

DOI: 10.5846/stxb202206091639

李刚勇, 陈春波, 李均力, 彭建. 低空无人机遥感在草原监测评价中的应用进展. 生态学报, 2023, 43(16): 6889-6901.

Li G Y, Chen C B, Li J L, Peng J. Advances in applying low-altitude unmanned aerial vehicle remote sensing in grassland ecological monitoring. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(16): 6889-6901.

低空无人机遥感在草原监测评价中的应用进展

李刚勇^{1,2}, 陈春波^{1,3,*}, 李均力^{1,3}, 彭建^{1,2}

1 干旱区草地生态系统遥感监测实验室, 乌鲁木齐 830049

2 新疆维吾尔自治区草原总站, 乌鲁木齐 830049

3 荒漠与绿洲生态国家重点实验室 干旱区生态安全与可持续发展重点实验室 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011

摘要: 低空域无人机遥感技术具有高时效性、高分辨率、低成本、易操控等优势, 作为地面与高空遥感(航天与航空遥感)间测量尺度空缺的有益补充, 低空无人机遥感扩展了样地样方空间尺度, 提高了中、小尺度遥感观测信息的精细化程度, 实现了草原生境信息的快速采集、处理与分析应用, 是草原“星-空-地”一体化监测的重要组成。针对草原监测评价, 总结了国内外低空无人机遥感在草原基况调查(草原草层高度监测、草原植被覆盖度监测与草原地上生物量估算)、草原动态监测(草原植被长势监测、草原产草量估测与草畜平衡监测)和草原应急管理(草原火灾、雪灾与生物灾害监测)中的应用。结合大数据、人工智能、云计算与物联网等新型技术, 分析了低空无人机遥感在草原生态监测领域存在的不足和未来的发展方向, 以期对低空无人机遥感关于草原监测评价与智慧草原的后续研究提供参考。

关键词: 低空无人机; 遥感; 草原; 监测; 评价; 调查; 应急管理

Advances in applying low-altitude unmanned aerial vehicle remote sensing in grassland ecological monitoring

LI Gangyong^{1,2}, CHEN Chunbo^{1,3,*}, LI Junli^{1,3}, PENG Jian^{1,2}

1 Joint Laboratory for Remote Sensing Observation of Grassland Ecosystem in Arid Area, Urumqi 830049, China

2 Xinjiang Grassland Technical Promotion Station, Urumqi 830049, China

3 State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

Abstract: The low-altitude unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing uses the UAV as a support and transports various sensors to obtain high-resolution ground-based remote sensing data. The low-altitude UAV remote sensing technology has the advantages of high timeliness, high resolution, low cost, and easy control, respectively. As a useful supplement to the gap in the measurement scale between ground and high-altitude remote sensing (aerospace and aerial remote sensing), the low-altitude UAV remote sensing expands the space scale of sample squares and improves the refinement of medium and fine scale remote sensing observation information. It also realizes the rapid collection, processing and application analysis of grassland habitat information, and is an important component of the integrated monitoring of grassland “star-air-ground”. The low-altitude UAV comprises the fixed-wing UAV and the multi-rotor UAV at the present time. In anyway, the low-altitude UAV remote sensing enriches data diversity, broadens the depth and scope of data, and provides benefits for monitoring and evaluation of grasslands. Aiming at ecological monitoring of grasslands, this study summarizes the application

基金项目: 中国科学院创新交叉团队项目(JCTD-2019-20); 2020 年自治区创新环境(人才、基地)建设专项(天山青年计划)(2020Q084); 2020 年自治区创新环境(人才、基地)建设专项—自然科学基金(自然科学基金)青年科学基金项目(2020D01B57); 2021 年中央财政林业草原生态保护恢复资金(草原生态修复治理补助)项目(XJCYZ202104)

收稿日期: 2022-06-09; **网络出版日期:** 2023-03-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ccb_8586@ms.xjb.ac.cn

of the low-altitude UAV remote sensing at home and abroad in grassland base survey (grassland grass height monitoring, grassland vegetation cover monitoring, and grassland aboveground biomass estimation), grassland dynamic monitoring (grassland vegetation growth monitoring, grassland yield estimation and grassland and livestock balance monitoring), and grassland emergency management (grassland fire, snow disaster and biological disaster monitoring). Finally, combined with new technologies such as big data, artificial intelligence, cloud computing and Internet of Things, the shortcomings and future development directions of the low-altitude UAV remote sensing in the field of grassland ecological monitoring are analyzed, in order to provide a reference for the follow-up research on grassland ecological monitoring and smart grassland by low-altitude UAV remote sensing. There are also certain limitations to the application of the low-altitude UAV remote sensing. Firstly, the low-altitude UAV is lightweight and vulnerable to micro-meteorological conditions. Secondly, although the low-altitude UAV may be equipped with multi-source sensors, the sensors have not yet adopted the unified design standards and considered product versatility. Thirdly, the big data processing efficiency of UAV is behind schedule. Lastly, in areas of complex environmental conditions, particularly rough terrain, the operational difficulty of the UAV increased. In the next period of time, the low-altitude UAV remote sensing should fill the above gaps, and the following developments and trends should be highlighted. The low-altitude UAV remote sensing should fully integrated UAV platform and remote sensing sensor, in order to perform integration, built-in and component of UAV flight platform and load. The low-altitude UAV remote sensing should promote the integrated monitoring of "Earth-space stars" and realize the extent of the temporal and spatial scale of grassland ecological observation. The low-altitude UAV remote sensing should combine remote sensing data from multiple sources, and integrate the emerging technologies such as big data, artificial intelligence, cloud computing and the Internet of things, so as to improve the processing efficiency of UAV massive data and mine the application value of images. We believe in that as part of continuing to promote and enhance the grassland ecological monitoring network in the new era, the low-altitude UAV remote sensing with its inherent advantages would foster the development of ecological monitoring of grasslands, from traditional ground-based observation to space-based quantitative remote sensing.

Key Words: low-altitude UAV; remote sense; grassland; observation; evaluation; survey; emergency management

草原是畜牧业的物质基础和重要的生态安全屏障,具有涵养水源、防风固沙、固碳释氧多种生态系统服务功能^[1]。在环境变化及其对草原资源利用强度不断增加的背景下,我国 90%的天然草原发生了不同程度的退化^[2]。为有效遏制草原退化国家颁布了一系列草原资源保护政策,但草原生态环境依然处于“总体恶化、局部改善”的趋势^[3]。当前,以草原退化为核心的监测评价,仍是草原生态保护与绿色发展的重要工作;及时、准确地掌握草原生态状况,既是林草行业摸清草原本底、提升草原科学化与精细化管理的需要,也是支撑草原保护、修复与合理利用的基础。

传统的草原监测为地面实测,虽精度高但耗费大、时效性差,难以大范围、高密度的开展监测,无法全面获取草原生态状况时空变化。卫星遥感能够大范围识别草原时空动态,但卫星遥感的分辨率、精度及其固定的重返周期难以满足中、小尺度草原监测的应用需求(如草原鼠害、毒害草时空监测以及牲畜数量统计与空间分布)。近年来,低空无人机及其与之匹配的遥感传感器的快速发展,无人机遥感已从研究研发跨越到行业试验和应用阶段,为草原监测评价提供了新的技术手段,逐渐运用在草原生态监测、草原资源调查、草原巡护、草原灾害监测预警等方面,详细如:草原地籍测量、草原植被高度与覆盖度监测、草原植被地上生物量估算、草原产草量与草畜平衡监测、草原植被长势与草原退化及其草原火灾、雪灾、毒害草、鼠害监测等^[4-6]。

在草原监测评价中,低空无人机遥感提供了一种高效、低成本的解决途径,逐渐被草原行业部门所关注。随着大数据、人工智能、云计算与物联网等高新技术的快速发展,草原立体观测逐渐迈入智慧化时代,低空无人机遥感作为草原立体监测的重要组成部分,迎来了一个全新的发展阶段(图 1)。为此,本文将围绕草原生态与资源综合监测评价,总结低空无人机遥感针对草原基况调查、草原动态监测与草原应急管理的应用现状,

