

无人机承载不同类型传感器在草原监测中的应用与展望

刘敏,唐小琼,孙宇,唐巍*

(四川省林业和草原调查规划院,四川 成都 610081)

摘要:草原具有生产和生态的双重价值,对经济发展和生态环境保护具有重要作用。无人机技术因成本低、精度高、时效性强等优势在农林业生产管理中广泛应用,通过收集分析近20年来国内外无人机承载不同传感器在草原监测方面的研究情况,发现可见光相机应用最为广泛,可以及时准确反映覆盖类型和植被空间分布;多光谱成像仪在植被指数反演生物量表现突出;高光谱成像仪有着连续且丰富的波段数据,与人工智能和大数据相结合,可逐步实现草原智能化调查;热红外成像仪在冠层温度与水分监测上表现突出;激光雷达在冠层高度和植被结构方面表现优异。但各种传感器都存在着不同程度的应用难题,就此对无人机发展和传感器应用提出建议,以期为解决草原监测的技术瓶颈和发展前景提供理论参考。

关键词:无人机;传感器;草原监测;应用;建议

中图分类号:S812 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2024)06-0001-10

DOI:10.13817/j.cnki.cyyep.2024.06.001



草地是一种空间分布广阔的重要陆地生态系统。全球草地面积有35万 hm^2 ,大约覆盖26%的陆地面积^[1],根据第一次草地普查结果表明,中国各类天然草地约有 $2.65 \times 10^8 \text{hm}^2$,占国土面积的25%^[2]。草原生态系统具有提供畜牧业和植物资源产品、气候调节、土壤碳积累、截留降水、侵蚀控制、废弃物降解、营养物质循环等功能,是极其重要的生态屏障^[3]。在我国社会经济发展和生态环境保护等方面具有重要作用。

草地资源调查和监测是动态掌握资源状况、实施生态保护、提升草原碳汇、制定农牧业发展决策,推进草原生态文明建设的重要前提^[4]。目前草地资源调查

以传统样方法为主^[5],即调查人员采用RTK(Real-Time Kinematic)、手持GPS(Global Position System)、数码相机、样方框等工具精准获取当时草原的草地类型、地形地貌、生长态势、地上生物量、利用情况等因子,通过计算机处理后分析和评价区域草地资源的空间格局和时间动态,但传统样方法存在工作效率低、人力成本高、安全隐患大等弊端。

随着卫星遥感影像开源和民用小微型无人机的大力推行,草地资源调查工作逐步走向信息化、专业化。已经有大量学者基于多类型卫星发射以及长时间序列遥感图像(如Landsat, SPOT, ENVISAT, MODIS, AVHRR, Sentinel等)分析草原资源的时空变化、地上生物量、草地退化等^[6-8]。近年来,无人机遥感以低成本、低风险、高时效的特点^[9-10],在农林业生产与管理上大量应用,先后有学者利用无人机承载可见光相机研究草原鼠害^[11]、沙化调查^[12]、地上草地生物量^[13];承载多光谱成像仪计算草地植被指数,估算地上生物量^[14-15];承载高光谱成像仪开展草地地物分类和植物入侵风险评价^[16]。

收稿日期:2024-07-03;**修回日期:**2024-09-06

基金资助:四川省自然科学基金项目“基于遥感反演的川西高原退化草地监测评估关键技术研究”(2023NSFSC0204)

作者简介:刘敏(1990-),女,重庆开州人,硕士,工程师,主要从事草地生态学研究。

E-mail:liumin20200908@163.com

*通信作者。E-mail:sked_tw@126.com

基于中国知网和 Web of Science,以无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)、草原监测(Grassland monitoring)、多光谱成像仪(Multispectral cameras)、高光谱成像仪(Hyperspectral cameras)、热红外测温成像仪(Thermal cameras)、激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)等关键词检索了2004年至2024年期间关于无人机在草原监测方面相关的文献,拟通过了解国内外无人机承载不同传感器在草原监测方面的研究进展,总结无人机数据的处理方法、技术路线和研究成果,分析各种传感器的优劣势,探讨无人机在未来草原生产管理中的应用价值和需求,以期为后续无人机设计与开发、传感器选择与应用、草原“天空地”一体化监测体系的构建与完善提供理论支撑。

1 无人机载荷及用途

无人机遥感系统(Unmanned Aerial Vehicle remote sensing system, AVRSS)是一种以 UAV 为平台,以各种成像与非成像传感器为主要载荷,飞行高度一般在千米以内,能够获取遥感影像、视频等数据的无人航空遥感与摄影测量系统^[17]。草原监测上常应用无人机低空遥感技术获取地面或空中实时影像和各类遥感数据,获取的数据具有分辨率高、易判读、时效性强、成本低、灵活性强、云下获取影像等特点^[18],常见的传感器有可见光相机、多光谱成像仪、高光谱成像仪、热红外测温成像仪、激光雷达扫描仪等,其中热红外测温成像仪可以快速获取温度,在火灾监测上应用广泛^[19],激光雷达扫描仪具穿透能力,在草层高度和植被垂直结构信息方面表现突出^[20-21]。

