植被变化图像，为研究森林砍伐和土地利用变化提供了直观证据[80-82]，高光谱遥感器被用于监测植被健康和识别受人类活动影响的植物物种[83]，热红外遥感器揭示了由人类活动引起的地表温度变化，为研究城市化等活动对周边森林生态系统产生的微气候效应提供了重要数据，还可用于实时监测非法砍伐、狩猎等活动[84-85]。LiDAR不仅能够量化森林生物量和碳汇价值，还能评估基础设施建设等人类活动对森林结构的影响[86-87]。无人机遥感为理解人类活动对森林生态环境的综合影响提供了一个多维度视角，支持森林生态系统管理和保护策略的制定和优化。

2.5　生物多样性与栖息地监测

无人机多/高光谱遥感在植物群落和生物多样性评估方面同样显示出巨大潜力。高光谱遥感器可通过细微的光谱差异区分并识别森林中的不同植物物种，甚至是在物种丰富的热带雨林中[57,88]，结合无人机的高空间分辨率，研究人员能够绘制详细的植物群落分布图，并监测生物多样性的时空变化[89]，这对于监测生物多样性变化、保护濒危物种、评估自然保护区的有效性以及制定生态恢复策略至关重要要。

LiDAR提供的高精度森林三维模型对于评估和监测野生动物栖息地极有帮助。研究人员能够识别动物物种多样性、潜在的栖息地，这对于野生动物保护和管理计划的制定具有重要价值[90-91]。结合无人机的高度灵活性，热红外技术使得研究人员能够在更广阔的地理范围内连续跟踪动物群体移动[92]，如Ito T Y[93]等利用无人机热红外开展了梅花鹿调查，发现该方式可提升种群数量和性别比的监测效果，改善梅花鹿的管理；Frackowiak R[94]等测试了无人机热红外技术在林区的应用效果，对欧洲麋、红鹿、欧洲獐和欧亚野猪等大型野生动物的侦测效果表明，商用热成像相机具备侦测和鉴定欧洲麋和红鹿等大型野生动物的潜力，还能在冬季准确区分红鹿的性别，这对于理解动物迁徙行为、评估栖息地连通性以及制定跨界保护措施具有重要意义。

3　发展与挑战

3.1　无人机平台创新提升数据获取效率

无人机平台的飞行能力对于数据获取效率的提升至关重要。一方面，通过研究使用新型高效电池和太

阳能等先进能源技术可以显著增强无人机的续航能力，这对于覆盖广阔森林区域的连续监测任务尤为关键；另一方面，轻量化设计可进一步增加无人机在复杂林区环境中的机动性和飞行时间，使其满足执行更长时间监测任务的需要，从而提高数据采集的连续性和完整性。此外，自主飞行和高精度导航技术的进步确保了无人机能够高效地执行精确的数据采集任务，特别是在树冠密集和地形复杂的森林环境中，可显著降低对人工操作的依赖性，提高数据采集的安全性和准确性。

为满足不同林业应用的特定需求，无人机平台应具备（同时）挂载不同类型遥感器并供它们协同工作的能力，如模块化设计使得无人机能够根据不同的监测目标快速调整遥感器配置，方便地解决挂载空间和供电等问题，极大地提高了其在林业应用中的灵活性。不断提升的边缘计算能力使得无人机在野外即时处理大量数据成为可能，能极大缩短从数据采集到分析的时间，为林业管理提供了实时的决策支持。同时，高速数据传输技术确保即使在偏远森林区域也能实现快速的数据回传，加快了数据处理和分析的流程。

安全性、可靠性和环境适应性同样是至关重要的因素。为了确保无人机系统在执行林业监测任务时的稳定性和持久性，应开发先进的安全机制和冗余系统，如多重控制系统和电源备份等，优化无人机的设计以适应多种环境条件，如高温、低温、高湿、强风等极端气候，这是保障数据采集质量、提高无人机在复杂林业环境中的可靠性、安全性和高效性的关键。同时，无人机平台的设计和操作必须遵循国际和地区的航空法规和安全标准，确保其合法合规地进行林业数据采集。这些技术创新和发展策略共同推动了无人机在林业中的广泛应用，为森林资源管理和保护提供了有力的技术支持。

