

DOI: 10.5846/stxb201612092538

胡健波, 张健. 无人机遥感在生态学中的应用进展. 生态学报, 2018, 38(1): - .

Hu J B, Zhang J. Unmanned Aerial Vehicle remote sensing in ecology: Advances and prospects. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1): - .

无人机遥感在生态学中的应用进展

胡健波¹, 张 健^{2,*},

1 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456

2 华东师范大学生态与环境科学学院, 上海 200241

摘要: 无人机与遥感技术的结合, 即无人机遥感。与传统的以卫星和有人机遥感相比, 无人机遥感具有高时效、高时空分辨率、云下低空飞行、高机动性等优势, 是传统卫星和有人机遥感手段所无法比拟的。这些优点使得无人机在生态学和保护生物学等领域获得迅速发展。首先对无人机遥感技术的发展历程、系统组成、分类与选型、应用优势等进行了介绍。在此基础上, 对无人机在生态学中的应用案例进行了总结, 内容涉及生境监测、植物物候调查、动物监测等方面。最后通过比较国内外相关领域的研究进展对无人机生态学存在的问题(技术门槛较高和法律法规不完善等)和潜在应用前景进行了探讨。

关键词: 无人机遥感; 近地面遥感; 生物多样性监测; 保护生物学; 空间生态学

Unmanned Aerial Vehicle remote sensing in ecology: Advances and prospects

HU Jianbo¹, ZHANG Jian^{2,*}

1 Tianjin Research Institute of Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China

2 School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China

Abstract: Unmanned Aerial Vehicles (UAV or drone) equipped with sensors have been recently emerging as a new platform for remote sensing. Compared with satellite and airborne remote sensing techniques, drones can fly at low altitudes and at slow speeds, allowing them to take ultra-high spatial resolution imagery as frequently as needed. Owing to the above advantages, drones have been rapidly applied in ecology and conservation biology. In this review, we first briefly introduced the history of drone technology, the composition and classification of the drone platform, and its advantages in different research fields. Then, we provided an overall review of recent progress in drone ecology, and other research fields, such as habitat monitoring, plant phenology surveys, and animal monitoring. Finally, after analyzing the current status of this emerging field, we discussed the limitations of drone imagery analysis and regulations, and potential application prospects.

Key Words: UAV-based remote sensing; near-surface remote sensing; biodiversity monitoring; conservation biology; spatial ecology

无人驾驶飞机系统(Unmanned Aerial System, UAS), 简称无人机(drone)。2002年美国联合出版社出版的《国防部词典》中对无人机的定义是“不搭载操作人员的一种有动力飞行器, 它借助空气动力提供所需升力, 能自主飞行或者远程引导”^[1]。无人机与遥感技术的结合, 即无人机遥感, 是以无人驾驶飞行器(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)作为载体, 通过搭载相机、光谱成像仪、激光雷达扫描仪等各种遥感传感器, 获取高分辨率光学影像、视频、激光雷达点云等数据^[2]。与传统的以卫星为平台的航天遥感相比, 无人机遥感具有可在

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31670439); 中组部千人计划青年人才项目

收稿日期: 2016-12-09; 网络出版日期: 2017-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jzhang@des.ecnu.edu.cn

云下低空飞行的能力,弥补了卫星光学遥感经常受云层遮挡获取不到影像的缺陷。同时,它的高时效、高时空分辨率特点,也是有固定重访周期且离地几百公里的传统卫星遥感所无法比拟的^[3]。与传统的以有人机为平台的航空遥感相比,小型无人机不需要机场基础设施和专业飞行员,而且体型小、便携、机动灵活。无人机遥感是卫星遥感和有人机航空遥感的有益补充,成为多尺度遥感家族中的重要成员,特别适合小区域范围的应急或高频次遥感调查。随着相关技术的发展,其应用领域已经从早期的军事应用扩展到精准农业、大地测量、海洋监测、地质灾害调查、森林资源调查、植物病虫害监测、国土资源监察等领域。

在生态学和保护生物学研究中,由于卫星遥感提供数据的空间尺度与地面调查数据的空间尺度很难匹配,生态学家、保护生物学家对遥感方法一直持怀疑的态度^[4-5]。无人机遥感为遥感技术在生态学和保护生物学中的应用提供了一个高效和低成本解决途径,近几年来开始被生态学家和保护生物学家所关注^[3,6]。本文首先对无人机遥感技术的发展历史、现状及其研究方法进行了简单地总结,然后对轻小型无人机在生态学中的应用进行了介绍,最后通过比较国内外相关领域的研究进展对无人机在动植物监测和生物多样性保护领域的潜在应用前景进行了介绍和展望。

1 无人机遥感的历史和现状

1.1 发展历程

1916年9月12日,一架由英国人研制的无线电操控的无人机首次试飞,标志着无人机发展的开始。到2016年为止,无人机的发展已经经历了100年的历史。总的来说,无人机的发展经历了4个阶段^[7]:(1)靶机起步阶段(1916—1963年):这个阶段无人机主要在军事领域用于作靶机。(2)初步实用阶段(1964—1990年):无人机技术被应用到越南战争、海湾战争等中,大大减少了战争空军伤亡率。与此同时,无人机在民用领域也开始了应用尝试。(3)迅速崛起阶段(1991—2009年):这个阶段无人机在民用领域越来越多地运用到各个行业中。例如,2008年我国将无人机遥感应用于冻雨灾害和汶川地震^[8],为决策部门提供了重要的基础资料。(4)全民应用阶段(2010年至今):目前无人机的应用已经渗透到人类生活的方方面面,成为促进社会发展的重要增长点。2015年我国遥感应用专业级轻小型无人机已超过3000架,估计未来5年的装备需求总量超过30000架^[7]。

1.2 系统组成

无人机系统主要由地面系统、飞机系统和任务载荷三大系统组成,其中最重要的飞机系统由飞控、导航、动力、数据链和机体这几大子系统组成。(1)飞控系统连接机身上大量的传感器(包括角速率、姿态、位置、加速度、高度和空速等),是无人机完成起飞、空中飞行、执行任务和返场回收等整个飞行过程的核心系统。(2)导航系统向无人机提供参考坐标系的位置、速度、飞行姿态,引导无人机按照指定航线飞行。(3)动力系统:不同用途的无人机对动力装置的要求不同,但都希望发动机体积小、重量轻、成本低、工作可靠。(4)数据链传输系统负责完成对无人机遥控、遥测、跟踪定位和传感器传输。