2 无人机承载不同类型传感器在草原生态研究中的进展

2.1 可见光相机

可见光相机的图像特征具有分辨率高、灰度特征明显、纹理信息丰富和判读难度低等特点(表2),图像通过分析软件(ENVI、大疆智图、Pix4Dmapper、飞马智理图、Agisoft Photo Scan Professional)生成正射影像和植被指数(表3),利用目视判读、线性回归、机器学习、深度学习等方法,获得草原植被盖度、地上生物量估算、草原鼠害提取、草原虫害的发生等信息,在草原监测上应用非常广泛。张翀等^[22]利用无人机(UAV)使用4种图像语义分割网络对森林-草原混合生态系统中的土地覆盖进行分类,结果表明 LResU-net 网络产生的结果比 U-net、ResU-net、LU-net 更加准确,认为是对森林草原混合生态系统中土地覆盖进行分类的最合适方法;赵玉刚等^[23]基于改进 DeepLabv3+ 的无人机林区图像地物分割方法,对草原、灌木、乔木、道路等进行分类;张正健等^[24]基于无人机承载可见光相机获取若尔盖高原典型样带的 RGB 影像,并计算6个可见光植被指数对若尔盖草原地上生物量进行估算,发现基于不同波段建立的植被指数存在差异;Grüner 等^[25]利用可见光相机对农场人工混播牧草,在每次刈割前获取 RGB 影像和地面调查数据,生成3D作物表面模型计算牧草表面高度,从而预测整个农场的草产量;余洁等^[26]基于大疆精灵 Phantom 4 RTK 微型多旋翼无人机获得的 RGB 影像,采用分类回归树(classification and regression tree, CART)、K 最邻近(K-nearest neighbor, KNN)、随机

表1 无人机承载不同传感器的产出结果及应用方向

Table 1 The output results and application directions of UAV carrying different sensors

传感器类型	产出结果	应用方向
可见光相机	正射影像、数字表面模型、数字线划图、三维点云	草原征占、草原违法督察、草原空间格局分布、草原沙化退化监测、草原植被分类、草原有害生物调查、草原放牧管理、牧草产量预测
多光谱成像仪	多波段光谱信息、光谱指数、二维图像	地上生物量监测、放牧监测;物候期观测、草原退化沙化监测、林草覆盖率
高光谱成像仪	以高光谱分辨率同时获取连续的地物光谱图像、全波段光谱信息、光谱指数、二维图像	地上生物量监测、指示物种监测、草原退化沙化监测、土壤墒情监测、草原病虫害监测
热红外测温成像仪	热成像图像、二维图像、温度图谱	草原鼠虫害监测、野生动物监测、草原火灾监测
激光雷达扫描仪	点云数据、数字高程模型、数字地面模型、冠层高度模型	草层高度、地上生物量估测,草原载畜量估测

森林(random forest, RF)和支持向量机(support vector machine, SVM)等方法对宁夏贺兰山荒漠草原植被进行分类,提出RF分类精度最高,分类总体精度达到87.77%,Kappa系数为0.79。于惠等^[27]利用UAV可见光影像构建了6个可见光植被指数,采用监督分类与植被指数直方图相结合的阈值法提取荒漠草地覆盖度,发现归一化绿红差异指数对草地覆盖度的提取精度最高。伏帅等^[28]发现常见植被指数对荒漠草地的估测效果较差,针对荒漠草地提出了一种能够有效估测荒漠草地植被盖度的荒漠植被指数(desert-vegetation index, DVI)。Lussem等^[29]基于无人机RGB图像构建了6个可见光植被指数,利用高分辨率冠层表面模型估算温带草地生物量(交叉验证 R^2 干生物量=0.57~0.73,新鲜生物量=0.43~0.79)。熊瑞东等^[30]基于无人机正射影像利用CART决策树、支持向量机、最邻近、贝叶斯4种监督分类方法分类,对若尔盖湿地自然保护区的草原鼠害进行比较分析,发现最邻近分类法对高原鼠兔鼠害提取精度最高,贝叶斯分类法是高原鼠兔鼠害信息提取的最佳方法。花蕊等^[31]基于无人机可见光影像和地面调查结果,获得洞口数、地上生物量、盖度和可食牧草比例等,采用自主设计的软件,得到草地危害指数(damage to rangeland index, DRI),将试验区鼠害地划分为5个危害等级。于红妍等^[32]利用获取祁连山国家公园青海片区高寒草原毛虫空间分异特征,结合BIOMOD生

态位模型、MOD13Q1-NDVI数据和土壤、气候和地形等环境因子,获取历年草原毛虫生态位。梁俊欢^[33]利用极狭无人机获取影像,应用深度学习目标检测算法Mask-RCNN对白喉乌头(*Aconitum leucostomum*)进行自动识别,结果发现ResNet50网络在检测白喉乌头的性能表现优异;Yuba等^[34]研究无人机在不同飞行高度对放牧牧场中狼尾草(*Pennisetum alopecuroides*)的检测精度,发现飞行高度56m获得了杂草检测的最佳精度、最小误差。可见光相机的广泛应用,突出了它操作简单、结果明了的优势,目前仍有大量学者利用深度学习、人工智能等方法,挖掘可见光图像更多的应用价值,以期弥补其产出波段少、反演精度不高的短板。

