

林娜,陈宏,赵健,等.轻小型无人机遥感在精准农业中的应用及展望[J].江苏农业科学,2020,48(20):43-48.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.20.007

轻小型无人机遥感在精准农业中的应用及展望

林娜¹,陈宏¹,赵健¹,池美香²

(1.福建省农业科学院数字农业研究所,福建福州 350003; 2.福建省农业科学院植物保护研究所,福建福州 350012)

摘要:近年来,轻小型无人机遥感以其操作简便、可动态连续监测等独特优势,在精准农业领域得到广泛应用,使农业生产管理具有了实时获取数据、准确定位及高效率应对的新特点。笔者针对现有的轻小型无人机遥感系统在国内外精准农业领域的主要应用进行阐述,包括农作物识别提取和精细分类、农作物估产及长势监测分析、农作物病虫害监测方面,同时对轻小型无人机遥感技术在精准农业应用中未来面临的挑战及发展方向进行分析与展望。轻小型无人机遥感设备的改进与更新、遥感信息解析方法的自动化及智能化、多源数据的融合等对精准农业的发展具有重要意义。

关键词:轻小型无人机;遥感;农情监测;精准农田作业

中图分类号:S127 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2020)20-0043-06

近年来,随着计算机技术、通信技术的迅速发展,农业调查及监测方法向现代化、信息化、精准化方向大力转变,特别是遥感技术在农业领域中的应用越来越广泛^[1-2]。轻小型无人机遥感技术是在小型化无人机平台上配备相应的微型传感器,利用通信技术和定位定姿技术快速准确地获取关于目标

地物的影像及数据,经过后期分析处理,相关产出可用于参数提取或行业具体应用^[3-4]。现有的卫星和地面遥感技术提高了农情信息获取效率,但卫星遥感技术存在重访周期长,较易受天气影响,难以获得高质量影像等缺点;地面遥感技术费时费力,能监测的范围小,干扰因素多,难以快速获取作物信息。轻小型无人机遥感系统具有体积小、质量轻、成本低、操作简便等一系列优势,且受天气、云层覆盖限制小,飞行高度及飞行时间灵活,能获取中小尺度范围内的高时空分辨率的影像数据,有效地弥补了卫星遥感和地面遥感的缺陷,满足精准农业管理的需求^[5-7]。

收稿日期:2020-02-07

基金项目:福建省科技重大专项(编号:2017NZ0003-1);国家重点研发计划(编号:2017YFC1200601)。

作者简介:林娜(1988—),女,福建福州人,硕士,研究实习员,主要从事农业遥感与地理信息化研究。E-mail:linna@faas.cn。

通信作者:赵健,博士,副研究员,主要从事农业信息化研究。E-mail:zhaojian@faas.cn。

(3):159-161.

[53]赵亚妮,王君,赵棉.血清2微球蛋白、视黄醇结合蛋白、胱抑素C、中性粒细胞明胶酶相关脂质运载蛋白及基质金属蛋白酶2多指标联合检测在糖尿病肾病患者中的价值[J].实用临床医药杂志,2018,22(13):20-23.

[54]王艺峰,郭雪成,王燕梅,等.生物酶修饰的明胶/纳米银复合生物材料[J].高分子学报,2014(11):1494-1500.

[55]Wolfgang F, Gerhard W, Conrad C. Asymmetrical flow field-flow fractionation and multiangle light scattering for analysis of gelatin nanoparticle drug carrier systems[J]. Analytical Chemistry, 2004, 76(7):1909-1920.

[56]陈智,田景振.药用微球应用概况[J].齐鲁药事,2009,28(3):164-167.

[57]顾梦洁,王欢,胡新,等.明胶微球制备方法的改进[J].实验室研究与探索,2015,34(4):57-60.

[58]佚名.二十一世纪护肤品主旋律的华彩乐章[J].中国化妆品,

1999(10):75.

[59]张忠楷,李国英.胶原、明胶和水解胶原蛋白的护肤功能比较[J].日用化学工业,2006(1):18-21,25.

[60]范金石,刘丽娜,雷东,等.护肤用壳聚糖基凝胶的制备及性能[J].山东化工,2019,48(7):4-6.

[61]Oliveira C A, Peres D D, Graziola F, et al. Cutaneous biocompatible rutin-loaded gelatin-based nanoparticles increase the SPF of the association of UVA and UVB filters[J]. European Journal of Pharmaceutical Sciences, 2016, 81:1-9.

