

基于多源信息融合的农业空地一体化研究综述

杨 普^{1,2} 赵远洋^{1,2} 李一鸣^{1,2} 吴宇峰^{1,2} 李蔚然^{1,2} 李振波^{1,2}

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学国家数字渔业创新中心, 北京 100083)

摘要: 无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)作为一种灵活、高效的农业环境信息和作物生长信息获取技术的载体,近年来在农业生产和科研领域得到了广泛的应用。无人机搭载感知成像设备已经成为智慧农业中信息获取的重要技术手段,与地上或地下传感器等共同构成空地一体化系统,为智能化农业管理提供数据支持和决策依据。多源信息融合是提高无人机感知能力的关键技术之一,其研究对于无人机的应用有着重要意义。与单一信息获取相比,基于多源数据融合的方法,将多源性的各类信息进行各种运算与处理,来提取目标的特征信息,以便进行分析与理解,最终实现对目标的识别、检测和控制等。总结了国内外 20 多年来有代表性的相关研究和解决方案,从无人机影像背景复杂、目标较小、视场大、目标具有旋转性的特点出发,对无人机目标检测近期的研究进行了归纳和分析。最后讨论了存在的问题,给出了今后的研究趋势与发展方向判断。

关键词: 农业; 多源信息融合; 空地一体化; 数据获取; 监测

中图分类号: S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)S0-0185-12

Review of Research on Integration of Agricultural Air-ground Integration Based on Multi-source Information Fusion

YANG Pu^{1,2} ZHAO Yuanyang^{1,2} LI Yiming^{1,2} WU Yufeng^{1,2} LI Weiran^{1,2} LI Zhenbo^{1,2}

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. National Innovation Center for Digital Fishery, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: As a flexible and efficient carrier of agricultural environmental information and crop growth information acquisition technology, UAVs have been widely used in agricultural production and scientific research in recent years. UAVs equipped with perceptual imaging equipment have become an important technical means for information acquisition in smart agriculture. Together with ground or underground sensors, they form an integrated air-ground system to provide data support and decision-making basis for intelligent agricultural management. Multi-source information fusion is one of the key technologies to improve the perception ability of UAVs, and its research is of great significance to the application of UAVs. Compared with the acquisition of single information, based on the method of multi-source data fusion, various types of multi-source information are subjected to various operations and processing to extract the characteristic information of the target for analysis and understanding, and finally realize the identification and recognition of the target. The representative related research and solutions for more than 20 years at home and abroad were summarized. Starting from the characteristics of complex background of UAV images, small target, large field of view, and target rotation, recent research on UAV target detection was inducted and analyzed. Finally, the existing problems were discussed, and the future research trend and development direction judgment were given.

Key words: agriculture; multi-source information fusion; air-ground integration; data acquisition; monitoring

收稿日期: 2021-07-13 修回日期: 2021-09-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(2020YFD0900204)

作者简介: 杨普(1994—),男,博士生,主要从事计算机系统理论、机器视觉及深度学习应用研究,E-mail: 18437951957@163.com

通信作者: 李振波(1978—),男,教授,博士生导师,主要从事计算机视觉和图像处理研究,E-mail: lizb@cau.edu.cn

0 引言

我国是一个农业大国,农业关系到国计民生,是国民经济的支柱产业^[1]。我国农业的生产结构包括种植业、林业、畜牧业、渔业和副业,但数千年来一直以种植业为主。其中,2019 年我国农业总产值为 66 066.45 亿元,同比上涨 7.5%,我国粮食产量达 66 384 万 t^[2]。

在农业监测管理中,农业数据通常非单一,需要多传感器等技术手段进行多元化监测。随着近年来无人机技术的迅速发展,基于空地一体化技术的方式可以搭载设备,用于农业信息获取,此种方式迅速发展各个领域。现有的航天、航空和地面遥感技术已广泛应用于监测农田作物的生长状况,加强了农作物的精准管理,提高了农业生产效益。因此,研究基于空地一体化系统的多源信息融合技术,实现对农业作物生长监测、水产动物环境监测等并及时制定更好的监测方案,对推动农业健康可持续发展有着重要的作用。

近年来,随着计算机信息技术、传感器智能技术^[3]、遥感技术、全球定位系统^[4-5] (Global positioning system, GPS)、地理信息系统 (Geographic information system, GIS)、微型计算机、通信设备和人工智能技术等的飞速发展,传统单一监测手段正逐渐被基于多源信息融合的空地一体化方法所替代。传感器感知后的信息通过各种网络和移动设备进行传输,数据获取不再局限于在大数据环境中完全了解信息的单个数据源。数据的存储和描述以多种来源的形式出现。知识结构的各种信息隐含在来自不同数据源的数据样本之间的关系中,这些关系从多个角度表达了数据样本之间的信息^[6]。基于多源信息融合的空地一体化方法更全面了解农业全方位信息,为智慧农业的进一步发展提供了技术支持^[7-8]。无人机 (Unmanned aerial vehicle, UAV) 作为一种由动力驱动、机上无人驾驶、可重复使用的新型遥感平台,具有优于其他遥感平台的灵活性、实时性、移动性等特点^[9]。特别是随着可见-近红外航空成像光谱仪、航空 CCD 数字相机的小型化,随时获取厘米级空间分辨率的可见-近红外图像成为可能,无人机系统目前在农业分析、种植、监测、农业喷洒、灌溉、健康评估等应用领域得到了迅速的拓展^[10]。在利用空地一体化多源信息融合进行农业信息获取方面,已有研究涵盖了种植业、林业、畜牧业、渔业和副业等领域,多源信息融合技术已逐渐发展成为精准农业特别是智慧农业的关键技术^[11]。

本文通过总结国内外 20 多年来有代表性的相

关研究和解决方案,从无人机影像背景复杂、目标较小、视场大、目标具有旋转性的特点出发,对无人机目标检测近期的研究进行归纳和分析。最后讨论存在的问题,判断今后的研究趋势与发展方向。

1 多源信息融合方法

多源信息融合 (Multi-source information fusion, MSIF) 是一门综合性学科,被称为多传感器信息融合,起源于 20 世纪 70 年代^[12]。从那时起,多源信息融合的理论和技术迅速发展,成为一门独立的学科,已成功应用于军事指挥自动化系统、战略预警与防御系统、多目标跟踪与识别等领域。随着信息技术快速发展,数据的类型和更新变得越来越繁杂和频繁,这给信息融合处理多源数据带来了新的挑战^[13]。因此,适合不同场景的多源信息模型的构建和不同融合技术的应用是需要解决的核心问题。多源信息融合基本原理是以单一传感器为工具来获取目标对象的信息,然后多源数据传送给处理系统,根据多源性的各类信息,将这些数据进行各种运算与处理来提取目标的特征信息,以便进行分析与理解,最终实现对目标的识别、检测和控制等^[14]。多源信息融合方法框架如图 1 所示。

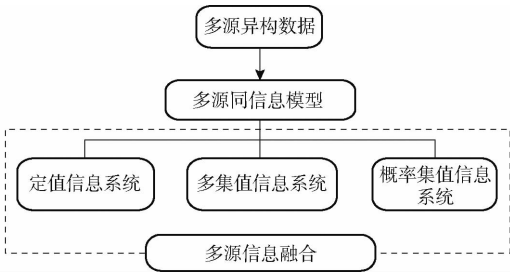


图 1 多源信息融合方法框架

Fig. 1 Multi-source information fusion method framework

就农业信息获取而言,基于空地一体化技术的多源信息融合技术就是利用无人机设备搭载其他设备获取信息,应用图像处理、模式识别等技术进行数据综合处理、统计分析等,最终实现智慧农业信息决策的过程。其典型的框架结构为(以无人机系统为例):以无人机为中心,包括无人机设备系统、传感器采集系统、数据处理与分析系统 3 部分。其中,无人机设备系统为主要载体,用来搭载高光谱相机等设备;传感器采集系统主要获取农业环境信息,其涉及的硬件设备主要包括:传感器、照相机、高光谱相机等。而数据处理与分析系统主要对原始数据进行预处理、特征选择与计算等。

