

于丰华, 李世隆, 金忠煜, 等. 基于无人机遥感技术的大田作物精准施肥决策研究进展[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(6): 788-797.

YU Fenghua, LI Shilong, JIN Zhongyu, et al. Research progress of precision fertilization decision-making for field crops based on UAV remote sensing technology[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(6): 788-797.

基于无人机遥感技术的大田作物精准施肥 决策研究进展

于丰华^{a,b,c}, 李世隆^{a,b}, 金忠煜^{a,b}, 白驹驰^{a,b}, 许童羽^{a,b,c}

[沈阳农业大学 a. 信息与电气工程学院, b. 国家数字农业区域创新中心(东北),

c. 辽宁省智慧农业技术重点实验室, 沈阳 110161]

摘要:近年来无人机遥感技术在作物施肥智慧决策与精准作业领域应用广泛, 现将无人机遥感技术在监测作物长势并指导施肥、无人机精准作业等方面的研究现状作以综述。基于信息化方法的施肥决策可通过数据驱动和机理驱动2种方式制定, 其中农情监测为施肥决策的制定提供了数据支撑, 目前研究主要以机器学习、回归分析等数据驱动方法监测作物长势, 存在农学机理与普适性不足等问题; 部分研究通过耦合辐射传输模型、作物生长模型等机理模型提升了无人机遥感对作物大规模监测的物理意义与普适性。制定施肥决策方面重点探讨了通过无人机遥感数据建立回归模型等数据驱动方式制定作物精准施肥决策的研究现状, 并对目前制定施肥决策缺乏机理性的问题进行了深入讨论与展望。无人机精准作业方面, 综述无人机遥感、作业处方图生成和精准喷施技术等无人机执行精准施肥决策的关键作业环节, 并对相关技术进行展望。深入分析基于无人机遥感方法开展大田作物精准施肥决策的研究进展及存在的问题, 旨在为利用无人机实现作物精准施肥提供科学依据和参考。

关键词:无人机; 精准施肥; 农情监测; 遥感

中图分类号: S25

文章编号: 1000-1700(2024)06-0788-10

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress of Precision Fertilization Decision-Making for Field Crops Based on UAV Remote Sensing Technology

YU Fenghua^{a,b,c}, LI Shilong^{a,b}, JIN Zhongyu^{a,b}, BAI Juchi^{a,b}, XU Tongyu^{a,b,c}

[Shenyang Agricultural University a. College of Information and Electrical Engineering, b. National Digital Agriculture Sub-center of Innovation (Northeast Region), c. Key Laboratory of Intelligent Agriculture in Liaoning Province, Shenyang 110161, China]

Abstract: In recent years, unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing technology has been widely applied in the field of intelligent decision-making and precise operation of crop fertilization. This article reviews the current research status of UAV remote sensing technology in monitoring crop growth and guiding fertilization, as well as precise UAV operations. Fertilization decisions based on information technology can be made through two methods: data-driven and mechanism driven. Among them, crop monitoring provides data support for fertilization decision-making. Currently, research mainly uses data-driven methods such as machine learning and regression analysis to monitor crop growth, which has problems such as insufficient agricultural mechanisms and universality; Some studies have improved the physical significance and universality of unmanned aerial vehicle remote sensing for large-scale crop monitoring through coupling radiation transfer

收稿日期: 2024-05-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(32201652); 辽宁省自然科学基金项目(2023-MSLH-283); 辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC2203005)

第一作者: 于丰华(1989-), 男, 博士, 教授, 从事精准农业航空研究, E-mail: adan@syau.edu.cn

通信作者: 许童羽(1967-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事农业电气化与信息化研究, E-mail: xutongyu@syau.edu.cn

models, crop growth models, and other mechanism models. In terms of formulating fertilization decisions, the focus was on exploring the research status of data-driven methods such as establishing regression models through UAV remote sensing data to make precise fertilization decisions for crops. The lack of mechanistic reasoning in current fertilization decisions was also discussed and discussed in depth. In terms of precise UAV operations, this article summarizes the key operational links of UAV remote sensing, operation prescription map generation, and precise spraying technology in executing precise fertilization decisions, and looks forward to related technologies. This article provides an in-depth analysis of the research progress and existing problems in precision fertilization decision-making for field crops based on UAV remote sensing methods, aiming to provide scientific basis and reference for the use of UAV precision fertilization for crops.