3.2 遥感器技术进步提高数据质量

在林业应用中，无人机搭载的各种轻小型遥感器尚面临着一系列挑战。可见光遥感器易受极端光照条件影响，在日光直射或暗影区域往往难以捕捉到清晰图像，影响成像质量的一致性和可靠性。多光谱和高光谱遥感器的光谱分辨率和波段选择有限，无法满足细致的物种分类或特定生理状态识别的要求。此外，高光谱遥感器产生的数据量庞大，对数据处理和分析能力的要求极高，这对需要实时数据处理和快速决策支持的应用构成了挑战。热红外遥感器的空间分辨率较低，限制了其在精细测量小面积（单株树木）的温度变化方面的应用，从而影响了对林火风险和植被健康状况的精确评估。主动型的LiDAR遥感器能够提供高精度的三维地形和植被结构数据，SAR遥感器具备穿透云层和林冠的能力，但它们的高成本和数据处理的复杂性限制了在小型无人机平台上的广泛应用，而且数据解译复杂，在密集林区中对林下特征的解析能力有限。针对上述挑战，不同遥感器应在相应方面做出改进。对于可见光遥感器，在不断提高空间分辨率的同时，应通过引入动态范围增强技术和智能曝光调整算法来提升其在极端光照条件下的成像性能，以改善直射日光或阴影区域下的图像质量；同时开发具有更高光学性能的镜头系统也是提升图像清晰度和减少畸变的有效途径。对于多光谱和高光谱遥感器，提高光谱分辨率和扩展光谱覆盖范围至关重要，尤其是增加对特定植物生理特征敏感的波段，这将极大地增强对植被健康状况和物种多样性的监测能力。热红外遥感器的改进应集中在提高空间分辨率上，通过采用更高性能的探测器和优化光学设计，提升对小面积树木温度变化的测量能力。对于LiDAR遥感器，虽然近年来成本不断降低，但依然面临能耗高、采集效率低、数据处理复杂等问题，需要通过提高硬件性能、优化算法等途径解决，如采用更先进的遥感器和信号处理芯片以提高采集速度和精度，采用新型材料和更紧凑的结构设计降低重量和能耗，设计更高效的信号处理方法降低数据处理的复杂度、实现自动化处理和分析。对于SAR遥感器，降低成本、简化数据处理流程是提高其在小型无人机平台上应用的关键，同时应开发更高分辨率和多极化的系统，以提升对地表和林下特征的识别能力。

除了硬件方面的改进和提升，还可利用超分辨率重建算法、多帧融合技术和泛化深度学习模型等方法提高空间分辨率[95-96]，利用光谱重建算法、光谱混合分析和光谱超分辨率等技术增强光谱分辨率[97-98]，通过先进的算法和技术优化遥感数据质量，极大减少硬件研发的周期和成本。另外，针对不同林业应用的需求，应根据遥感器的特点制定并遵循相应的操作标准和流程，平衡数据精度和采集效率之间的关系[99]，如飞行高度、速度、时间和数据采集参数等，以确保数据采集的一致性和可比较性。

总之，无人机搭载遥感器正不断朝轻量化、模块化、集成化、高效化的方向发展。轻量化设计不仅能提高无人机的飞行效率和携带能力，还能使遥感应用更加灵活和广泛；模块化设计将使遥感器更易于升级和替换，从而快速适应不同的监测需求；集成化发展

将促进不同类型遥感器的协同工作；高效化则通过开发更高效的数据压缩技术和实时处理算法，减少数据传输负担、提高数据处理效率、加速决策支持过程。

3.3　数据融合与集成分析提升信息解读能力

无人机遥感技术为林业领域带来了前所未有的机会，但在实际应用中，数据处理面临诸多挑战，尤其是在不同遥感器、无人机与传统卫星和地面数据之间的整合，存在多重困难。这些挑战主要包括数据分辨率和空间范围的差异、时间同步问题、数据异质性和处理复杂性等，不仅需要技术层面的突破，还需要跨学科的合作，整合遥感科学、计算机科学、生态学和林业管理等领域的知识。