2 基于多源信息融合的农业分析

根据无人机载荷、监测目的的不同,可以选择不

同类型的遥感传感器。根据光谱接收方式,有被动遥感传感器(光学相机、光谱仪、成像光谱仪、热红外传感器等)和主动遥感传感器(激光雷达等);根据光谱的接收范围和光谱分辨率,有可见光传感器(数码相机)、多光谱相机、高光谱成像仪和微波传感器。多源信息融合的农业分析应用如图2所示。



图2 多源信息融合的农业分析应用图

Fig.2 Application diagram of agricultural analysis based on multi-source information fusion

2.1 可见光成像技术

可见光成像获取的是 RGB 可见光影像,无近红外波段(Near infrared spectroscopy, NIR)信息^[15]。数码相机是一种获取作物表型信息低成本的工具,成像时对外界环境要求相对较低,具有较高的空间分辨率,但光谱分辨率相对较差,只有红、绿、蓝3个波段。数码相机能够快速获取农田灰度或真彩色影像和数字地面/高程模型,据此可以估算农作物株高、叶倾角分布、叶面积指数、倒伏状况以及叶色等信息。

以无人机为平台搭载数码相机传感器,因机动性强、价格低、空间分辨率高的优势,能够及时准确地估算地上生物量(Above-ground biomass, AGB),已成为遥感估算研究的热点之一。刘杨等^[16]尝试在马铃薯的块茎增长期,通过设置10、20、30、40、50 m共5种无人机飞行高度,获取不同分辨率的数码影像,探究其对以光谱信息、纹理特征和光谱信息+纹理特征构建AGB模型精度的影响。结果表明,同种分辨率影像下,光谱信息+纹理特征估算AGB的效果最优,其次为单一纹理特征模型,而单一光谱模型表现效果最差。随着数码影像分辨率提高,光谱信息、纹理信息以及光谱+纹理信息估算AGB的精度逐渐变好。高林等^[17]利用无人机数码影像估测冬小麦的叶面积指数(Leaf area index, LAI),通过获取到的孕穗期、开花期和灌浆期冬小麦无人机数码影像为数据源,利用数字图像转换原理构建出10种数字图像特征参数,并系统地分析了3个生育期内两个冬小麦品种在4种氮水平下的LAI与数字图

像特征参数之间的关联性。结果表明 UAV-based VARIRGB 指数模型估测的 LAI 与实测 LAI 拟合性较好($R^2=0.71$,均方根误差为0.8, $P<0.01$),证明将无人机数码影像应用于冬小麦 LAI 探测是可行的。刘帅兵等^[18]利用无人机搭载相机获取的数码影像,采用3种阈值分割方法,将田间植株作物与土壤背景分离。对比影像分割方法的时效性与准确性,最终确定采用可见光波段差异植被指数(Visible-band difference vegetation index, VDVI)提取植被信息。结果表明,基于 UAV 数码影像利用多元线性回归构建冬小麦氮素含量反演模型,对试验小区整体提取作物信息的方式反演冬小麦叶氮含量效果最好,相比传统反演方法,模型稳定性更高,可为冬小麦田间水肥决策管理提供参考。

2.2 多光谱/高光谱成像传感器

无人机搭载成像光谱仪能够获取农作物的光谱吸收和反射特征,用于监测农作物种植面积、长势,估算农作物理化参数,预测产量^[19]。多光谱成像传感器能够获取和记录电磁辐射光谱中的可见光部分和不可见光部分,具有成本较低、影像获取速度快、工作效率高等优点,广泛用于农作物生长信息获取研究。近年来,高光谱影像已经成为获取农作物含水率、叶片养分含量、叶绿素含量、叶面积指数和其他理化参数以及产量预测的普遍方式^[20]。高光谱成像技术已成为无人机遥感平台研究农作物表型参数的未来趋势。

宁纪锋等^[21]为监测地膜农田的种植分布,提出一种适用于地膜农田的改进深度语义分割模型,实现对无人机多光谱遥感影像中地膜农田的有效分割。结果表明,改进的 Deep Lab V3 + 语义分割模型对多光谱遥感影像的识别效果比可见光高7.1个百分点。该文提出的方法能够从复杂的场景中精准识别地膜农田,为分析地膜农田的种植分布和监测提供参考。韩文霆等^[22]以不同水分处理的青贮玉米为研究对象,探讨无人机多光谱遥感平台结合作物生长模型估测青贮玉米生物量及水分利用效率的可行性。结果表明,基于无人机多光谱、气象和土壤水分数据计算的实际蒸腾量与玉米生物量具有极显著($P<0.001$)的相关性。研究表明,将无人机遥感平台与作物生长模型相结合能够很好地估测大田玉米生物量及水分利用效率。杨蜀秦等^[23]提出了一种面向无人机多光谱遥感影像的农田作物分类方法,通过修改输入层结构、融合多光谱信息和植被指数先验信息并采用 Swish 激活函数优化模型,使网络在响应值为负时仍能反向传播。结果表明,改进的 Deep Lab V3 + 模型平均像素精度和平均交并比分

别为 93.06% 和 87.12%, 采用文献[23]方法能够从农田作物遥感影像中学习到达力更强的语义特征, 从而获得准确的作物分类结果, 为利用无人机遥感影像解译农田类型提供了一种新的方法。

虽然多光谱技术在农业监测利用广泛, 但多光谱传感器也有光谱分辨率低、光谱不连续等不足, 使其应用受到限制^[24]。基于高光谱影像的农作物物理化参数物理反演模型的适用性、农作物多组分混合光谱分解模型中的复杂机制以及单一因素提取方法仍需要今后大量研究来解决。

2.3 热红外影像传感器

热红外影像传感器, 也称热红外成像仪, 接收的是红外辐射能量, 并通过算法将其转换为温度。其主要由红外探测器和光学成像镜头组成, 其中红外探测器的核心是红外敏感元件。该类型传感器能够生成时间序列或基于单一时间点分析的数据, 广泛用于监测农作物长势和水分胁迫^[25]。由于气孔导度、光合特征和蒸发速率与冠层温度紧密相关, 红外热成像技术可以用于探测农作物对胁迫环境的响应。

张智韬等^[26]针对当前无人机热红外遥感诊断作物水分胁迫状况精度不高的问题, 以 4 种水分处理的花铃期棉花为试验对象, 利用六旋翼无人机搭载热红外传感器, 通过 Canny 边缘检测算法将热红外图像中的土壤背景有效剔除, 应用温度直方图验证剔除效果, 计算棉花冠层温度特征数, 并分析冠层温度特征数对诊断棉花水分胁迫的适用性。结果表明, 棉花冠层温度特征数与表征棉花水分胁迫的生理指标和物理指标都具有较高的相关性, 最大的决定系数 R^2 为 0.884, 冠层温度标准差 (Canopy temperature standard deviation, CTSD) 对作物水分胁迫的敏感程度更高, 可以作为诊断作物水分胁迫的新指标。该研究提出冠层温度特征数的计算方法仅需要无人机热红外影像数据, 相比其他诊断作物水分胁迫状况的温度指标具有较大的应用潜力。杨文攀等^[27]以无人机搭载热红外成像仪和 RGB 高清数码相机构成低空遥感数据获取系统, 以不同性状的拔节期玉米为研究对象, 采集试验区的无人机影像。利用含有已知三维坐标的几何控制板进行数码影像几何校正, 便携式手持测温仪测量辐射定标板黑白面的温度, 高空间分辨率的数码影像对玉米进行分类并二值化处理。同时, 利用便携式手持测温仪在地面同步测量玉米冠层温度, 并与提取的冠层温度进行一致性分析, 以验证评估基于热红外影像提取玉米冠层温度的效果。结果表明, 提取的冠层温度与地面实测值具有高度一致性 ($R^2 = 0.7236$, 均方