[62]康海彦,杨治广,黄晓楠.海藻酸钠/ β -环糊精固定化纳米Fe⁰去除重金属的性能研究[J].环境工程,2015,33(6):144-147.

[63]Sameena M F, Goel R, Karthik A, et al. Brevundimonas vesicularis MF276770, a new strain for gelatinase production by utilizing chicken feet gelatin[J]. Biocatalysis and Biotransformation, 2019, 37(4):278-290.

轻小型无人机遥感技术在精准农业中的应用大大降低了劳动力的投入,加强了农作物的精准管理,提高了农业生产效益。笔者将对现有的轻小型无人机遥感技术在国内外精准农业中的主要应用进行阐述,同时对其未来应用面临的挑战及发展方向进行分析与展望,以期为无人机遥感技术在农业中的进一步应用提供参考。

1 轻小型无人机遥感系统的组成及工作流程

轻小型无人机遥感系统主要由无人驾驶飞行平台、能量系统、遥感传感器、地面控制系统、数据传输系统、影像处理系统等部分组成^[8]。无人驾驶飞行器主要分为无人直升机、固定翼无人机、多旋翼无人机、混合翼无人机 4 种机型^[4]。通常所指的

轻小型无人机载荷能力在 15 kg 以内,飞行高度在 3 000 m 以下,最大飞行速度不超过 33 m/s^[9]。根据不同的应用需求与场景,须在飞行平台上搭载不同类型的微型传感器设备,以获取实时的遥感信息数据。受轻小型无人机平台稳定性与有效载荷能力的限制,遥感传感器需满足体积小、质量轻、功耗低、安全性高等要求。目前,无人机遥感传感器主要有数码相机、多光谱和高光谱相机、热红外扫描仪及激光雷达等。通过数据传输及处理系统可生成载有遥感信息的影像及相关类型的数字模型、光谱指数等遥感产出结果,这些产出结果在农业生产管理中可应用于农作物调查、长势监测、产量评估等多个方面^[10-13](表 1)。

表 1 不同无人机遥感系统的产出结果与主要农业应用

系统类型	产出结果	主要农业应用
无人机 + 可见光相机	正射影像、数字表面模型、数字线画图、三维点云	面积测绘、农作物识别、农田地块区划
无人机 + 多光谱相机	多波段光谱信息、光谱指数、纹理信息等	农作物分类识别、产量预估、植被指数分析、病虫害监测
无人机 + 高光谱相机	全波段光谱信息、光谱指数等	农作物元素含量测定、病虫害监测、农作物长势监测、农田土壤分析、农作物生物量测定
无人机 + 热红外相机	温度图谱等	灾害预警、水分胁迫监测、旱情监测、精准灌溉
无人机 + 激光雷达	三维激光点云、数字高程模型、数字地面模型、冠层高度模型等	株高、冠层面积、农作物生物量监测

开展轻小型无人机遥感信息获取工作的流程可以分为前期准备、数据获取和后期数据处理与解析等阶段^[14]。在前期阶段,准备工作主要包括飞行空域申请,飞行条件判定,调查飞行区域实际地形与周边环境,设定起降点和飞行路径,根据影像重叠度、分辨率等的要求设置控制系统参数。在数据获取阶段,执行飞行并实时监控与调整飞行参数。后期数据处理阶段主要包括图像匹配与拼接、正射校正、辐射校正、遥感产品生成等(图 1)。

2 轻小型无人机遥感在国内外精准农业中的应用现状

2.1 农作物识别与精细分类

地表农作物的识别提取与精细分类是进行作物面积测算、长势分析等工作的基础与关键,也是开展精准农田作业的重要数据来源。相对于传统的地面调查,轻小型无人机遥感识别技术具有实时性和高效性,可节约大量人力;相对于卫星遥感识别技术,无人机在抗干扰性方面具有较大优势,由

