•综述•

无人机和地面相结合的自然保护地 生物多样性监测技术与实践

刘方正^{1,2} 杜金鸿^{1,2} 周 越^{1,2} 黄志旁³ 李延鹏³ 王 伟^{1,2*} 肖 文³

1 (中国环境科学研究院, 北京 100012)

2 (国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 北京 100012)

3 (大理大学东喜玛拉雅研究院, 云南大理 671003)

摘要: 无人机技术的运用为自然保护地生物多样性监测与研究带来了新的机遇和变革。然而, 对自然保护地主要保护对象的关注不足, 导致了无人机和地面相结合的监测技术尚未形成。为更好地发挥多种调查监测技术的各自优势, 为自然保护地生物多样性管护和监测提供支撑, 我们总结了国内外已开展的无人机和地面相结合的监测工作进展, 梳理了我国不同类型自然保护地生物多样性保护管理和监测的需求。总的来看, 不同类型自然保护地的主要保护对象围绕在生态系统、物种、遗址遗迹等或由上述要素构成的景观资源上; 管理目标定位则集中在保护、恢复、科研、宣教、游憩和可持续发展等方面。基于上述需求, 我们归纳提出了包括图像识别与分类解译、数据反演与格局分析、数字建模与地表测量、巡护巡检4个类别共计14个专题的无人机和地面相结合的监测技术方案, 明确了监测时期与频次、监测指标、监测技术的结合途径以及数据后处理方法等。同时, 我们在三江并流世界遗产地云岭片区内选择植物识别、植被长势、景观格局、地表测量以及执法检查等技术专题开展了应用试验。在技术方案取得良好验证结果的同时, 实现了对自然保护地生物多样性保护和管理的技术支撑, 为未来自然保护地精细化管理提供了技术储备。

关键词: 自然保护地; 生物多样性; 无人机; 调查监测; 一体化

Monitoring technology and practice on protected area biodiversity by integrating unmanned aerial vehicle (UAV) and ground approaches

Fangzheng Liu^{1,2}, Jinhong Du^{1,2}, Yue Zhou^{1,2}, Zhipang Huang³, Yanpeng Li³, Wei Wang^{1,2*}, Wen Xiao³

1 Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

2 National Environment Protection Library of Regional Ecosystem Structure and Services Evaluation, Beijing 100012

3 Institute of Eastern-Himalaya Biodiversity Research, Dali, Yunnan 671003

Abstract: The application of UAV technology brings new opportunities and revolutions to the monitoring and research on biodiversity in protected area. However, we find that no monitoring technology solutions combining UAV and ground approaches have been formed yet, due to the lack of concerns on protected objects. Considering to better perform various monitoring technology strengths and to effectively support management and monitoring in protected area, we review study cases on UAV and ground investigation domestic and overseas firstly, and then compare the demands from conservation, management and monitoring of all kinds protected area in China. In general, the ecosystems, species, site relics and landscape are regarded as protected objects in all kinds of protected area. Meanwhile, conservation, recovering, study, education, recreation, and sustainable development become the management goals. Based on the demands mentioned above, we present an integrated technology solution which composed of four categories and 14 subjects for UAV and ground to monitor biodiversity coherently. This solution includes image recognition and classification, data inversion and pattern analysis, digital modeling and surface measuring, patrolling and inspection. In addition, monitoring time and frequency, index, integration approach, data postprocessing can be acquired in

收稿日期: 2018-02-09; 接受日期: 2018-07-10

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0503304)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: wang.wei@craes.org.cn

the solution. Furthermore, monitoring subjects were chosen to apply and test in the Three Parallel Rivers World Heritage, such as plant identification, vegetation growth, landscape pattern, surface measuring, and law enforcement. While achieving good results on the solution verification, we hope that this monitoring solution will do significant help to improve the protected area biodiversity conservation and management level, also be part of technological storage in assessment and supervision.

Key words: protected area; biodiversity; UAV; investigation and monitoring; integrating

生物多样性的变化与监测是生物多样性科学的热点问题之一(马克平, 2016), 也是自然保护地保护管理的核心工作之一(权佳等, 2010)。放眼全球, 各国政府及国际组织纷纷探索研究生物多样性的有效监测途径和技术方法, 以应对来自气候变化、人类活动、生物入侵等方面的巨大压力和严峻挑战(马克平, 2014; 郭庆华等, 2016; 马克平, 2016; Pecl, 2017), 发达国家已将生物多样性调查监测视为国土战略安全级别予以考虑和部署(方精云等, 2009)。我国政府高度重视生物多样性保护工作, 近年来通过深入实施《中国生物多样性保护战略与行动计划》和《联合国生物多样性十年中国行动方案》, 生物多样性保护取得积极进展(http://www.zhb.gov.cn/home/ztbd/rdzl/sdwyh/tpxw/201502/t20150212_295812.shtml)。在监测体系和网络建设方面, 已建立了中国森林生物多样性监测网络(CForBio, <http://www.cfbi-div.org/>)、国家生态系统观测研究网络(CNERN, <http://www.cnern.org/>)等平台, 为生物多样性的监测和研究提供了理想平台, 回答了一系列生物多样性变化的科学问题(米湘成等, 2016), 促使监测在生物多样性保护成效评估中的重要作用得到了进一步确认(马克平, 2011)。

建立自然保护地是保护生物多样性的有效手段, 也是开展生物多样性监测的主战场。当前, 传统的自然保护地生物多样性监测工作已经形成了较为齐备的技术体系和操作规范。国家林业局发布了《自然保护区生物多样性调查规范》(LY/T 1814-2009)对生态系统多样性和物种多样性的调查内容和调查方法等做出了规定。根据被观测对象的不同, 环境保护部发布了包括陆生维管植物在内的 13 项生物多样性观测技术导则系列标准(<http://kjs.mep.gov.cn/hjbhbz/bzwb/stzl/>), 详细规定了观测调查的技术要求等。然而, 传统调查监测技术往往需要投入大量的人力、物力和时间(郭志华等, 2003; 傅文杰等, 2006; 孙银良等, 2014; 吕爱锋等,

2014)。因此, 生物多样性的调查监测效率、频次以及成果发布很大程度上受制于成本和人员能力的局限(Gotelli & Colwell, 2001; Graham & Hijmans, 2006; 胡海德等, 2012)。

随着技术手段的不断创新, 生物多样性监测能力也逐渐提高。从纸质调查记录表到手持信息采集终端, 从地面样线样方到高空卫星遥感, 从冬季踏雪寻迹到GPS跟踪项圈, 生态学家获得调查监测数据的途径、数据内容、时效性和经济性等都得到了优化和提升。其中, 遥感技术特别是小型轻量级无人机低空遥感技术, 能够在任意时间内收集足够精细空间分辨率的影像和空间数据, 具有影像获取速度快、应用周期短、清晰度高、受自然环境约束小、运行和维护成本低等特点(郭庆华等, 2016; 胡健波和张健, 2018), 在生态环境探测、航摄测绘、生境预测与变化分析等方面发挥着越来越重要的作用, 为生物多样性调查监测提供了全新的视角和方案(Chabot & Bird, 2015; 马克平, 2016), 被认为在生态学空间研究领域具有变革作用(Anderson & Gaston, 2013; Turner, 2014)。