根误差为 0.60°C), 提取精度较高, 表明基于无人机热红外影像获取玉米冠层温度的方法具有高通量的优势且精度较高。该研究可为玉米育种材料的田间冠层温度监测提供参考, 可以实现快速、准确、无损地获取田间玉米冠层温度, 对无人机辅助玉米抗旱性状的监测具有重要的意义。杨帅等^[28]以 4 种水分梯度处理的拔节期玉米为研究对象, 借助无人机可见光和热红外图像, 采用 RGRI 指数法、Otsu 阈值法和不剔除土壤背景 3 种处理方法提取热红外图像中玉米冠层温度信息, 计算作物水分胁迫指数 (Crop water stress index, CWSI) 并用于反演不同水分梯度处理下玉米地不同深度的土壤含水率。结果表明, 基于 RGRI 指数法获取的玉米冠层温度与实测冠层温度的相关性最高 (R^2 均大于 0.8, 均方根误差均小于 1°C), 在整个拔节期, RGRI 指数法计算的 CWSI 反演土壤含水率效果最好 (R^2 均大于 0.5, $P < 0.01$)。

测量农作物冠层温度的常用方法是使用手持红外温度计, 无法同步获得不同试验条件下的农作物冠层温度。由于农作物冠层温度是随时间变化的, 因此也难以比较同一时间点上不同处理的农作物冠层温度的差异^[29]。此外, 测量区域的选择是主观和随机的, 搭载红外热成像传感器的无人机可以快速获取大区域内农作物冠层温度图像, 能够有效识别不同处理、不同环境条件下的农作物冠层温度差异。

2.4 其他

激光雷达使用发射激光束测量与目标物之间的距离, 采用了光电探测技术, 属于主动遥感传感器。激光雷达由发射器、接收器、跟踪框架和信息处理模块构成, 具有点密度高、空间分辨率高、低空探测能力强等优点, 体积和质量较传统微波雷达小^[30]。由发射器发射的脉冲激光与植被冠层部分不同组分交互作用以及接收反射光的时间差异能够在垂直和水平上反映出冠层结构的信息。简单的激光雷达只能测量首次反射波, 全波形激光雷达可以得到一系列时间延迟产生的光子量子密度。激光雷达应用的限制性因素主要是价格高、光束窄、数据处理工作量大, 且激光脉冲会被水全吸收, 这些因素极大地限制了激光雷达技术的应用。当前激光雷达已经被用来估测林木高度和生物量, 但大田作物方面的应用很少^[31]。由于农作物高度普遍较低, 且叶片聚集模式是以植株为中心, 因此用于提取森林冠层结构参数的方法并不适用于农作物。但是, 在使用激光雷达提取农作物冠层参数方向上的探索仍是必要的。

近年来, 隐蔽性强、突发性高、破坏力大、灾害链长的重大地质灾害频繁发生。人工排查无法实现区

域地质灾害隐患的早期识别,已是地质灾害防治领域必需解决的难题。贾虎军等^[32]基于无人机载 LiDAR(Light detection and ranging)和倾斜摄影技术,获取地质灾害隐患点更加精准、精细的地形地貌勘测数据,采用定性与定量相结合方法开展地质灾害隐患早期识别。无人机载 LiDAR 技术能够穿透地表植被,获取真实地表数字高程模型(Digital elevation matrix, DEM),据此可计算出地质灾害的山体阴影、坡度、等高线、粗糙度以及曲率等关键特征参数。无人机载 LiDAR 和倾斜摄影技术能够快速获取地质灾害隐患点的三维模型和数字正射影像(Digital orthophoto map, DOM),使在三维实景场景模型中开展地质灾害隐患点识别和研判成为可能。通过建立数据综合应用策略,对地质灾害隐患点定性和定量分析,能够实现早期发现、有效识别。无人机载 LiDAR 和倾斜摄影技术在地质灾害隐患早期

识别方面具有较大的应用价值。

近年来,无人机平台由于其灵活机动、成本低等优势在植被生态调查、资源环境监测、生物多样性保护等领域逐渐兴起。郭庆华等^[33]研究了无人机分类系统在生物多样性遥感监测中的应用,为如何选择合适的载体和传感器提供了参考。在此基础上,针对无人机平台的高精度遥感信息具体应用案例,就反映生物多样性变化并揭示其驱动机制方面的无人机遥感直接和间接指标的相关研究进展展开阐述。结果表明,无人机遥感技术可以很好地弥补地面监测与航天、卫星遥感之间的尺度空缺,更好地将监测点上的结果以准确、可靠的推绎方法扩展到区域尺度供决策分析使用。今后需要进一步完善生物多样性近地面遥感监测项目,从整体上提高生物多样性热点区域应对变化的分析预警能力。综上,不同类型传感器的特点如表 1 所示。

表 1 不同类型无人机载遥感传感器特点及用途
Tab.1 Features and uses of different types of UAV-borne remote sensing sensors

传感器类型	数据特征	应用	优势	局限
数码相机(RGB)	灰度或彩色图形	可见特征分析、外形监测、农作物长势观察	数据直观,空间分辨率高	只有可见光波段
多光谱成像传感器	可见光-近红外多波段影像	植被养分状况、外界环境胁迫、病虫害等监测	多个波段(包含近红外),数据量小,处理简单快速,传感器成本低	波段数有限,光谱信息量小
高光谱成像传感器	可见光-近红外连续波段影像	植被养分状况、外界环境胁迫、病虫害监测和预警	光谱分辨率高,包含信息量大	数据量大,处理流程复杂,传感器成本高
热红外成像传感器	与热红外发射相关的温度图像	植被气孔导度、环境胁迫、病害监测	能够对大区域冠层一次性成像获取温度信息	受外界环境影响较大,对小幅度温度变化不敏感,高分辨率的传感器较重
激光雷达(LiDAR)	地物反射的激光点云	植被高度、生物量	高度测量精确,分辨率高	价格高,光束窄,数据处理工作量大,受水体干扰
合成孔径雷达	雷达回波图像	作物识别、种植面积监测、关键作物特征估算	不受天气影响,分辨率高	图像处理和图像理解难度较大

总体而言,搭载各类传感器的无人机遥感系统具有灵活、易操作、根据需求获取数据和高空间分辨率等优势,是快速无损获取农作物生长信息的重要方式^[34]。但是,由于单一来源的遥感数据包含的信息有限,综合利用多种传感器获取和集成数据是非常有必要的。另外,由于影像质量会受到风速、飞行高度和速度、传感器性能、无人机自身震动和影像校正方法等因素影响,还需要探索获取高质量数据的策略^[35]。针对不同传感器开发适用性强的快速算法对无人机获取的大数据进行有效处理仍是待解决的难题。