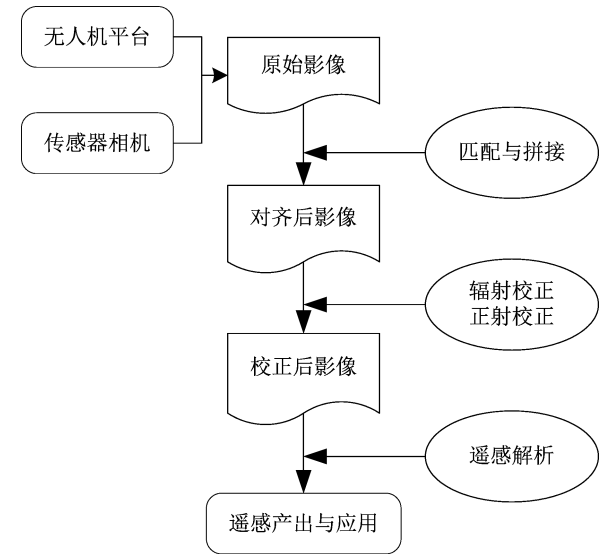


图1 轻小型无人机数据处理流程

于其可提供更为丰富的结构及纹理信息,能更高效地获取地物分类数据。

国内外开展的基于轻小型无人机获取的影像数据提取农作物种植信息的研究已经取得了一定的进展,就遥感分类方法而言,大致分为 2 种:基于

像元的分类方法和基于面向对象的分类方法。在基于像元的分类方法方面,田振坤等通过搭载冠层测量相机的无人直升机平台获取高空间分辨率遥感影像,分析农作物波谱特征和归一化植被指数(NDVI)变化阈值,提出了一种农作物快速分类及提取方法^[15]。Poblete – Echeverría 等使用无人机遥感获取具有超高空间分辨率的 RGB 图像,在垂直网格系统(VSP)训练上对比运用 K – 均值、人工神经网络、随机森林和光谱指数 SI 4 种方法提取葡萄园冠层信息的精度及灵敏性^[16]。戴建国等基于固定翼无人机遥感获取的 RGB 影像,采用 ReliefF – Pearson 特征降维方法优选纹理和低通滤波特征,并利用支持向量机分类方法对北疆主要农作物棉花、玉米、苜蓿和西葫芦等进行分类提取^[17]。在基于面向对象的分类方法方面,王利民等基于小型无人机航拍影像的光谱特征、几何特征、纹理特征,运用面向对象分类方法对苜蓿、春玉米、夏玉米和裸土进行分类^[18]。Diaz – Varela 等基于无人机获取的正射影像和数字表面模型,利用多尺度面向对象的分类方法对梯田进行自动识别^[19]。张超等以旋翼无人机航拍的 RGB 影像为数据源,基于小波包分解的面向对象分类方法对农场中多种作物类型进行精细识别^[20]。李明等基于多旋翼无人机获取的可见光数字影像,利用面向对象遥感分类方法建立识别水稻地块的二分类 Logistic 回归模型^[21]。

2.2 农作物长势动态监测

利用轻小型无人机遥感动态监测的优势可实时了解农作物生长状况、营养水平、水肥胁迫情况等。目前研究者利用遥感反演生长参数时多采用多元线性回归、偏最小二乘、主成分分析等建模方法,随着小型化高光谱遥感设备的研发,更多敏感波段可加入分析模型,人工神经网络、深度学习等建模方法也受到研究者的青睐^[22]。在农作物收获前对其生长过程中出现的问题进行提前诊断,可为精准农业中的作物管理和田间作业提供重要依据,及时准确地调整施肥、田间管理措施,从而保证作物的正常生长,获得更好的经济效益。

农作物长势动态监测主要包括作物生长参数变化及作物元素含量监测等。祝锦霞等通过旋翼式无人机平台获取水稻叶片和冠层的数字图像,研究不同氮素养分程度下水稻叶片和冠层的综合特征信息,应用于水稻的氮素养分诊断^[23]。Chosa 等采用无人机平台获取的真彩色和近红外影像监测