表2 常用于草原监测的可见光相机

Table 2 RGB cameras frequently used in grassland monitoring

相机型号	分辨率/pixel	有效像素/万	重量/g
DJI Phantom 4	4 000×3 000	1 240	1 380
DJI Phantom 4 Pro	4 000×3 000	2 000	1 368
DJI Phantom 4 RTK	4 000×3 000	2 000	1 391
Sony RX1	6 000×4 000	2 400	450
Sony QX-1L	5 456×3 632	2 010	158
Canon5D Mark II	5 616×3 744	2 110	810
“御”Mavic 2 Pro	5 472×3 648	2 000	907
“御”Mavic 2 Zoom	4 000×3 000	1 200	905

表3 可见光植被指数

Table 3 Visible vegetation index

植被指数	全称	公式	参考文献
R	归一化红	$R=r/(r+g+b)$	[35]
G	归一化绿	$G=g/(r+g+b)$	[35]
B	归一化蓝	$B=b/(r+g+b)$	[35]
VEG	植物指数	$VEG=g/(r^{0.667} \times b^{0.333})$	[36]
ExG	超绿植被指数	$ExG=2g-r-b$	[37]
ExGR	超绿超红差分植被指数	$ExGR=E \times G - (1.4r - g)$	[38]
GLI	绿叶指数	$GLI=(2g-r-b)/(2g+r+b)$	[39]
CIVE	植被颜色指数	$CIVE=0.441r-0.811g+0.385b+18.78745$	[40]
COM	组合指数	$COM=0.25ExG+0.3ExGR+0.33CIVE+0.12VEG$	[41]
WI	Woebbecke指数 Woebbecke index	$WI=(g-b)/(r-g)$	[42]
Lab	Lab指数 Lab index	$Lab=a$	[43]

注:公式中:r、g、b分别为红、绿、蓝三通道灰度值的归一化值,a为Lab颜色空间中的a通道灰度值。

2.2 多光谱成像仪

无人机承载多光谱成像仪,通常可以获得4-12

个光谱波段,具有光谱信息丰富、数据量小的特点(表4),对于植被覆盖度提取、草地生长量和草原退化情

况分析等应用较为有利。近年来,多个学者运用无人机承载多光谱成像仪在草地生物量估算、草种识别、草原退化、草原植被覆盖度和林草覆盖率进行研究分析。那木拉等^[44]采用Parrot Sequoia无人机机载多光谱成像仪,分别从像元尺度和对象尺度上开展了荒漠草原典型物种的对象识别,发现多光谱成像仪对集中连片的植物种类识别能力较强;沈思聪等^[45]基于无人机多光谱和地面调查相结合,挑选出NDVI、EVI等10个常见植被指数和5个光谱波段,采用SVM对21个紫花苜蓿品种的地上生物量和叶绿素含量构建预测模型,发现经过智能算法精化优化后的SVM的地上生物量和叶绿素含量的估算更准确;汪传建等^[46]利用多光谱数据生成比值植被指数(RVI),然后分阴坡阳坡反演草地生物量,并将其与绵羊的采食轨迹结合,得到草地的利用情况和剩余有效利用面积。刘嘉慧等^[47]利用多光谱无人机生成NDVI,结合植被冠层分析仪实地测量草地叶面积指数(Leaf area index, LAI),分析了不同放牧强度下LAI的变化和牛行为的变化。赵莹等^[48]通过建立8种多光谱植被指数和8种可见光植被指数,采用阈值法、支持向量机法计算林草覆盖率,发现在有阴影的情况下,多光谱数据计

算林草覆盖率更具有适应性和稳定性。Gao Shuhan等^[49]基于无人机多光谱影像结合实地调查,对鄂托克前旗的荒漠草地,采用植被指数和随机森林等方法进行草原退化评估,建立了平均相对误差为9.49%的荒漠草地综合退化指数。Mazur等^[50]使用多光谱成像仪和可见光相机获取数据,通过建立NDVI与植被高度关系,实现草原作物生产力的远程监控。Pöttker等^[51]利用多光谱无人机获取遥感数据,然后通过卷积神经网络(CNN)对德国下萨克森州奥斯纳布吕克区的草原植物群落进行空间分类,发现单事模型分类精度较高,多时态分类模型的精准度较低,且会受到物候期和植被组成的影响。Strong等^[52]运用多光谱无人机,基于6种植被指数对3种草原改良类型(未改良草原、改良草原和人工牧场)进行植物群落分类分析,研究发现强型归一化差值植被指数(ENDVI)在植被群落分类上最有效。综上,多光谱成像仪在生物量估算、草原退化监测的表现能力强,但市面上流通的商用多光谱的中心波长和波段宽度主要用于农作物和其他自然资源监测上,对草原调查监测的贴合性较差,且光谱段灵活性较差,图像分辨率较低。