首先，多源数据融合技术的发展是提升林业遥感应用能力的关键。通过整合来自不同无人机之间、无人机与卫星/地面之间的数据，可实现对森林覆盖、生物量、健康状况等关键参数的全面监测。无人机搭载的不同遥感器各自提供了森林的不同属性信息，为了充分利用它们提供的互补信息，开发高级的数据融合与集成技术至关重要。利用数据融合算法、多角度分析技术和机器学习模型等方法来整合和分析不同类型的数据，可以更全面和精确地解读森林特征，如通过结合LiDAR的三维结构数据和高光谱的细节光谱信息可获得更准确的植被分类、生物量估计和健康状况评估。此外，多源数据融合还可提高森林监测的时效性和准确性，特别是在应对快速变化的林业问题（病虫害扩散和林火监测）时。在不同尺度（卫星、无人机、地面）数据融合方面，要求开发能够处理和整合不同分辨率和空间范围数据的高级融合技术[100-101]，如无人机提供的高分辨率图像可揭示森林的细节结构，而卫星数据则提供了对广阔区域的连续覆盖。利用多尺度分析、机器学习算法等进行遥感数据的尺度转换，可在保证数据一致性和准确性的同时，实现不同尺度数据的有效融合。

其次，时间序列分析技术的创新对于捕捉森林的动态变化至关重要。季节性生长、病虫害扩散和林火发生等森林生态系统变化均要求对森林进行连续且长期的监测。开发能够自动同步不同时间点数据的技术，尤其是整合无人机和卫星数据的时间序列分析，可以及时发现和响应森林变化。需要创新算法来处理时间上的不一致性，确保数据分析结果的时效性和准确性。

再次，考虑到不同数据源的异构性和处理复杂性，建立统一的数据预处理框架以及利用云计算和分布式计算技术变得尤为重要。统一的数据预处理框架可以解决数据格式、坐标系统和测量参数的差异问题，云计算和分布式计算技术则提供了必要的计算资源，支持大规模数据的存储、处理和分析，特别是对于机器学习和深度学习模型的训练，这些计算平台能够加速模型的开发和优化，提高数据处理的效率。

最后，增强数据分析结果的可解释性和用户交互性也是提升林业遥感应用能力的重要方向。开发易于理解的分析工具和可视化界面，使林业专家和决策者能够直观地理解和利用遥感数据进行资源管理和规划。通过提供清晰的图表、地图和报告，帮助用户更好地解读和应用遥感数据，支持定制化的查询和决策制定。

4　结　语

本文详细探讨了无人机搭载轻小型遥感器在林业应用中的最新进展，重点分析了可见光、多光谱、高光谱、热红外和LiDAR等遥感器技术。针对林分参数估算、健康状况监测、病虫害调查和森林火灾监控等特定的林业应用需求，每种遥感器都展现了其独特的优势和应用潜力，它们提供的高分辨率和多维度数据，已成为林业资源管理和保护中不可或缺的工具。

未来的研究方向应当聚焦于进一步提高遥感数据处理效率和精确度，特别是在多源数据融合技术方面的开发。此外，应深入探讨如何根据特定林业应用需求定制化遥感器技术的使用，还需考虑无人机技术与现有林业管理实践的集成方式，以确保技术进步能够有效转化为林业管理的实际改进。综上所述，无人机遥感技术在林业中的应用前景广阔，对促进可持续林业管理和保护具有重要意义。

参考文献

[1] Brovkina O, Cienciala E, Surovy P, et al. Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for Assessment of Qualitative Classification of Norway Spruce in Temperate Forest Stands[J]. Geo-spatial Information Science, 2018, 21(1): 12-20

[2] Khan A, Gupta S, Gupta S K. Multi-hazard Disaster Studies: Monitoring, Detection, Recovery, and Management, Based on Emerging Technologies and Optimal Techniques[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2020, 47: 101 642

[3] Kolanuvada S R, Ilango K K. Automatic Extraction of Tree Crown for the Estimation of Biomass from UAV Imagery Using Neural Networks[J]. Journal of the Indian Society of

Remote Sensing,2021,49(3):651-658

[4] Nguyen H T, Lopez C M L, Moritake K, et al. Individual Sick Fir Tree (Abies Mariesii) Identification in Insect Infested Forests by Means of UAV Images and Deep Learning[J].Remote Sensing,2021,13(2):260