1.3 分类与选型

无人机按照其使用功能、气动布局、质量、动力等可以分为不同的类型^[7]。按使用功能划分,可以分为军用、民用和消费无人机。用于科学研究、环境监测、测绘等的多为民用无人机,而用于个人航拍、游戏等休闲用途的多为消费无人机。目前市面上的无人机种类繁多,常见的民用的无人机可以根据气动布局和动力分为4种:油动固定翼、电动固定翼、油动旋翼(单旋翼为主)、电动旋翼(多旋翼为主)(图1)。当然,即便是同种类型无人机,性能参数差异也会非常大,如机型(固定翼)、旋翼数量(旋翼)、飞控系统、载荷的体积和重量、续航时间、飞行速度、海拔高度、抗风能力、起飞降落方式等。无人机的选型需要根据具体的应用需求而具体分析。几张主要民用无人机的优劣势分析见表1。

1.4 无人机遥感传感器

为了充分发挥无人机机动灵活的优势,常用的无人机往往十分轻巧,这一特性决定了无人机搭载的遥感

传感器同样要求重量轻、体积小。最常见的高分相机是普通的家用数码相机。例如:总重 2.5 kg 的美国 Trimble UX5 无人机搭载的是索尼微单数码相机,而总重 630 g 的瑞士 SenseFly eBee 无人机搭载的是佳能卡片机。多光谱相机种类较少,如:Tetracam 公司的减重版六波段 Mini-MCA (630 g) 和 Micro-MCA (530 g)、FLIR 公司的 VUE 型热红外成像仪(100 g)、RIEGL 公司的无人机激光雷达 VUX(4.5 kg)。无人机遥感传感器与无人机共同推动了无人机遥感技术的发展。



图 1 四种主要民用无人机类型

Fig.1 Four main types of civilian drones

(a) 油动固定翼、(b) 电动固定翼、(c) 油动旋翼和 (d) 电动旋翼

表 1 四种主要民用无人机类型的优劣势分析

Table 1 Advantages and disadvantages of four main types of civilian drones

无人机类型 Types	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
油动固定翼 Fuel fixed-wing	体型大,续航能力强(超过 2 h),抗风强(一般 6 级风)。飞行速度快,适合大范围区域的遥感调查,一般大于 10 km ² 。	安全隐患大,不适合在人口密集的区域飞行,起降场地要求非常空旷,一般需要弹射架,甚至跑道。
电动固定翼 Electric fixed-wing	飞行速度较快,适合中小范围区域的遥感调查,一般大于 1 km ² ,小于 10 km ² 。相比油动固定翼更便携。	体型小,载重小,抗风弱(一般 3—5 级风)。续航能力相比油动的弱,一般能飞 0.5—1 h 左右。
油动旋翼 Fuel rotor	可定点悬停,适合定点拍摄或者录制视频,垂直起降对起降场地要求低。相比电动多旋翼,载重大、续航时间长。	飞行速度慢。体型较大,机械结构复杂,对操控和维护要求较高,安全性上不如电动多旋翼。
电动旋翼 Electric rotor	可定点悬停,垂直起降对起降场地要求低。安全程度较高,便于携带。	飞行速度慢,载重小,续航能力差,一般能飞 10—30 min

2 轻小型无人机遥感平台及其研究方法

2.1 轻小型无人机遥感的应用优势

近几年来,无人机遥感技术的快速发展使得获取实时的高精度遥感影像数据成为可能^[3,9]。与传统的遥感技术和平台相比,轻小型无人机遥感具有以下优势:

(1) 高分辨率:无人机能够从地面几米高处获取足够高分辨率地面影像的能力(可达到厘米级),弥补了卫星因天气原因无法获取或者图像分辨率低的不足。

(2) 高时效性:无人机能第一时间获取资源变化数据,如:可以及时监测风雪灾害、森林火灾、采伐等自然和人类干扰后森林的更新和演替情况。无人机也可以实时传输影像到地面终端或在较短时间内完成整个目标区域的调查,将影像导入电脑后用专业处理软件可以快速处理,整个过程可以在几天内完成。

(3) 云层下成像:无人机具有可在云下低空飞行能力,弥补了卫星光学遥感和普通航空摄影经常受云层遮挡获取不到影像的缺陷。

(4) 移动性能高:无人机平台体积小,较为轻便,移动性能好,在运输、保管环节上与有人飞机遥感平台相比可以节省不少的费用^[10-11]。

这些优点使得无人机正逐步成为卫星遥感、有人机遥感和地面遥感的有效补充,在大地测量、灾害监测、资源调查与监测等领域获得迅速发展。基于 ISI Web of Science 文献数据库,我们对无人机遥感相关论文进行统计(图 2),在 2000—2016 年 11 月 7 日之间在所有研究领域共发表 416 篇相关论文,其中 370 篇(90%)是在 2011 年以后发表的,198 篇(48%)是在 2015 年和 2016 年发表的,表明无人机技术正在最近几年以井喷的速度迅速地应用到科学研究中。Nature 和 Science 等杂志也分别报道了无人机在科学研究中的潜力^[12-14]。

2.2 轻小型无人机监测的主要工作流程

基于轻小型无人机监测工作主要由 3 个部分组成,分别是前期准备、数据获取和后期数据处理与分析。在前期准备阶段,主要包括飞行空域申请,根据气象预报或实际天气情况判定飞行条件,根据地形、障碍物选择起降场地,根据监测区域范围、重叠度、分辨率等要求设定飞行航线。在数据获取阶段,执行飞行并实时监控与飞行安全密切相关的参数。后期数据处理与分析阶段包括图像拼接、几何校正、信息提取与分析等,具体的内容取决于无人机搭载的遥感设备的要求。