表4 常用于草原监测的多光谱成像仪

Table 4 Multispectral cameras frequently used in grassland monitoring

相机型号	通道数	分辨率/pixel	波段/nm	重量/g
DJI Phantom 4 多光谱版	5	1 600×1 300	450 ± 16、560 ± 16、650 ± 16、730 ± 16、840 ± 26	1 487
DJI Mavic 3 多光谱版	4	1 920×1 080	560 ± 16、650 ± 16、730 ± 16、860 ± 26	951
Parrot Sequoia	4	1 280×960	550 ± 40、660 ± 40、735 ± 10、790 ± 40	35
Micro MCA12 Snap 多光谱相机	6	1 280×1 024	450—1000	497
Red Edge-MX	5	1 280×960	475 ± 20、560 ± 20、668 ± 10、717 ± 10、842 ± 40	458
MS600 V2	6	280×960	450 ± 30、555 ± 27、660 ± 22、720 ± 10、750 ± 10、840 ± 30	280

2.3 高光谱成像仪

高光谱遥感技术源于多光谱遥感,它融合了图像处理及光谱分析,高光谱每个像元可有数十或数百个光谱信息,可以获取大量连续窄波段的影像,并且光谱分辨率高(表5),因此该技术在地物识别分类及信息提取方面具有优势^[53]。Polley等^[54]利用高光谱无人机,通过遥感反射光谱中的空间异质性来模拟草原物种组成、丰富度的空间转换(β 多样性)和总空间尺度的物种多样性(γ 多样性),发现当反射率测量的颗粒一致的情况下,草原的 γ 多样性和 β 多样性都可以通

过植被光学特性中的空间异质性建模实现。Melville等^[55]利用高光谱无人机系统影像对塔斯马尼亚中部地区的低地原生草原群落进行分类,发现高光谱分辨率UAS数据集可以实现精细的草原植物群落分类,并显示出群落和物种水平映射的巨大潜力。Wengert等^[56]基于无人机携带的高光谱成像仪获取多站点和多时相数据,采用偏最小二乘回归、支持向量回归、随机森林回归和Cubist回归4种机器学习(ML)算法建模估算草地生物量,发现基于ML算法的Cubist回归方法表现最佳,对不同时间和地点的草地鲜物质产量

和干物质产量反应稳定性最高。杨红艳等^[57]通过相关性分析提取特征波段,结合深度学习卷积神经网络分类,对荒漠草原植被进行分类,为草原物种水平分类提供了一个途径。乌尼乐等^[58]利用高光谱数据、地面调查、支持向量机和随机森林等方式结合,发现随机森林识别模型对退化指示物种冷蒿(*Artemisia frigida*)的识别精度更高。张涛等^[59]利用无人机高光谱数据提出鼠洞指数(rat hole index, RHI),并对其进行了精度矫正,发现RHI对鼠洞识别的精度可达97%, Kappa系数可达0.93。张燕斌等^[60]以高光谱数据为基

础提出3D-ResNet18计算机深度学习植被覆盖度提取方法,经验证,该方法的估算精度可达97.56%。胡宜娜等^[61]利用XGBoost对高光谱原始波段进行优化选择,结合扩展形态学属性剖面特征,利用稀疏多项式逻辑回归与自适应稀疏表示两种分类方法分别对可食牧草与毒杂草进行识别分类,发现自适应稀疏表示分类法对草种的识别更精细。高光谱成像仪获取的数据精度高,但由于其价格昂贵、数据处理流程复杂、光谱组合方式筛选难度大等原因,导致高光谱在草原监测中应用较少。

表5 常用于草原监测的高光谱成像仪

Table 5 Hyperspectral cameras frequently used in grassland monitoring

相机型号	通道数	分辨率/nm	光谱范围/nm	重量/g
GaiaSky-mini 型	256	3.5	400~1 000	1 300
Gaiasky-mini3-VN型	448	5±0.5	400~1 000	1 200
Cubert UHD 185型	125	4	450~946	470
Pika XC2	447	1.3	400~1 000	2 200

2.4 热红外测温成像仪

热红外测温成像仪可以探测物体的热辐射(表6),监测地表温度和水分,常用于草原火灾监测、干旱评估、国家自然保护区野生动物监测等方面。Barber等^[62]使用无人机电热红外测温仪和可见光传感器估计草原中的燃料水分,在华盛顿西部的草地上预测的不同草原优势种可燃物水分不一致。Eide等^[63]运用无人机承载热成像和多光谱传感器,分析杂草冠层对草甘膦抗性,认为热成像在杂草种群中草甘膦抗性预测中表现不佳。胡乔等^[64]从实际野生动物利用的角度进行栖息地评估,以反映潜在的栖息地质量差异,提出了一种融合了热图像视觉智能、无人机摄影测量和自动机器学习(AutoML)的方法,实现野生动物自动制图,推导生态指标,用于栖息地利用评估。Gonza-

lez等^[65]通过无人机和人工智能图像处理相结合的方法来定位野生动物在其自然栖息地的位置,实现无人机图像中的野生动物自动监测。王楚等^[66]基于无人机热红外图像提取冠层温度,识别不同灌溉梯度的气孔导度阈值,利用随机森林算法构建气孔导度的水牛草诊断模型,探讨无人机热红外图像对水牛草种子产量监测中的应用。Scholten等^[67]利用无人机承载热红外测温成像仪对草原鸣禽巢穴进行监测定位,发现无人机辅助搜索定位巢穴的速度比传统方法快28%,效率更高,且带来的人侵风险更低。热红外测温成像仪在冠层温度、植被水分方面表现优异,但因其对环境敏感,不同天气、不同时段获取的影像差异较大,难以重复试验。