3 空地一体化技术在农业中的应用

3.1 农业喷洒

在现代化农业生产中,无人机可用于农药喷洒,

操作者可借助智能控制技术对发生病虫害的农田作出准确的定点,并对无人机进行控制^[36]。应用无人机技术合理控制农药喷洒量,通过科学的农药喷洒,可为农业生产基地的农作物生产提供良好的生长环境,以保证农作物的健康生长。随着无人机技术的日趋成熟,农业生产基地的工作人员在进行农药喷洒时,应当结合不同种类农作物的生长需求和田间病虫害分布对无人机的喷洒作业范围作出调整,避免出现重复用药的现象,真正做到准确治理,从而有效提升农作物的生产质量。

20 世纪 90 年代,日本山叶公司率先推出世界上第一架无人机,主要用于喷洒农药。2015 年,美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)批准日本雅马哈无人机 RMAX 成为第一架用

于装载化肥和农药进行作物喷洒的植保无人机, RMAX 质量超过 25 kg。相比传统拖拉机, 这种无人机能够更精确地喷洒作物。

随着无人机喷洒技术的迅速发展, 我国南方地方首先将农药喷洒应用于水稻种植, 很多专家和学者聚焦于无人机在水稻田间的作业效果。张海艳等^[37]以一定比例的罗丹明 B 与善思纳米农药的混合溶液作为喷施溶液, 通过改变无人机作业高度和农药喷洒量进行田间喷施试验, 采用荧光示踪剂法和水敏纸图像分析法获得 2 种无人机在不同喷施条件下喷施的雾滴在靶标上的沉积效果。结果表明, 2 种植保无人机旋翼风场不同导致雾滴沉积效果不同, 单旋翼植保无人机喷施效果更好。2 种无人机喷施的农药最终对水稻病虫害的防治效果无明显差异, 且防治效果均达到国家防效标准。高圆圆等^[38]开展了利用 Af-811 小型无人机喷洒不同剂型毒死蜱防治玉米螟试验。结果表明, 在试验设定的 3 个飞行高度中, 喷雾高度 2.5 m 时 10% 毒死蜱超低容量液剂的防治效果最好。无人机喷洒 10% 毒死蜱超低容量液剂对玉米螟的防治效果为 80.7%, 而 42% 毒死蜱乳油对水稀释药液的防治效果只有 69.1%。而当向 42% 毒死蜱乳油药液中添加雾滴蒸发抑制剂后, 防治效果增加到 75.8%。与地面自走式高杆喷雾机相比, 利用小型无人机喷洒省工、省时、省水, 但从防治效果分析, 无人机的喷雾技术还需要进一步优化。

相对于人工施肥与机械化施肥, 无人机远程施肥具备非常突出的优势, 利用 GPS 定位技术与遥控技术可远程操控无人机进行田间施肥工作, 这样既节省了大量的人力, 提高了田间施肥效率, 也优化了施肥效果。除此之外, 根据不同时期农作物生长的营养需求, 可以控制无人机的施肥量, 给农作物补充相应的养分, 以促进农作物的生长^[39]。

3.2 农作物监测

对作物进行健康评估并及时发现病虫害是优质农业生产的必要保障之一。通过搭载可视红外线以及近红外线发射装备, 农业无人机可以准确分析农作物反射的绿光及近红外光的数量并绘制多光谱图像来追踪农作物的变化与健康状况^[40-41]。农户可根据相应的数据制定快速有效的方案, 保障农作物远离病虫害, 从而显著提升农业生产的效率。

运用无人机不仅可以监测农业生产基地的田间土地环境信息, 还可全方位监测不同农作物的生产信息, 农业生产基地的管理人员可根据获取的农作物生长信息进行深入分析探究。相关工作人员可利用无人机技术进行农作物图像采集或者是光谱分

析, 在此基础上, 对农业生产基地内的玉米、水稻及瓜果蔬菜等农作物生长情况进行动态化监测。与此同时, 农业生产基地的工作人员可结合获取的农作物生长监测信息, 有计划、有目的地调整农业生产管理措施。比如观测分析玉米、水稻及瓜果蔬菜的长势及营养需求, 做好施肥、浇水、喷洒农药等工作。此外, 相关工作人员可在无人机上装载高清摄像头, 在一定时期内对农业生产基地中的农作物进行多谱图像拍摄, 并对各项数据信息进行对比分析, 以制定科学合理的管理方案^[42]。无人机可用于监测单位面积内农作物的生长状态、是否存在倒伏、农作物的种植密度等, 所以使用无人机进行现代化农业生产, 可真正实现农业的增产增收。

快速、准确获取农作物长势信息能够为种植业的科学化管理提供依据。陈青松等^[43]以四川省雅安市芦山县某猕猴桃农业园为研究对象, 基于微小无人机遥感平台, 采集了研究区可见光遥感影像、地面实测数据及其他管理信息。经过处理获得研究 DOM 和数字表面模型 (Digital surface model, DSM), 依据实际上架株数与覆盖度进行相关性分析。结果表明, 对 DOM 的分割很难区分猕猴桃和其他植被。对 DSM 的空间分析表明, 以搭架的水泥柱平均高度来区分猕猴桃与其他杂草是可行的, 覆盖度与猕猴桃实际上架株数存在较强的正相关关系 ($R^2 = 0.8416$), 通过猕猴桃覆盖度可以反映猕猴桃上架株数情况进而反映猕猴桃的产业状况, 该方法为快速监测猕猴桃生长提供了参考。肖武等^[44]基于无人机多光谱影像, 在传统植被指数的基础上引入红边波段进行扩展, 优选了 22 种植被指数, 结合田间同步实测生物量数据, 采用经验模型法分别构建了一元回归、基于最小二乘法的多元线性回归 (Multivariable linear regression, MLR)、反向传播神经网络 (Back propagation neural networks, BPNN) 的生物量反演模型, 筛选出最佳模型。结果表明, 所选的植被指数均与生物量显著相关, 其中 BP 神经网络模型的估算精度最高。杨福芹等^[45]使用无人机挂载数码相机, 获取到冬小麦超高分辨率的 RGB 影像, 并将色彩信息与纹理特征进行融合, 构建了能够准确估算冬小麦氮营养指数的“图-谱”指标。陈春玲等^[46]获取了不同生育期东北粳稻的无人机高光谱遥感影像, 对高光谱数据进行导数、标准正态、SG 滤波等变化处理, 提取高光谱数据的敏感波段、位置变量、面积变量和光谱指数等, 使用偏最小二乘回归、极限学习、神经网络等多种传统统计和机器学习算法构建了水稻叶片氮素含量的估算模型。贾丹等^[47]提取无人机多光谱影像的纹理特征和光谱特

征,结合光谱指数和主成分分析进行分析研究。结果表明,影像光谱信息+纹理特征信息对小麦植株氮浓度反演效果整体随着影像分辨率的提高呈增加趋势,且其反演结果优于单一光谱特征或单一纹理特征的反演效果。

色素含量和叶面积指数是反映作物生长状况的两个重要指标。李静等^[48]使用无人机搭载可见光数码相机获取水稻田影像,并构建可见光植被指数对水稻叶片 SPAD 值进行估算。毛智慧等^[49]使用无人机搭载不同类型的多光谱传感器获取玉米冠层影像,发现绿波段和近红外波段、红边波段和近红外波段组合构造的两类植被指数在两种传感器上都对玉米冠层叶绿素较为敏感,在此基础上建立了玉米冠层叶绿素预测模型。高林等^[50]用无人机在不同生长阶段拍摄冬小麦的 RGB 和多光谱图像,并使用多种类型的植被指数建立冬小麦叶面积指数的估算模型。