然而, 从目前的研究和应用来看, 无人机和地面相结合的监测技术方案尚未形成, 对自然保护地主要保护对象的关注不足, 未能发挥有效的管护和监测作用。多种调查监测途径之间在技术集成、信息交互、分析处理等方面少有互动, 对多源调查监测数据的管理和处理的关键方法有待进一步突破。为此, 本文介绍了国内外已开展的无人机和地面相结合的监测工作进展, 梳理了我国不同类型自然保护地生物多样性保护管理和监测的需求, 并在此基础上归纳提出了包括4个类别14个专题的无人机和地面相结合的监测技术方案; 通过在三江并流世界遗产地开展的技术验证, 实现对自然保护地生物多样性保护和管理的技术支撑, 为未来自然保护地精细化、一体化管理提供技术储备。

1 无人机和地面相结合的生物多样性监测研究进展

1.1 植物识别与分类

结合地面实测数据, 无人机凭借其极高的空间分辨率和光谱分辨率, 可以实现对特定植物物种的识别与分类。Holmgren和Åsa等(2004)借助机载激光雷达和地面实测数据, 在瑞典一处森林内识别并区分出了挪威云杉(*Picea abies*)和苏格兰松(*Pinus sylvestris*)。杨龙等(2016)通过冠层轮廓、纹理、颜色等信息以及目标个体的GPS实地位置, 成功分辨出16种亚热带物种。Garzon-Lopez等(2013)的实验指出, 无人机对主要树种的调查结果与地面调查无异。目前已有文献对红树林、针叶林、湿地植物群落等成功分类的报道(Holmgren & Åsa, 2004; Husson et al, 2014; Zweig et al, 2015; 冯家莉等, 2015)。上述技术的实现可以将植被分类能力推进到群丛水平, 为自然保护地等小区域尺度植被保护和规划管理提供有效支撑。

1.2 动物调查监测

陆生动物的地面调查监测技术较为成熟, 对动物行为的丰富经验和知识也为指导无人机监测提供了有效保障, 两者的结合运用在陆生动物调查监测领域取得了较多的成功实践。Christie等(2016)的测试结果表明, 相同面积针对同一物种的调查结果而言, 无人机调查在经济成本和人力成本上是普通地面调查的50%, 而物种的发现率则是地面调查的20倍以上。调查监测对象代表有非洲象(*Loxodonta africana*)、考拉(*Phascolarctos cinereus*)、豹(*Capreolus pygargus*)、藏野驴(*Equus kiang*)等, 监测指标主要包括种群数量、个体年龄、栖息地范围、迁徙路线等(Israel, 2011; Vermeulen et al, 2013; Gonzalez et al, 2016; 罗巍等, 2017)。

水生动物的分布、活动、丰富度和健康状况是较难调查获得的(Christie et al, 2016)。根据已有的座头鲸(*Megaptera novaeangliae*)监测数据和行为习性, Christiansen等(2016)在澳大利亚海域对200头繁殖期座头鲸的身体表面积进行了无人机航空测量, 结合监测数据在有关模型下的分析, 探究了不同成熟阶段座头鲸个体在繁殖季节的能量消耗。类似地, 包括抹香鲸(*Physeter macrocephalus*)、虎鲸(*Orcinus orca*)、弓头鲸(*Balaena mysticetus*)以及儒艮(*Dugong*)

等水生动物的调查监测也有文献报道(Koski et al, 2009; Hodgson et al, 2013; NOAA, 2014; Durban et al, 2015)。

1.3 生态系统调查监测

用无人机开展生态系统调查监测需有地面训练样本和验证样本支持(何游云等, 2016), 以确保调查监测结果的准确性和可靠性。森林生态系统调查监测中的树木形态参数、株数密度、蓄积量、林冠格局等指标, 以及森林灾情防控、森林健康评估等都可以通过无人机和地面相结合的途径实现(李祥等, 2017; Chiara et al, 2017), 还可借助激光雷达和地面调查数据进一步实现对森林群落垂直结构的模型构建与分析(Luke et al, 2012; 郭庆华等, 2016)。草原草甸生态系统调查监测中, 可以借助无人机实现生物量估算、牧草产量评估、长势预测、面积汇总、生态安全评估等(李风贤, 2017; Wang et al, 2017)。湿地和水域生态系统调查监测中, 目前较为关注的是外来入侵植物的识别与防控(Wan et al, 2014)。

2 无人机和地面相结合的自然保护地生物多样性监测技术方案

我国已建立了自然保护区、风景名胜区、国家公园(体制试点)等10余种不同类型且数量庞大的自然保护地(彭杨靖等, 2018; 李俊生等, 2018)。总的来看, 不同类型自然保护地的主要保护对象围绕在生态系统、物种、遗址遗迹等或由其构成的景观资源上; 管理目标定位则集中在保护、恢复、科研、宣教、游憩和可持续发展等方面。基于对自然保护地保护对象和管理目标定位的梳理, 结合目前文献资料报道和实地调研情况, 并进一步参考有关学者(唐小平和荣晓峰, 2017; 彭杨靖等, 2018)提出的当前我国自然保护地类型现状, 梳理了各类自然保护地生物多样性监测需求(表1)。

传统的地面调查在上述各类自然保护地生物多样性的监测工作中发挥了重要作用。但是受限于人力、物力、时间等, 在监测深度、角度和频次上难以突破; 而脱离地面调查数据的训练和验证, 无人机低空遥感难以发挥精准的分类、识别、建模等功能。为此, 我们以提高自然保护地精细化管理能力为出发点, 从自然保护地生物多样性监测需求角度出发, 构建了包括4个技术类别14个技术专题的

表1 不同类型自然保护区生物多样性监测需求
Table 1 Biodiversity monitoring demands of different protected area types