3 无人机遥感在生态学中的发展现状

在生态学和保护生物学领域,无人机遥感相关的研究工作刚刚起步。在 2001—2016 年 10 月之间在生态学、生物多样性保护、环境科学和林学等领域内共发表 95 篇相关 SCI 论文,其中 70 篇(74%)是在 2013 年以后发表的。Koh 和 Wich^[6]对低成本无人机技术在生物多样性保护中的应用进行了综述和展望,并指出“无人机生态学的时代开始了”(dawn of drone ecology)。这篇文章的第一作者 Lian-Pin Koh 博士在 2013 年的 TED 演讲视频“A drone's-eye view of conservation”(http://www.ted.com/talks/lian_pin_koh_a_drone_s_eye_view_of_conservation)进一步使得无人机生态学的概念在生态学家、保护生物学家和公众中流行起来,该视频到 2016 年 10 月为止在 TED 网站上已经被观看超 58 万次。Anderson & Gaston^[3]在美国生态学会刊物《Frontiers in Ecology and the Environment》上对轻小型无人机在生态学中的应用前景进行了更详细地介绍,并预测无人机遥感将带来空间生态学的革命(“revolutionize spatial ecology”)。随后,Whitehead & Hugenholtz^[9]和 Whitehead 等^[10]对小型无人机在环境相关领域的研究进展和存在的挑战进行了系统地综述。Paneque-Gálvez 等^[15]对无人机技术在森林管理中的应用进行了深入介绍。一些以轻小型无人机为平台的研究工作也陆续开展起来,研究内容涉及森林冠层监测、动物行为和数量调查、生境监测、野生动植物保护、自然保护区管理等。

3.1 植物监测

传统地基于地面的植物组成与结构调查由于所获得的数据精度差、人力成本高、覆盖范围小等限制,很难

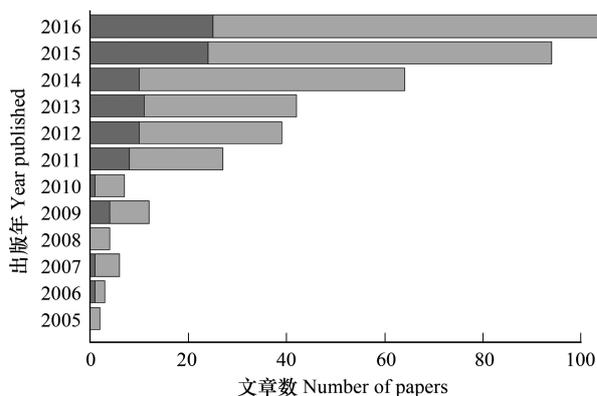


图 2 基于 ISI Web of Science 的无人机遥感相关论文数量统计

Fig.2 The drone related papers based on the ISI Web of Science during January 2015 and November 2016

灰色区域代表每年发表的无人机遥感相关的总的文章数量,红色区域代表了每年发表的论文中属于以下几个研究领域的论文:环境科学、生态学、植物科学、生物多样性保护、动物学和林业

应用到较大的取样面积。无人机遥感技术可以部分上弥补这些限制,目前应该被尝试着在植物资源调查、物候监测、植物病虫害监测等方面。我们选取了植被垂直结构调查和物候监测两个方面的案例来加以说明。

(1) 植被垂直结构调查:植被的垂直结构对森林的生物量分配和碳储量^[16-18]、生产力^[19-20]有着非常重要的影响。同时,复杂的冠层结构所形成的垂直分层和生态位分化为各种生物提供了重要的生境条件和食物资源,对许多植物和动物群落的多度和分布格局有显著的影响^[21-23]。然而,我们对森林冠层的了解大多只限于定性的分析,而很少定量的分析。一个主要的原因是缺乏有效的收集数据和分析数据的方法^[24]。轻小型无人机的发展为更有效地测量植被的垂直结构提供了可能。以我们最近在广东鼎湖山 20 hm² (400 m × 500 m) 的常绿阔叶林大样地的无人机调查为例(图 3),我们于 2014 年采用工业级四旋翼无人机(型号:MD4-1000)收集了该样地范围内所采集的高分辨率(~5 cm)的无人机遥感影像,并结合地面调查所获得的样地高程数据,计算出样地林冠层的多个变量(如:林冠层高度、森林郁闭度、林冠层高度的变异程度等)(图 3)。然后,我们通过与地面调查的植物多样性数据、地形数据、土壤数据等相结合,对影响植物多样性分布的相关因子的重要性进行了数量上的评价^[25]。

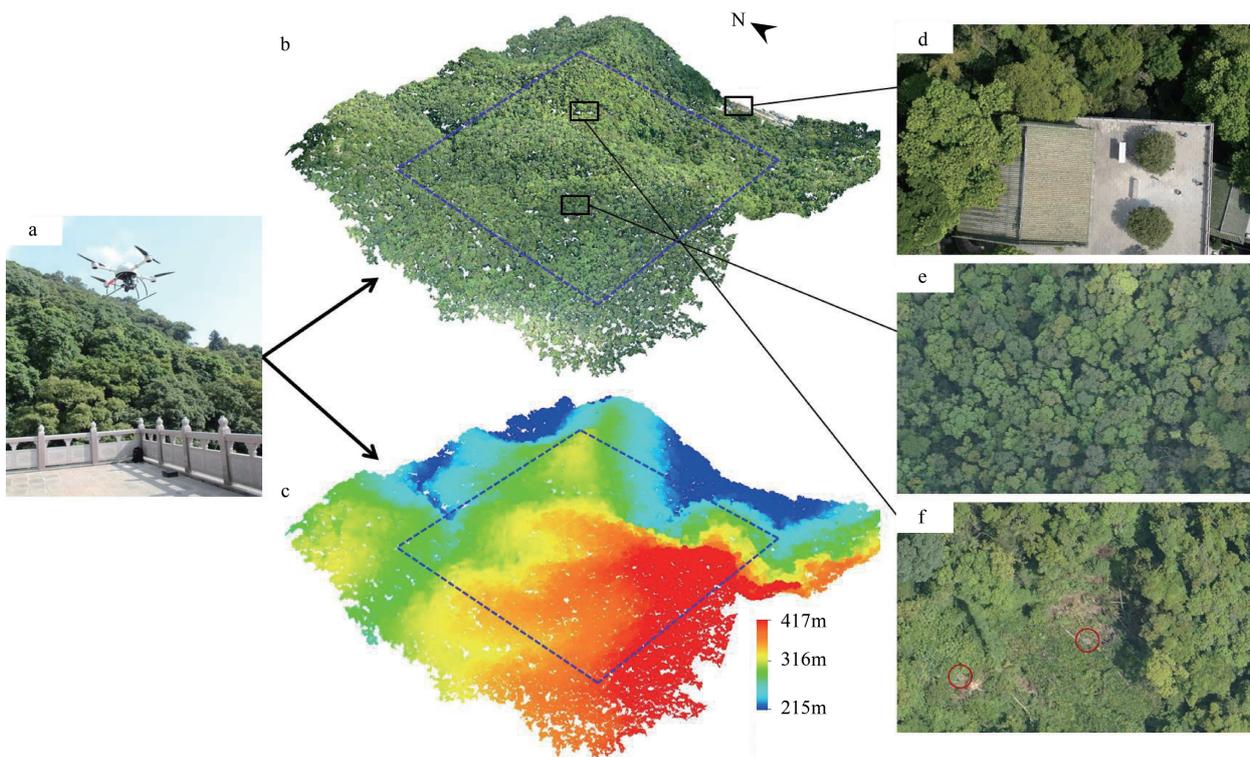


图 3 基于一个 20 公顷常绿阔叶林样地的无人机调查(引自:Zhang 等^[25])