水稻生长情况,通过计算每个区域的作物生长参数指标,包括绿度和归一化植被指数,量化不同区域作物的生长变异性,并基于此提出改进种植措施的建议,以达到生产高质量水稻作物的预期效益^[24]。Hunt 等利用无人机遥感平台获取的近红外、绿色和蓝色影像,测试分析 2 个不同肥力田块冬小麦的生长参数,结果发现,叶面积指数与绿色归一化植被指数(GNDVI)之间存在良好的相关关系^[25]。刘峰等基于植被与土壤的光谱特征差异,对板栗主要生育期进行监测研究,提出了一种基于无人机多光谱遥感影像的植被覆盖度快速计算方法,并利用多时相无人机影像数据实现了板栗植被覆盖度年变化监测^[26]。Du 等通过基于卫星影像的归一化植被指数(NDVI)和基于无人机影像的可见光波段差异植被指数(VDVI)分析小麦冠层生长状态,表明 NDVI 指数与谷物蛋白质之间存在较大相关性,在小麦生长早期 NDVI 指数和 VDVI 指数在分析谷物蛋白质性能上表现出良好的一致性^[27]。秦占飞等基于八旋翼无人机高光谱影像,依托不同氮素水平水稻试验,对比分析光谱指数与偏最小二乘回归方法预测水稻叶片全氮含量的准确度,结果表明,无人机高光谱影像反演的水稻叶片全氮含量分布范围与地面调查实际情况较相符^[28]。刘建立等利用无人机载可见 – 近红外成像光谱仪、高分辨率可见光相机、机载激光雷达等设备,研究建立针对华北地区冬小麦、夏玉米农田的无人机遥感养分诊断模型^[29]。

2.3 田块尺度的估产

精确估测农作物的产量及其变化对实施精准农业管理具有重要意义。通过轻小型无人机遥感系统可以获取农作物详细的光谱特征,以此可反演出作物的生长信息,建立生长信息与产量间的关系模型,进而预估农作物产量^[30]。由于无人机遥感技术可以在合适的生育期对农作物进行实时参数监测,因此所建立的农作物产量预测模型具有更高的精度和通用性。

目前,农作物遥感估产预测模型所使用的参数主要有植被指数、生物量、光谱反射率等。Swain 等基于无人机低空遥感平台获取的高时空分辨率影像估算水稻产量和总生物量,探讨 NDVI 值估算叶片叶绿素含量的适宜性,并通过统计分析发现,不同氮素水平下的水稻产量和总生物量具有显著的差异性^[31]。Vega 等利用无人机搭载多光谱相机获

取不同生长季节的向日葵影像,研究 NDVI 值与作物状态相关的几个指数的关系,并对其产量进行了预测分析,结果表明,NDVI 与产量、含氮量及生物量具有很好的线性关系^[32]。杨贵军等基于无人机多光谱影像计算得到的 NDVI,结合氮肥优化算法进行小麦潜在产量预测,与实际产量对比分析发现,利用上述方法预测产量的估算精度较高^[33]。Zhou 等利用搭载 Mini-MCA 多光谱相机的无人机拍摄的影像进行谷物产量预测,发现最佳产量预测时间位于孕穗期,最佳预测指数可选用 NDVI 和可见光大气阻抗植被指数(VARI),且基于多时相的植被指数与预测产量相关性较高^[34]。

2.4 病虫害监测

大面积的病虫害会造成农作物巨大的生产损失,农作物在受到病虫害胁迫后,叶片色素及冠层结构会发生变化^[35-36]。轻小型无人机遥感可针对叶片色素及冠层变化敏感的波段光谱特征进行动态监测,以此诊断农作物是否受病虫害侵害及危害程度,进而为精准农业管理中的科学防控作出准确指导,在降低生产损失的同时最大化减少农药的使用,得到较好的经济和环境效益。

在无人机病虫害监测研究方面主要包括病虫害识别、病害程度评估、病害时空监测等。罗菊花等利用多时相高光谱无人机航空图像对冬小麦条锈病进行监测,通过建立敏感波段平均光谱反射率与相应病情指数之间的多元线性回归模型,在扫帚式超光谱成像(PHI)影像上实现了对冬小麦条锈病发生程度与发生范围的监测^[37]。Yang 等利用多光谱和高光谱航空影像数据进行了棉花田根腐病的检测和定位,结果显示,这 2 类数据监测结果的精度差别不显著,表明航空遥感数据具有大范围病害监测的应用潜力^[38]。Zhang 等在对虫害早期监测中采用了包括无人机高光谱在内的多源数据,利用提取的植被指数对叶绿素含量进行反演,为遥感参数在病虫害预测及早期诊断中的应用提供了参考^[39]。Nebiker 等利用无人机搭载近红外多光谱相机获取的遥感影像,对马铃薯和洋葱栽培中的植物病害进行了定性检测研究,以此确定病害的原始侵染地点、发生模式,并监测病害的防治效果等^[40]。