[5] Zhao Y, Sun B, Liu S, et al. Identification of Mining Induced Ground Fissures Using UAV and Infrared Thermal Imager: Temperature Variation and Fissure Evolution[J].ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021,180:45-64

[6] de Almeida D R A, Broadbent E N, Ferreira M P, et al. Monitoring Restored Tropical Forest Diversity and Structure Through UAV-borne Hyperspectral and LiDAR Fusion[J]. Remote Sensing of Environment,2021,264:112 582

[7] eBee X[EB/OL].[2024-02-24].https://www.sensefly.com/drones/ebee-x/

[8] 精灵4 RTK[EB/OL].[2024-02-24]. https://www.dji.com/cn/phantom-4-rtk/info

[9] 精灵4多光谱[EB/OL].[2024-02-24]. https://www.dji.com/cn/p4-multispectral

[10] 经纬M300 RTK[EB/OL].[2024-02-24].https://enterprise.dji.com/cn/matrice-300?site=enterprise&from=nav

[11] 经纬350RTK[EB/OL].[2024-02-24].https://enterprise.dji.com/cn/matrice-350-rtk?site=enterprise&from=nav

[12] 经纬M600[EB/OL].[2024-02-24].https://www.dji.com/cn/matrice600

[13] CW-15长航时垂直起降固定翼无人机[EB/OL].[2024-02-24].https://www.jouav.com/zh/products/cw-15.html

[14] V系列飞马智能航测/遥感/巡检/应急系统[EB/OL].[2024-02-24]. https://www.feimarobotics. com/zhcn/productDetailV100

[15] Nevalainen P, Salmivaara A, Ala-Ilomaki J, et al. Estimating the Rut Depth by UAV Photogrammetry[J].Remote Sensing,2017,9(12):1 279

[16] Huang H, Li X, Chen C. Individual Tree Crown Detection and Delineation from Very-high-resolution UAV Images Based on Bias Field and Marker-controlled Watershed Segmentation Algorithms[J].IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11(7):2 253-2 262

[17] Moran C J, Hoff V, Parsons R A, et al. Mapping Fine-scale Crown Scorch in 3D with Remotely Piloted Aircraft Systems[J].Fire-Switzerland,2022,5(3):59

[18] Wallace L, Saldias D S, Reinke K, et al. Using Orthoimages Generated from Oblique Terrestrial Photography to Estimate and Monitor Vegetation Cover[J].Ecological Indicators,2019,101:91-101

[19] Castilla G, Filiatrault M, McDermid G J, et al. Estimating Individual Conifer Seedling Height Using Drone-based Image Point Clouds[J].Forests,2020,11(9):924

[20] Wang L, Zhou Y, Hu Q, et al. Early Detection of Encroaching Woody Juniperus Virginiana and Its Classification in Multi-species Forest Using UAS Imagery and Semantic Segmentation Algorithms[J].Remote Sensing,2021,13(10): 1 975

[21] Lopatin E, Poikonen P. Cost-effective Aerial Inventory of Spruce Seedlings Using Consumer Drones and Deep Learning Techniques with Two-stage UAV Flight Patterns[J].Forests,2023,14(5): 973

[22] 刘洪麟.机载高光谱成像仪光谱定标关键技术研究[D].上海:中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2020

[23] Arroyo-Mora J P, Kalacska M, Loke T, et al. Assessing the Impact of Illumination on UAV Pushbroom Hyperspectral Imagery Collected Under Various Cloud Cover Conditions[J].Remote Sensing of Environment,2021,258:112 396

[24] Adao T, Hruska J, Padua L, et al. Hyperspectral Imaging: A Review on UAV-based Sensors, Data Processing and Applications for Agriculture and Forestry[J].Remote Sensing, 2017,9(11):1 110

[25] Guo Q, Su Y, Hu T, et al. An Integrated UAV-borne LiDAR System for 3D Habitat Mapping in Three Forest Ecosystems Across China[J].International Journal of Remote Sensing,2017,38(8/10):2 954-2 972

[26] Scheeres J, de Jong J, Brede B, et al. Distinguishing Forest Types in Restored Tropical Landscapes with UAV-borne LiDAR[J].Remote Sensing of Environment,2023,290:113 533