Fig.3 Drone survey in a 20 ha stem mapping plot in an evergreen broad-leaved forest^[25]

(a) 无人机起飞场地;(b) 由无人机获得的样地森林冠层的三维点云图;(c) 样地森林冠层表面模型(CSM);(d-f) 三个无人机收集的高分辨率图像

(2) 植物物候监测:植物物候是环境条件季节和年级变化最直观、最敏感的综合指示器^[26],是地球与大气科学应用中研究植物生命周期及其与气候关系的一个重要参量。开展植物物候研究对于深入研究全球变化及与陆地生态系统的关系等方面具有十分重要的意义^[27]。传统的植物物候数据采集是通过人工定点目视观测,这种方法因覆盖范围小、时间序列短等不足,难以进行较大尺度的物候时空分析。近年来,随着遥感技术的发展,基于卫星遥感数据的大面积植物监测已经获得较为广泛地运用^[26]。然而,基于卫星遥感的植物物候研究还面临着数据分辨率低、噪声干扰因素较多、物候期识别方法普适性低、物候研究结果验证不充分等问题^[28]。基于轻小型无人机的植物物候监测可以极大地解决地面监测和卫星遥感监测存在的困难,但这方面

的工作还鲜有报道。Dandois & Ellis^[29]报道了他们在美国马里兰的一个 50 m×50 m 的样地范围内,用小型无人机对 2010 年 10 月至 2012 年 6 月之间的植物物候进行了监测,通过计算 RGB(红绿蓝)3 个颜色通道的变化来检测植物物候期的变化。Berra 等^[30]用固定翼无人机对英国一个针阔混交林内的植物物候进行了近 4 个月的详细监测,基于 RGB3 个颜色通道的信息计算了单株个体等级的绿色色度指数(Green Chromatic Coordinate colour index),结果发现这些个体之间的展叶时间存在着较大变异(最大差异为 18 d)。

另外,以轻小型无人机为研究平台,Inoue 等^[31]在日本东部的落叶阔叶林内用小型无人机对倒木进行了详细调查,通过与地面调查比较,无人机调查准确地记录了 80%—90% 的胸径大于 30 cm 的倒木。Getzin 等^[32]用无人机对德国的 10 个温带森林样地内的林窗进行了空间定位,并勾画出其形状和计算其面积。Messinger 等^[33]在亚马逊地区采集了 516 hm² 范围内低地森林的无人机影像,并以此对该区域的地上生物量进行了快速而准确的估计。

3.2 动物监测

近几年来,以轻小型无人机为平台来监测动物活动也开始引起了动物生态学家的关注。Chabot & Bird^[34]和 Christie 等^[35]分别对这一研究领域进行了非常详细的介绍。以下我们从哺乳动物和鸟类为例来加以简单的总结。

(1) 哺乳动物:目前用无人机对哺乳动物的调查主要集中在体型较大的动物。例如,Vermeulen 等^[36]在非洲西部用无人机对非洲象(*Loxodonta africana*)种群进行了调查,在 4 条样带上共调查到 34 头大象(图 4)。Israel^[37]用无人机装载热红外相机来监测孢子(*Capreolus capreolus*)的活动。Watts 等^[38]用无人机影像来估计美国短吻鳄(*Alligator mississippiensis*)的种群数量。Christiansen 等^[39]在澳大利亚用无人机影像来测量繁殖期间 200 头座头鲸(*Megaptera novaeangliae*)的体型大小的变异。Michez 等^[40]用无人机监测数据来调查野猪(*Sus scrofa*)活动对农作物生长的影响。

(2) 鸟类:与一些体型较大的哺乳动物的研究工作相比,用无人机来监测鸟类活动还刚刚起步。Weissensteiner 等^[41]用无人机来评估鸟类的繁殖行为,并与传统的调查方法进行了比较,发现用无人机调查可以节省传统方法的所需的近 85% 的时间消耗。Hodgson 等^[42]以两个热带岛屿和一个北极岛屿为例,展示了无人机调查鸟类种群数量和行为的优势(图 4)。Rodríguez 等^[43]通过联合一个小型鸟类的飞行数据记录器和无人机监测的生境数据来分析鸟类物种分布规律。Liu 等^[44]将无人机用于濒危鸟类物种黑脸琵鹭(*Platalea minor*)的调查中。

3.3 新出版物和信息平台的出现

(1) 相关期刊:

随着科学家对无人机在生态与环境相关领域的关注,多个遥感领域的期刊都组织了专刊来展现无人机的应用前景。例如,2015 年《Remote Sensing》杂志组织的专刊“无人机遥感在植被和农作物领域的应用”共收录了 13 篇论文(《Remote Sensing》第 7 卷第 4 期);2016 年《Sensors》杂志组织的专刊“无人机在环境监测中的应用”包括了 31 篇研究论文(《Sensors》第 16 卷第 5 期)。2013 年创刊的开源杂志《Journal of Unmanned Vehicle Systems》(<http://www.nrcresearchpress.com/journal/juvs>)成为该领域发展的一个重要标志。自 2013 年秋季发表第一期文章以来,至 2016 年 11 月初为止共出版了 12 期,发表无人机相关文章 60 篇,研究内容涉及从无人机的名词用法、无人机操控的技术规范到无人机在商业、医疗、石油化工、资源管理、物种保护等方面的应用,其中直接与生态和环境科学相关的文章占近 50%(29 篇)。

(2) 相关会议和网站:

近两年来,一些无人机技术和应用相关的研讨会也相继召开,为该领域的发展起到了非常积极的作用。例如,2014 年 10 月由美国摄影测量及遥感学会(American Society for Photogrammetry and Remote Sensing)召开的第一届无人机研讨会就吸引了 530 多名参会者,随后 2015 年和 2016 年也分布召开了第二届和第三届无人机研讨会,并获得了来自科研工作者、企业家等的诸多关注(<https://uasreno.org>)。在环境研究领域,2016 年 2

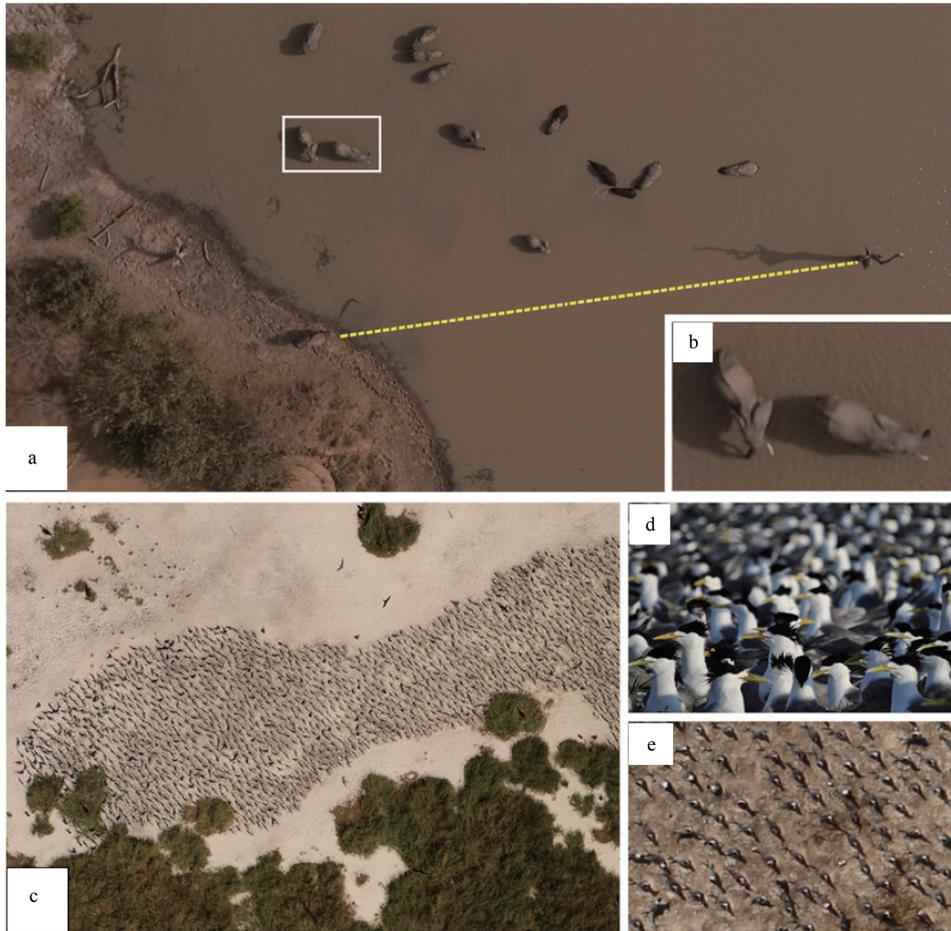


图 4 无人机用于动物监测中的例子

Fig.4 The use of drones for animal monitoring

(a) 在非洲西部获取大象种群影像图 (Vermeulen 等^[36]); (b) 是图 a 中白色区域的放大图; (c) 在澳大利亚的岛屿上拍摄繁殖期的海鸟种群的影像图 (Hodgson 等^[42]); (d) 和 (e) 是图 c 的局部放大图

月和 6 月在澳大利亚和英国分别举行了为期两天的会议来展示和讨论无人机在环境领域的应用前景 (<http://www.worcester.ac.uk/discover/uav-conference.html>), 都分别有 100 多人参加。

另外, 由 Lian-Pin Koh 和 Serge Wich 发起的网络平台 ConservationDrones.org 包括了很多生物多样性保护相关的研究案例 (<https://conservationdrones.org/>), 也包括了无人机生态学的一些相关研究论文。由生态学家 Erle Ellis 团队建立的平台 Ecosynth (<http://ecosynth.org/>) 提供了一些无人机影像的开源软件和方法, 也可以作为相关研究人员的一个有效工具^[29]。

4 无人机遥感在中国生态学中的发展现状

在我国, 无人机遥感也开始受到关注^[11]。如: 臧克等^[8]研究了无人机遥感技术在汶川地震中的应用, 利用处理后的影像对于灾情调查、灾情分析和评价, 对指导灾后应急救援发挥巨大作用。在生态学、林学和保护生物学等领域, 李宇昊和张同伟^[45]用小型无人机对黑龙江伊春地区的针叶林资源进行调查。李卫正等^[46]在南京某林场用小型无人机调查了松材线虫感染的病死木的空间分布。冯家莉等^[47]用小型无人机进行了红树林资源调查, 提取了高精度的空间分布信息。Zhang 等^[25]把小型无人机与中国森林生物多样性监测网络 (<http://www.cfbiodiv.org/>) 的鼎湖山样地的地面调查数据相结合, 分析了由无人机调查获得的森林冠层结构参数对地面植物多样性的影响 (图 3)。在动物监测方面, 马鸣等^[48]把小型多旋翼无人机用于高山兀鹫 (*Gyps*

himalayensis) 的繁殖生态学研究, 拍摄了高山兀鹫巢穴、亲鸟、幼鸟及其生长发育过程。近期由中央电视台、西北濒危动物研究所等单位组织的“2016 我们与藏羚羊”科考中, 科研人员使用固定翼无人机监测藏羚羊的迁徙过程, 获取了该迁徙种群的密度、数量和年龄结构等数据(图 5)。本次案例共飞行 14 个架次, 每个架次覆盖约 3 km², 获得覆盖范围高达 40 余 km²、分辨率达 5 cm 的高清正射影像(http://www.forestry.gov.cn/Zhuanti/content_stwm/899354.html)。