表6 常用于草原监测的热红外测温成像仪

Table 6 Thermal cameras frequently used in grassland monitoring

型号	测温范围/℃	热灵敏度/mK	重量/g
FLIR Duo Pro R	高增益: -25~+135 低增益: -40~+550	<50	320
FLIR Vue Pro R 640	-55~+90	<50	110
Zenmuse XT S	高增益: -40~+150; 低增益: 100~+550	≤40	387

2.5 激光雷达扫描仪

激光雷达是激光测距技术、惯性测量单元、GPS差分定位等技术的集成体,以激光为发射介质,通过测量地面点激光回波脉冲相对于发射激光主波之间的时间计算传感器到地面采样点之间的距离(表7),可以直观表达物体的三维形态^[68]。王东亮等^[69]利用无人机激光雷达对呼伦贝尔草原生态系统冠层高度和草原覆盖度进行模型分析,提取的平均冠层高度、最大冠层高度和分数覆盖度估计地上生物量。张翔等^[70]利用无人机激光雷达提取不同放牧强度下内蒙古草原植被参数,研究不同植被参数之间的相互关系

(冠层高度、植被覆盖分数和地上生物量),发现飞行高度对冠层高度没有显著影响。Getzin等^[71]人基于高空影像和激光雷达无人机对分析草原裸土间隙,探索植被间隙、乔木和灌木的尺度依赖性模式。Naoko等^[72]基于无人机LiDAR的结构指数(V型底部、V型中间和V型顶部)对河堤上的草和杂草物种进行分类。Miura等^[73]利用LiDAR数据推导河堤草本植被的垂直结构和植被结构指数,发现当中间植被丰富时,底层植被会被低估。激光雷达扫描仪在三维测量和空间结构上表现突出,但因其价格昂贵、使用流程复杂等原因,在草原监测实际应用中很少。

表7 常用于草原监测的激光雷达扫描仪

Table 7 LiDAR frequently used in grassland monitoring

型号	测距精度	扫描角	激光波长/nm	重量/g
禅思 L2	2cm@150 m	重复扫描:水平 70°× 3° 非重复扫描:水平 70°× 75°	905	320
Velodyne HDL-32E	<50 mK	40°(+10.67°~-30.67°)	905	110
LiAir 300	≤40 mK	40.3°(-20.8°~+19.5°)	905	1 100

3 结论与展望

通过详细探讨无人机承载不同传感器在草原监测中的研究进展,重点分析了可见光相机、多光谱成像仪、高光谱成像仪、热红外测温成像仪、激光雷达扫描仪等遥感器,发现每种遥感器具有明显的优劣势(表8),其中可见光相机在覆盖类型变化、植被空间分布和草场管理上具有显著优势,但因波段有限,导致反演模型精度不高;多光谱成像仪在草畜平衡管理、

产草量估算上具有显著优势,但容易受天气影响,图像分辨率不高,且光谱段灵活性较差;高光谱成像仪在植物病理分析、毒害草识别有显著优势,但价格昂贵、数据处理难度大,应用范围小;热红外测温成像仪在热源体分析、水分胁迫等方面表现突出,但其对环境温度敏感,试验重复难度大。激光雷达扫描仪在三维测量、冠层高度估算和植被结构分析方面表现优秀,但价格昂贵、数据量巨大、使用流程复杂,应用普及性较差。

表8 传感器的优劣势分析

Table 8 Analysis of advantages and disadvantages of sensors

传感器类型	优点	劣势	应用情况
可见光相机	价格低、操作简单、结果明了。	易受天气影响,波段有限。	在覆盖类型变化及分类、牧场管理、产草量估算、鼠虫害监测、毒害草识别等方面均有应用。
多光谱成像仪	波段数适中、操作简单、数据结果丰富。	易受天气影响,光谱段灵活性较差,图像分辨率较低。	主要应用牧场管理、草畜平衡管理、产草量估算、草原健康监测和生态保护等方面。
高光谱成像仪	波段数多且连续,光谱数据分辨率高。	价格昂贵、数据处理流程复杂、易受光线影响,光谱组合方式筛选难度大。	目前仍处于小区试验阶段,尚未大范围应用。其在草原地物智能化识别、植物病害方面和生态保护方面具有较好的应用前景。
热红外测温成像仪	可获得温度信息,分析热源物体,视线受阻的环境适应性良好。	易受监测环境的温度影响,重复试验难度大。	主要应用在草原火灾监测和管理、干旱评估和野生动物监测等方面。
激光雷达扫描仪	丰富的点云数据,可获得三维信息。	价格昂贵、数据量大、使用流程复杂、硬件要求高。	目前仍处于试验阶段,在草原估产、草原监测、草原植被群落结构分类等方面应用前景良好。