并面向大数据、人工智能与云计算等技术对低空无人机遥感关于草原监测评价的应用进行展望。

1 低空无人机载荷及用途

低空无人机遥感以无人驾驶飞行器(Unmanned Aerial Vehicle,UAV)为载体,通过搭载各类传感器,获取地面高分辨率遥感数据^[7-8]。低空无人机包括固定翼无人机、多旋翼无人机。固定翼无人机航速快,作业半径广阔,适合大范围对地观测;多旋翼无人机组装、拆卸方便,可空中悬停并且灵活机动,适合小范围、高精度、连续航拍^[9]。低空无人机遥感包括光学遥感、热红外遥感与激光雷达遥感。光学遥感(可见光、多光谱与高光谱成像仪)采集草原水平方向的光谱信息;激光雷达具穿透能力,在获取草原植被垂直结构信息方面具有优势^[10];热红外遥感(热红外成像仪)能快速获取地表面状温度^[11]。

与卫星遥感相比,无人机的飞行高度低于 500 m,属于低空域范围,可以克服传统遥感云遮挡、重访周期、大气条件等不利因素,能够获取更高精度的高分辨率影像^[7]。与航空遥感相比,无人机对飞行条件要求低、时效性强^[8-9],能够搭载多种传感器^[12](如:可见光、多光谱、热红外、高光谱与激光雷达)(表 1)。低空无人遥感弥补了卫星遥感与地面样方间的尺度空缺,丰富了数据的多元化,拓展了数据的深度、广度,针对草原监测评价具优势。

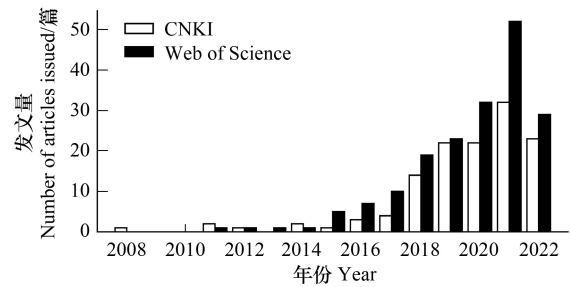


图 1 低空无人机遥感在草原监测评价应用中的文献统计

Fig.1 Bibliographic statistics on the application of the low-altitude UAV remote sensing in grassland surveillance and assessment

表 1 低空无人机遥感机载传感器

Table 1 Aerial sensors of low-altitude UAV remote sensing

传感器类型 Sensor type	常用传感器 Commonly used sensors	数据产品 Data products	优势 Advantage	局限 Confined
可见光相机 Visible light camera	大疆禅思 P1、Canon IXUS 125 HS	二维正射、三维倾斜、数字表面模型	技术成熟、行业普遍采用	通常为 RGB 影像、光谱信息有限、数据采集易受天气影响
多光谱成像仪 Multispectral imager	RedEdge-MX、Altum	多波段光谱信息、光谱指数图像、二维图像	能获取多个不连续光谱波段	波段局限导致解译困难(无法克服同物异谱、同谱异物)
高光谱成像仪 Hyperspectral imager	GaiaSky-light、Hyperea 660 C1 等	以高光谱分辨率同时获取连续的地物光谱图像	光谱分辨率高、信息量大、可反演植物生化组分	波段数量多、无法与其它数据直接融合
热红外测温成像仪 Thermal infrared imager	大疆禅思 ZENMUSE H20/H20T/XT S	热成像图像	获取温度信息	易受周围环境影响
激光雷达扫描仪 Lidar scanner	LeddarTech Vu8、LeddarOne、大疆禅思 L1、Riegl VUX-1 等	(实时)点云数据、高精度数字地面模型	复刻高精度、高精细的地表三维信息	无法获取光谱信息

2 无人机遥感监测草原生态研究进展

2.1 草原基况调查

2.1.1 草原草层高度监测

草原草层高度是草地退化、沙化的重要指标,也是估测草原蓄积量、地上生物量与碳储量的主要因子。传统的草层高度监测,地面需布设大量样方进行测量(或刈割),对草地有一定破坏性,工作量大、耗时费力,无法获得较大范围草层高度。多光谱卫星遥感反演草层高度模型精度低,星载激光雷达因大光斑离散雷达数据,无法在区域尺度上连续估算草层高度^[13]。草层高度精细化监测是草原遥感的难点。

SfM (Structure from Motion) 摄影测量技术应用到无人机遥感,使低空无人机遥感反演草层高度具有优势^[13]。SfM 基于特征匹配从重叠图像中自动化提取目标地物数字三维模型^[14],如 Batistoti 等采用无人机影像获取了数字表面模型(DSM)与数字高程模型(DEM)后计算草层高度,结果显示拟合优度(R^2)为 0.8^[15]。随着低空无人机装备轻小型激光雷达、高光谱传感器,促进了无人机获取高分辨率草层高度,如 Zhang 等^[16]、Sankey 等^[17]获取并分析了草层高度、盖度与地上生物量的关系,发现无人机(搭载激光雷达)飞行高度(<200 m)对草层高度的精度没有显著影响,考虑了草层高度反演生物量的模型精度达到 87%。

当前,低空无人机遥感获取草层高度已有初步应用(表 2)。无人机获取高分辨率草层高度观测技术的快速发展,与星载激光雷达、高光谱数据的有效衔接,逐渐填补地表样方与卫星遥感间的缺口,实现了草层高度的升尺度研究。

表 2 低空无人机遥感监测草原草层高度
Table 2 Based on low-altitude UAV remote sensing for monitoring grass height

数据获取 Data collection	无人机传感器 Sensor types	研究内容 Research contents	研究区域 Research Area
样方测量、无人机航拍(大疆 M600 Pro) Field measurement, UAV aerial photography(DJI M600 Pro)	激光雷达(Riegl VUX-1 传感器)	无人机激光雷达提取草原植被参数 ^[16]	内蒙古呼伦贝尔草原(49°20'24"N, 119°59'44"E), 面积 90 hm ²
样方测量、无人机航拍(大疆 Phantom 3 Pro) Field measurement, UAV aerial photography(DJI Phantom 3 Pro)	可见光相机(分辨率:4000×3000 像素)	无人机影像估算草地冠层高度和地上生物量 ^[18]	甘肃玛曲县、内蒙古自治区阿内蒙古拉善左旗县、江苏省
样方测量、无人机航拍(Swinglet CAM) Field measurement, UAV aerial photography(Swinglet CAM)	可见光相机(Canon IXUS 125 HS, 分辨率:5 cm×5 cm)	无人机时序影像监测草地植被高度与绿度 ^[19]	荷兰瓦尔河南岸
样方测量、无人机航拍(Onyxstar HYDRA-12) Field measurement, UAV aerial photography (Onyxstar HYDRA-12)	可见光相机(分辨率:6000×4000 像素)	无人机影像测量黑麦草的冠层高度和生物量估算 ^[20]	比利时(50°58'48"N, 3°46'48"E), 面积 0.5 hm ²
样方测量、无人机航拍	可见光相机(分辨率:1920×1080 像素)	草地植被高度与地上生物量监测方法比较(无人机的技术和 RGB-D 重建方法) ^[21]	挪威(58°45'48"N, 5°39'00"E), 面积 1 hm ²
样方测量、无人机航拍(大疆 Phantom 4 RTK)、手持激光雷达测量(Paracosm PX-80) Field measurement, UAV aerial photography (DJI Phantom 4 RTK), hand-held scanner (Paracosm PX-8)	可见光相机(分辨率:4000×3000 像素)、激光雷达	基于便携式激光雷达的草高测量精度改进方法 ^[22]	日本(35°10'2"N, 132°30'19"E)

2.1.2 草原植被覆盖度监测

植被覆盖度是观测区域内植被垂直投影面积占地表总面积的百分比,是表征植被群落生长状况及生境质量的重要参数,反映了草原生态系统生态状况^[23]。传统的地面测量无法准确获得区域草原植被盖度,卫星遥感能快速估算区域植被覆盖度,但较粗的分辨率无法表征稀疏的草地植被特征,低空无人机拥有灵活性并且时效性强与分辨率高等优势,可作为地面测量与卫星遥感监测草原植被盖度的补充。