3 轻小型无人机遥感在精准农业应用中的挑战及展望

虽然近年来国内外的研究对轻小型无人机遥

感技术作了大量改进与更新,系统硬件与图像处理技术都得到了快速发展和广泛应用,但尚存在一些亟需解决的问题。

3.1 轻小型无人机遥感设备改进与更新

传感器是轻小型无人机遥感系统重要的组成设备之一,而目前国内外大多数研究还集中在搭载多光谱传感器的轻小型无人机在农业中的应用上,激光雷达、高光谱遥感技术、热红外成像仪的应用案例还不多见,主要原因在于这类传感器设备成本偏贵,加上受轻小型无人机承重力的限制,传统款式的传感器设备等难以广泛应用到无人机遥感系统中^[41-42]。

此外,当前轻小型无人机普遍存在续航时较短的问题,单次飞行路径无法实现大范围的农业应用作业,加上平衡控制系统及路径算法的不精确,导致飞行不稳定、重拍漏拍现象严重,使得获取的影像存在质量问题。轻小型无人机遥感系统的稳定性、抗风险性、载荷能力、续航时间、路径算法等问题仍然是目前制约其发展的瓶颈^[43-44]。

因此,轻小型无人机遥感系统的发展亟需设计开发出成本低、微型化、通用性强、质量轻的无人机遥感设备,力求安全性及长时性,减少设备产生的误差,优化飞行算法,改进传输模式,最大程度提高作业效率,获得更高质量的影像,提升轻小型无人机在精准农业应用中的实用性。

3.2 轻小型无人机遥感信息处理自动化及智能化

轻小型无人机遥感系统获取的影像普遍存在幅宽小、数量多、倾角及重叠度不一致等问题,增加了影像匹配、拼接、校正的难度,实现轻小型无人机影像预处理自动化,获得高质量的遥感影像是轻小型无人机遥感技术发展的重要环节。

此外,目前国内外关于轻小型无人机遥感在农业中的应用研究仍基于简单的遥感获取信息,大部分集中在通过光谱特征反演农作物生长参数的研究上,需要通过分析建立遥感信息与作物生长相关参数之间的关系,受限于模型的精确性与鲁棒性,限制了轻小型无人机遥感在精准农业上的应用范围。如何深入结合农作物生理生态过程,针对不同类型的农业应用,进一步挖掘遥感信息与农作物各生理参数间的深层关系,提高遥感解析模型的精确度与通用性,如何将遥感产出结果直接应用于农业变量作业管理等是轻小型无人机遥感系统在精准农业应用上的一大挑战^[45-46]。

因此,在后续的研发中可关注轻小型无人机遥感信息后处理方法的自动化与智能化,包括无人机遥感数据的自动拼接及校正算法、结合人工智能的作物分类及识别提取、作物生长信息快速解析方法、作物精准管理变量决策优化算法等^[47]。轻小型无人机遥感信息获取技术及解析技术的发展,可以为精准农业智能化转型升级提供新思路,为农田作业、生产管理提供实时精确的决策依据。

3.3 多来源数据在精准农业中的融合应用

我国农作物类型多样、影响因素复杂,轻小型无人机遥感在精准农业中的应用可以在农田精细尺度和动态连续监测方面发挥极大作用。但高密度的农作物遥感信息获取后,融合应用这些不同角度的作物信息,推出一整套具有可实施性的农业精准管理措施,对精准农业发展具有重要现实意义^[48]。轻小型无人机遥感在精准农业中的应用涉及了农学、光学、计算机科学、生态学等多个学科知识,结合多源遥感数据、地面调查数据、气象数据、地理数据等进行多角度的融合研究也是今后发展的方向之一。

4 结语

轻小型无人机遥感技术作为调查及监测的有力工具,能及时获取精准农业生产管理中所需的各种数据信息,在国内外研究及应用中被广泛使用,促进了农业生产过程向信息化、智能化、精准化方向的发展。笔者详细介绍国内外轻小型无人机遥感技术在精准农业方面的研究及应用现状,指出了轻小型无人机目前在精准农业应用中面临的挑战及今后发展方向。随着计算机技术的进一步发展,轻小型无人机将会被越来越广泛及深入地应用到精准农业中,不仅仅局限于农情监测方面,在其他农业方面的应用,如农场管理规划、农业设施管理也能发挥极大作用。为此进一步开发高稳定性、强载荷能力、长续航时间、高图像质量的轻小型无人机智能化遥感系统,并将其应用于快速准确获取农田作物信息以及融合多源数据指导田间精准作业,具有重要的研究意义和实际应用价值。

参考文献:

[1] 吴炳方,蒙继华,李强子. 国外农情遥感监测系统现状与启示[J]. 地球科学进展,2010,25(10):1003-1012.
[2] 吴炳方. 中国农情遥感速报系统[J]. 遥感学报,2004,8(6):481-497.