[27] 仇晓兰,焦泽坤,杨振礼,等.微波视觉三维SAR关键技术及实验系统初步进展[J].雷达学报,2022,11(1):1-19

[28] Singh A, Kushwaha S K P. Forest Degradation Assessment Using UAV Optical Photogrammetry and SAR Data[J].Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2021, 49(3): 559-567

[29] Cheng J, Yang H, Qi J, et al. Estimating Canopy-scale Chlorophyll Content in Apple Orchards Using a 3D Radiative Transfer Model and UAV Multispectral Imagery[J].Computers and Electronics in Agriculture,2022,202:107 401

[30] Wang Y, Feng C, Ma Y, et al. Estimation of Nitrogen Concentration in Walnut Canopies in Southern Xinjiang Based on UAV Multispectral Images[J].Agronomy-Basel, 2023, 13(6):1 604

[31] Yin S, Zhou K, Cao L, et al. Estimating the Horizontal and Vertical Distributions of Pigments in Canopies of Ginkgo Plantation Based on UAV-borne LiDAR, Hyperspectral Da-

ta by Coupling PROSAIL Model[J].Remote Sensing,2022,14(3):715

[32] Zhou K,Cao L,Shen X,et al. Novel Spectral Indices for Enhanced Estimations of 3-dimentional Flavonoid Contents for Ginkgo Plantations Using UAV-borne LiDAR and Hyperspectral Data[J].Remote Sensing of Environment,2023,299:113 882

[33] Lin C,Chen S,Chen C,et al. Detecting Newly Grown Tree Leaves from Unmanned-aerial-vehicle Images Using Hyperspectral Target Detection Techniques[J].ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018, 142:174-189

[34] Zhang N, Zhang X, Yang G, et al. Assessment of Defoliation During the Dendrolimus Tabulaeformis Tsai et Liu Disaster Outbreak Using UAV-based Hyperspectral Images[J].Remote Sensing of Environment,2018,217:323-339

[35] Liu Y,Zhan Z,Ren L,et al. Hyperspectral Evidence of Early-stage Pine Shoot Beetle Attack in Yunnan Pine[J].Forest ecology and Management,2021,497:119 505

[36] Ma Y, Lu J, Huang X. Damage Diagnosis of Pinus Yunnanensis Canopies Attacked by Tomicus Using UAV Hyperspectral Images[J].Forests,2023,14(1):61

[37] Huo L,Lindberg E,Bohlin J,et al. Assessing the Detectability of European Spruce Bark Beetle Green Attack in Multispectral Drone Images with High Spatio-temporal Resolutions[J].Remote Sensing of Environment,2023,287:113 484

[38] Liao K, Yang F, Dang H, et al. Detection of Eucalyptus Leaf Disease with UAV Multispectral Imagery[J].Forests,2022,13(8):1 322

[39] Windrim L,Carnegie A J,Webster M,et al. Tree Detection and Health Monitoring in Multispectral Aerial Imagery and Photogrammetric Pointclouds Using Machine Learning[J].IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,2020,13:2 554-2 572

[40] Panagiotidis D, Abdollahnejad A, Slavik M. 3D Point Cloud Fusion from UAV and TLS to Assess Temperate Managed Forest Structures[J].International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022, 112:102 917

[41] Yin D, Wang L. Individual Mangrove Tree Measurement Using UAV-based LiDAR Data: Possibilities and Challenges[J].Remote Sensing of Environment,2019,223:34-49

[42] Picos J, Bastos G, Miguez D, et al. Individual Tree Detection in a Eucalyptus Plantation Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-LiDAR[J].Remote Sensing,2020,12(5):885

[43] Wallace L, Lucieer A, Watson C S. Evaluating Tree Detection and Segmentation Routines on very High Resolution UAV LiDAR Data[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2014,52(12):7 619-7 628

[44] Mao X, Liang Z, Fan W. Object-oriented Automatic Identification of Forest Gaps Using Digital Orthophoto Maps and LiDAR Data[J].Canadian Journal of Remote Sensing,2020,46(2):177-192

[45] Wang K, Wang T, Liu X. A Review: Individual Tree Species Classification Using Integrated Airborne LiDAR and Optical Imagery with a Focus on the Urban Environment[J].Forests,2019,10(1):1