蔡栋等^[24]、宋清洁等^[25]、冷若琳等^[26]和 Meng 等^[27]分别以甘南藏族自治州为研究区域,分析了草地野外实测样方盖度、低空无人机影像提取的盖度与多源遥感(Landsat 8、MODIS)植被指数间的相关性,构建了草地植被盖度回归模型并进行了精度验证。蔡栋等^[28]构建的无人机照片与 Landsat 8 影像的草地植被盖度模型精度为 93.6%,宋清洁等^[25]采用无人机与 MODIS 数据构建的最优反演模型精度可达 88%。Meng 等^[27]构建了单因子参数、多因子参数/非参数反演模型,发现 BP 神经网络为草地植被盖度的最佳模型($R^2=0.72$, RMSE=13.38%)。刘艳慧等基于遗传算法采用无人机影像构建的过绿指数、颜色指数估算了草原植被覆盖度,发现过绿指数估算植被覆盖度精度较高($P=0.272$, RMSE=6.63),株高与覆盖度的交叉变量拟合精度为 83.41% ($R^2=0.8536$, RMSE=2.442 g/m²)^[29]。

近年来,低空无人机遥感监测草原植被盖度主要表现在以下方面(表3):①建立无人机遥感与地面实证调查的方法;②结合多种统计模型和机器学习算法,构建低空无人机遥感获取的草地盖度与卫星遥感植被指数(如 EVI、NDVI 与 SAVI 等)间的关系;③地面样地样方测量仍是低空无人机遥感与卫星遥感估算草原植被盖度的重要验证数据。

表 3 低空无人机遥感监测草原植被覆盖度
Table 3 Observation of grassland vegetation cover based on low-altitude UAV remote sensing

数据获取 Data collection	无人机传感器 Sensor types	研究内容 Research contents	研究区域 Research Area
样方测量、无人机航拍(大疆 Phantom 2)与卫星影像(MOD13Q1) Field measurement, UAV aerial photography(DJI Phantom 2), and satellite image(MOD13Q1)	可见光相机	无人机遥感与卫星遥感监测高寒草原盖度动态 ^[28]	黄河源东部区域(32°12′11″—35°48′7″N, 95°50′45″—103°28′9″E), 面积 12.2×10 ⁴ km ²
地面实测、无人机航拍与卫星影像(Landsat 8、MOD13Q1) Field measurement, UAV aerial photography, and satellite image(Landsat8, MOD13Q1)	可见光相机	多源遥感监测草地植被覆盖度 ^[24]	甘肃甘南藏族自治州(33°06′—35°44′N, 100°46′—104°44′E)
地面实测、无人机航拍(大疆 Phantom 3 Pro)与卫星影像(MOD13Q1) Field measurement, UAV aerial photography(DJI Phantom 3 Pro), and satellite image(MOD13Q1)	可见光相机(分辨率:4000×3000)	基于低空无人机遥感与卫星遥感识别草原植被覆盖度 ^[25]	甘肃甘南藏族自治州(33°06′—35°44′N, 100°46′—104°44′E)
地面实测、无人机航拍(大疆 Phantom 3 Pro)与卫星影像(Landsat 8、MODIS) Field measurement, UAV aerial photography(DJI Phantom 3 Pro), and satellite image(Landsat8, MODIS)	可见光相机	多源遥感监测草地非生长季植被覆盖度 ^[26]	甘肃甘南藏族自治州(33°06′—35°44′N, 100°46′—104°44′E)
样方采样、无人机航拍(大疆 Phantom 3 Pro) Field measurement, UAV aerial photography(DJI Phantom 3 Pro)	可见光相机(分辨率:4000×3000)	无人机大样方草地植被覆盖度及生物量估算 ^[29]	内蒙古呼伦贝尔草原中部
样地采样、无人机航拍(大疆 Phantom 3 Pro)与卫星影像(国产高分一号) Field measurement, UAV aerial photography(DJI Phantom 3 Pro), and satellite image(GF-1)	可见光相机	无人机遥感与卫星遥感反演草地植被覆盖度 ^[30]	伊敏露天矿(呼伦贝尔草原的中部)
样方测量、无人机航拍(大疆 Phantom 4 Pro) Field measurement, UAV aerial photography(DJI Phantom 4 Pro)	可见光相机	无人机遥感与卫星遥感估测草地植被覆盖度 ^[31]	兰州大学榆中校区校园内草原、试验田(104°08′—104°09′E, 35°55′—35°56′N)

2.1.3 草原地上生物量估算

地上生物量为植被地上部分光合产物的积累量,是草原生态监测、健康评价的重要依据和草原生态系统评价的重要参数^[32]。以往多采用样方统计、回归模型、物理模型并结合卫星遥感估算生物量,但传统的卫星遥感分辨率粗、易受大气影响等限制,导致草原地上生物量估算精度低、误差大与时序不连续,难以满足草原监测评价的实际需求。

低空无人机以其影像获取速度快、空间分辨率高和云下采集等优势,可以快速、有效地估算草原地上生物量。孙世泽等^[33]、张正健等^[34]开展了无人机影像获取的植被指数与样方实测生物量的相关性分析,结果显示天山北坡比值植被指数(RVI)拟合精度为 0.75^[33],若尔盖高原 NGRDI 模型拟合精度为 0.86^[34]。Wengert 等^[35]、Kang 等^[36]基于无人机高光谱遥感估算了草原植被地上生物量。李淑贞等采用无人机高光谱、Sentinel-2 多光谱影像与实测生物量,建立、验证了植被指数回归模型,发现 NDRE 模型具有更高的拟合精度($R^2 = 0.71$)与较低的均方根误差(RMSE = 18%)^[37]。Zhao 等^[38]、da Costa 等^[39]与 zhang 等^[16]采用无人机载激光雷达获取草原点云数据估算地上生物量,分析了激光雷达信息丢失及其对估算地上生物量精度的影响,da Costa

等^[39]的估算精度为 0.79。Zhang 等^[40]、Taugourdeau 等^[41]与 Barnetson 等^[42]基于机器学习(随机森林)结合地面采样与无人机影像估算了草原地上生物量,结果显示随机森林估算结果 $R^2 = 0.78$ 、 $RMSE = 24.80 \text{ g/m}^2$ ^[40], 湿重相对误差 20%、干重 25%^[41]。

总体来看,基于无人机遥感和地表样方数据,构建地上生物量与植被指数的回归模型,随着低空无人机载荷提高,高光谱、激光雷达逐渐用于估算草原地上生物量(表 4)。

表 4 低空无人机遥感估算草原地上生物量的研究

Table 4 UAV remote sensing at low altitude to estimate aboveground biomass in grasslands