尽管无人机技术已逐渐被我国的科学家所认识, 但在现阶段相关应用还处于尚未形成规模的初级阶段。2014 年 11 月 18 日, 在国家遥感中心与中国科学院地理科学与资源研究所的共同努力下, 国家遥感中心轻小型无人机遥感应用专家工作组成立。工作组将在加强载荷传感器研发、推动行业准入制度建立、完善安全规范制定、推动轻小型无人机遥感系统综合验证场建设等方面开展工作, 这将为无人机生态学等相关领域的有序发展发挥重要作用。根据 2016 年出版的《轻小型无人机遥感发展报告》上的数据, 2015 年我国遥感应用专业级轻小型无人机已超过 3000 架, 估计未来 5 年的装备需求总量超过 30000 架^[7]。如何有效地利用这些无人机研究平台来真正地服务于生态学研究 and 生物多样性保护工作中, 还需要我们进一步地思考和探索。

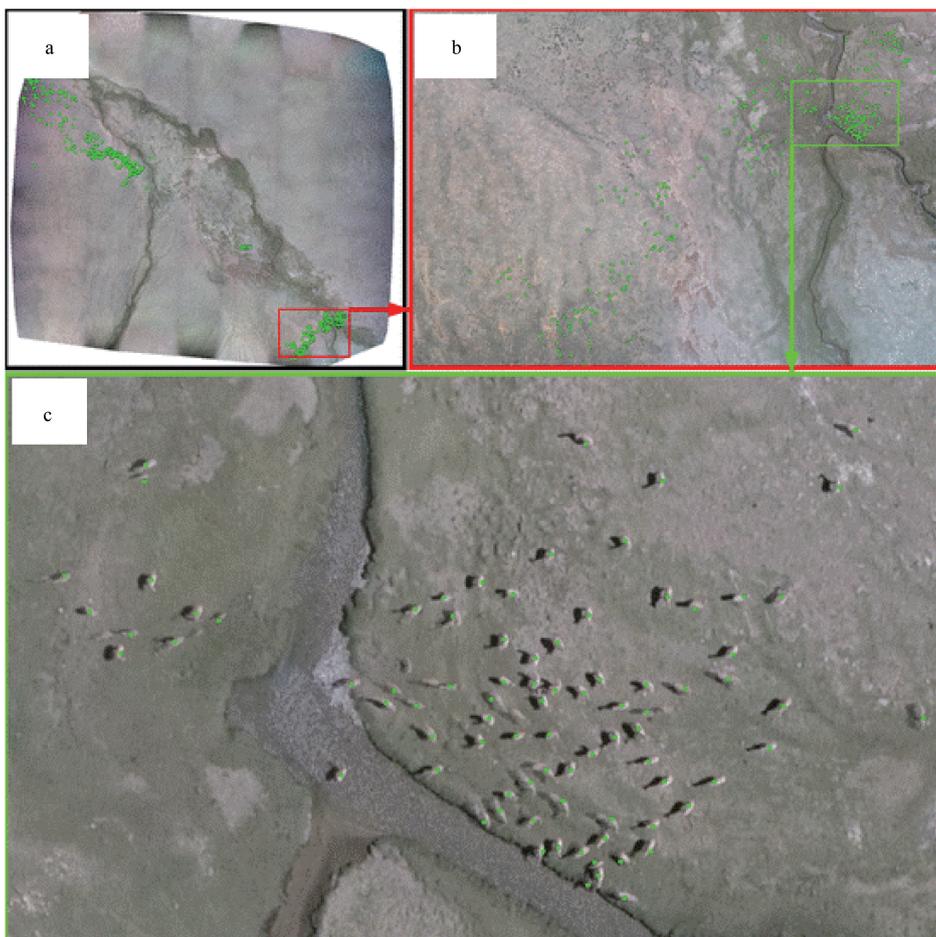


图 5 西藏羌塘国家级自然保护区中的一个飞行架次的藏羚羊无人机遥感调查案例

Fig.5 The use of drones in the population of Tibetan antelope (*Pantholops hodgsonii*) in Chang Tang Nature Reserve in Tibet

(a) 无人机拍摄的藏羚羊种群影像图; (b) 是图 a 的红色区域的放大图; (c) 是图 b 中绿色区域的放大图。图中的绿色圆点是用于藏羚羊计数的个体标识

5 存在的问题与展望

5.1 无人机数据的获取与处理对多数生态学家还存在技术上的挑战

尽管无人机遥感技术已经被生态学家所关注^[3],然而无人机的操作技术、数据收集和处理等对传统的以野外调查和控制实验为主要研究手段的生态学家都存在很多技术上的挑战。目前很多无人机在生态学里面的应用案例都是基于拍摄的照片来肉眼辨识图像中的动物或植物,这样一方面大大地影响了我们的工作效率,另一方面也限制了我们的挖掘无人机影像中的其他更丰富的数据(如:生境结构、树种组成、光谱信息等)。为解决这些障碍,生态学家已经在尝试提供简单的开源的无人机影像分析软件或方法(如:[29])或通过网络平台来提供更多详细的案例(如:ConservationDrone.org)。基于实际研究案例的无人机技术培训将会是无人机在生态学领域内的普及的重要手段。另外,生态学家也在通过与无人机遥感专家的合作来挖掘高分辨率的无人机大数据中的诸多信息(如:[25]),例如植物树冠的自动识别与勾勒、植被参数自动反演、动物个体自动识别、计数甚至体型测量等。

5.2 无人机在生态学中的应用领域还需要进一步地扩展

如上所述,无人机遥感技术已经开始应用到动植物监测、生物多样性保护等方面,然而多数研究还集中在用无人机搭载 RGB 普通数码相机为监测平台。激光雷达、多光谱与高光谱遥感技术、热红外成像仪等在无人机生态学中的应用案例还不多见,主要原因在于这些先进的遥感设备成本昂贵,而且操作和数据处理专业化能力要求较高。另外,受无人机载荷大小的限制,这些遥感设备的传统款式还难以广泛应用到无人机监测中。适合无人机平台的轻量级的遥感设备也仅仅是近几年才陆续有商业化的产品出现^[49-51]。

同时,我们也缺少与无人机数据相匹配的高精度的地面调查数据,包括详细的物种分布数据和地形、土壤等的信息。这些都限制了无人机技术在森林生态学中的应用,尤其在生物多样性高、冠层结构复杂和环境条件变异极大的亚热带和热带森林地区。以美国史密斯(Smithsonian)研究所热带森林研究中心(<http://www.forestgeo.si.edu/>)和中国森林生物多样性监测网络(<http://www.cfbiodiv.org/>)为代表的大型森林动态监测样地网络是一个可以开展无人机生态学研究理想平台。这些样地的面积大多为 20 hm² 以上,并且对样地内所有胸径 ≥ 1 cm 的木本植物进行定位、挂牌,并测量记录其胸径和生长状态等,同时也调查了非常详细的关于地形、海拔、土壤等的相关信息^[52]。通过这些详实的地面数据与无人机调查数据的结合,将进一步深化我们对生物多样性维持机制的理解。