[3] Marris E. Drones in science; fly, and bring me data[J]. Nature, 2013,498(7453):156-158.
[4] 孙刚,黄文江,陈鹏飞,等. 轻小型无人机多光谱遥感技术应用进展[J]. 农业机械学报,2018,49(3):1-17.
[5] Zhang C H, Kovacs J M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review[J]. Precision Agriculture, 2012,13(6):693-712.
[6] 李冰,刘镭源,刘素红,等. 基于低空无人机遥感的冬小麦覆盖度变化监测[J]. 农业工程学报,2012,28(13):160-165.
[7] Sankaran S, Khot L R, Espinoza C Z, et al. Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping: a review[J]. European Journal of Agronomy, 2015,70:112-123.
[8] 汪沛,罗锡文,周志艳,等. 基于微小型无人机的遥感信息获取关键技术综述[J]. 农业工程学报,2014,30(18):1-12.
[9] Yang G, Liu J, Zhao C, et al. Unmanned aerial vehicle remote sensing for field-based crop phenotyping: current status and perspectives[J]. Frontiers in Plant Science, 2017,8:1111.
[10] 戴建国,张国顺,郭鹏,等. 基于无人机遥感多光谱影像的棉花倒伏信息提取[J]. 农业工程学报,2019,35(2):63-70.
[11] 葛静,孟宝平,杨淑霞,等. 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[J]. 草业学报,2017,26(3):1-12.
[12] Gevaert C M, Suomalainen J, Tang J, et al. Generation of spectral-temporal response surfaces by combining multispectral satellite and hyperspectral UAV imagery for precision agriculture applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015,8(6):3140-3146.
[13] 甘平,董燕生,孙林,等. 基于无人机载 LiDAR 数据的玉米涝灾灾情评估[J]. 中国农业科学,2017,50(15):2983-2992.
[14] 胡健波,张健. 无人机遥感在生态学中的应用进展[J]. 生态学报,2018,38(1):20-30.
[15] 田振坤,傅莺莺,刘素红,等. 基于无人机低空遥感的农作物快速分类方法[J]. 农业工程学报,2013,29(7):109-116.
[16] Poblete-Echeverría C, Olmedo G F, Ingram B, et al. Detection and segmentation of vine canopy in ultra-high spatial resolution RGB imagery obtained from unmanned aerial vehicle (UAV): a case study in a commercial vineyard[J]. Remote Sensing, 2017,9(3):268.
[17] 戴建国,张国顺,郭鹏,等. 基于无人机遥感可见光影像的北疆主要农作物分类方法[J]. 农业工程学报,2018,34(18):122-129.
[18] 王利民,刘佳,杨玲波,等. 基于无人机影像的农情遥感监测应用[J]. 农业工程学报,2013,29(18):136-145.
[19] Diaz-Varela R A, Zarco-Tejada P J, Angileri V, et al. Automatic identification of agricultural terraces through object-oriented analysis of very high resolution DSMs and multispectral imagery obtained from an unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Environmental Management, 2014,134:117-126.
[20] 张超,刘佳佳,苏伟,等. 基于小波包变换的农作物分类无人机遥感影像适宜尺度筛选[J]. 农业工程学报,2016,32(21):95-101.