无人机因分辨率高、易判读、时效性强等特点,未来在草原生产管理工作中应用前景广阔,但现有的无人机在草原监测方面仍有提升的空间,具体为:1)是急需利用高新技术来提升无人机的环境抗力、续航能力、无网络精准定位等问题,保障监测的效率;2)是需要研发具备识别草原资源特性的无人机和传感器产品,在针对草原监测的难题上寻求技术突破,将热成像和多光谱相结合,实现草原鼠洞自动识别、自动投饵等智能化可视化技术;3)是需要完善数据分析软件功能,搭建常用模型和分析环境,使分析更加智能化。

参考文献:

- [1] 赵同谦,欧阳志云,郑华,等. 草地生态系统服务功能分析及其评价指标体系[J]. 生态学杂志, 2004, 23(6): 155-160.
- [2] 国家林业和草原局. 2021中国林草资源及生态状况[EB/OL]. <https://www.forestry.gov.cn/main/586/20221129/084459358299794.html?eqid=f986c5c20002394c000000364531eb6>. 2024-06-28.
- [3] 鲁春霞,谢高地,成升魁,等. 中国草地资源利用:生产功能与生态功能的冲突与协调[J]. 自然资源学报, 2009, 24(10):1685-1696.
- [4] 张勇辉,冯琦胜,梁天刚,等. 草地资源调查与智能分析系统简介[J]. 草业科学, 2023, 40(8):2171-2178.
- [5] 巴图娜存,胡云锋,艳燕,等. 1970年代以来锡林郭勒盟草地资源空间分布格局的变化[J]. 资源科学, 2012, 34(6): 1017-1023.
- [6] 王福成,魏学红,雷延民,等. 基于SPOT NDVI的2010-2018年青海省草地资源动态监测研究[J]. 草原与草坪, 2023, 43(3):100-107.
- [7] 张玉琢,杨志贵,于红妍,等. 基于STARFM的草地上生物量遥感估测研究——以甘肃省夏河县桑科草原为例[J]. 草业学报, 2022, 31(6):23-34.
- [8] 阿卜杜热合曼·吾斯曼,玉素甫江·如素力,张发,等. 基于遥感监测的天山新疆段草地退化时空特征及其与气候因子的关系[J]. 草业科学, 2023, 40(7):1779-1792.
- [9] 李宗南,陈仲新,王利民,等. 基于小型无人机遥感的玉米倒伏面积提取[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19): 207-213.
- [10] 张文,王志伟,吴红芝,等. 利用无人机提取样本点的多源遥感影像分类方法研究[J]. 草原与草坪, 2021, 41(5):22-30.
- [11] 堂格斯,包玉龙,孙长青,等. 基于无人机遥感和深度学习
- 的布氏田鼠洞群识别[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2023, 38(5):448-457.
- [12] 徐渝杰,舒向阳,陶敏,等. 基于无人机和机器学习的川西北修复沙地植被信息提取[J]. 四川农业大学学报, 2024, 42(1):181-187.
- [13] 张正健,李爱农,边金虎,等. 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[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(1):51-62.
- [14] 孙世泽. 基于无人机多光谱数据的天然草地生物量估算方法研究[D]. 石河子:石河子大学, 2018.
- [15] 张德会. 基于无人机多光谱影像的植被信息遥感提取[J]. 北京测绘, 2022, 36(7):919-923.
- [16] 朱相兵. 基于无人机高光谱遥感的草原地物分类与反演研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2023.
- [17] 李德仁,李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(5): 505-513.
- [18] 孙中宇,陈燕乔,杨龙,等. 轻小型无人机低空遥感及其在生态学中的应用进展[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2):528-536.
- [19] 梁远志. 无人机红外影像在森林火灾监测中的应用研究[J]. 林业科技情报, 2023, 55(3):13-15.
- [20] 郭庆华,胡天宇,马勤,等. 新一代遥感技术助力生态系统生态学研究[J]. 植物生态学报, 2020, 44(4): 418-435.
- [21] 李刚勇,陈春波,李均力,等. 低空无人机遥感在草原监测评价中的应用进展[J]. 生态学报, 2023, 43(16): 6889-6901.
- [22] Zhang C, Zhang L, Zhang B Y J, *et al.* Land cover classification in a mixed forest-grassland ecosystem using LResU-net and UAV imagery[J]. Journal of Forestry Research, 2022, 33(3):923-936.
- [23] 赵玉刚,刘文萍,周焱,等. 基于注意力机制和改进DeepLabV3+的无人机林区图像地物分割方法[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2024, 48(04):93-103.
- [24] 张正健,李爱农,边金虎,等. 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[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(1):51-62.
- [25] Esther Grüner, Mckel T, Rüdiger Gra, *et al.* Using RGB remote sensing for biomass prediction in temperate grassland [C]//Sustainable meat and milk production from grasslands, 2018.
- [26] 余洁,沈爱红,石云,等. 基于无人机遥感影像和面向对