Key words: UAV; precision fertilization; crop monitoring; remote sensing

粮食安全是国家安全的重要基础,施肥是田间管理的关键环节,直接影响粮食等大田作物的最终产量^[1]。传统大田作物制定施肥决策往往依靠农民经验,对作物生长情况及土壤肥力情况缺少量化的方法。传统观念认为肥料投入与作物产量成正比^[2],为追求产量,施肥决策往往具有随意性和盲目性^[3]。2020年我国农用化肥平均施用量为 $434.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,是国际公认化肥施用安全上限 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的1.93倍^[4]。过量施肥常常导致土壤养分比例失衡,进而增加作物减产的风险。相反,施肥不足则难以满足作物生长发育的营养需求,对其生长产生不良影响。因此,在大田作物田间管理环节中,合理施肥至关重要,确保养分准确供应,从而保障作物的健康生长和高产。

针对化肥施用不合理的现象,2015年开始农业农村部组织了化肥使用量零增长行动,积极推动降低农作物化肥用量。我国农用化肥施用量连续6年保持下降,2021年全国农用化肥施用量5191万t,比2015年减少13.8%。2022年农业农村部印发《到2025年化肥减量化行动方案》^[5],明确要求以新技术实施养分综合管理,推广营养诊断和精准施肥等技术以及喷肥无人机、水肥一体化设施等机具,促进施肥精准化、智能化、绿色化、专业化,实现化肥减量增效。

精准施肥技术是精准农业应用领域之一,其核心在于根据农作物对养分的需求量和土壤的养分状况,科学合理地确定施肥量和施肥方式,以实现养分的高效利用^[6]。实地调查数据评估作物长势的方法需要消耗大量人力物力,且受时效性和空间尺度的限制而难以实时获取大面积的农情信息。遥感技术具有覆盖面广、效率高、时效性强等优势^[7],有效弥补了传统农情监测方式的不足,目前被广泛应用于快速无损地监测大面积作物长势信息^[8]。与地面遥感平台^[9]和航天遥感平台^[10]相比,无人机尺度的航空遥感平台^[11]因其灵活、高效、便捷等特点,在时空分辨率等方面具有显著优势,可以更好的与地面观测数据相结合^[12],目前被广泛应用于为田块尺度精准施肥获取作物长势数据和土壤养分状况。

本研究以无人机遥感技术在作物精准施肥领域的相关研究成果为综述对象,梳理并总结了当前该领域的国内外研究进展与前沿方向,以期为今后基于无人机遥感手段的作物精准施肥决策研究提供相关的理论基础与技术支持。

1 信息技术在作物精准施肥决策中的研究与应用

1.1 精准施肥对作物生长发育的重要影响

作物在生长过程中需要吸收大量的氮^[13]、磷^[14]、钾^[15]等营养元素,而这些元素在土壤中的含量往往无法满足作物的需求。化肥作为现代农业的重要组成部分,在作物生长发育过程中扮演着至关重要的角色,为作物提供了必要的营养元素,促进其正常生长。肥料施用过多会导致土壤中养分浓度过高,导致作物徒长、贪青晚熟^[16],容易倒伏并招致病虫害侵袭^[17],导致作物减产;施肥不足则无法满足作物生长所需的养分,影响作物的光合作用和呼吸作用,导致作物生长缓慢、产量下降。

作物施肥决策是一个由多种因素复合而成的复杂过程,其中施肥时间和施肥量的确定是关键环节。施肥决策的制定往往需要综合土壤类型与状况、作物种类与生长阶段、气候条件以及化肥质量与价格等多种因素^[18]。传统的施肥决策依赖于农民的经验 and 直觉,难以按作物实际生长情况精准施肥。近年来,随着农业信息化技术的不断发展,以作物和土壤养分状况为基础制定施肥决策,已经成为现代农业精准管理的重要手段之一^[19]。

1.2 基于测土配方法的作物精准施肥决策

测土配方法是一种以实现作物与土壤之间养分供求平衡为目标、以调节作物需肥与土壤供肥矛盾为核心、通过对土壤进行精密检测并分析土壤养分含量的土壤养分管理技术。测土配方法目前已经形成一套完整的理论体系,以最小养分律、报酬递减律等经典施肥理论为理论依据^[20],以作物高产、施肥高效为目的,通过室内化学分析等技术手段对土壤养分含量进行测量,结合作物需肥规律,进而制定施肥方案^[21]。传统测土配方法主要包括地力分区配方法、目标产量配方法、田间试验法3类,其中目标产量配方法相较于其他方法在信息技术不断发展的时代背景下更具研究和应用潜力^[22]。

测土配方法作为被广泛应用的科学施肥方法之一,该技术在提高大田作物产量、改善品质以及减少化肥用量等方面都取得了显著成效。测土配方法的理论已趋于成熟,目前的研究多集中在利用软件开发等现代信息手段研制辅助决策平台推广测土配方施肥软件^[23],并逐渐集成了地块施肥指导、地块种植管理、投入品管理、用户管理等功能^[24]。尽管测土配方法已获得广泛的应用,但其存在的针对性不强、对作物生长状态考虑不足、成本较高等问题制约了作物施肥决策的精准制定。