自然保护区类型 Protected area type	主要保护对象 Primary protected object	管理目标定位 Management target	生物多样性监测需求 Biodiversity monitoring demands
自然保护区 Nature reserves	森林、草原与草甸、荒漠、内陆湿地和水域、海洋和海岸、野生动物、野生植物、地质遗迹、古生物遗迹等 Forest, steppe and meadow, desert, inland wetland and water area, marine and coastal, wild animals, wild plants, geological formations, and ancient organisms remains	予以特殊保护和管理, 兼顾发挥科学研究、宣传教育、社区共管、旅游休憩等功能 To be protected and managed specially, and play the functions such as scientific research, public education, community management, and tourism	(1) 生态系统方面, 包括对生态系统类型、植被类型、植被长势、垂直结构、水平格局等进行监测。 (2) 保护物种方面, 包括对物种的识别分类、位置分布、活动范围、数量密度、外来入侵种等进行监测。
风景名胜區 Scenic and historical area	历史圣地、山岳、岩洞、江河、湖泊、海滨海岛、特殊地貌、城市风景、生物景观、壁画石窟、纪念地、陵寝、民俗风情、其他 Historical holy land, mountains, caves, rivers, lakes, coastal islands, special physiognomy, urban landscape, biological landscape, mural grottoes, memorial sites, tombs, folk customs, and others	保护珍贵的风景名胜资源为主, 并供公众游览、休息或进行科学、文化活动等 To mainly protect precious scenic spots and resources, and play the functions such as visiting, resting, and scientific cultural activities	(3) 景观与遗址遗迹方面, 包括对地貌景观、水土流失、地质灾害等进行数字建模和变化监测。 (4) 资源管护方面, 包括对火灾防控、病虫害防控、非法进入监管、偷盗偷猎检查等。
国家公园(体制试点) Nation park (system pilot)	具有国家代表性的大面积自然生态系统 A large area of natural ecosystem with national characteristics	实现自然资源科学保护和合理利用 To realize scientific conservation and rational utilization of natural resources	(1) In terms of monitoring ecosystem, it includes items such as ecosystem type, vegetation type, vegetation growth, vertical structure, and horizontal pattern. (2) In terms of monitoring species, it includes items such as identification, classification, distribution, range, quantity, density, and invasive species.
森林公园 Forest park	森林景观 Forest landscape	森林旅游、科普教育、科学研究 To perform forest tourism, education, and research	(3) In terms of monitoring geological landscape and site relics, it includes items such as digital modeling and change monitoring for landform, soil erosion and geological disasters.
湿地公园 Wetland park	湿地景观 Wetland landscape	开展保护、恢复、宣传、教育、科研、监测、生态旅游等 To perform conservation, rehabilitation, publicity, education, research, monitoring, and eco-tourism	(4) In terms of resources management, it includes items such as fire prevention, pest control, illegal entry supervision, theft and poaching inspection.
地质公园 Geopark	地质遗迹景观 Geological relic landscape	地质遗迹保存、科学研究、教育和旅游 To perform geological heritage preservation, scientific research, education, and tourism	
海洋公园 Marine park	海洋生态景观、独特地质地貌景观及其周边海域 Marine ecological landscape, unique geological and geomorphologic landscape and its surrounding waters	促进人与海洋自然生态环境的和谐发展 To promote the harmonious development of human and marine	
沙漠公园(试点) Desert park (pilot)	沙漠景观 Desert landscape	旅游休闲、科学研究、宣传教育 To perform tourism leisure, scientific research, and public education	
矿山公园 Mine park	矿业遗迹景观 Mining relic landscape	游览观赏、科学考察、科普教育 To perform sightseeing, investigation, and public education	
种质资源保护区 Germplasm resource reserve	水产种质资源及其生存环境, 畜禽及其遗传材料和原产地 Aquaculture germplasm resources and environment. Livestock and poultry germplasm resources and origin	永续利用较高经济价值和遗传育种价值的种质资源 Sustainable utilization of high economic value and genetic breeding value of germplasm resources	
沙化土地封禁保护区 Sandy land restrict area	连片沙化土地分布区 A series of sandy land distribution areas	杜绝人为因素、维护地表原始状态、促进生态自然修复等 To eliminate human factors, maintain original state of the land surface, and promote ecological and natural restoration	
水利风景区 Water conservancy scenic area	水域风景资源 Water landscape resources	开展观光、娱乐、休闲、度假或科学、文化、教育活动 To perform sightseeing, entertainment, leisure, vacation, and scientific cultural and educational activities	

表2 无人机和地面相结合的自然保护地生物多样性监测技术方案

Table 2 The technology solution for protected area biodiversity monitoring by integrating unmanned aerial vehicle (UAV) and ground approaches

技术类别与需求 Technology categories and monitoring demands	技术专题 Subjects	时期与频次 Time and frequency	监测指标 Monitoring index	监测技术的结合途径 Integration approach for monitoring technologies	数据后处理 Data postprocessing	
图像识别与分类解释 Image recognition and classification 掌握主要保护对象的位置分布、活动范围、数量密度等现状, 对生物入侵、野生动植物资源管理提供支撑。满足物种保护和监测需求。 To master the current situation of protected objects, such as location, distribution, quantity, density and so on. To support management on wildlife and bio-invasion. To meet the monitoring demand of species conservation.	植物识别 Plant identification	不同植物的生长季、凋落季、开花季等多时相配合 Growth, fall, and bloom season	物种名称、分布范围、面积、边界、数量或密度 Species, distribution, area, boundary, quantity and density	实地采集目标植物的光谱、纹理、群落、生境等信息, 使用无人机正射拍摄或倾斜拍摄 Collecting data of spectrum, texture, community and habitat of objective plants in field. Using UAV orthophotography or inclined shooting technology	实测数据构建训练样本, 实现对无人机数据的识别、解译和验证, 通常通过图像处理软件增强目标对象环境的对比差异, 并借助面向对象的分类方法实现计算机自动提取 Measured data is used to construct the training sample, and complete identification, interpretation, and validation for UAV data. Image processing software is used to enhance the contrast between target and environment, so that the computer could automatically extract features by means of object oriented classification	
	外来物种监控 Alien species control	同上 Ditto	同上 Ditto	同上 Ditto		
	植被分类 Vegetation classification	同上 Ditto	同上 Ditto	同上, 并结合已有的植被调查和分类成果 Ditto, and integrating vegetation investigation or classification data		
	野生动植物监测 Wild animals monitoring	迁徙、筑巢、繁殖等时期 Migration, nesting, and reproduction period	物种名称、活动范围、体长、行为 Species, distribution, body length, and behavior	实地勘察目标动物的行为习性、活动痕迹、栖息地情况等, 使用无人机正射拍摄、热红外拍摄、视频录制等 Observing objective animals' behavior, activity traces and habitat condition with UAV orthophotography, thermal infrared images, video recording		
数据反演与格局分析 Data inversion and pattern analysis 掌握主要保护对象的质量状况, 对生态系统的结构、过程和功能进行评估, 识别重点关注区域, 开展针对性的管护。满足对生态系统监测方面的需求。 To master the health condition of protected objects. To assess items of ecosystem such as structure, process, and function. To figure out the areas need to be focused and inputting specific measures. To meet the monitoring demand of ecosystem.	植被长势 Vegetation growth	生长季或雨季等, 1次/年 Growth or rainy season, once a year	生物量、叶面积指数、植被层高度 Biomass, leaf area index, and vegetation height	实测样方内植被高度、胸径、灌草生物量等, 使用无人机正射拍摄并建立DEM ¹ 、DSM ² 、CHM ³ 等 Measuring height, DBH, biomass data in samples. Using UAV orthophotography to build DEM ¹ , DSM ² , CHM ³	实测数据同无人机数据一同参与反演模型的构建, 同时提供精度检验 To construct inversion model using field investigation data and UAV data, and the accuracy test is provided available	
	物候季相 Phenology and seasonal aspect	特定物候关注期 Specific phenological period	温度、降水、日照时长、萌芽、开花、结果等 Temperature, precipitation, sunshine duration, bud, bloom, fruit, and so on	结合物候观测记录、气象数据、植被分类成果等, 使用无人机正射或倾斜拍摄 Integrating phenological observation, climate, and vegetation data with UAV orthophotography or inclined shooting		
	景观格局 Landscape pattern	生长季、凋落季、湿地枯水期, 1次/年 Growth, fall or dry season, once a year	景观类型、面积、周长、连通性、破碎程度等 Landscape type, area, perimeter, connectivity, and fragmentation	实地采集解译训练样本, 结合土地利用数据, 使用无人机正射拍摄 Collecting training samples, land use data with UAV orthophotography	已有的实测数据还可作为格局现状和变化监测以及趋势预测提供支撑 The existing measured data can support the monitoring of current pattern and change situation, and predicting the trend in future	
	森林结构 Forest structure	按需 According to demand	树种组成、高度、胸径、蓄积量 Species, height, diameter at breast height, and volume	实地开展森林群落调查, 获取乔灌木物种组成、密度、盖度、高度等数据, 使用无人机进行激光扫描 Investigating forestry composition, density, coverage, and height, with UAV laser scanning		
	鼠洞地穴 Mousehole	同上 Ditto	位置、数量、空间分布情况 Location, quantity, and spatial distribution	实地调查鼠洞地穴的面积、周长、形状等信息, 使用无人机正射拍摄并建立DEM Investigating caves areas, perimeter, and shape, with UAV orthophotography and building DEM		