- 象技术的荒漠草原植被分类[J]. 草业学报, 2024, 33(7):1-14.
- [27] 于惠, 吴玉锋, 牛莉婷. 基于无人机可见光图像的荒漠草地覆盖度估算[J]. 草业科学, 2021, 38(8):1432-1438.
- [28] 伏帅, 冯琦胜, 党菁阳, 等. 基于无人机图像的草地植被覆盖度估算方法比较[J]. 草业科学, 2022, 39(3):455-464.
- [29] Lussem U, Bolten A, Menne J, *et al.* Estimating biomass in temperate grassland with high resolution canopy surface models from UAV-based RGB images and vegetation indices [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2019, 13(3):034525.
- [30] 熊瑞东, 程武学, 熊钰丹, 等. 基于无人机的若尔盖高寒草地鼠害程度估算模型研究[J]. 中国农业信息, 2020, 32(6):32-45.
- [31] 花蕊, 周睿, 包达尔罕, 等. 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[J]. 草业学报, 2022, 31(4):165-176.
- [32] 于红妍, 张世荣, 赵兴群, 等. 基于无人机航拍和生态位模型的草原毛虫宜生区研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3):224-233.
- [33] 梁俊欢, 董峦, 孙宗玖, 等. 基于Mask-RCNN的无人机影像白喉乌头检测[J]. 草食家畜, 2023(1):44-51.
- [34] Yuba N, Kawamura K, Yasuda T, *et al.* Counting of *Penisetum alopecuroides* at heading stage in a grazed pasture using images from an unmanned aerial vehicle [J]. *Grassland Science*, 2020, 66(4):285-292.
- [35] 吴强. 基于无人机遥感和机器学习的河套灌区小麦生长监测及产量预测[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [36] Hague T, Tillett N D, Wheeler H. Automated Crop and Weed Monitoring in Widely Spaced Cereals [J]. *Precision Agriculture*, 2006, 7(1):21-32.
- [37] Woebbecke D M, Meyer G E, Bargaen K V, *et al.* Color Indices for Weed Identification Under Various Soil, Residue, and Lighting Conditions [J]. *Transactions of the Asae*, 1995, 38(1):259-269. DOI: 10.13031/2013.27838.
- [38] Neto J C. A combined statistical-soft computing approach for classification and mapping weed species in minimum-tillage systems [D]. Lincoln: The University of Nebraska, 2004.
- [39] Louhaichi M, Borman M M, Johnson D E. Spatially Located Platform and Aerial Photography for Documentation of Grazing Impacts on Wheat [J]. *Geocarto International*, 2001, 16(1):65-70.
- [40] Kataoka T, Kaneko T, Okamoto H, *et al.* Crop growth estimation system using machine vision [C]// *Advanced Intelligent Mechatronics*, 2003.
- [41] Guijarro M, Pajares G, Riomoros I, *et al.* Automatic segmentation of relevant textures in agricultural images [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011, 75(1):75-83.
- [42] Woebbecke D M, Meyer G E, Bargaen K V, *et al.* Color Indices for Weed Identification Under Various Soil, Residue, and Lighting Conditions [J]. *Transactions of the Asae*, 1995, 38(1):259-269.
- [43] 牛亚晓, 张立元, 韩文霆. 基于Lab颜色空间的棉花覆盖度提取方法研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10):240-249.
- [44] 那木拉, 李渊, 王乌云, 等. 基于无人机多光谱影像的荒漠草原典型物种识别[J]. 中国农业信息, 2022, 34(2):37-48.
- [45] 沈思聪, 张靖雪, 陈鸣晖, 等. 基于无人机多光谱估测不同品种紫花苜蓿的地上生物量和叶绿素含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(12):3847-3852.
- [46] 汪传建, 江红红, 尹小君, 等. 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[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19):82-87.
- [47] 刘嘉慧, 余瑞, 王有, 等. 基于多光谱无人机的不同放牧策略对草地叶面积指数变化动态解析[J]. 热带生物学报, 2024, 15(1):60-72.
- [48] 赵莹, 王光辉, 任建锋, 等. 基于无人机可见光及多光谱数据的林草覆盖率提取方法研究[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2023, 21(5):120-128.
- [49] Gao S H, Yan Y Z, Yuan Y, *et al.* Comprehensive degradation index for monitoring desert grassland using UAV multispectral imagery [J]. *Ecological Indicators*, 2024, 165:112194.
- [50] Mazur P, Chojnacki J. Remote grasslands crop productivity measurements with usage of multispectral camera and small unmanned aerial vehicle [J]. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2018, 63:151-154.
- [51] Pöttker M, Kiehl K, Jarmer T, *et al.* Convolutional neural network maps plant communities in semi-natural grass-