[46] Suiter A E. Remote Sensing Based Detection of Forested Wetlands: An Evaluation of LiDAR, Aerial Imagery, and Their Data Fusion[M].Southern Illinois University at Carbondale,2015

[47] Zhang Z,Liu X. Support Vector Machines for Tree Species Identification Using LiDAR-derived Structure and Intensity Variables[J].Geocarto International,2013,28(4):364-378

[48] Luo S,Wang C,Xi X,et al. Fusion of Airborne LiDAR Data and Hyperspectral Imagery for Aboveground and Belowground Forest Biomass Estimation[J].Ecological Indicators,2017,73:378-387

[49] Singh K K,Bianchetti R A,Chen G,et al. Assessing Effect of Dominant Land-cover Types and Pattern on Urban Forest Biomass Estimated Using LiDAR Metrics[J].Urban Ecosystems,2017,20(2):265-275

[50] Singh K K,Chen G,McCarter J B,et al. Effects of LiDAR Point Density and Landscape Context on Estimates of Urban Forest Biomass[J].ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2015,101:310-322

[51] Snavely N,Seitz S M,Szeliski R. Modeling the World from Internet Photo Collections[J].International Journal of Computer Vision,2008,80(2):189-210

[52] 王海涛,余晓敏,陆海霞,等.无人机遥感影像特征点子像素定位研究[J].地理空间信息,2023,21(8):28-32

[53] Ota T,Ogawa M,Shimizu K,et al. Aboveground Biomass Estimation Using Structure from Motion Approach with Aerial Photographs in a Seasonal Tropical Forest[J].Forests,2015,6(11):3 882-3 898

[54] Webster C,Westoby M,Rutter N,et al. Three-dimensional Thermal Characterization of Forest Canopies Using UAV Photogrammetry[J].Remote Sensing of Environment,2018,209:835-847

[55] Nevalainen O,Honkavaara E,Tuominen S,et al. Individual Tree Detection and Classification with UAV-based Photogrammetric Point Clouds and Hyperspectral Imaging[J].Remote Sensing,2017,9(3):185

[56] Qin H,Zhou W,Yao Y,et al. Individual Tree Segmentation

and Tree Species Classification in Subtropical Broad Leaf Forests Using UAV-based LiDAR, Hyperspectral, and Ultrahigh-resolution RGB Data[J].Remote Sensing of Environment,2022,280:113 143

[57] Cao J, Leng W, Liu K, et al. Object-based Mangrove Species Classification Using Unmanned Aerial Vehicle Hyperspectral Images and Digital Surface Models[J].Remote Sensing,2018,10(1):89

[58] Sankey T, Hultine K, Blasini D, et al. UAV Thermal Image Detects Genetic Trait Differences Among Populations and Genotypes of Fremont Cottonwood (Populus fremontii, Salicaceae)[J].Remote Sensing in Ecology and Conservation, 2021,7(2):245-258

[59] Wang R, Bao T, Tian S, et al. Quantifying Understory Vegetation Cover of Pinus Massoniana Forest in Hilly Region of South China by Combined Near-ground Active and Passive Remote Sensing[J].Drones,2022,6(9):240

[60] Han C, Liu J, Ding Y, et al. Recognition of Area Without Understory Vegetation Based on the RGB-UAV Ultra-high Resolution Images in Red Soil Erosion Area[J].Remote Sensing,2023,15(5):1 470

[61] Imangholiloo M, Saarinen N, Markelin L, et al. Characterizing Seedling Stands Using Leaf-off and Leaf-on Photogrammetric Point Clouds and Hyperspectral Imagery Acquired from Unmanned Aerial Vehicle[J].Forests,2019,10(5):415

[62] Hendel I, Ross G M. Efficacy of Remote Sensing in Early Forest Fire Detection: A Thermal Sensor Comparison[J]. Canadian Journal of Remote Sensing,2020,46(4):414-428

[63] Al-Kaff A, Madridano A, Campos S, et al. Emergency Support Unmanned Aerial Vehicle for Forest Fire Surveillance[J].Electronics,2020,9(2):260

[64] Talucci A C, Forbath E, Kropp H, et al. Evaluating Post-fire Vegetation Recovery in Cajander Larch Forests in Northeastern Siberia Using UAV Derived Vegetation Indices[J]. Remote Sensing,2020,12(18):2 970