另外,值得注意的是,无人机在长期生态学中的例子还没有报道,主要原因是无人机生态学的发展才仅仅有几年的历史^[6]。无人机监测的高时效性和高度的灵活性为长期监测各种生态系统的动态变化(包括植物物候变化、物种组成变化、自然和人类干扰等)提供了可能。随着无人机监测数据在时间和空间尺度上的积累,这些数据将为我们回答一些生态学中的重大科学问题提供重要支持^[25]。

5.3 无人机操控行业的管理规范与技术标准尚不完善

由于无人机研发、生产和使用的准入门槛相对较低,并且无人机行业还缺少有效的管理规范和技术标准,形成了无人机“满天飞”的局面。这一乱象也影响了无人机遥感领域的有序发展^[7]。目前,美国、欧洲等已经开始制定民用无人机的相关标准,但尚未形成完整的标准体系。2016年6月21日,美国联邦航空管理局发布了首部专门针对小型无人机的管理规则 Part 107(<https://www.faa.gov/uas/>),该规则对无人机操控人员、飞行时间、飞行区域、飞行高度等给出了详细的要求,这是无人机行业走向有序化发展的重要一步。在我国,有关小型无人机遥感的相关规定较少,需尽快制定相关管理规定,建立完善的无人机监管措施。

综上所述,无人机遥感以其诸多难以替代的应用优势,为生态学、保护生物学等相关学科的发展注入新的活力,其应用潜力巨大,前景十分广阔,对于传统野外调查工作量巨大且辛苦的生态学家来说,充满诱惑和吸引力。正如 Anderson 和 Gaston^[3]在他们的文章所说,轻小型无人机遥感将革新空间生态学的研究,正在成为生态学家的重要研究工具^[53]。无人机遥感技术在生态学中的应用还存在技术门槛较高和法律法规不完善等限制,但这仅仅是时间问题,在可预见的未来必将被一一克服。

参考文献 (References):

- [1] US Department of Defense. DOD dictionary of military and associated terms. 2017-02. http://www.dtic.mil/doctrine/new_pubs/dictionary.pdf.
- [2] 金伟, 葛宏立, 杜华强, 徐小军. 无人机遥感发展与应用概况. 遥感信息, 2009, 1: 88-92.
- [3] Anderson K, Gaston K J. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2013, 11(3): 138-146.
- [4] Turner W, Spector S, Gardiner N, et al. Remote sensing for biodiversity science and conservation. *Trends in Ecology & Evolution*, 2003, 18(6): 306-314.
- [5] 魏彦昌, 吴炳方, 张喜旺, 杜鑫. 生物多样性遥感研究进展. 地球科学进展, 2008, 23(9): 924-931.
- [6] Koh L P, Wich S A. Dawn of drone ecology: low-cost autonomous aerial vehicles for conservation. *Tropical Conservation Science*, 2012, 5(2): 121-132.
- [7] 廖小罕, 周成虎. 轻小型无人机遥感发展报告. 北京: 科学出版社, 2016.
- [8] 臧克, 孙永华, 李京, 闫志壮, 宫辉力, 李小娟, 赵文吉. 微型无人机遥感系统在汶川地震中的应用. 自然灾害学报, 2010, 19(3): 162-166.
- [9] Whitehead K, Hugenholtz C H. Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 1: A review of progress and challenges. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 2014, 2(3): 69-85.
- [10] Whitehead K, Hugenholtz C H, Myshak S, Brown O, LeClair A, Tamminga A, Barchyn T E, Moorman B, Eaton B. Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 2: scientific and commercial applications. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 2014, 2(3): 86-102.
- [11] 李德仁, 李明. 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, 2014, 39(5): 505-513.
- [12] Marris E. Drones in science; fly, and bring me data. *Nature*, 2013, 498(7453): 156-158.
- [13] Schiffman R. Drones flying high as new tool for field biologists. *Science*, 2014, 344(6183): 459-459.
- [14] Floreano D, Wood R J. Science, technology and the future of small autonomous drones. *Nature*, 2015, 521(7553): 460-466.
- [15] Paneque-Gálvez J, McCall M K, Napoletano B, Wich S, Koh L. Small drones for community-based forest monitoring: an assessment of their feasibility and potential in tropical areas. *Forests*, 2014, 5(6): 1481-1507.
- [16] Lefsky M A, Cohen W B, Harding D J, Parker G G, Acker S A, Gower S T. Lidar remote sensing of above-ground biomass in three biomes. *Global Ecology and Biogeography*, 2002, 11(5): 393-399.
- [17] Saatchi S S, Harris N L, Brown S, Lefsky M, Mitchard E T A, Salas W, Zutta B R, Buermann W, Lewis S L, Hagen S, Petrova S, White L, Silman M, Morel A. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(24): 9899-9904.
- [18] Zhang J, Huang S, Hogg E H, Lieffers V, Qin Y, He F. Estimating spatial variation in Alberta forest biomass from a combination of forest inventory and remote sensing data. *Biogeosciences*, 2014, 11(10): 2793-2808.
- [19] Thomas R Q, Hurtt G C, Dubayah R, Schilz M H. Using Lidar data and a height-structured ecosystem model to estimate forest carbon stocks and fluxes over mountainous terrain. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2008, 34(S2): S351-S363.
- [20] Antonarakis A S, Saatchi S S, Chazdon R L, Moorcroft P R. Using Lidar and Radar measurements to constrain predictions of forest ecosystem structure and function. *Ecological Applications*, 2011, 21(4): 1120-1137.
- [21] Macarthur R, Macarthur J W. On bird species diversity. *Ecology*, 1961, 42(3): 594-598.
- [22] Dudley R, DeVries P J. Tropical rain forest structure and the geographical distribution of gliding vertebrates. *Biotropica*, 1990, 22(4): 432-434.
- [23] Zhang J, Kissling W D, He F L. Local forest structure, climate and human disturbance determine regional distribution of boreal bird species richness in Alberta, Canada. *Journal of Biogeography*, 2013, 40(6): 1131-1142.
- [24] Barker M G, Pinard M A. Forest canopy research: sampling problems, and some solutions. *Plant Ecology*, 2001, 153(1/2): 23-38.
- [25] Zhang J, Hu J B, Lian J Y, Fan Z J, Ouyang X J, Ye W H. Seeing the forest from drones: testing the potential of lightweight drones as a tool for long-term forest monitoring. *Biological Conservation*, 2016, 198: 60-69.
- [26] 陈效速, 王林海. 遥感物候学研究进展. 地理科学进展, 2009, 28(1): 33-40.
- [27] Walther G, Post E, Convey P, Menzel A, Parmesan C, Beebee T J C, Fromentin J M, Hoegh-Guldberg O, Bairlein F. Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 2002, 416(6879): 389-395.
- [28] 范德芹, 赵学胜, 朱文泉, 郑周涛. 植物物候遥感监测精度影响因素研究综述. 地理科学进展, 2016, 35(3): 304-319.
- [29] Dandois J P, Ellis E C. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. *Remote Sensing of*