株高与作物的产量、抗倒伏能力、光合作用能力都有一定的相关关系,合理的株高是农作物健康生长、产量稳定的基础之一。作为农作物的基本性状参数,对株高的监测在农业生产和育种中都是一项基础而重要的工作。张宏鸣等^[51]通过无人机获取玉米生长阶段 4 期不同高清 DOM 及 DSM,利用 K-means 算法、遗传神经网络算法和骨架算法分别对 DOM 中的玉米区域进行提取。结果表明,结合 DOM 和 DSM 可以较好地提取生长阶段的玉米高度。采用 DOM 和 DSM 相结合的骨架算法提取植株骨架,为株高提取提供了一种新途径,可为无人机遥感监测作物株高状况提供参考。牛庆林等^[52]在玉米不同的生育期获取高分辨率的无人机 RGB 影像,利用地面控制点对影像进行精确几何校正,生成试验田的数字正射影像以及作物表面模型(Crop surface model, CSM)并提取各个时期、各个田块玉米的株高信息。

倒伏是农业常见灾害,对作物的产量和质量都有着不良影响,快速、准确地监测作物的倒伏灾害有助于管理者及时评估损失,也有助于育种人员选育抗倒伏品种。李宗南等^[53]通过小型无人机遥感试验获取的红、绿、蓝彩色图像研究灌浆期玉米倒伏的图像特征和面积提取方法。研究首先计算和统计正常、倒伏玉米的 30 项色彩、纹理特征,然后比较特征的变异系数和相对差异评选出适宜区分正常、倒伏玉米的特征。结果表明,基于红、绿、蓝色均值纹理特征提取倒伏玉米面积的误差最小为 0.3%,最大为 6.9%,显著低于基于色彩特征提取方法的误差。该研究结果为应用无人机

彩色遥感图像准确提取倒伏玉米面积提供了依据和方法。赵立成等^[54]利用无人机 RGB 影像生成的 DSM 影像,通过计算正常小麦与倒伏小麦的高度差提取小麦倒伏区域。

3.3 农业灾害遥感监测

农业旱灾和洪涝灾害是目前世界范围内最常见、影响最大的两种气候灾害。每年因旱灾造成的经济损失约占气候灾害造成的经济损失总量的 50%。由于洪涝灾害的突发性极强,每年我国农田受涝面积大约为 733 万 hm^2 ,造成 200 亿元的直接经济损失,占各类农业灾害损失的 30% 左右^[55]。目前最为常用的干旱监测方法为作物缺水指数法、热惯量法、植被指数法等。代辉等^[56]通过天空地一体化灾情查勘技术研究洪涝灾害。为了准确获取 2012 年内蒙古自治区巴彦淖尔市暴雨洪涝灾害农作物损失情况,采用卫星遥感、无人机航空遥感与人工地面现场调查相结合的方式,即通过人工地面调查为高分辨率无人机航空遥感数据处理建立目视解译标志库并对解译结果精度进行校验,再由无人机数据的处理结果为卫星影像数据处理提供辅助,确定采用 NDWI 指数法提取卫星影像上受淹没范围的水体指数阈值,提取受淹没农用地。通过无人机的使用,快速准确地获取灾害给当地农业生产带来的损失,当地政府迅速组织有效力量进行农业抢险救灾,并采用天空地一体化灾情评估方法对农作物损失情况进行评估。

病虫害是影响农业生产的重要因素,给农业生产造成巨大的损失。利用遥感大范围监测技术可以对农业病虫害做到早期发现、早期防治、及时响应、及时处理。遥感技术不仅能对农业虫害病情的发生、发展进行实时监测,而且能对虫害对于农作物生长影响作出有效的分析和评估。病虫害遥感监测的原理是作物病虫害会导致作物叶片细胞结构色素、水分氮素含量及外部形状等发生变化,从而引起作物反射光谱的变化。对于作物冠层,病虫害会引起作物叶面积指数、生物量覆盖度等的变化,故病虫害作物的反射光谱与正常作物可见光到热红外波段的反射光谱有明显差异。荀栋等^[57]为了研究 TH80-1 型植保无人机对水稻中后期主要病虫害稻飞虱、稻纵卷叶螟和水稻纹枯病的防治效果及应用前景,进行了植保无人机低空低容量喷雾和人工电动喷雾器大容量喷雾两种不同施药方式田间药效试验。结果表明,在水稻分蘖后期,在相同的药剂配方条件下,TH80-1 型植保无人机施药方式对水稻中后期主要病虫害防治效果显著,并且均优于传统人工喷雾器喷洒防治效果。李卫正等^[58]利用低成本小型

无人机采集松材线虫病地区的高空间分辨率影像,并经摄影测量软件 LPS 正射处理后导入到美国 GeoLink 软件中,实现病死木位置信息的采集。经地面差分 GPS 测量验证,精度均方根误差为 1.565 m。该方法比传统病虫害监测实施效率高,系统维护和使用成本较低,可为疫情区域判断疑似病死木位置提供定位技术支持。

病虫害对作物造成的生物胁迫是威胁粮食安全的重要因素,及时、全面地掌握农作物虫害状况的空间和时间变异信息是实施精准防治的前提。乔红波等^[59]融合高分辨率可见光影像的图像信息和地面观测得到的光谱信息,使用基于支持向量机(Support vector machine, SVM)的决策树分类构建健康冬小麦与感染全蚀病冬小麦的分类模型,并对不同病害程度进行分级。郭伟等^[60]以无人机搭载高光谱成像仪为遥感平台,利用高光谱影像结合地面病害调查数据,在田块尺度对冬小麦全蚀病病情指数分布进行空间填图。利用地物光谱仪(ASD)同步获取的高光谱数据评价 UHD185 光谱数据质量,综合运用统计分析以及遥感反演填图技术,使用模型对冬小麦进行病情指数反演,制作了冬小麦全蚀病病害空间分布图。研究结果为无人机高光谱遥感在冬小麦全蚀病的精准监测方面提供了技术支撑,并对未来卫星遥感探索冬小麦全蚀病大面积监测提供了理论基础。

3.4 农业灌溉

农业灌溉搭载高光谱、多光谱、热传感器的农业无人机,可准确分析并识别地块的干旱区域,为精准灌溉作业提供强大的数据支持。此外,在农作物生长过程中,该类型无人机还可以计算植被指数,通过农作物自身散发的热量来分析农作物密度以及健康状况。精准灌溉是指在 3S 技术及其相关技术或自动检测控制技术条件下的精准灌溉工程技术,它根据不同作物不同生育期间的土壤墒情和作物需水量实施实时精量灌溉。灌溉技术分为喷灌、微灌和渗灌等模式,农田小尺度的土壤含水率分布状况是实现精准灌溉的前提。赵春江等^[61]建立了基于互补相关模型、IKONOS 遥感数据及气象观测资料的高分辨率农田蒸散量估算方法,并利用蒸渗仪观测数据对农田蒸散模型及时空扩展结果进行验证和分析,从而为农田精准灌溉提供更为精细的蒸散决策信息。

3.5 其他

随着无人机遥感技术的逐渐成熟,无人机获取的遥感数据,给内陆水体的水环境监测提供了新的机遇。刘国洋等^[62]为提高水质监测的效率、减少人

力劳动和能源的浪费,提出了基于无人机技术的水样采集、水质监测装置,将现场通过水泵采样的数据通过无人机上搭载的 STM32 微处理器进行处理后用 GPRS 网络发送至服务器端,地面控制端通过计算机上的上位机进行数据接收和无人机控制。试验表明,该装置可高效地进行实时水质监测。黄宇等^[63]以云南星云湖和深圳茅洲河为例,利用无人机高光谱成像仪获取研究区高光谱影像的同时对地面水质参数进行采样,构建水质参数的最佳双波段监测模型。结果表明,叶绿素 a 含量的模型精度最高,其次是悬浮物、总氮和总磷含量,最低是浊度。无人机高光谱成像技术为城市河流、湖泊的水质监测提供了全新的数据来源和技术手段,同时也为湖泊、河流的水环境保护及治理提供了依据。洪运富等^[64]利用无人机获取的遥感数据来分析污染源的类型、数量、空间分布及其扩散形态。中国科学院上海技术物理研究所设计的基于无人机 SE-1 平台的小型多光谱成像仪,成功用于赤潮、海洋污染和原油泄漏等重大事件的监测。