[65] ArturoVizcaya-MartinezD,Flores-de-SantiagoF,Valderrama-Landeros L, et al. Monitoring Detailed Mangrove Hurricane Damage and Early Recovery Using Multisource Remote Sensing Data[J].Journal of Environmental Management,2022,320:115 830

[66] Li B, Hou J, Li D, et al. Application of LiDAR UAV for High-resolution Flood Modelling[J].Water Resources Management,2021,35(5):1 433-1 447

[67] Xu W, Yang F, Ma G, et al. Multiscale Inversion of Leaf Area Index in Citrus Tree by Merging UAV LiDAR with Multispectral Remote Sensing Data[J].Agronomy-basel, 2023, 13(11):2 747

[68] Cheng Z, Chen J M, Guo Z, et al. Improving UAV-based LAI Estimation for Forests over Complex Terrain by Reducing Topographic Effects on Multispectral Reflectance[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2024,62:1-19

[69] Huang R, Yao W, Xu Z, et al. Information Fusion Approach for Biomass Estimation in a Plateau Mountainous Forest Using a Synergistic System Comprising UAS-based Digital Camera and LiDAR[J].Computers and Electronics in Agriculture,2022,202:107 420

[70] Liu H, Cao F, She G, et al. Extrapolation Assessment for Forest Structural Parameters in Planted Forests of Southern China by UAV-LiDAR Samples and Multispectral Satellite Imagery[J].Remote Sensing,2022,14(11):2 677

[71] Cao L, Liu H, Fu X, et al. Comparison of UAV LiDAR and Digital Aerial Photogrammetry Point Clouds for Estimating Forest Structural Attributes in Subtropical Planted Forests[J].Forests,2019,10(2):145

[72] Teixeira Da Costa M B, Silva C A, Broadbent E N, et al. Beyond Trees: Mapping Total Aboveground Biomass Density in the Brazilian Savanna Using High-density UAV-LiDAR Data[J].Forest Ecology and Management,2021,491:119 155

[73] Tenenbaum D E, Band L E, Kenworthy S T, et al. Analysis of Soil Moisture Patterns in Forested and Suburban Catchments in Baltimore, Maryland, Using High-resolution Photogrammetric and LiDAR Digital Elevation Datasets[J].Hydrological Processes,2006,20(2):219-240

[74] Domlija P, Gazibara S B, Arbanas Z, et al. Identification and Mapping of Soil Erosion Processes Using the Visual Interpretation of LiDAR Imagery[J].ISPRS International Journal of Geo-information,2019,8(10):438

[75] 王棣,耿增超,佘雕,等.秦岭典型林分土壤有机碳储量及碳氮垂直分布[J].生态学报,2015,35(16):5 421-5 429

[76] Fraser B T, Congalton R G. Monitoring Fine-scale Forest Health Using Unmanned Aerial Systems (UAS) Multispectral Models[J].Remote Sensing,2021,13(23):4 873

[77] Ludovisi R, Tauro F, Salvati R, et al. UAV-based Thermal Imaging for High-throughput Field Phenotyping of Black Poplar Response to Drought[J].Frontiers in Plant Science, 2017,8:236-242

[78] Sankey T, Tatum J. Thinning Increases Forest Resiliency During Unprecedented Drought[J].Scientific Reports,2022, 12:362-371

[79] Gao Q, Yu M. Canopy Density and Roughness Differentiate Resistance of a Tropical Dry Forest to Major Hurricane Damage[J].Remote Sensing,2021,13(12):2 262

[80] Hansen M C, Potapov P V, Moore R, et al. High-resolution

Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change[J].Science,2013,342(6 160):850-853

[81] Furukawa F, Laneng L A, Ando H, et al. Comparison of RGB and Multispectral Unmanned Aerial Vehicle for Monitoring Vegetation Coverage Changes on a Landslide Area[J].Drones,2021,5(3):97

[82] Belmonte A, Sankey T, Biederman J A, et al. UAV-derived Estimates of Forest Structure to Inform Ponderosa Pine Forest Restoration[J].Remote Sensing in Ecology and Conservation,2020,6(2):181-197