- [21] 李明, 黄愉淇, 李绪孟, 等. 基于无人机遥感影像的水稻种植信息提取[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 108–114.
- [22] Ma B L, Lianne M D, Costa C, et al. Early prediction of soybean yield from canopy reflectance measurements [J]. Agronomy Journal, 2001, 93(6): 1227–1234.
- [23] 祝锦霞, 陈祝炉, 石媛媛, 等. 基于无人机和地面数字影像的水稻氮素营养诊断研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2010, 36(1): 78–83.
- [24] Chosa T, Miyagawa K, Tamura S, et al. Monitoring rice growth over a production region using an unmanned aerial vehicle: preliminary trial for establishing a regional rice strain[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2010, 43(26): 178–183.
- [25] Hunt J, Hively W D, Fujikawa S J, et al. Acquisition of NIR – Green – Blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring[J]. Remote Sensing, 2010, 2(1): 290–305.
- [26] 刘峰, 刘素红, 向阳. 园地植被覆盖度的无人机遥感监测研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 250–257.
- [27] Du M M, Noguchi N. Multi – temporal monitoring of wheat growth through correlation analysis of satellite images, unmanned aerial vehicle images with ground variable [J]. IFAC – PapersOnLine, 2016, 49(16): 5–9.
- [28] 秦占飞, 常庆瑞, 谢宝妮, 等. 基于无人机高光谱影像的引黄灌区水稻叶片全氮含量估测[J]. 农业工程学报, 2016, 32(23): 77–85.
- [29] 刘建立, 李晓鹏. 基于无人机低空高精度遥感的冬小麦和夏玉米变量施肥管理模型“进展[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2018, 44(4): 37.
- [30] Øvergaard S I, Isaksson T, Kvaal K, et al. Comparisons of two Hand – Held, multispectral field radiometers and a hyperspectral airborne imager in terms of predicting spring wheat grain yield and quality by means of powered partial least squares regression [J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2010, 18(4): 247–261.
- [31] Swain K C, Thomson S J, Jayasuriya H P W. Adoption of an unmanned helicopter for low – altitude remote sensing to estimate yield and total biomass of a rice crop [J]. Transactions of the ASABE, 2010, 53(1): 21–27.
- [32] Vega F A, Ramirez F C, Saiz M P, et al. Multi – temporal imaging using an unmanned aerial vehicle for monitoring a sunflower crop [J]. Biosystems Engineering, 2015, 132: 19–27.
- [33] 杨贵军, 李长春, 于海洋, 等. 农用无人机多传感器遥感辅助小麦育种信息获取[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 184–190.
- [34] Zhou X, Zheng H B, Xu X Q, et al. Predicting grain yield in rice using multi – temporal vegetation indices from UAV – based multispectral and digital imagery [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 130: 246–255.
- [35] Zhang J, Pu R, Huang W, et al. Using in – situ hyperspectral data for detecting and discriminating yellow rust disease from nutrient stresses[J]. Field Crops Research, 2012, 134: 165–174.
- [36] Pontius J, Martin M, Plourde L, et al. Ash decline assessment in emerald ash borer – infested regions: a test of tree – level, hyperspectral technologies [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(5): 2665–2676.
- [37] 罗菊花, 黄文江, 顾晓鹤, 等. 基于 PHI 影像敏感波段组合的冬小麦条锈病遥感监测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(1): 184–187.
- [38] Yang C, Everitt J H, Fernandez C J. Comparison of airborne multispectral and hyperspectral imagery for mapping cotton root rot [J]. Biosystems Engineering, 2010, 107(2): 131–139.
- [39] Zhang K, Hu B, Robinson J. Early detection of emerald ash borer infestation using multisourced data: a case study in the town of Oakville, Ontario, Canada [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2014, 8(1): 083602.
- [40] Nebiker S, Lack N, Abächerli M, et al. Light – weight multispectral uav sensors and their capabilities for predicting grain yield and detecting plant diseases [J]. ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016: 963–970.
- [41] Chapman S, Merz T, Chan A, et al. Pheno – Copter: a low – altitude, autonomous remote – sensing robotic helicopter for high – throughput field – based phenotyping [J]. Agronomy, 2014, 4(2): 279–301.
- [42] Gilad W, Itamar M L, Noam L. Using ground observations of a digital camera in the VIS – NIR range for quantifying the phenology of Mediterranean woody species [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2017, 62: 88–101.
- [43] 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.
- [44] Ballesteros R, Ortega J F, Hernández D, et al. Applications of georeferenced high – resolution images obtained with unmanned aerial vehicles. Part I: description of image acquisition and processing [J]. Precision Agriculture, 2014, 15(6): 579–592.
- [45] 白由路, 金继运, 杨俐苹, 等. 低空遥感技术及其在精准农业中的应用[J]. 土壤肥料, 2004(1): 3–6.
- [46] 赵春江, 薛绪掌, 王 秀, 等. 精准农业技术体系的研究进展与展望[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 7–12.
- [47] 于 堃, 单 捷, 王志明, 等. 无人机遥感技术在小尺度土地利用现状动态监测中的应用[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(4): 853–859.
- [48] 赵春江. 对我国未来精准农业发展的思考[J]. 农业网络信息, 2010(4): 5–8.