- lands using multispectral unmanned aerial vehicle imagery [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(7):1945.
- [52] Strong C J, Burnside N G, Llewellyn D. The potential of small—Unmanned Aircraft Systems for the rapid detection of threatened unimproved grassland communities using an Enhanced Normalized Difference Vegetation Index [J]. *PLoS ONE*, 2017, 12(10):e0186193.
- [53] 王圆. 基于无人机高光谱遥感及人工智能的荒漠化草原地物分类研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2023.
- [54] Polley H W, Yang C, Wilsey B J, *et al.* Spectral heterogeneity predicts local—scale gamma and beta diversity of mesic grasslands[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(4):458.
- [55] Melville B, Lucieer A, Aryal J. Classification of lowland native grassland communities using hyperspectral Unmanned Aircraft System (UAS) Imagery in the Tasmanian midlands[J]. *Drones*, 2019, 3(1):5.
- [56] Wengert M, Wijesingha J, Schulze—Brüninghoff D, *et al.* Multisite and Multitemporal Grassland Yield Estimation Using UAV—Borne Hyperspectral Data [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(9):2068.
- [57] 杨红艳, 杜健民, 王圆, 等. 基于无人机遥感与卷积神经网络的草原物种分类方法[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(4):188—195.
- [58] 乌尼乐, 包玉龙, 布仁图雅, 等. 基于无人机高光谱遥感的典型草原退化指示种识别[J]. *遥感技术与应用*, 2024, 39(1):248—258.
- [59] 张涛, 杜健民, 张海军, 等. 基于无人机高光谱荒漠草原鼠洞识别方法研究[J]. *光电子·激光*, 2022, 33(2):120—126.
- [60] 张燕斌, 杜健民, 毕玉革, 等. 基于无人机高光谱遥感的荒漠草原覆盖度提取方法研究[J]. *光电子·激光*, 2023, 34(8):842—850.
- [61] 胡宜娜, 安如, 艾泽天, 等. 基于无人机高光谱影像的三江源草种精细识别研究[J]. *遥感技术与应用*, 2021, 36(4):926—935.
- [62] Barber N, Alvarado E, Kane V, *et al.* Estimating Fuel Moisture in Grasslands Using UAV—Mounted Infrared and Visible Light Sensors. [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2021, 21(19):6350—6350.
- [63] Eide A, Koparan C, Zhang Y, *et al.* UAV—assisted thermal infrared and multispectral imaging of weed canopies for glyphosate resistance detection[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(22):4606.
- [64] Hu Q, Zhang L, Drahota J, *et al.* Combining Multi—View UAV Photogrammetry, Thermal Imaging, and Computer Vision Can Derive Cost—Effective Ecological Indicators for Habitat Assessment [J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(6):1081.
- [65] Gonzalez L F, Montes G A, Puig E, *et al.* Unmanned aerial vehicles (UAVs) and artificial intelligence revolutionizing wildlife monitoring and conservation [J]. *Sensors*, 2016, 16(1):97.
- [66] Wang C, Zhu K, Bai Y, *et al.* Response of stomatal conductance to plant water stress in buffalograss seed production: Observation with UAV thermal infrared imagery [J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 292:108661.
- [67] Scholten C N, Kamphuis A J, Vredevoogd K J, *et al.* Real—time thermal imagery from an unmanned aerial vehicle can locate ground nests of a grassland songbird at rates similar to traditional methods[J]. *Biological Conservation*, 2019, 233:241—246.
- [68] 许子乾. 基于无人机航测与激光雷达技术的林分特征及生物量估测[D]. 南京:南京林业大学, 2019.
- [69] Wang D, Xin X, Shao Q, *et al.* Modeling Aboveground Biomass in Hulunber Grassland Ecosystem by Using Unmanned Aerial Vehicle Discrete Lidar [J]. *Sensors*, 2017, 17(1):180—180.
- [70] Xiang Z, Yuhai B, Dongliang W, *et al.* Using UAV LiDAR to Extract Vegetation Parameters of Inner Mongolian Grassland [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(4):656—656.
- [71] Getzin, Stephan, Löns, *et al.* High—resolution images and drone—based LiDAR reveal striking patterns of vegetation gaps in a wooded spinifex grassland of Western Australia [J]. *Landscape Ecology*, 2021, 37(3):1—17.
- [72] Naoko M, Tomoyo K, Susumu Y, *et al.* Classification of Grass and Forb Species on Riverdike Using UAV LiDAR—Based Structural Indices [J]. *International Journal of Automation Technology*, 2021, 15(3):268—273.
- [73] Miura N, Koyanagi F T, Yokota S, *et al.* Can UAV lidar derive vertical structure of herbaceous vegetation on riverdike? [J]. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2019, 4:127—132.

Application and prospect of UAV carrying different types of sensors in grassland monitoring

LIU Min, TANG Xiao-qiong, SUN Yu, TANG Wei*

(*Sichuan Provincial Institute of Forestry and Grassland Inventory and Planning, Chengdu 610081, China*)

Abstract: Grassland have dual values in production and ecology, playing an important role in economic development and ecological environment protection. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) technology has become widely used in agricultural and forestry production management due to its advantages of low cost, high precision, and strong timeliness. This study collects and analyzes the research situation of UAV equipped with various sensors in grassland monitoring over the past 20 years, both domestically and internationally. Among these, visible light cameras are the most widely used, providing timely and accurate data on vegetation coverage types and spatial distribution. Multispectral imagers have outstanding performance in vegetation index inversion and biomass, while hyperspectral imagers offer continuous and abundant band data that, when combined with artificial intelligence and big data, enable intelligent grassland monitoring. Thermal infrared imagers are effective in canopy temperature and moisture monitoring. Laser radar performs well in canopy height and vegetation structure. However, challenges remain in the widespread adoption of these technologies due to sensor-specific limitations. This paper offers suggestions on the development of UAV design and sensor applications, providing a theoretical reference for addressing the technical bottleneck and exploring future development prospects in grassland monitoring.

Key words: UAV; sensor; grassland monitoring; application; suggestion

(责任编辑:康宇坤)