表 2 (续) Table 2 (continued)

技术类别与需求 Technology categories and monitoring demands	技术专题 Subjects	时期与频次 Time and frequency	监测指标 Monitoring index	监测技术的结合途径 Integration approach for monitoring technologies	数据后处理 Data postprocessing	
数字建模与地表测量 Digital modeling and surface measuring 提供可视化的地理数据模型，对地貌变化进行监测，评估水土流失、地质灾害和生态修复等。满足对地质景观与遗址遗迹的保护监测需求。 To provide geographical digital models in visualized ways. To monitor landform. To assess water and soil erosion, geologic hazard, and ecological restoration effectiveness. To meet the demand of geo-protection and monitoring of geological landscape and site relics.	数字建模 Digital modeling	按需 According to demand	地表土方变化量、山体沟壑位移量等 Earthwork change, massif or ravine displacement	倾斜摄影或激光扫描 Inclined shooting or laser scanning	实测数据为无人机数据提供精准的定位和校正信息 The measured data provide accurate positioning and calibration information for UAV data	
	地表测量 Surface measuring	同上 Ditto	高程、地物等 Elevation, surface features	架设全站仪开展实地测绘，结合地形图等已有数据，使用无人机正射拍摄、倾斜摄影或激光扫描 Surveying and mapping by total station, topographic maps, with UAV orthophotography, inclined shooting and laser scanning		
巡护巡检 Patrolling and inspection 提高自然保护区巡护和执法效力，确保重要自然资源和功能区的生态安全。 To improve patrolling and inspection efficacy. To ensure the safety of natural resources and key functional zones.	火情监控 Fire control	防火期或火情发生期 Prevention or occurrence period	灾情发生位置、面积、强度、时间、原因 Location, area, intensity, duration, and cause	现场巡逻、地面瞭望、视频监控、热红外传感、视频传输 Patrolling, outlooking and monitoring cameras, with UAV thermal infrared sensing, video transmission	地面调查巡逻记录同无人机相互配合，提前发现或及时处置存在的火情、病情和违法活动 The patrol recording and UAV data combining each other to find and dispose fire, disease and illegal activities	
	病虫害监测 Diseases and pest monitoring	病虫害预警或发生期 Prevention or occurrence period	同上 Ditto	现场巡护记录，使用无人机对疫病区正射拍摄 Patrolling and recording, with UAV orthophotography for disease area		
	执法检查 Law enforcement	按需 According to demand	对违规建设定位并测量 Location and measurement	现场巡逻走访、执法取证，使用无人机拍摄、视频录制、目标定位与测量 Patrolling and law enforcement, with UAV photo shooting, video recording, target location and measuring		

1. DEM指数字高程模型; 2. DSM指数字表面模型; 3. CHM指冠层高度模型。

1. DEM means Digital Elevation Model; 2. DSM means Digital Surface Model; 3. CHM means Canopy Height Model.

无人机和地面相结合的自然保护地生物多样性监测技术方案(表2), 明确了监测时期与频次、监测指标、监测技术的结合途径以及数据后处理方法等。14个技术专题既相互独立, 又互为支撑, 既可按照专题开展单项监测, 也可以根据实际需求选择技术专题进行有针对性的监测。

2.1 图像识别与分类解译

图像识别与分类解译技术类别包括了植物识别、外来物种监控、植被分类和野生动物监测4个技术专题。通过这一技术类别的运用, 使自然保护地管理者掌握了主要保护对象的位置分布、活动范围、数量密度等现状, 在生物入侵防控、野生动植物资源管理等方面发挥支撑作用, 满足自然保护地物种保护和监测方面的需求。

在进行植物识别时, 可利用不同植物生长、凋落、开花等表观特征的不同, 增强识别的差异, 同时经过实地光谱、纹理、群落、生境等信息的采集, 结合无人机正射拍摄或倾斜拍摄, 实现解译识别。如井然等(2016)使用上述技术实现了对典型湿地水生植物的快速高精度识别。

对于外来物种监控, 可基于植物识别的技术思路, 进一步扩大针对外来物种和周边环境的训练样本数据量采集, 增强影像差异, 实现外来物种范围界限的监控。具体技术操作可参考李晓敏等(2017)通过实地调查后对互花米草(*Spartina alterniflora*)无人机影像的差异增强处理工作。

类似地, 在进行植被分类时, 进一步结合已有的植被调查数据和分类成果, 利用地形、土壤、水分、种间关系、群落结构等现场调查数据, 通过无人机低空遥感拍摄, 可以实现群丛水平的植被分类。例如冯家莉等(2015)通过这一技术方法, 完成了对桐花树(*Aegiceras corniculata*)、木榄(*Bruguiera gymnorhiza*)和红海榄(*Rhizophora stylosa*)群丛的分类与制图。

对于野生动物监测而言, 通常需要在大致知晓该动物分布位置的情况下, 掌握其行为习性和栖息地状况, 通过无人机热红外拍摄、正射拍摄或视频录像等, 实现对野生动物种类、数量、种群结构、繁殖迁徙等项目的监测。Gonzalez等(2016)基于对考拉生活习性的调查, 采用上述技术方法, 选择无人机热红外成像传感器发现并识别了树冠层内栖息的考拉个体。

综上, 对于图像识别与分类解译技术类别的实现, 在地面调查技术上, 需要较为详实的地物点位信息、植被调查数据、光谱反射数据、动物痕迹等, 以便建立解译数据库和验证数据库; 在无人机调查技术上, 通常以高分辨率传感器的正射拍摄为主, 飞行高度在100–300 m左右, 对地观测像元分辨率在5 cm左右; 在数据后处理技术上, 以图像拼接、目视解译或机器识别为主, 同时可基于多时相光谱信息差异, 实现动态监测和变化跟踪。

对于图像识别与分类解译技术类别而言, 无人机和地面监测的结合突破了传统单一空间维度的监测数据采集渠道, 同时两者的配合又进一步弥补了彼此的信息盲区。借助无人机和地面相结合的监测技术, 可使图像识别与分类解译的信息来源、数量和质量等明显提升, 并在训练样本的建立、机器学习的效率、识别和解译的准确度等关键环节发挥重要作用。

2.2 数据反演与格局分析

数据反演与格局分析技术类别包括了植被长势、物候季相、景观格局、森林结构、鼠洞地穴5个技术专题。通过这一技术类别的运用, 使自然保护地管理者掌握主要保护对象的质量状况, 可在评估生态系统的结构、过程和功能, 识别重点关注区域等方面发挥作用, 满足自然保护地生态系统方面的主要监测需求, 并指导开展重点区域的针对性、精细化的管护工作。