4 主要问题和未来发展趋势

4.1 当前的主要问题

当前无人机搭载传感器技术在农业中的应用已经相对成熟,但随着近年来农业监测技术不断发展,无人机应用在时间、空间上的现实需求对现有无人机搭载方案存在较大挑战。因而未来在完善和创新的同时,也需要进一步提高性能与效率。主要体现在以下几个方面:

(1)随着多源信息融合技术的发展,需要无人机搭载的仪器越来越多,因此增加无人机的负载能力和续航能力,对于充分发挥无人机性能至关重要。

(2)在多信息获取的时候,往往需要信息传递稳定、准确。因此需要提升无人机的稳定性,用以保证获取信息的精度和准确性。

4.2 发展趋势

智能无人机正在为农业提供一种现代化的高效率、低成本的生产方式,渐进地帮助农民改变传统农业劳动力密集、粗放的生产生活方式。不仅具有适应性广、遥感操纵、空中作业、不受地形环境约束等优点,而且提高作业安全性,作业人员远离施药区域,不受农药危害,防治效果好,面临突发虫害有很强突击能力。无人机将会是由繁重的体力劳动、高成本、低效益向解放生产力、低成本、高效益转变的重要手段。无人机技术的深入和使用,将使现有的农田耕作变得更高效、更节约资源和环境友好。而在面临复杂多变的场景,以后发展前景主要如下:

(1)随着多源信息融合技术的发展,无人机获取的数据复杂,因此研究数据处理方法,特别是建立多源信息融合的耦合性,对于信息快速提取和分析、决策与调控有着重要意义。

(2)随着无人机技术的成熟,无人机搭载水质传感器等用于便携式监测水质信息,特别可以与无人船、水下机器人结合,实现空地海一体化系统全覆盖。

5 结束语

本文通过对国内外空地一体化技术、农业信息获取、多源信息融合的研究现状进行深入分析,阐述

了基于多源信息融合的空地一体化技术对现代农业生产的重要意义。新一代高空间、高光谱和高时间分辨率遥感等高通量数据的不断出现,使得农业信息获取技术的监测对象、监测精度、监测的业务化流程等方面得到了更大的突破。我国农业正处在由传统农业向现代农业发展的转型期,实施空地一体化技术给现代农业带来了新的机遇。我国农业信息技术与发达国家之间还有一定差距,大力发展农业获取与处理新技术、扩展空地一体化技术新应用,借鉴当前最新理论研究成果应用于实践,将会对我国农业现代化产生巨大作用。

参 考 文 献

- [1] 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.
ZHAO Chunjiang, XUE Xuzhang, WANG Xiu, et al. Advance and prospects of precision agriculture technology system[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(4): 7-12. (in Chinese)
- [2] 罗锡文,廖娟,汪沛,等.提高农业机械化水平促进农业现代化发展[J].中国农村科技,2021(1):6-11.
LUO Xiwen, LIAO Juan, WANG Pei, et al. Improve the level of agricultural mechanization and promote the development of agricultural modernization[J]. China Rural Science and Technology, 2021(1): 6-11. (in Chinese)
- [3] 肖乾.多传感器组合导航系统信息融合技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2005.
XIAO Qian. Research on information fusion technology of multi-sensor integrated navigation system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005. (in Chinese)
- [4] 高星伟,过静珺,程鹏飞,等.基于时空系统统一的北斗与GPS融合定位[J].测绘学报,2012,41(5):743-748,755.
GAO Xingwei, GUO Jingjun, CHENG Pengfei, et al. Beidou and GPS fusion positioning based on the unity of space-time system[J]. Journal of Surveying and Mapping, 2012, 41(5): 743-748, 755. (in Chinese)
- [5] CEZARY S, WLADYSŁAW K, LESZEK S, et al. Diagnostics of the tram track shape with the use of the global positioning satellite systems (GPS/Glonass) measurements with a 20 Hz frequency sampling[J]. Journal of Vibroengineering, 2014, 16(6): 3076-3085.
- [6] GUNNAR G, REIMUND G. Characterization of bridge motions on the violin using polymer sensor technology[J]. Proceedings of Meetings on Acoustics, 2013, 19(1): 035005.
- [7] JIANG X, LI S, TAO T, et al. Multi-information fusion based localization algorithm for Mars rover[J]. Advances in Aircraft and Spacecraft Science, 2014, 1(4): 455-469.
- [8] CHEN P, CHEN J. The multi-source data fusion global ionospheric modeling software—IonoGim[J]. Advances in Space Research, 2014, 53(11): 1610-1622.
- [9] 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):505-513,540.
LI Deren, LI Ming. Research progress and application prospects of UAV remote sensing system[J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2014, 39(5): 505-513, 540. (in Chinese)
- [10] 周志艳,臧英,罗锡文,等.中国农业航空植保产业技术创新发展战略[J].农业工程学报,2013,29(24):1-10.
ZHOU Zhiyan, ZANG Ying, LUO Xiwen, et al. Technology innovation and development strategy of China's agricultural aviation plant protection industry[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(24): 1-10. (in Chinese)
- [11] 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.
WANG Pei, LUO Xiwen, ZHOU Zhiyan, et al. Overview of key technologies for remote sensing information acquisition based on micro-mini UAV[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(18): 1-12. (in Chinese)
- [12] LIU Y, XU C, HUANG B, et al. Landslide displacement prediction based on multi-source data fusion and sensitivity states[J]. Engineering Geology, 2020, 271: 105608.
- [13] MOUNEM M, ZHOU S. Estimation and mapping of soil properties based on multi-source data fusion[J]. Remote Sensing, 2021, 13(5): 978.
- [14] LIN L, FENG Z, HUI S, et al. Multi-source information fusion and deep-learning-based characteristics measurement for exploring the effects of peer engagement on stock price synchronicity[J]. Information Fusion, 2021, 69: 1-21.
- [15] 汪小钦,王苗苗,王绍强,等.基于可见光波段无人机遥感的植被信息提取[J].农业工程学报,2015,31(5):152-159.
WANG Xiaoqin, WANG Miaomiao, WANG Shaoqiang, et al. Extraction of vegetation information based on UAV remote sensing in the visible light band[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(5): 152-159. (in Chinese)
- [16] 刘杨,冯海宽,孙乾,等.不同分辨率无人机数码影像的马铃薯地上生物量估算研究[J].光谱学与光谱分析,2021, 41(5): 1470-1476.
LIU Yang, FENG Haikuan, SUN Qian, et al. Estimation of potato aboveground biomass based on UAV digital images with different resolutions[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(5): 1470-1476. (in Chinese)