数据获取 Data collection	无人机传感器 Sensor types	研究内容 Research contents	研究区域 Research area
样方测量、无人机航拍(大疆 Phantom 3 Pro) Field measurement, UAV aerial photography(DJI Phantom 3 Pro)	可见光相机(分辨率:4000×3000 像素)	无人机影像估算草地冠层高度和地上生物量 ^[18]	甘肃玛曲县、内蒙古自治区阿拉善左旗县、江苏南部某研究站点
样方测量、无人机航拍(大疆 M600 Pro) Field measurement, UAV aerial photography(DJI M600 Pro)	激光雷达(Riegl VUX-1 传感器)	无人机激光雷达提取草原植被参数 ^[16]	呼伦贝尔草原(49°20′24″N, 119°59′44″E), 面积 90hm ²
样方采样、无人机航拍(大疆 Phantom 3 Pro) Field measurement, UAV aerial photography(DJI Phantom 3 Pro)	可见光相机(分辨率:4000×3000)	无人机大样方草地植被覆盖度及生物量估算 ^[29]	内蒙古呼伦贝尔草原中部
样方实测、无人机航拍(大疆 Spreading WingS1000) Field measurement, UAV aerial photography(DJI Spreading WingS1000)	多光谱相机(Micro MCA12 Snap, 分辨率:1280×1024 像素)	无人机多光谱影像估算草地生物量 ^[33]	新疆天山北坡中段(85°46′15″E, 44°00′13″N)
地面样方实测、无人机航拍(小型电动固定翼无人机) Field measurement, UAV aerial photography(mini fixed wing UAV)	可见光相机(SNOY RX1 光学相机, 分辨率:6000×4000 像素)	无人机遥感估算草地地上生物量 ^[34]	若尔盖高原(33°00′00″—34°05′00″N, 101°36′00″—103°25′00″E)
样方测量、无人机航拍(大疆 M600 Pro) Field measurement, UAV aerial photography(DJI M600 Pro)	激光雷达(Velodyne Ultra Puck)	无人机遥感(激光雷达)估算稀树草原地上生物量 ^[39]	巴西塞拉多热带稀树草原
地面样方测量、无人机航拍(大疆八旋翼无人机) Field measurement, UAV aerial photography(DJI octacopter UAV)	多光谱相机(Micro MCA12 Snap, 分辨率:1280×1024 像素)	无人机遥感的草原生物量反演和放牧场利用强度评估 ^[43]	新疆生产建设兵团第八师一五一团紫泥泉内(44°00′13″N, 85°46′15″E)
样地测量、无人机航拍(多旋翼无人机) Field measurement, UAV aerial photography	激光雷达(Velodyne's HDL-32E)	无人机遥感(激光雷达)反演草原生态系统地上生物量 ^[44]	呼伦贝尔草原(49°19′34″N, 119°56′52″E)
样方测量、无人机航拍(大疆 Phantom 4 Pro) Field measurement, UAV aerial photography(DJI Phantom 4 Pro)	可见光相机	多时相无人机摄影测量估算草场生物量 ^[45]	皮钦查省(厄瓜多尔)
无人机航拍(大疆 Phantom 4) UAV aerial photography(DJI Phantom 4)	可见光相机(分辨率 4864×3648 像素)	基于无人机改进放牧强度下草原地上生物量估算 ^[46]	青海河南蒙古族自治县
样方测量、无人机航拍(大疆 Phantom 3 Pro) Field measurement, UAV aerial photography(DJI Phantom 3 Pro)	可见光相机	无人机遥感估算非均质温带草原的生物量 ^[47]	德国黑森州卡塞尔大学(51°23′00″N, 9°54′00″E)

2.2 草原动态监测

2.2.1 草原植被长势监测

草原植被长势为植被的生长状况,监测草原植被长势对草地管理、保护及其生境改善具有现实意义^[48]。以往采用人工调查,测量、记录草地植被长势信息(高度、盖度、地上生物量与牧草发育期等)^[49]。人工监测方法耗时费力、覆盖范围有限、代表性较差,卫星遥感能多时段、大范围监测草原植被长势^[50]。然而,多数星载影像的空间分辨率不足以开展精细化的草原植被长势监测。当前,低空无人机遥感以其机动灵活、较低的成本和高时空分辨率等优势成为近地遥感观测的有效工具。

针对草原植被长势,国内采用低空无人机开展监测的研究鲜有报道。固定站点(国家站点、草原行业部

门站点以及科研实验站点)仍是草原植被长势的主要监测方式,部分站点已采用物候相机不间断监测,在草地生长初期的监测时段需要清理草原上层覆盖的积雪开展监测。采用无人机监测草原植被长势国外已有探索,如 Possoch 等^[51]、Lussem 等^[52]与 Bareth 等^[53]分别采用低空无人机在德国波恩、德国埃菲尔山区与加拿大安大略省科夫勒保护区监测了草原牧草植被长势。

总体来看,低空无人机能根据需求进行实时拍摄,可弥补地面、卫星观测梯度的过渡;建立草原植被长势地面观测、无人机观测与卫星遥感观测的相关关系,能提高草原植被长势监测的准确率。

2.2.2 草原产草量估测

草地产草量是牲畜可食用的草产量,直接影响着草原的载蓄量,是草原生产利用的重要指标^[54]。及时、准确地掌握草原产草量,是草原资源监测评价的重要内容^[48]。通常,草原产草量估测包括地面样地监测与卫星遥感估算,利用草原植被光谱数据、草原产草量、卫星影像与气象数据,构建草原产草量与植被光谱指数间的统计模型、遥感模型与气象模型^[55]。然而,因气象数据插值导致的尺度、精度问题,以及卫星影像分辨率的限制,以上模型估算的产草量精度有待提高^[56]。

在中、小尺度,低空无人机遥感获取草原植被生物物理参数估算产草量,克服了人工调查效率低,弥补了卫星遥感的分辨率、云层等外界条件限制。Jenal 等^[57]、Lussem 等^[58]与 de Oliveira 等^[59]采用低空无人机载多光谱分别在德国科隆、德国波恩与巴西估算了草原产草量,Jenal 等^[57]估算的精度 $0.75(R^2)$ 、 $0.17(\text{RMSE})$,Lussem 等^[58]为 $0.65(R^2)$ 、 $956.57 \text{ kg/hm}^2(\text{RMSE})$,de Oliveira 等^[59]使用了卷积神经网络(CNN)估算了草原植被总干物质产量($R^2=0.76$ 、 $\text{RMSE}=413.07 \text{ kg/hm}^2$)与叶片干物质产量($R^2=0.79$ 、 $\text{RMSE}=286.24 \text{ kg/hm}^2$)。Wengert 等^[35]与 Feng 等^[60]采用无人机载高光谱估算了草原产草量,Wengert 等^[35]估算的鲜草产草量精度 $0.87(R^2)$ 、 $7.6\%(\text{RMSE})$,干重精度 $0.75(R^2)$ 、 $12.9\%(\text{RMSE})$,Feng 等^[60]基于集成学习后估算苜蓿产量的拟合精度为 0.87 。

综上所述,低空无人机遥感扩展了草原样地样方空间范围,通过多种传感器获取草原草层光谱、空间结构信息,结合机器学习等方法能客观估测草原产草量。

2.2.3 草畜平衡监测

草畜平衡是一定时间内草原可利用饲草饲料总量与饲养牲畜所需的饲草饲料量间的动态平衡,区域草原产草量与牲畜数量是草畜平衡的研究基础。通常,草原产草量采用地面样方采样、遥感与生态模型估算,牲畜数量多采用统计年鉴数据(即牲畜年末存栏数)。以往没有考虑到牲畜数量的时序变化与空间分布,在一定程度上限制了草畜平衡的估算精度。

近年来,低空无人机遥感逐渐成为调查牲畜时空特征新的技术手段。Barbedo 等基于无人机影像提高动物与背景的对比度,采用优化的深度学习算法识别出成簇牲畜的数量,精度为 90% ^[61]。Kellenberger 等采用改进的卷积神经网络算法提高了无人机影像识别牲畜的精度^[62]。Zhao 等基于无人机获取高分辨率影像采用多种算法(MCNN,CSRNeT,SFANeT与贝叶斯网络)识别绵羊数量及其空间分布^[63]。Sarwar 等基于无人机高清视频采用区域卷积神经网络算法对围场中绵羊进行检测与计数,然后将结果与其他技术进行比较以评估其性能^[64]。

采用低空无人机遥感开展草畜平衡的研究已有应用,如杨帆等基于样方采样、MOD13A1 遥感数据估算玛多县(青海省果洛藏族自治州)草原产草量,结合无人机遥感影像,预测了包括野生动物和家畜在内的草畜平衡状况^[65-67]。郭兴健等基于无人机遥感调查了黄河玛多县境内岩羊种群数量及其分布规律,为青藏高原地区大型野生动物及草畜平衡研究提供了新思路^[68];邵全琴利用无人机遥感建立家畜(牦牛、藏羊和马等)与野生动物(藏野驴、藏原羚和岩羊等)的无人机图像解译标志库,客观调查了样带内的种群数量^[69]。

可以看出,低空无人机遥感具有操作灵活、分辨率高等优势;在调查牲畜数量的作业中,低空无人机调查范围广、对牲畜干扰小、能进入不易到达的区域,能够客观获取牲畜数量^[70]。

2.3 草原应急管理监测

火灾、雪灾与生物灾害是草原应急管理的重要组成。关于草原行业部门的应急管理,低空无人机遥感提

供了一种新型手段,解决了人工监测的缺点(费时费力、精度低与范围小),弥补了传统草原应急管理的不足。同卫星遥感相比,低空无人机遥感获取影像快,尤其在中小尺度具有显著优势,可持续监测人工勘察不易到达区域^[56]。近年来,低空无人机遥感已应用到草原应急管理。