对于植被长势监测, 需要构建训练样方并实地采集样本数据, 如植被高度、胸径、生物量等, 通过实测数据和无人机数据相关关系的构建, 反演计算获得生物量、叶面积等表征植被长势的指标。何游云等(2016)和葛静等(2017)对单木树干生物量和草地盖度与长势的反演工作中体现了上述方法的运用。

在物候季相监测时, 需要采集温度、降水、日照时长等环境数据, 同时利用无人机观测植物萌芽、开花、结果、枯萎等现象, 将实测数据和无人机数据进行关联, 实现更加精准的物候季相监测或预测数据。

对于景观格局监测, 关注植被盖度、林窗、林冠、生境异质性、连通性和隔离性等(Getzin et al, 2012), 可为评估生态系统演变趋势提供基础。结合土地利用数据、植被分类数据等, 对无人机数据使用景观生态学分析方法, 掌握景观格局变化发展的

趋势和原因。例如Dunford等(2009)和隋丹丹等(2017)在林冠层和林窗景观变化的研究中便采用了这一技术方法。

森林结构监测方面,在调查获知乔灌木物种组成、密度、盖度、高度等真实数据后,使用无人机搭载激光雷达传感器进行扫描,获得的密度点云数据可精准重建森林三维结构,其准确性可与林木实地调查相当(Panagiotidis et al, 2016)。

在鼠洞地穴监测时,需要实地掌握鼠洞地穴的面积、周长等形状信息,建立无人机影像解译标志后,可通过计算机自动提取。马涛等(2018)便将这一技术运用到大沙鼠(*Rhombomys opimus*)的巢穴调查中,实现了鼠洞的自动提取和监测。

总的来看,在数据反演与格局分析中,从地面调查技术上,以样方、样线、样地为代表的抽样调查手段为主,参与无人机低空遥感反演的建模和验证;从无人机调查技术上,以正射拍摄为主,传感器可选择多光谱或高光谱相机以增强观测时的光谱分辨率,飞行高度在200–400 m左右,对地观测像元分辨率在10 cm左右,或激光雷达每立方米100点云密度;从数据后处理技术上,以图像拼接、波段合成、反演模型运算、景观生态学指数计算等为主。

对于数据反演与格局分析技术类别而言,无人机和地面监测的结合进一步挖掘了传统生物多样性监测数据的价值,为生态系统的结构、过程、功能和格局等重要环节的监测提供了帮助。特别是得益于地面和空中不同监测视角的有机结合,为解释自然保护区生态系统格局成因和变化机制提供了有力的技术支撑。

2.3 数字建模与地表测量

数字建模与地表测量技术类别包括数字建模和地表测量2个技术专题。通过这一技术类别的运用,为自然保护区管理者提供可视化的地理信息数字模型,尤其是对以地质景观、古生物遗迹、历史遗址等为保护对象的自然保护地而言,本项技术类别将在地形地貌、水土流失、地质灾害、生态修复等方面发挥监测和评估作用,满足对地质景观与遗址遗迹的保护监测需求,并在防灾减灾和抢险救灾等方面提供辅助。

对于数字建模,将有助于自然保护区获得特定目标的数字模型,用于监测研究、展示发布等。例如可对极小种群植物建立3D数字模型、对自然景观

建立数字沙盘等。

此外,地表测量可为自然保护区管理者提供精准的地表信息。根据柴子为等(2015)对无人机正射影像提取的DEM数据、ASTER GDEM数据、SRTM数据的比较,无人机DEM与实测高程差距最小。

对于数字建模与地表测量技术类别,目前在自然保护区的应用较为有限,尚未形成技术和成果需求,同时也受到数据量大、计算成本高等因素制约。从地面调查技术来看,需要采集验证点、大量实物照片等;从无人机调查技术看,以激光雷达扫描、倾斜摄影为主,需要同时兼顾空间分辨率和光谱信息,以可见光拍摄和激光雷达相结合为最佳;从数据后处理技术看,需要依托专业图像和3D模型处理软件,构建植被、建筑物等目标的数字模型,并能输出高精度、可视化的模型文件,用于展示发布、测量测绘、跟踪监测等。

2.4 巡护巡检

巡护巡检技术类别包括火情监控、病虫害监测、执法检查3个技术专题。这一技术类别已在当前我国自然保护区日常巡护和执法检查中获得了应用,尤其是在打击和震慑违法进入和偷猎盗猎,防范和取缔非法开发建设活动等工作中效果显著,确保了自然保护区重要自然资源和关键功能区的安全。

火情监控中可将现场巡逻、地面瞭望、监控探头等手段与无人机热红外传感、视频回传等功能结合,实现火情的早期发现、实时观测、及时处置、中继通讯和应急指挥等。

病虫害监测时,通过现场采集染病植物的光谱数据,对疫病发生区域开展无人机正射拍摄,识别病虫害区域边界,还需进一步结合疫病机理分析、实地传播途径调查等支持,实现对疫病范围的跟踪监测。

近年来,无人机和地面调查相结合的技术在违法违规活动的定位核查工作中也发挥了重要作用(<http://www.nxep.gov.cn/info/1727/59694.htm>)。例如江西官山国家级自然保护区在江西省内率先启用无人机对3万多亩森林进行巡护,有效提高了地面巡护人员的巡护范围和巡护效率,对自然保护区内的违法违规活动起到了震慑作用(http://jxly.gov.cn/id_402848b75e177118015e2b9b4ef00101/news.shtml)。

图1 无人机和地面相结合的监测技术方案在三江并流世界遗产地中的应用

Fig. 1 The technology solution by integrating unmanned aerial vehicle (UAV) and ground approaches was applied in the Three Parallel Rivers World Heritage

3 应用实验

中国三江并流世界遗产地是全球瞩目的生物多样性热点区域,为评估该保护地的生物多样性保护成效、识别干扰其突出普遍价值(outstanding universal value)的人为要素,同时探讨不同类型自然保护地精细化管理的技术方案,我们在三江并流世界遗产地云岭片区内选择植物识别、植被长势、景观格局、地表测量以及执法检查等技术专题开展技术方案的应用试验(图1)。

在云岭片区拉沙山,根据我们实地调查获知的植被和山地高程信息,选择在 26.3256973° N, 99.2560421° E的位置起飞。为同时确保影像质量和飞行器安全,设定飞行高度为500 m,对监测样地进行正射拍摄。通过Adobe Lightroom对拍摄获得的143张可见光照片进行亮度和对比度的调整处理后,在Agisoft PhotoScan Professional 1.3.2软件的支持下,完成了照片数据的拼接处理,并计算获得了数字表面模型。

通过现场验证,无人机对地观测影像数据的分

辨率为每像元3 cm。根据已有调查数据建立的训练集,在遥感影像处理软件ENVI 5.1和地理信息系统软件ArcMap 10.2的支持下,实现了对特定树种美丽马醉木(*Pieris japonica*)和华山松(*Pinus armandii*)的个体识别;同时,通过对影像的增强处理,扩大了林冠植被和环境的差异,实现了林窗的提取,为景观格局的分析计算提供了支撑;此外,初步构建了观测样地的数字表面高程模型,为后期开展植被的长期系统监测和景观格局变化分析等提供了数据积累。