- [17] 高林,杨贵军,李红军,等.基于无人机数码影像的冬小麦叶面积指数探测研究[J].中国生态农业学报,2016,24(9):1254-1264.
GAO Lin, YANG Guijun, LI Hongjun, et al. Detection of winter wheat leaf area index based on UAV digital image[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(9): 1254-1264. (in Chinese)
- [18] 刘帅兵,杨贵军,景海涛,等.基于无人机数码影像的冬小麦氮含量反演[J].农业工程学报,2019,35(11):75-85.
LIU Shuaibing, YANG Guijun, JING Haitao, et al. Retrieval of nitrogen content in winter wheat based on UAV digital image[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(11): 75-85. (in Chinese)
- [19] ZOU K, CHEN X, ZHANG F, et al. A field weed density evaluation method based on UAV imaging and modified U-Net[J]. Remote Sensing, 2021, 13(2): 310.
- [20] BHARDWAJ A, SAM L, JAVIER F, et al. UAV imaging of a martian brine analogue environment in a fluvio-aeolian setting[J]. Remote Sensing, 2019, 11(18): 2104.
- [21] 宁纪锋,倪静,何宜家,等.基于卷积注意力的无人机多光谱遥感影像地膜农田识别[J].农业机械学报,2021,52(9):213-220.
NING Jifeng, NI Jing, HE Yijia, et al. Convolutional attention based plastic mulching farmland identification via UAV multispectral remote sensing image[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 213-220. (in Chinese)
- [22] 韩文霆,汤建栋,张立元,等.基于无人机遥感的玉米水分利用效率与生物量监测[J].农业机械学报,2021,52(5):129-141.
HAN Wenting, TANG Jiandong, ZHANG Liyuan, et al. Maize water use efficiency and biomass monitoring based on drone remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 129-141. (in Chinese)
- [23] 杨蜀秦,宋志双,尹瀚平,等.基于深度语义分割的无人机多光谱遥感作物分类方法[J].农业机械学报,2021,52(3):185-192.
YANG Shuqing, SONG Zhishuang, YIN Hanping, et al. UAV multi-spectral remote sensing crop classification method based on deep semantic segmentation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 185-192. (in Chinese)
- [24] GONG Y, DUAN B, FANG S, et al. Remote estimation of rapeseed yield with unmanned aerial vehicle (UAV) imaging and spectral mixture analysis[J]. Plant Methods, 2018, 14: 70.
- [25] SHAO Z, LI Y, DENG R, et al. Three-dimensional-imaging thermal surfaces of coal fires based on UAV thermal infrared data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2021, 42(2): 672-692.
- [26] 张智韬,边江,韩文霆,等.无人机热红外图像计算冠层温度特征数诊断棉花水分胁迫[J].农业工程学报,2018,34(15):77-84.
ZHANG Zhitao, BIAN Jiang, HAN Wenting, et al. UAV thermal infrared image calculation canopy temperature feature number to diagnose cotton water stress[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(15): 77-84. (in Chinese)
- [27] 杨文攀,李长春,杨浩,等.基于无人机热红外与数码影像的玉米冠层温度监测[J].农业工程学报,2018,34(17):68-75,301.
YANG Wenpan, LI Changchun, YANG Hao, et al. Corn canopy temperature monitoring based on UAV thermal infrared and digital image[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(17): 68-75, 301. (in Chinese)
- [28] 杨帅,陈俊英,周永财,等.无人机热红外遥感反演玉米根域土壤含水率方法研究[J].节水灌溉,2021(3):12-18.
YANG Shuai, CHEN Junying, ZHOU Yongcai, et al. Research on the method of UAV thermal infrared remote sensing to retrieve soil moisture content in corn root zone[J]. Water-saving Irrigation, 2021(3): 12-18. (in Chinese)
- [29] 郭伟,乔红波,赵恒谦,等.基于比值导数法的棉花蚜害无人机成像光谱监测模型研究[J].光谱学与光谱分析,2021,41(5):1543-1550.
GUO Wei, QIAO Hongbo, ZHAO Hengqian, et al. Research on UAV imaging spectrum monitoring model of cotton aphids based on ratio derivative method[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(5): 1543-1550. (in Chinese)
- [30] WALLACE L, HILLMAN S, REINKE K, et al. Non-destructive estimation of above-ground surface and near-surface biomass using 3D terrestrial remote sensing techniques[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2017, 8(11): 1607-1616.
- [31] OTA T, KAJISA T, MIZOUE N, et al. Estimating aboveground carbon using airborne LiDAR in Cambodian tropical seasonal forests for REDD+ implementation[J]. Journal of Forest Research, 2015, 20(6): 484-492.
- [32] 贾虎军,王立娟,范冬丽.无人机载 LiDAR 和倾斜摄影技术在地质灾害隐患早期识别中的应用[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(2):60-65.
JIA Hujun, WANG Lijuan, FAN Dongli. Application of UAV-borne LiDAR and oblique photography technology in the early identification of hidden dangers of geological hazards[J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(2): 60-65. (in Chinese)
- [33] 郭庆华,吴芳芳,胡天宇,等.无人机在生物多样性遥感监测中的应用现状与展望[J].生物多样性,2016,24(11):1267-1278.
GUO Qinghua, WU Fangfang, HU Tianyu, et al. The application status and prospects of UAVs in remote sensing monitoring of biodiversity[J]. Biodiversity, 2016, 24(11): 1267-1278. (in Chinese)
- [34] JAYAN W, SUPRIYA D, MICHAEL W, et al. Comparison of spaceborne and UAV-borne remote sensing spectral data for estimating monsoon crop vegetation parameters[J]. Sensors, 2021, 21(8): 2886.
- [35] KANG Y, NAM J, KIM Y, et al. Assessment of regression models for predicting rice yield and protein content using unmanned