2.3.1 草原火灾与雪灾监测

草原火灾是一种破坏性极强的自然灾害,人工监测成本高、效率低、实效性差,难以达到完全监测;航天遥感因受制于卫星平台运行周期,监测频率有限,难以实时监测;点域无线传感器由于感应范围、能耗与价格限制,无法大规模应用于草原火灾监测。近年来,为降低草原火灾危害,需针对草原火灾开展信息化监测^[71]。无人机能快速获取火场实时高分数据,准确把握火情动态,为火灾蔓延提供可靠的初始场数据^[72-73]。无人机能携带多种传感器,采集多源遥感数据,快速、准确地评估草原火灾受损程度^[74],定量预测灾后草原植物-土壤养分动态^[17]。

草原雪灾突发性强、危害大,直接影响牧区畜牧业的可持续发展。以往雪灾监测采用地面观测,收集、整理速度慢,偏远地区不易到达无法开展观测,难以全面了解雪灾受损范围、程度^[75]。关于草原雪灾监测,一定时空范围内无人机不接触也不破坏草原,但可以获得更多积雪数据,低空无人机遥感更加准确便于计算、分析与数据挖掘,雪灾经客观评估后能为牧区畜牧业生产提供帮助。目前,低空无人机多与航天遥感结合定量评估区域雪灾时空分布^[76],与生物/气象数据、历史数据结合预测草原雪灾^[77]。

2.3.2 草原生物灾害监测

生物灾害是影响草原生态平衡的重要因素,鼠害、虫害为草原生物灾害的重要组成。传统调查费时费力、资金投入大,较难快速、准确地识别灾害的发生范围与危害程度。低空无人机遥感是一种新型的草原生物灾害监测手段,具有高分辨率、高时效、低成本与低损耗特点,在草原鼠害、虫害监测中已有示范^[6,78](表5)。

表5 低空无人机遥感关于草原生物灾害监测

Table 5 Remote sensing by low-altitude UAV for monitoring biological disaster in grasslands

数据获取 Data collection	无人机传感器 Sensor types	研究内容 Research contents	研究区域 Research area
无人机航拍(固定翼无人机) UAV aerial photography (fixed wings UAV)	可见光相机(Sony NEX7)	无人机遥感监测沙漠森林鼠害空间分布 ^[79]	古尔班通古特沙漠(44°24'46"N, 87°51'25"E)
样方测定、无人机航拍(大疆精灵3 Pro) Field measurement, UAV aerial photography (DJI Phantom 3 Pro)	可见光相机(分辨率:4000×3000像素)	无人机调查鼯鼠种群的最佳尺度研究 ^[80]	内蒙古自治区呼伦贝尔市(额尔古纳市、陈巴尔虎旗与鄂温克族自治旗)
无人机航拍(DOPSV360 航摄无人机) UAV aerial photography (DOPSV360)	可见光相机(索尼 NEX7 相机: 6000×4000 像素、索尼 ilce- 7m 相机:7360×4912 像素)	低空无人机遥感识别荒漠林大沙鼠洞群覆盖率及其分布特征 ^[81]	古尔班通古特沙漠南缘(第一试验区 44°24'46"N, 87°51'25"E;第二试验区 44°34'58"N, 88°09'36"E)
无人机航拍(动力三角翼无人机) UAV aerial photography (Powered delta wing UAV)	可见光相机(佳能 5D Mark III, 分辨率 5760×3840)	无人机遥感监测草原鼠害 ^[82]	新疆乌苏草原鼠害防治示范区(44°15'51"N—44°10'13"N, 84°55'45"E—85°08'20"E)
样地调查、无人机航拍(大疆精灵3) Field measurement, UAV aerial photography (DJI Phantom 3)	可见光相机	低空无人机遥感监测高原鼠兔危害等级 ^[83]	甘肃省甘南藏族自治州玛曲县(33°06'30"N—34°30'15"N, 100°45'45"E—102°29'00"E)
无人机航拍(大疆 M600 Pro) UAV aerial photography (DJI M600)	激光雷达(高光谱仪:GaiaSky-mini 型)	无人机高光谱影像识别荒漠草原鼠洞 ^[84]	内蒙古自治区乌兰察布市的四子王旗境内(111°52'48"E, 41°46'48"N)
地面调查、无人机航拍(大疆御2、大疆精灵3) Field measurement, UAV aerial photography (DJI Mavic 2, DJI Phantom 3)	可见光相机(分辨率:1200×1200像素)	低空无人机监测草原毛虫 ^[86]	青海省黄南藏族自治州泽库县(100°34'—102°08'E, 34°45'—35°32'N)

Wen 等基于无人机遥感监测鼠害,分析了啮齿类动物的空间分布、爆发规律及其危害程度^[79]。孙姗姗等采用无人机调查鼯鼠种群,结果显示最佳尺度的飞行高度为 50 m,最小取样面积 2.21 hm²^[80]。马涛等^[81]、轩俊伟等^[82]在新疆验证了低空无人机遥感针对鼠害监测的有效性;马涛等^[81]识别的鼠洞洞群覆盖率为 19.4%,具有明显的聚集特征与带状分布特征;轩俊伟等^[82]识别的中度、轻度危害区约占试验区的 72%,极度危害区占比 3%。花蕊等通过无人机遥感获取了高原鼠兔洞口数量与植被盖度,精度分别为 95%与 93%;经可见光差值植被指数估算地上生物量,精度为 86.54%^[83]。张涛等利用无人机载高光谱监测荒漠化草原鼠洞数量与分布,提出鼠洞指数动态监测草原鼠洞,精度可达 97%^[84]。

郑永军等采用低空机载蝗虫预警系统开展了草原蝗虫识别与计数,准确率达 89%^[85]。高姻燕等提出并验证了一种基于无人机遥感监测草原毛虫的方法,在监测效率、对草地破坏性及提高时效性、可预报性等方面更优于传统方法,在草原毛虫幼虫信息提取、灾害预警与高效防控等方面具有应用潜力^[86]。王佳宇等阐述了草原蝗虫监测预警技术的研究进展,指出在小区域和飞行困难区域无人机能够快速获取草原蝗虫高分影像,构建蝗灾分析预警系统,实现蝗虫密度的监测与预警^[87]。

3 展望

3.1 问题与挑战

草原监测评价的难点仍是无法及时、有效、客观准确地获取、分析与挖掘监测区域内草原植被生境状况。无人机是低空域灵活、准确与高效获取高分遥感影像的重要平台,目前已应用于林草行业,在中、小尺度草原监测评价与智慧草原中发挥了重要作用。但是,低空无人机遥感在实际应用中也存在一些局限:

(1) 低空无人机重量较轻,易受微气象条件影响,虽然已设计有抗抖稳定系统,但实际获取的影像依然存在质量不足,增加了影像后期的处理难度。

(2) 低空无人机可搭载多源传感器(如可见光、多光谱、热红外、高光谱与激光雷达),但传感器尚没有采用统一的设计标准和考虑产品的通用性;轻小型化传感器的定量精度有待提高,多数研究中采用的消费级无人机传感器光谱响应曲线的校准有待提高。

(3) 海量数据的处理效率具有滞后性,没有实现自动化、智能化处理,缺乏与之配套的国产化数据处理、挖掘与可视化分析软件,在草原监测行业尚没有形成完善的软、硬件技术体系。

(4) 草原监测周期长、范围大,行业内广泛采用的无人机受飞行电池容量或燃料搭载量的限制,导致无人机的作业半径及面积有限,尤其在环境复杂及其地形崎岖的区域,增加了无人机的操作难度。没有长期稳定连续的草原观测数据,缺少与之匹配的地面调查数据与参考标准,降低了遥感解译的精度。