在巡护巡检方面,研究团队使用自主研发的自然保护区移动监管系统APP^①(见附录1),实时记录巡护轨迹、标记可疑点位、记录生物多样性观测数据,并将有关情况导入大疆精灵4 Pro无人机地面站(DJI Ground Station Pro),实现对道路、房屋、农田等人工地物以及风倒林等受灾受害地物的取证记录。

① 自然保护区移动监管系统 APP 是在环境保护部的指导下,由中国环境科学研究院研发,是“绿盾 2017”和“绿盾 2018”自然保护区专项行动专用程序,为自然保护区综合监管提供重要技术支持。请扫描文末附录中的二维码了解下载和申请流程。

为更好地开展此项技术方案试验示范并完善工作,研究团队在三江并流世界遗产地建立了生物多样性监测保护示范样地,通过无人机和地面相结合的调查监测技术,采集并积累了植被、生态系统、人类干扰要素等多种调查观测数据,优化完善并提出了多种监测技术方法,为多种类型自然保护区提供生物多样性保护管理和监测评估技术解决方案。

4 展望

无人机调查监测技术在自然保护区内的运用面临的主要挑战是如何同其他调查监测技术相结合。从空间位置上看,卫星遥感、无人机遥感、地面调查构成了从上而下的完整调查监测技术链,但是,不同观测目标、不同数据结构、不同时空尺度的多源调查监测数据之间如何有效地结合使用仍然困扰着生态学家(胡健波和张健,2018)。因此,须注重无人机调查与其他调查技术的相互配合,才能在监测项目、监测效率、结果精度等方面取得可观效果。

我们将进一步探究无人机同其他监测途径相结合的可能,打通不同监测平台在技术、数据、处理方式等方面的壁垒;获得监测样地至少两期的植物分类、植被长势、景观格局和地表测量等结果,实现监测数据的系统积累和变化分析。同时,我们还将围绕无人机和地面相结合的监测结果的精度检验技术开展研究。

从另一个角度看,无人机等新技术新方法能在自然保护区管护工作中得到迅速普及,也从一定程度上反映出了当前我国自然保护区建设发展程度不充分、管护能力建设不平衡的局面,与实现生态环境的精细化监管尚存在一定差距。具体表现在:(1)未能建立起以保护成效评估为导向的监测体系,监测指标和结果与主要保护对象的保护成效评估需求脱节;(2)技术研发和整合滞后,多种监测手段各自为战,难以在生态系统的整体上对功能和过程进行监测;(3)监测和管护工作未能有效结合;(4)对人类活动的监管和防控技术仍有待提高等。

我们认为,要想解决上述自然保护区发展和建设过程中的不充分、不平衡的问题,在监测工作中应更加注重多途径调查监测技术的优势整合,统一服务于生物多样性研究、保护和管理,才是未来单项技术和技术体系发展的方向。多途径调查监测技

术的整合须着重关注以下两个方面:

一是加快开展多源数据的融合技术研究。多源数据的使用已在科学研究中发挥了越来越重要的作用(杨柳等,2017),开展无人机与多源数据相融合的技术研究尤为必要。同时,多种传感器平台收集上传的生态环境数据向传统数据处理与管理方式提出了挑战(戴圣骐和赵斌,2016)。当前,基于物联网技术的跨传感器平台的生态环境调查监测数据管理理念正逐渐形成(田立勤等,2014),有望为未来多源数据和多种传感器平台的融合提供技术解决途径。

二是推动自然保护区精细化监管理念的实现和实施。精细化体现在监管尺度和监管深度上,通过热点网格的方式聚焦自然保护区的重点关注区域,使保护和管理的空间尺度更加精细;通过将自然保护区监管部门-管理局-管护站-检查点-巡护人员的有效串联,使各级监管者的需求得到满足,延伸了监管深度。

我们相信,有了技术的保障和理念的指引,未来自然保护区的监测和管理必将更为有效和突出,生态环境的精细化管理也将指日可待。

致谢:感谢张玉波博士研发并提供的“观察者三号”六旋翼无人机系统。感谢大理大学东喜玛拉雅研究院师生在监测样地开展的工作。

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.
- Chabot D, Bird DM (2015) Wildlife research and management methods in the 21st century: Where do unmanned aircraft fit in. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 3, 137–155.
- Chai ZW, Kang J, Wang L, Zhao X, Qiao HL (2015) The construction of DEM in mountain plantation landscape based on UAV images. *Remote Sensing Technology and Application*, 30, 504–509. (in Chinese with English abstract) [柴子为, 康峻, 王力, 赵昕, 乔海浪 (2015) 基于无人机影像的山地人工林景观DEM构建. *遥感技术与应用*, 30, 504–509.]
- Chiara T, Andrea B, Federico C, Salvatore FDG, Beniamino G, Alessandro M, Franco M, Carolina V, Alessandro Z, Luke W (2017) Forestry applications of UAVs in Europe: A review. *International Journal of Remote Sensing*, 38, 2427–2447.
- Christiansen F, Dujon AM, Sprogis KR, Arnould JPY, Beijder