- Environment, 2013, 136: 259-276.
- [30] Berra E F, Gaulton R, Barr S. Use of a digital camera onboard a UAV to monitor spring phenology at individual tree level. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Beijing: IEEE, 2016: 3496-3499.
- [31] Inoue T, Nagai S, Yamashita S, Fadaei H, Ishii R, Okabe K, Taki H, Honda Y, Kajiwarra K, Suzuki R. Unmanned aerial survey of fallen trees in a deciduous broadleaved forest in eastern Japan. PLoS One, 2014, 9(10): e109881.
- [32] Getzin S, Wiegand K, Schöning I. Assessing biodiversity in forests using very high-resolution images and unmanned aerial vehicles. Methods in Ecology and Evolution, 2012, 3(2): 397-404.
- [33] Messinger M, Asner G, Silman M. Rapid assessments of Amazon forest structure and biomass using small Unmanned Aerial Systems. Remote Sensing, 2016, 8(8): 615-615.
- [34] Chabot D, Bird D M. Wildlife research and management methods in the 21st century: where do unmanned aircraft fit in. Journal of Unmanned Vehicle Systems, 2015, 3(4): 137-155.
- [35] Christie K S, Gilbert S L, Brown C L, Hatfield M, Hanson L. Unmanned aircraft systems in wildlife research: current and future applications of a transformative technology. Frontiers in Ecology and the Environment, 2016, 14(5): 241-251.
- [36] Vermeulen C, Lejeune P, Lisein J, Sawadogo P, Bouché P. Unmanned aerial survey of elephants. PLoS One, 2013, 8(2): e54700.
- [37] Israel M. A UAV-based roe deer fawn detection system. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Zurich, Switzerland: 2011.
- [38] Watts A, Perry J H, Smith S E, Burgess M A, Wilkinson B E, Szantoi Z, Ifju P G, Percival H F. Small Unmanned Aircraft systems for low-altitude aerial surveys. The Journal of Wildlife Management, 2010, 74(7): 1614-1619.
- [39] Christiansen F, Dujon A M, Sprogis K R, Arnould J P Y, Bejder L. Noninvasive unmanned aerial vehicle provides estimates of the energetic cost of reproduction in humpback whales. Ecosphere, 2016, 7(10): e01468.
- [40] Michez A, Morelle K, Lehaire F, Widar J, Authélet M, Vermeulen C, Lejeune P. Corrigendum: use of unmanned aerial system to assess wildlife (*Sus scrofa*) damage to crops (*Zea mays*). Journal of Unmanned Vehicle Systems, 2017, doi: 10.1139/juvs-2016-0038.
- [41] Weissensteiner M H, Poelstra J W, Wolf J B W. Low-budget ready-to-fly unmanned aerial vehicles: an effective tool for evaluating the nesting status of canopy-breeding bird species. Journal of Avian Biology, 2015, 46(4): 425-430.
- [42] Hodgson J C, Baylis S M, Mott R, Herrod A, Clarke R H. Precision wildlife monitoring using unmanned aerial vehicles. Scientific Reports, 2016, 6: 22574.
- [43] Rodríguez A, Negro J J, Mulero M, Rodríguez C, Hernández-Pliego J, Bustamante J. The eye in the sky: combined use of unmanned aerial systems and GPS data loggers for ecological research and conservation of small birds. PLoS One, 2012, 7(12): e50336.
- [44] Liu C C, Chen Y H, Wen H L. Supporting the annual international black-faced spoonbill census with a low-cost unmanned aerial vehicle. Ecological Informatics, 2015, 30: 170-178.
- [45] 李宇昊, 张同伟. 厘米级遥感影像用于伊春地区次生林空间结构调查. 东北林业大学学报, 2013, 41(8): 139-143.
- [46] 李卫正, 申世广, 何鹏, 郝德君, 方彦, 陶珑, 张水锋. 低成本小型无人机遥感定位病死木方法. 林业科技开发, 2014, 28(6): 102-106.
- [47] 冯家莉, 刘凯, 朱远辉, 李勇, 柳林, 蒙琳. 无人机遥感在红树林资源调查中的应用. 热带地理, 2015, 35(1): 35-42.
- [48] 马鸣, 庭州, 徐国华, 道·才吾加甫, 艾孜江·买买提明, 邢睿, 罗彪, 吴道宁. 利用多旋翼微型飞行器监测天山地区高山兀鹫繁殖简报. 动物学杂志, 2015, 50(2): 306-310.
- [49] Lin Y, Hyyppä J, Jaakkola A. Mini-UAV-Borne LIDAR for fine-scale mapping. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(3): 426-430.
- [50] Wallace L, Lucieer A, Watson C, Turner D. Development of a UAV-LiDAR system with application to forest inventory. Remote Sensing, 2012, 4(12): 1519-1543.
- [51] Crutsinger G M, Short J, Sollenberger R. The future of UAVs in ecology: an insider perspective from the Silicon Valley drone industry. Journal of Unmanned Vehicle Systems, 2016, 4(3): 161-168.
- [52] 马克平. 中国森林生物多样性监测网络十年发展. 科学通报, 2014, 59(24): 2331-2332.
- [53] Turner W. Sensing biodiversity. Science, 2014, 346(6207): 301-302.