3.2 发展趋势

(1) 跨领域与交叉学科,深度整合无人机平台与遥感传感器,实现无人机飞行平台与载荷的一体化、嵌入式和组件式。低空无人机遥感是一项复杂的系统工程,在草原监测评价中的成功应用是跨领域与交叉学科的有效整合,主要包括无人机系统技术、遥感、地图学与地理信息系统、地理学、生态学、植物学、草原与草地等学科。未来低空无人机遥感的普适性将会逐渐提高,更多地面向行业部门与普通用户,进一步降低无人机采集数据的门槛。低空无人机发展的总体趋势为轻小型、标准化与市场化应用,无人机传感器是向多任务、模块化与组件式架构发展。低空无人机搭载多传感器或集成传感器的数据采集与实时处理尚在探索阶段。基于高空间、高光谱、多维度的低空无人机遥感将成为今后发展的热点和趋势

(2) 推动“星-空-地”一体化监测,实现草原监测的时间尺度延续与空间范围扩展。草原植被生态系统是一个复合的生态系统,是土壤-草原植被-大气-水分的连续体,全面、系统的草原生态监测应当是时序变化与空间格局演替的统一。短期、小尺度的监测不能全面地解释草原生态系统的演变,也不能客观诠释草原的时空变化;草原监测的本质是客观、准确地采集当前草原生态环境状况表征指标,以期为今后的草原资源可持续利用做出有效预测。因此,结合地面样方测量,耦合低空无人机遥感与卫星遥感实现草原资源空间对地观测,弥

补人工监测与航天遥感时效性、准确性及其精细度方面的缺陷。扩展草原生态监测的空间尺度,在个体、种群、群落、生态系统甚至景观、区域尺度上,开展“星-空-地”一体化草原生态监测,实现时间尺度延续与空间范围的扩展,为草原的现状与变化趋势做出正确的评价与预测。

(3) 融合多源遥感数据,融入大数据、人工智能、云计算与物联网等新兴技术,提高无人机海量数据的处理效率,挖掘影像的应用价值。多源、多尺度与多维数据融合是低空无人机遥感应用的发展方向,能够克服因单一数据源无法系统地捕捉目标区域信息。在数据采集阶段,采用搭载的多源传感器或一体化集成多源传感器采集数据,能够避免多次飞行,同时克服不同遥感影像的地理位置精度差。在数据处理阶段,数据融合包括:①不同时间分辨率数据融合,②不同尺度(分辨率)数据融合,③不同维度数据融合。在此基础上,积极融入大数据、人工智能、云计算与物联网等新兴技术,提升低空无人机遥感针对草原生态监测的智能化交互水平,在草原生态监测中实现智慧化监测。低空无人机遥感为草原生态智能监测网络开辟了一个实际、准确的方向,即物联感知自动监测草原生态状况、动态评估草原生态健康、实现草原多灾种早期预报,精准促进草原智能化监测、评估与预警。

(4) 构建无人机遥感光谱数据与草原植被生理参数关系,增强草原植被的自动化识别。低空无人机遥感采集的光谱数据估算草原植被冠层生理参数,是草原定量遥感的难点,截至目前尚没有一种通用、稳定的光谱指数能够准确表征草原植被特征,受大气光照、无人机飞行高度、草原植被类型与土壤等影响,各种遥感光谱指数与草原植被生理参数间的关系不稳定。构建草原植被无人机遥感解译基础数据库,包括典型草原植被波普标准数据集、不同航拍高度典型草原植被纹理特征数据集,建立草原植被冠层形态、物候与光谱特征库,促进草原植被的自动化识别,是低空无人机遥感急需解决的问题。

4 结语

在草原监测评价中,低空无人机遥感处于快速发展阶段。低空无人机遥感时效性高,在光谱、空间分辨率方面具有明显优势,促进了草原基况调查、动态监测与应急管理监测,提高了草原生态保护与管理水平。但是,现阶段常用的无人机续航时间有待进一步提高,在复杂地形作业中关于通信稳定性有待提升。另外,面向草原大数据、人工智能、物联网等新技术背景,低空无人机遥感在高端技术自动化、实时处理、精准解译等方面仍有局限。基层草原行业部门对低空无人机遥感技术的理论素养与高效应用有待突破。新时代继续推进完善草原生态监测网络的背景下,低空无人机遥感以其固有的优势推动着草原监测由传统的地面观测(样地样方的位置、质量、指标方面)向空间定量遥感发展。

参考文献(References):

- [1] Bardgett R D, Bullock J M, Lavorel S, Manning P, Schaffner U, Ostle N, Chomel M, Durigan G, Lfry E, Johnson D. Combatting global grassland degradation. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021; 1-16.
- [2] 张文博. 基于 MODIS 数据的草地退化遥感监测方法研究. 2020.
- [3] 王德利, 王岭, 辛晓平, 李凌浩, 唐华俊. 退化草地的系统性恢复:概念、机制与途径. *中国农业科学*, 2020, 53(13): 2532-2540.
- [4] Eskandari R, Mahdianpari M, Mohammadimanesh F, Salehi B, Brisco B, Homayouni S. Meta-analysis of unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for agro-environmental monitoring using machine learning and statistical models. *Remote Sensing*, 2020, 12: 3511.
- [5] Lam O H Y, Dogotari M, Prüm M, Vithlani H N, Roers C, Melville B, Zimmer F, Becker R. An open source workflow for weed mapping in native grassland using unmanned aerial vehicle; using *Rumex obtusifolius* as a case study. *European Journal of Remote Sensing*, 2020, 54: 71-88.
- [6] 郭庆华, 胡天宇, 刘瑾, 金时超, 肖青, 杨贵军, 高显连, 许强, 谢品华, 彭焱刚, 闫利. 轻小型无人机遥感及其行业应用进展. *地理科学进展*, 2021, 40(9): 1550-1569.
- [7] 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): 20-30.
- [8] 孙中宇, 陈燕乔, 杨龙, 唐光良, 袁少雄, 林志文. 轻小型无人机低空遥感及其在生态学中的应用进展. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 528-536.
- [9] 杨贵军, 李长春, 于海洋, 徐波, 冯海宽, 高林, 朱冬梅. 农用无人机多传感器遥感辅助小麦育种信息获取. *农业工程学报*, 2015, 31(21): 184-190.
- [10] 郭庆华, 胡天宇, 马勤, 徐可心, 杨秋丽, 孙千惠, 李玉美, 苏艳军. 新一代遥感技术助力生态系统生态学研究. *植物生态学报*, 2020, 44