- aerial vehicle-based multispectral imagery[J]. Remote Sensing, 2021, 13(8): 1508.
- [36] 茹煜,贾志成,范庆妮,等. 无人直升机远程控制喷雾系统[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 47–52.
RU Yu, JIA Zhicheng, FAN Qingni. Remote control spray system for unmanned helicopter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 47–52. (in Chinese)
- [37] 张海艳,兰玉彬,文晟,等. 植保无人机水稻田间农药喷施的作业效果[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(1): 116–124.
ZHANG Haiyan, LAN Yubin, WEN Sheng. Operational effect of pesticide spraying on rice field by plant protection drone[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(1): 116–124. (in Chinese)
- [38] 高圆圆,张玉涛,赵西城,等. 小型无人机低空喷洒在玉米田的雾滴沉积分布及对玉米螟的防治效果初探[J]. 植物保护, 2013, 39(2): 152–157.
GAO Yuanyuan, ZHANG Yutao, ZHAO Youcheng, et al. Preliminary study on the deposition and distribution of fog droplets sprayed on corn fields by small drones at low altitude and the control effect on corn borer[J]. Plant Protection, 2013, 39(2): 152–157. (in Chinese)
- [39] 张东彦,兰玉彬,陈立平,等. 中国农业航空施药技术研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 53–59.
ZHANG Dongyan, LAN Yubin, CHEN Liping, et al. Research progress and prospects of China's agricultural aviation pesticide application technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 53–59. (in Chinese)
- [40] ANONYMOUS. Lightweight sensing and control system for unmanned aerial vehicle monitoring[J]. NASA Tech. Briefs, 2019, 43(10): 1–8.
- [41] CAO R, LI B, WANG H, et al. Vertical and horizontal profiles of particulate matter and black carbon near elevated highways based on unmanned aerial vehicle monitoring[J]. Sustainability, 2020, 12(3): 1–16.
- [42] 班松涛,田明璐,常庆瑞,等. 基于无人机高光谱影像的水稻叶片磷素含量估算[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 163–171.
BAN Songtao, TIAN Minglu, CHANG Qingrui, et al. Estimation of phosphorus content in rice leaves based on UAV hyperspectral images[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 163–171. (in Chinese)
- [43] 陈青松,滕连泽,张洪吉,等. 基于微小无人机农作物长势监测试验研究——以猕猴桃为例[J]. 农机使用与维修, 2019(8): 4–10.
CHEN Qingsong, TENG Lianze, ZHANG Hongji, et al. Research on crop growth monitoring experiment based on micro-UAV—taking kiwi fruit as an example[J]. Use and Maintenance of Agricultural Machinery, 2019(8): 4–10. (in Chinese)
- [44] 肖武,陈佳乐,宣宏志,等. 基于无人机影像的采煤沉陷区玉米生物量反演与分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 169–180.
XIAO Wu, CHEN Jiale, TAI Hongzhi, et al. Inversion and analysis of corn biomass in coal mining subsidence area based on UAV images[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 169–180. (in Chinese)
- [45] 杨福芹,冯海宽,肖天豪,等. 融合无人机影像光谱与纹理特征的冬小麦氮营养指数估算[J]. 农业现代化研究, 2020, 41(4): 718–726.
YANG Fuqin, FENG Haikuan, XIAO Tianhao, et al. Estimation of nitrogen nutrition index of winter wheat based on fusion of UAV image spectrum and texture characteristics[J]. Research of Agricultural Modernization, 2020, 41(4): 718–726. (in Chinese)
- [46] 陈春玲,周长献,于丰华,等. 基于光谱特征参数的粳稻冠层氮素含量反演方法[J]. 沈阳农业大学学报, 2020, 51(2): 218–224.
CHEN Chunling, ZHOU Changxian, YU Fenghua, et al. Inversion method of japonica rice canopy nitrogen content based on spectral characteristic parameters[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2020, 51(2): 218–224. (in Chinese)
- [47] 贾丹,陈鹏飞. 低空无人机影像分辨率对冬小麦氮浓度反演的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 164–169.
JIA Dan, CHEN Pengfei. Effect of low-altitude UAV image resolution on inversion of winter wheat nitrogen concentration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 164–169. (in Chinese)
- [48] 李静,王建军,王安. 基于低成本无人机的水稻叶片 SPAD 值遥感估测[J]. 吉林农业, 2017(18): 68.
LI Jing, WANG Jianjun, ZHU An. Remote sensing estimation of rice leaf SPAD value based on low-cost drones[J]. Jilin Agriculture, 2017(18): 68. (in Chinese)
- [49] 毛智慧,邓磊,赵晓明,等. 利用无人机遥感提取育种小区玉米倒伏信息[J]. 中国农学通报, 2019, 35(3): 62–68.
MAO Zhihui, DENG Lei, ZHAO Xiaoming, et al. Using UAV remote sensing to extract corn lodging information in breeding plots[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(3): 62–68. (in Chinese)
- [50] 高林,杨贵军,于海洋,等. 基于无人机高光谱遥感的冬小麦叶面积指数反演[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 113–120.
GAO Lin, YANG Guijun, YU Haiyang, et al. Winter wheat leaf area index inversion based on UAV hyperspectral remote sensing[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 113–120. (in Chinese)
- [51] 张宏鸣,谭紫薇,韩文霆,等. 基于无人机遥感的玉米株高提取方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 241–250.
ZHANG Hongming, TAN Ziwei, HAN Wenting, et al. Corn plant height extraction method based on UAV remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 241–250. (in Chinese)
- [52] 牛庆林,冯海宽,杨贵军,等. 基于无人机数码影像的玉米育种材料株高和 LAI 监测[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 73–82.
NIU Qinglin, FENG Haikuan, YANG Guijun, et al. Monitoring of plant height and LAI of maize breeding materials based on

- UAV digital imaging[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(5): 73–82. (in Chinese)
- [53] 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.
LI Zongnan, CHEN Zhongxin, WANG Limin, et al. Extraction of corn lodging area based on remote sensing by small drones [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(19): 207–213. (in Chinese)
- [54] 赵立成,段玉林,史云,等. 基于无人机 DSM 的小麦倒伏识别方法[J]. 中国农业信息, 2019, 31(4): 36–42.
ZHAO Licheng, DUAN Yulin, SHI Yun, et al. Wheat lodging recognition method based on drone DSM [J]. China Agricultural Information, 2019, 31(4): 36–42. (in Chinese)
- [55] 闫峰,李茂松,王艳姣,等. 遥感技术在农业灾害监测中的应用[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 131–136.
YAN Feng, LI Maosong, WANG Yanjiao, et al. Application of remote sensing technology in agricultural disaster monitoring [J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(6): 131–136. (in Chinese)
- [56] 代辉,武文波,刘纯波,等. 洪涝灾害天空地一体化灾情查勘技术研究[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(1): 1–6.
DAI Hui, WU Wenbo, LIU Chunbo, et al. Research on integrated disaster investigation technology for flood disasters in the sky and ground[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(1): 1–6. (in Chinese)
- [57] 荀栋,张兢,何可佳,等. TH80–1 植保无人机施药对水稻主要病虫害的防治效果研究[J]. 湖南农业科学, 2015(8): 39–42.
XUN Dong, ZHANG Jing, HE Kejia, et al. Study on the control effect of TH80–1 plant protection drone application on main rice diseases and insect pests[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2015(8): 39–42. (in Chinese)
- [58] 李卫正,申世广,何鹏,等. 低成本小型无人机遥感定位病死木方法[J]. 林业科技开发, 2014, 28(6): 102–106.
LI Weizheng, SHEN Shiguang, HE Peng, et al. Low-cost small drone remote sensing method for locating dead woods[J]. Forestry Science and Technology Development, 2014, 28(6): 102–106. (in Chinese)
- [59] 乔红波,焦红涛,吴旭,等. 基于支持向量机模型的冬小麦全蚀病为害等级遥感监测[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(12): 1694–1698.
QIAO Hongbo, JIAO Hongtao, WU Xu, et al. Remote sensing monitoring of winter wheat total erosion based on support vector machine model[J]. Journal of Triticeae Crops, 2014, 34(12): 1694–1698. (in Chinese)
- [60] 郭伟,朱耀辉,王慧芳,等. 基于无人机高光谱影像的冬小麦全蚀病监测模型研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 162–169.
GUO Wei, ZHU Yaohui, WANG Huifang, et al. Research on winter wheat total erosion monitoring model based on UAV hyperspectral image[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 162–169. (in Chinese)
- [61] 赵春江,杨贵军,薛绪掌,等. 基于互补相关模型和 IKONOS 数据的农田蒸散时空特征分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 115–124, 293–294.
ZHAO Chunjiang, YANG Guijun, XUE Xuzhang, et al. Analysis of temporal and spatial characteristics of farmland evapotranspiration based on complementary correlation models and IKONOS data[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(8): 115–124, 293–294. (in Chinese)
- [62] 刘国洋,王宇,魏茂源,等. 基于无人机技术的水质监测采样装置[J]. 电子测试, 2016(8): 23–24.
LIU Guoyang, WANG Yu, WEI Maoyuan, et al. Water quality monitoring sampling device based on drone technology[J]. Electronic Testing, 2016(8): 23–24. (in Chinese)
- [63] 黄宇,陈兴海,刘业林,等. 基于无人机高光谱成像技术的河湖水质参数反演[J]. 人民长江, 2020, 51(3): 205–212.
HUANG Yu, CHEN Xinghai, LIU Yelin, et al. Inversion of river and lake water quality parameters based on UAV hyperspectral imaging technology[J]. People's Yangtze River, 2020, 51(3): 205–212. (in Chinese)
- [64] 洪运富,杨海军,李营,等. 水源地污染源无人机遥感监测[J]. 中国环境监测, 2015, 31(5): 163–166.
HONG Yunfu, YANG Haijun, LI Ying, et al. UAV remote sensing monitoring of pollution sources in water sources[J]. China Environmental Monitoring, 2015, 31(5): 163–166. (in Chinese)