- L (2016) Noninvasive unmanned aerial vehicle provides estimates of the energetic cost of reproduction in humpback whales. *Ecosphere* 7(10): e01468. 10.1002/ecs2.1468.
- Christie KS, Gilbert SL, Brown CL, Hatfield M, Hanson L (2016) Unmanned aircraft systems in wildlife research: Current and future applications of a transformative technology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 14, 241–251.
- Dai SQ, Zhao B (2016) Trends and challenges of ecosystem observations in the age of big data. *Biodiversity Science*, 24, 85–94. (in Chinese with English abstract) [戴圣骐, 赵斌 (2016) 大数据时代下的生态系统观测发展趋势与挑战. *生物多样性*, 24, 85–94.]
- Dunford R, Michel K, Gagnage M, Piégay H, Trémelo ML (2009) Potential and constraints of unmanned aerial vehicle technology for the characterization of Mediterranean riparian forest. *International Journal of Remote Sensing*, 30, 4915–4935.
- Durban JW, Fearnbach H, Barrett-Lennard LG, Perryman WL, Leroi DJ (2015) Photogrammetry of killer whales using a small hexacopter launched at sea. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 3, 131–135.
- Fang JY, Wang XP, Shen ZH, Tang ZY, He JS, Yu D, Jiang Y, Wang ZH, Zheng CY, Zhu JL, Guo ZD (2009) Methods and protocols for plant community inventory. *Biodiversity Science*, 17, 533–548. (in Chinese with English abstract) [方精云, 王襄平, 沈泽昊, 唐志尧, 贺金生, 于丹, 江源, 王志恒, 郑成洋, 朱江玲, 郭兆迪 (2009) 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范. *生物多样性*, 17, 533–548.]
- 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, 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.]
- Fu WJ, Hong JY, Lin MS (2006) A method of land use classification from remote sensing image based on support vector machines and spectral similarity scale. *Remote Sensing Technology and Application*, 21, 25–30. (in Chinese with English abstract) [傅文杰, 洪金益, 林明森 (2006) 基于光谱相似尺度的支持向量机遥感土地利用分类. *遥感技术与应用*, 21, 25–30.]
- Garzon-Lopez CX, Bohlman SA, Olff H, Jansen PA (2013) Mapping tropical forest trees using high-resolution aerial digital photographs. *Biotropica*, 45, 308–316.
- Ge J, Meng BP, Yang SX, Gao JL, Feng QS, Liang TG, Huang XD, Gao XH, Li WL, Zhang RP, Wang YL (2017) Dynamic monitoring of alpine grassland coverage based on UAV technology and MODIS remote sensing data — A case study in the headwater of the Yellow River. *Acta Prataculurae Sinica*, 26, 1–12. (in Chinese with English abstract) [葛静, 孟宝平, 杨淑霞, 高金龙, 冯琦胜, 梁天刚, 黄晓东, 高新华, 李文龙, 张仁平, 王云龙 (2017) 基于UAV技术和MODIS遥感数据的高寒草地盖度动态变化监测研究——以黄河源东部地区为例. *草业学报*, 26, 1–12.]
- 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.
- 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, 97–115.
- Gotelli NJ, Colwell RK (2001) Quantifying biodiversity: Procedures and pitfalls in the measurement and comparison of species richness. *Ecology Letters*, 4, 379–391.
- Graham CH, Hijmans RJ (2006) A comparison of methods for mapping species ranges and species richness. *Global Ecology and Biogeography*, 15, 578–587.
- Guo QH, Wu FF, Hu TY, Chen LH, Liu J, Zhao XQ, Gao S, Pang SX (2016) Perspectives and prospects of unmanned aerial vehicle in remote sensing monitoring of biodiversity. *Biodiversity Science*, 24, 1267–1278. (in Chinese with English abstract) [郭庆华, 吴芳芳, 胡天宇, 陈琳海, 刘瑾, 赵晓倩, 高上, 庞树鑫 (2016) 无人机在生物多样性遥感监测中的应用现状与展望. *生物多样性*, 24, 1267–1278.]
- Guo ZH, Xiao WF, Jiang YX (2003) Applications of remote sensing to monitoring forest canopy dynamics. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 27, 851–858. (in Chinese with English abstract) [郭志华, 肖文发, 蒋有绪 (2003) 遥感在林冠动态监测研究中的应用. *植物生态学报*, 27, 851–858.]
- He YY, Zhang YB, Li JQ, Wang JL (2016) Estimation of stem biomass of individual *Abies faxoniana* through unmanned aerial vehicle remote sensing. *Journal of Beijing Forestry University*, 38, 42–49. (in Chinese with English abstract) [何游云, 张玉波, 李俊清, 王卷乐 (2016) 利用无人机遥感测定岷江冷杉单木树干生物量. *北京林业大学学报*, 38, 42–49.]
- Hodgson A, Kelly N, Peel D (2013) Unmanned aerial vehicles (UAVs) for surveying marine fauna: A dugong case study. *PLoS ONE*, 8, e79556.
- Holmgren J, Åsa P (2004) Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sensing of Environment*, 90, 415–423.
- Hu HD, Li XY, Du YF, Zheng HF, Du BX, He XY (2012) Research advances in biodiversity remote sensing monitoring. *Chinese Journal of Ecology*, 31, 1591–1596. (in Chinese with English abstract) [胡海德, 李小明, 杜宇飞, 郑海峰, 都本绪, 何兴元 (2012) 生物多样性遥感监测方法研究进展. *生态学杂志*, 31, 1591–1596.]
- Hu JB, Zhang J (2018) Unmanned aerial vehicle remote sensing in ecology: Advances and prospects. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 20–30. (in Chinese with English abstract) [胡健波, 张健 (2018) 无人机遥感在生态学中的应用进展. *生态学报*, 38, 20–30.]

- Husson E, Hagner O, Ecke F (2014) Unmanned aircraft systems help to map aquatic vegetation. *Applied Vegetation Science*, 17, 567–577.
- Israel M (2011) A UAV-based roe deer fawn detection system. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XXXVIII-1/C22, 51–55.
- Jing R, Deng L, Zhao WJ, Gong ZN (2016) Object-oriented aquatic vegetation extracting approach based on visible vegetation indices. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 27, 1427–1436. (in Chinese with English abstract) [井然, 邓磊, 赵文吉, 宫兆宁 (2016) 基于可见光植被指数的面向对象湿地水生植被提取方法. *应用生态学报*, 27, 1427–1436.]
- Koski WR, Allen T, Ireland D, Buck G, Smith PR, Macrander AM, Halick MA, Rushing C, Sliwa DJ, McDonald TL (2009) Evaluation of an unmanned airborne system for monitoring marine mammals. *Aquatic Mammals*, 35, 347–357.
- Li FX (2017) Application and discussion of UAV technology in ecological remote sensing monitoring of grassland. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (7), 99–102. (in Chinese with English abstract) [李风贤 (2017) 无人机技术在草原生态遥感监测中的应用与探讨. *测绘通报*, (7), 99–102.]
- Li JS, Zhu YP, Luo ZL, Luo JW, Xin LJ, Li BY (2018) Study and Practice on National Park System. China Environment Publishing Group, Beijing. (in Chinese) [李俊生, 朱彦鹏, 罗遵兰, 罗建武, 辛丽娟, 李博炎 (2018) 国家公园体制研究与实践. 中国环境出版集团, 北京.]
- Li X, Zheng YW, Dai CY, Lin WS (2017) Research progress of forest information acquisition based on unmanned aerial vehicle (UAV) image. *World Forestry Research*, 30(4), 41–46. (in Chinese with English abstract) [李祥, 郑清文, 戴楚彦, 林文树 (2017) 基于无人机影像的森林信息获取研究进展. *世界林业研究*, 30(4), 41–46.]
- Li XM, Zhang J, Ma Y, Ren GB (2017) Study on monitoring alien invasive species *Spartina alterniflora* using unmanned aerial vehicle hyperspectral remote sensing—A case study of the Yellow River Delta. *Marine Sciences*, 41, 98–107. (in Chinese with English abstract) [李晓敏, 张杰, 马毅, 任广波 (2017) 基于无人机高光谱的外来入侵种互花米草遥感监测方法研究——以黄河三角洲为研究区. *海洋科学*, 41, 98–107.]
- Luke W, Arko L, Christopher W, Darren T (2012) Development of a UAV-LiDAR system with application to forest inventory. *Remote Sensing*, 4, 1519–1543.
- Luo W, Shao QQ, Wang DL, Wang YC (2017) An object-oriented classification method for detection of large wild herbivores: A case study in the source region of three rivers in Qinghai. *Chinese Journal of Wildlife*, 38, 561–564. (in Chinese with English abstract) [罗巍, 邵全琴, 王东亮, 汪阳春 (2017) 基于面向对象分类的大型野生食草动物识别方法——以青海三江源地区为例. *野生动物学报*, 38, 561–564.]
- Lü AF, Zhou L, Zhu WB (2014) The remote sensing based dynamic monitoring of land desertification in Qinghai Province. *Remote Sensing Technology and Application*, 29, 803–811. (in Chinese with English abstract) [吕爱锋, 周磊, 朱文彬 (2014) 青海省土地荒漠化遥感动态监测. *遥感技术与应用*, 29, 803–811.]
- Ma KP (2011) Assessing progress of biodiversity conservation with monitoring approach. *Biodiversity Science*, 19, 125–126. (in Chinese) [马克平 (2011) 监测是评估生物多样性保护进展的有效途径. *生物多样性*, 19, 125–126.]
- Ma KP (2014) China's forest biodiversity monitoring network decade development. *Chinese Science Bulletin*, 59, 2331–2332. (in Chinese) [马克平 (2014) 中国森林生物多样性监测网络十年发展. *科学通报*, 59, 2331–2332.]
- Ma KP (2016) Hot topics for biodiversity science. *Biodiversity Science*, 24, 1–2. (in Chinese) [马克平 (2016) 生物多样性的热点问题. *生物多样性*, 24, 1–2.]
- Ma T, Zheng JH, Wen AM, Chen M, Liu ZJ (2018) Group coverage of burrow entrance and distribution characteristics of desert forest-dwelling *Rhombomys opimus* based on unmanned aerial vehicles (UAV) low-altitude remote sensing: A case study at the southern margin of the Gurbantunggut Desert in Xinjiang. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 953–963. (in Chinese with English abstract) [马涛, 郑江华, 温阿敏, 陈梦, 刘忠军 (2018) 基于UAV低空遥感的荒漠林大沙鼠洞群覆盖率及分布特征研究——以新疆古尔班通古特沙漠南缘局部为例. *生态学报*, 38, 953–963.]
- Mi XC, Guo J, Hao ZQ, Xie ZQ, Guo K, Ma KP (2016) Chinese forest biodiversity monitoring: Scientific foundations and strategic planning. *Biodiversity Science*, 24, 1203–1219. (in Chinese with English abstract) [米湘成, 郭静, 郝占庆, 谢宗强, 郭柯, 马克平 (2016) 中国森林生物多样性监测: 科学基础与执行计划. *生物多样性*, 24, 1203–1219.]
- NOAA (2014) Spying on Sperm Whales. http://www.nmfs.noaa.gov/stories/2013/03/3_07_13sperm_whales.html. (accessed on 2018-01-24)
- Panagiotidis D, Abdollahnejad A, Surovy P, Chiteculo V (2016) Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 38, 2392–2410.
- Pecl GT, Araújo MB, Bell JD, Blanchard J, Bonebrake TC, Chen IC, Clark TD, Colwell RK, Danielsen F, Evengård B, Falconi L, Ferrier S, Frusher S, Garcia RA, Griffiths RB, Hobday AJ, Janion-Scheepers C, Jarzyna MA, Jennings S, Lenoir J, Linnetved HI, Martin VY, McCormack PC, McDonald J, Mitchell NJ, Mustonen T, Pandolfi JM, Petrotelli N, Popova E, Robinson SA, Scheffers BR, Shaw JD, Sorte CJB, Strugnell JM, Sunday JM, Tuanmu M, Vergés A, Villanueva C, Wernberg T, Wapstra E, Williams SE (2017) Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science*, 355, 1–9.
- Peng YJ, Fan J, Xing SH, Cui GF (2018) Overview and classi-