- (4): 418-435.
- [11] 杨文攀, 李长春, 杨浩, 杨贵军, 冯海宽, 韩亮, 牛庆林, 韩东. 基于无人机热红外与数码影像的玉米冠层温度监测. 农业工程学报, 2018, 34(17): 68-75, 301.
- [12] 张继贤, 刘飞, 王坚. 轻小型无人机测绘遥感系统研究进展. 遥感学报, 2021, 25(3): 708-724.
- [13] 冯琦胜, 殷建鹏, 杨淑霞, 梁天刚. 草层高度遥感监测研究进展. 草业科学, 2018, 35(5): 1040-1046.
- [14] 魏占玉, Arrowsmith Ramon, 何宏林, 高伟. 基于 SfM 方法的高密度点云数据生成及精度分析. 地震地质, 2015, 37(2): 636-648.
- [15] Batistoti J, Junior J M, Ítavo L, Matsubara E, Gomes E, Oliveira B, de Souza M, Siqueira H L, Filho G S, Akiyama T, Gonçalves W, Liesenberg V, Li J, Dias A. Estimating pasture biomass and canopy height in Brazilian savanna using UAV photogrammetry. Remote Sensing, 2019, 11: 2447.
- [16] Zhang X, Bao Y, Wang D L, Xin X, Ding L, Xu D W, Hou L, Shen J. Using UAV LiDAR to extract vegetation parameters of Inner Mongolian grassland. Remote Sensing, 2021, 13: 656.
- [17] Sankey J B, Sankey T T, Li J R, Ravi S, Wang G, Caster J, Kasprak A. Quantifying plant-soil-nutrient dynamics in rangelands: fusion of UAV hyperspectral-LiDAR, UAV multispectral-photogrammetry, and ground-based LiDAR-digital photography in a shrub-encroached desert grassland. Remote Sensing of Environment, 2021, 253: 112223.
- [18] Zhang H F, Sun Y, Chang L D, Qin Y, Chen J J, Qin Y, Du J X, Yi S, Wang Y L. Estimation of grassland canopy height and aboveground biomass at the quadrat scale using unmanned aerial vehicle. Remote Sensing, 2018, 10: 851.
- [19] van Iersel W, Straatsma M, Addink E, Middelkoop H. Monitoring height and greenness of non-woody floodplain vegetation with UAV time series. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018, 141: 112-123.
- [20] Borra-serrano I, De swaef T, Muylle H, Nuytens D, Vangeyte J, Mertens K, Saeys W, Somers B, Roldán-ruiz I, Lootens P. Canopy height measurements and non-destructive biomass estimation of Lolium erenne swards using UAV imagery. Grass and Forage Science, 2019, 74(3): 356-369.
- [21] Rueda-Ayala V, Peña J, Höglind M, Bengochea-Guevara J, Andújar D. Comparing UAV-based technologies and RGB-D reconstruction methods for plant height and biomass monitoring on grass ley. Sensors, 2019.
- [22] Obanawa H, Yoshitoshi R, Watanabe N, Sakanoue S. Portable LiDAR-based method for improvement of grass height measurement accuracy: comparison with SfM methods. Sensors: Basel, Switzerland, 2020, 20(17): 4809.
- [23] 陈春波, 彭建, 李刚勇. 新疆草地生态系统健康评价体系构建. 干旱区研究, 2022, 39(1): 270-281.
- [24] 蔡栋, 李文龙, 朱亚莉, 苏文亮, 朱高峰, 赵志刚, 魏巍. 基于多源数据的甘南草地植被覆盖度遥感监测研究. 兰州大学学报: 自然科学版, 2019, 55(3): 373-379.
- [25] 宋清洁, 崔霞, 张瑶瑶, 孟宝平, 高金龙, 向宇轩. 基于小型无人机与 MODIS 数据的草地植被覆盖度研究——以甘南州为例. 草业科学, 2017, 34(1): 40-50.
- [26] 冷若琳, 张瑶瑶, 谢建全, 李芙凝, 胥刚, 崔霞. 基于多光谱数据与小型无人机的甘南草地非生长季植被覆盖度. 草业科学, 2019, 36(11): 2742-2751.
- [27] Meng B, Gao J L, Liang T G, Cui X, Ge J, Yin J P, Feng Q S, Xie H. Modeling of alpine grassland cover based on unmanned aerial vehicle technology and multi-factor methods: a case study in the east of Tibetan Plateau, China. Remote Sensing, 2018, 10: 320.
- [28] 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. 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, 2017, 26(3): 1-12.
- [29] 刘艳慧, 蔡宗磊, 包妮沙, 刘善军. 基于无人机大样方草地植被覆盖度及生物量估算方法研究. 生态环境学报, 2018, 27(11): 2023-2032.
- [30] 蔡宗磊, 苗正红, 常雪, 刘艳慧, 郝刚, 何龙涛. 基于无人机大样方数据及国产卫星反演草地植被覆盖度方法研究. 草地学报, 2019, 27(5): 1431-1440.
- [31] 伏帅, 张勇辉, 李佳吕, 王萌榛, 彭璐, 冯琦胜, 梁天刚. 不同植被指数和无人机航高对草地盖度估测精度的影响. 草业科学, 2021, 38(1): 11-19.
- [32] Reinermann S, Asam S, Kuenzer C. Remote sensing of grassland production and management-a review. Remote Sensing, 2020, 12(12): 1949.
- [33] 孙世泽, 汪传建, 尹小君, 王伟强, 刘伟, 张雅, 赵庆展. 无人机多光谱影像的天然草地生物量估算. 遥感学报, 2018, 22(5): 848-856.
- [34] 张正健, 李爱农, 边金虎, 赵伟, 南希, 靳华安, 谭剑波, 雷光斌, 夏浩铭, 杨勇帅, 孙明江. 基于无人机影像可见光植被指数的若尔盖草地地上生物量估算研究. 遥感技术与应用, 2016, 31(1): 51-62.
- [35] Wengert M, Wijesingha J, Schulze-Brünninghoff D, Wachendorf M, Astor T. Multisite and multitemporal grassland yield estimation using UAV-borne hyperspectral data. Remote Sensing, 2022, 14(9): 2068.
- [36] Kang XY, Zhang AW, Pang HY, Xiao-yan Kang, Ai-wu Zhang, Hai-yang Pang. Estimation of Grassland Aboveground Biomass From UAV-Mounted Hyperspectral Image by Optimized Spectral Reconstruction. SPECTROSCOPY AND SPECTRAL ANALYSIS, 2021, 41(1): 250-256.
- [37] 李淑贞, 徐大伟, 范凯凯, 陈金强, 佟旭泽, 辛晓平, 王旭. 基于无人机与卫星遥感的草原地上生物量反演研究. 遥感技术与应用, 2022, 37(1): 272-278.
- [38] Zhao X X, Su Y J, Hu T Y, Cao M Q, Liu X Q, Yang Q L, Guan H C, Liu L L, Guo Q H. Analysis of UAV lidar information loss and its influence on the estimation accuracy of structural and functional traits in a meadow steppe. Ecological Indicators, 2022, 135: 108515.