[83] Zhang N, Wang Y, Zhang X. Extraction of Tree Crowns Damaged by Dendrolimus Tabulaeformis Tsai et Liu Via Spectral-spatial Classification Using UAV-based Hyperspectral Images[J].Plant Methods,2020,16(1):985-997

[84] Mantau A J, Widayat I W, Leu J, et al. A Human-detection Method Based on YOLOv5 and Transfer Learning Using Thermal Image Data from UAV Perspective for Surveillance System[J].Drones,2022,6(10):290

[85] Bian Z, Wu S, Roujean J, et al. A TIR Forest Reflectance and Transmittance (FRT) Model for Directional Temperatures with Structural and Thermal Stratification[J].Remote Sensing of Environment,2022,268:112 749

[86] Dubayah R O, Drake J B. LiDAR Remote Sensing for Forestry[J].Journal of Forestry,2000,98(6):44-46

[87] de Oliveira C P, Caraciolo Ferreira R L, Aleixo Da Silva J A, et al. Modeling and Spatialization of Biomass and Carbon Stock Using LiDAR Metrics in Tropical Dry Forest, Brazil[J].Forests,2021,12(4):473

[88] Sothe C, Dalponte M, de Almeida C M, et al. Tree Species Classification in a Highly Diverse Subtropical Forest Integrating UAV-based Photogrammetric Point Cloud and Hyperspectral Data[J].Remote Sensing,2019,11(11):1 338

[89] Du B, Mao D, Wang Z, et al. Mapping Wetland Plant Communities Using Unmanned Aerial Vehicle Hyperspectral Imagery by Comparing Object/Pixel-based Classifications Combining Multiple Machine-learning Algorithms[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,2021,14:8 249-8 258

[90] Bakx T R M, Koma Z, Seijmonsbergen A C, et al. Use and Categorization of Light Detection and Ranging Vegetation Metrics in Avian Diversity and Species Distribution Research[J].Diversity and Distributions,2019,25(7):1 045-1 059

[91] Simonson W D, Allen H D, Coomes D A. Applications of Airborne LiDAR for the Assessment of Animal Species Diversity[J].Methods in Ecology and Evolution, 2014, 5(8): 719-729

[92] Gonzalez L F, Montes G A, Puig E, et al. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and Artificial Intelligence Revolutionizing Wildlife Monitoring and Conservation[J].Sensors, 2016,16(1):97

[93] Ito T Y, Miyazaki A, Koyama L A, et al. Antler Detection from the Sky: Deer Sex Ratio Monitoring Using Drone-mounted Thermal Infrared Sensors[J].Wildlife Biology,2022(4):102

[94] Frackowiak R, Goraj Z J. Animal Detection Using Thermal Imaging and a UAV[J].Aircraft Engineering and Aerospace Technology,2023,95(9):1 444-1 452

[95] Deng L, Sun J, Chen Y, et al. M2H-Net: A Reconstruction Method For Hyperspectral Remotely Sensed Imagery[J].ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021,173:323-348

[96] Wang X, Hu Q, Cheng Y, et al. Hyperspectral Image Super-resolution Meets Deep Learning: A Survey and Perspective[J].IEEE-CAA Journal of Automatica Sinica,2023,10(8): 1 668-1 691

[97] Hang R, Liu Q, Li Z. Spectral Super-resolution Network Guided by Intrinsic Properties of Hyperspectral Imagery[J].IEEE Transactions on Image Processing, 2021, 30: 7 256-7 265

[98] Deng L, Mao Z, Li X, et al. UAV-based Multispectral Remote Sensing for Precision Agriculture: A Comparison Between Different Cameras[J].ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2018,146:124-136

[99] Deng L, Yan Y, Gong H, et al. The Effect of Spatial Resolution on Radiometric and Geometric Performances of a UAV-mounted Hyperspectral 2D Imager[J].ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018, 144: 298-314

[100] Wu S, Deng L, Zhai J, et al. Approach for Monitoring Spatiotemporal Changes in Fractional Vegetation Cover Through Unmanned Aerial System-guided-satellite Survey: A Case Study in Mining Area[J].IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,2023,16:5 502-5 513

[101] Guo L, Wu Y, Deng L, et al. A Feature-level Point Cloud Fusion Method for Timber Volume of Forest Stands Estimation[J].Remote Sensing,2023,15(12):2 995