- fication outlook of natural protected areas in mainland China. *Biodiversity Science*, 26, 315–325. (in Chinese with English abstract) [彭杨靖, 樊简, 邢韶华, 崔国发 (2018) 中国大陆自然保护地概况及分类体系构想. 生物多样性, 26, 315–325.]
- Quan J, Ouyang ZY, Xu WH, Miao H (2010) Comparison and applications of methodologies for management effectiveness assessment of protected areas. *Biodiversity Science*, 18, 90–99. (in Chinese with English abstract) [权佳, 欧阳志云, 徐卫华, 苗鸿 (2010) 自然保护区管理有效性评价方法的比较与应用. 生物多样性, 18, 90–99.]
- Sui DD, Wang Y, Lian JY, Zhang J, Hu JB, Ouyang XJ, Fan ZJ, Cao HL, Ye WH (2017) Gap distribution patterns in the south subtropical evergreen broad-leaved forest of Dinghushan. *Biodiversity Science*, 25, 382–392. (in Chinese with English abstract) [隋丹丹, 王悦, 练琚愉, 张健, 胡健波, 欧阳学军, 范宗骥, 曹洪麟, 叶万辉 (2017) 鼎湖山亚热带常绿阔叶林林窗分布格局及其成因. 生物多样性, 25, 382–392.]
- Sun YL, Zhou CP, Shi PL, Song MH, Xiong DP (2014) The variability of grassland net primary production in Tibet and its responses to no grazing project. *Chinese Journal of Grassland*, 36, 1–12. (in Chinese with English abstract) [孙银良, 周才平, 石培礼, 宋明华, 熊定鹏 (2014) 西藏高寒草地净初级生产力变化及其对退牧还草工程的响应. 中国草地学报, 36, 1–12.]
- Tang XP, Luan XF (2017) Developing a nature protected area system composed mainly of national parks. *Forest Resources Management*, (6), 1–8. (in Chinese with English abstract) [唐小平, 栾晓峰 (2017) 构建以国家公园为主体的自然保护地体系. 林业资源管理, (6), 1–8.]
- Tian LQ, Lin C, Zhang Q, Chen ZG (2014) Topology reliability design and optimization analysis of IoT-based monitoring. *Journal of Software*, 25, 1625–1639. (in Chinese with English abstract) [田立勤, 林闯, 张琪, 陈振国 (2014) 物联网监测拓扑可靠性设计与优化分析. 软件学报, 25, 1625–1639.]
- Turner W (2014) Sensing biodiversity. *Science*, 346, 301–302.
- Vermeulen C, Lejeune P, Lisein J, Sawadogo P, Bouché P (2013) Unmanned aerial survey of elephants. *PLoS ONE*, 8, e54700.
- 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.
- Wang D, Xin X, Shao Q, Brolly M, Zhu Z, Chen J (2017) Modeling aboveground biomass in Hulunber grassland ecosystem by using unmanned aerial vehicle discrete lidar. *Sensors*, 17, 180–198.
- Yang L, Sun ZY, Tang GL, Lin ZW, Chen YQ, Li Y, Li Y (2016) Identifying canopy species of subtropical forest by lightweight unmanned aerial vehicle remote sensing. *Tropical Geography*, 36, 833–839. (in Chinese with English abstract) [杨龙, 孙中宇, 唐光良, 林志文, 陈燕乔, 黎喻, 李勇 (2016) 基于微型无人机遥感的亚热带林冠物种识别. 热带地理, 36, 833–839.]
- Yang L, Yu J, Liu Y, Zhan DC (2017) Research progress on cognitive-oriented multi-source data learning theory and algorithm. *Journal of Software*, 28, 2971–2991. (in Chinese with English abstract) [杨柳, 于剑, 刘烨, 詹德川 (2017) 面向认知的多源数据学习理论和算法研究进展. 软件学报, 28, 2971–2991.]
- Zweig CL, Burgess MA, Percival HF, Kitchens WM (2015) Use of unmanned aircraft systems to delineate fine-scale wetland vegetation communities. *Wetlands*, 35, 303–309.

(特邀责任编辑: 郭庆华 责任编辑: 时意专)

附录 Supplementary Material

附件1 自然保护区移动监管系统APP使用说明

Appendix 1 Specification of protected areas mobile regulation system