- [39] Da costa M B T, Silva C A, Broadbent E N, Leite R V, Mohan M, Liesenberg V, Stoddart J, Do amaral C H, De almeida D R A, Da silva A L. Beyond trees: mapping total aboveground biomass density in the Brazilian savanna using high-density UAV-lidar data. *Forest Ecology and Management*, 2021, 491: 119155.
- [40] Zhang H F, Tang Z G, Wang B Y, Meng B P, Qin Y, Sun Y, Lv Y Y, Zhang J G, Yi S H. A non-destructive method for rapid acquisition of grassland aboveground biomass for satellite ground verification using UAV RGB images. *Global Ecology and Conservation*, 2022, 33: e01999.
- [41] Taugourdeau S, Diedhiou A, Fassinou C, Bossoukpe M, Diatta O, Goran A, Auderbert A, Ndiaye O, Diouf A, Tagesson T, Fensholt R, Faye É. Estimating herbaceous aboveground biomass in Sahelian rangelands using Structure from Motion data collected on the ground and by UAV. *Ecology and Evolution*, 2022.
- [42] Barnetson J, Phinn S, Scarth P. Estimating plant pasture biomass and quality from UAV imaging across queensland's rangelands. *AgriEngineering*, 2020, 2(4): 523-543.
- [43] 汪传建, 江红红, 尹小君, 孙世泽, 张雅, 李冬. 基于 GPS 与无人机遥感反演草地生物量的放牧场利用强度评估. *农业工程学报*, 2018, 34(19): 82-87.
- [44] Wang D L, Xin X P, Shao Q Q, Brolly M, Zhu Z L, Chen J. Modeling aboveground biomass in hulunber grassland ecosystem by using unmanned aerial vehicle discrete lidar. *Sensors*, Basel, Switzerland, 2017, 17(1): 180.
- [45] Sinde-González I, Gil-Docampo M, Arza-García M, Grefa-Sánchez J, Yáñez-Simba D, Pérez-Guerrero P, Abril-Porras V. Biomass estimation of pasture plots with multitemporal UAV-based photogrammetric surveys. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 101: 102355.
- [46] Shi Y, Gao J, Li X L, Li J X, dela Torre D M G, Brierley G J. Improved estimation of aboveground biomass of disturbed grassland through including bare ground and grazing intensity. *Remote Sensing*, 2021, 13(11): 2105.
- [47] Grüner E, Astor T, Wachendorf M. Biomass prediction of heterogeneous temperate grasslands using an SfM approach based on UAV imaging. *Agronomy*, 2019, 9(2): 54.
- [48] 付晶莹, 彭婷, 江东, 林刚, 边鹏, 韩昊. 草地资源立体观测研究进展与理论框架. *资源科学*, 2020, 42(10): 1932-1943.
- [49] 饶新宇, 李红军, 张圣微, 雒萌, 刘志强, 张静文. 草原植被长势遥感监测方法适宜性研究. *中国生态农业学报: 中英文*, 2021, 29(12): 2084-2092.
- [50] 于海达, 杨秀春, 徐斌, 金云翔, 高添, 李金亚. 草原植被长势遥感监测研究进展. *地理科学进展*, 2012, 31(7): 885-894.
- [51] Possoch M, Bieker S, Hoffmeister D, Bolten A, Schellberg J, Bareth G. Multi-temporal crop surface models combined with the RGB vegetation index from UAV-based images for forage monitoring in grassland. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, XLI-B1: 991-998.
- [52] Lussem U, Hollberg J, Menne J, Schellberg J, Bareth G. Using calibrated RGB imagery from low-cost UAVs for grassland monitoring: case study at the Rengen grassland experiment (RGE), Germany. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017, XLII-2/W6: 229-233.
- [53] Lu B, He Y H, Liu H H T. Mapping vegetation biophysical and biochemical properties using unmanned aerial vehicles-acquired imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39(15/16): 5265-5287.
- [54] 石岳, 马殷雷, 马文红, 梁存柱, 赵新全, 方精云, 贺金生. 中国草地的产草量和牧草品质: 格局及其与环境因子之间的关系. *科学通报*, 2013, 58(3): 226-239.
- [55] 金云翔, 徐斌, 杨秀春, 李金亚, 王道龙, 马海龙. 内蒙古锡林郭勒盟草原产草量动态遥感估算. *中国科学: 生命科学*, 2011, 41(12): 1185-1195.
- [56] 李风贤. 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*, 2017(7): 99-102, 107.
- [57] Jenal A, Lussem U, Bolten A, Gny M L, Schellberg J, Jasper J, Bongartz J, Bareth G. Investigating the potential of a newly developed UAV-based VNIR/SWIR imaging system for forage mass monitoring. *PFG-Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 2020, 88(6): 493-507.
- [58] Lussem U, Schellberg J, Bareth G. Monitoring forage mass with low-cost UAV data: case study at the Rengen grassland experiment. *PFG-Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 2020, 88(5): 407-422.
- [59] de Oliveira G S, Marcato J Jr, Polidoro C, Osco L P, Siqueira H, Rodrigues L, Jank L, Barrios S, Valle C, Simeão R, Carromeu C, Silveira E, André de Castro Jorge L, Gonçalves W, Santos M, Matsubara E. Convolutional neural networks to estimate dry matter yield in a guineagrass breeding program using UAV remote sensing. *Sensors*, 2021, 21(12): 3971.
- [60] Feng L W, Zhang Z, Ma Y C, Du Q Y, Williams P, Drewry J, Luck B. Alfalfa yield prediction using UAV-based hyperspectral imagery and ensemble learning. *Remote Sensing*, 2020, 12(12): 2028.
- [61] Barbedo J G A, Koenigkan L V, Santos P M, Ribeiro A R B. Counting cattle in UAV images-dealing with clustered animals and animal/background contrast changes. *Sensors*, Basel, Switzerland, 2020, 20(7): 2126.
- [62] Kellenberger B, Marcos D, Tuia D. Detecting mammals in UAV images: best practices to address a substantially imbalanced dataset with deep learning. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 216: 139-153.
- [63] Jianmin Z, Xuedong L, Baoshan L. Algorithm of sheep dense counting based on unmanned aerial vehicle images. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(22).

- [64] Sarwar F, Griffin A, Periasamy P, Portas K, Law J. Detecting and counting sheep with a convolutional neural network. 2018 15th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS). Auckland, New Zealand. IEEE, 2018(11): 1-6.
- [65] 杨帆, 邵全琴, 郭兴健, 李愈哲, 王东亮, 张雅娴, 汪阳春, 刘纪远, 樊江文. 玛多县大型野生食草动物种群数量对草畜平衡的影响研究. 草业学报, 2018, 27(7): 1-13.
- [66] Yang F, Shao Q Q, Jiang Z G. A population census of large herbivores based on UAV and its effects on grazing pressure in the yellow-river-source National Park, China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(22): 4402.
- [67] Yang F, Shao Q Q, Guo X J, Tang Y Z, Li Y Z, Wang D L, Wang Y C, Fan J W. Effect of large wild herbivore populations on the forage-livestock balance in the source region of the Yellow River. Sustainability, 2018, 10(2): 340.
- [68] 郭兴健, 邵全琴, 杨帆, 李愈哲, 汪阳春, 王东亮. 无人机遥感调查黄河源玛多县岩羊数量及分布. 自然资源学报, 2019, 34(5): 1054-1065.
- [69] 邵全琴, 郭兴健, 李愈哲, 汪阳春, 王东亮, 刘纪远, 樊江文, 杨帆. 无人机遥感的大型野生食草动物种群数量及分布规律研究. 遥感学报, 2018, 22(3): 497-507.
- [70] 高娟婷, 孙飞达, 霍霏, 张履冰, 周俗, 杨廷勇, 边巴扎西. 无人机遥感技术在草地动植物调查监测中的应用与评价. 草地学报, 2021, 29(1): 1-9.
- [71] 夏鑫. 多无人机协同草原火情监测的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2021.
- [72] 朝鲁门. 无人机技术在草原生态遥感监测方面的探索. 南方农业, 2018, 12(23): 164-165.
- [73] 胡可, 陈思思, 王俊伟. 无人机载红外载荷在应急测绘中的应用. 测绘科学, 2015, 40(10): 60-64.
- [74] McKenna P, Erskine P D, Lechner A M, Phinn S. Measuring fire severity using UAV imagery in semi-arid central Queensland, Australia. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(14): 4244-4264.
- [75] 哈斯. 草原雪灾损失快速评估研究, 2017.
- [76] Liang H, Huang X D, Sun Y H, Wang Y L, Liang T G. Fractional snow-cover mapping based on MODIS and UAV data over the Tibetan Plateau. Remote Sensing, 2017, 9(12): 1332.
- [77] 郁尚钊, 孙义, 侯扶江. 无人机技术在草原研究和管理中的应用. 草学, 2020(4): 8-18.
- [78] 宋勇, 陈兵, 王琼, 苏维, 孙乐鑫, 赵静, 韩焕勇, 王方永. 无人机遥感监测作物病虫害研究进展. 棉花学报, 2021, 33(3): 291-306.
- [79] Wen A M, Zheng J H, Chen M, Mu C, Tao M. Spatial distribution of rodent pests in desert forest based on UAV remote sensing. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium(IGRASS). Beijing, China. IEEE, 2016(7): 1804-1807.
- [80] 孙珊珊, 满都呼, 伟军, 朝克图, 阿焱, 张恒, 付和平, 武晓东, 袁帅. 基于无人机的东北鼯鼠种群数量调查最佳尺度选择. 草业科学, 2021, 38(9): 1841-1849.
- [81] 马涛, 郑江华, 温阿敏, 陈梦, 刘忠军. 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, 2018, 38(3): 953-963.
- [82] 轩俊伟, 郑江华, 倪亦非, 穆晨. 基于动力三角翼平台的草原鼠害遥感监测研究. 中国植保导刊, 2015, 35(2): 52-55.
- [83] 花蕊, 周睿, 包达尔罕, 董克池, 唐庄生, 花立民. 基于旋翼无人机低空遥感的高原鼠兔危害等级划分技术研究. 草业学报, 2022, 31(4): 165-176.
- [84] 张涛, 杜健民, 张海军, 皮伟强, 高新超, 朱相兵. 基于无人机高光谱荒漠草原鼠洞识别方法研究. 光电子·激光, 2022, 33(2): 120-126.
- [85] 郑永军, 吴刚, 王一鸣, 毛文华. 基于模糊模式的蝗虫图像识别方法. 农业工程学报, 2010, 26(S2): 21-25, 430.
- [86] 高烟燕, 马青山, 张欣雨, 马建海, 宜树华, 李葆春, 张建国, 卢霞梦, 孙义. 基于无人机的草原毛虫监测初探. 草业科学, 2020, 37(10): 2106-2114.
- [87] 王佳宇, 杜波波, 高书晶, 孟根其其格, 王宁, 林克剑. 草原蝗虫监测预警技术的研究进展. 植物保护学报, 2021, 48(1): 65-72.