1.3 基于专家系统的作物精准施肥决策

专家系统是一种含有某领域大量专家知识与经验的智能计算机程序系统,能够根据系统中的知识与经验模拟人类专家的决策过程,以解决需要人类专家处理的复杂问题^[25],目前在制定作物精准施肥决策等农业领域得到了广泛应用。陈朗等^[26]通过定点跟踪方法建立柑橘树体矿质营养和果实品质指标原始数据库,生成果实膨大期优质叶片养分适宜标准,构建基于果实品质综合评价的营养施肥推荐专家系统,实现了有效养分施肥配方推荐的功能,显著提高了柑橘果实综合品质。侯云鹏等^[27]通过田间定位试验,研究发现养分专家系统推荐施肥相较于农民习惯施肥和土壤测试推荐施肥,显著降低了氮磷肥用量,增加了钾肥用量,从而提高了玉米产量、收益及其稳定性,并提升了肥料利用率,维持土壤养分稳定,降低氮磷盈余和钾亏缺。

农业专家系统等人工智能模型作为常见的施肥方案推荐方法,由于其固有的黑盒性和不可解释性,导致其在合理性方面饱受争议^[28]。同时,关于农业专家系统开发的理论研究还不够深入,许多系统只是简单地将专家系统的理论和方法套用到农业领域,系统中使用的知识大多属于浅层次的知识,主要是基于条件规则型的知识,没有针对农业生产的实际情况进行深入研究。这导致系统的知识表示方式相对单一,推理模式简单,缺乏专业的开发平台。

1.4 基于知识图谱的作物精准施肥决策

知识图谱作为结构化数据表示中的高效方法之一不仅具有强大的推理能力,在推理过程中也具有较强的可解释性^[29-30],与传统人工智能模型相比其更具信服力。目前研究人员在基于知识图谱的精准施肥方面有较深的研究,通过整合农业专家知识、模型知识等多源异构数据并加以决策应用于精准施肥领域,以解决农业数据标准不同而造成的异质、异构、多模态等问题^[31]。知识图谱的构建需要大量的数据,农业领域的数据具有多样性和不确定性,这可能导致数据质量可靠性下降,降低知识图谱的准确性和完整性,影响精准施肥决策的效果。

针对知识图谱推理方面存在的局限性,研究人员运用案例推理技术克服其存在问题。戈为溪等^[32]利用知识图谱确定施肥方案,并加以案例推理技术对知识图谱不擅长处理数值预测问题的情况进行施肥量方面的补充。GE等^[33]提出了一种基于知识图谱和案例推理方法的施肥推荐模型,通过参考语义知识和定量信息,根据现状智能生成施肥计划,解决了基于知识图谱的模型不能完全挖掘数据、也不擅长处理数值预测的问题。

知识图谱通过整合农业领域的各种实体和关系,为农业管理提供了丰富的数据支持和知识资源,在作物精准施肥决策方面展现出显著优势和巨大潜力。然而作物生长和施肥受到土壤性质、气候条件等多种环境因素相互交织的影响,知识图谱和案例推理技术受数据质量和案例库规模的限制难以全面考虑这些因素的影响,施肥决策可能会产生偏差。

2 基于无人机遥感数据驱动的作物精准施肥决策

精准施肥的关键是精准掌握作物的长势情况并根据作物所需制定施肥决策,无人机遥感技术目前被广泛应用在作物精准施肥决策领域。

2.1 基于无人机遥感数据驱动的农情精准监测

随着信息技术的快速发展,遥感技术以其非接触、大范围、快速获取地表信息的独特优势在农情监测领域得到了广泛的应用,数据驱动方法提高了作物长势监测的效率和精度,为农业生产决策提供了有力的数据支持。目前主要通过通过对遥感数据进行理化参量反演^[34]和产量预估^[35]等方式进行作物长势监测。

彭涛等^[36]通过农田土壤无人机高光谱影像构建土壤全氮的高光谱反演模型,筛选出最优模型并对研究区土壤全氮含量进行反演制图,为农田土壤全氮含量快速估测提供技术参考和支撑。刘涛等^[37]通过不同高度的无人机多光谱影像与地面实测数据构建不同高度下的光谱指数与叶面积指数(leaf area index, LAI)和叶绿素含量的关系模型,探究无人机多光谱反演小麦叶面积指数和叶绿素含量的模型估算潜力,为筛选无人机多光谱波段实现作物长势参数快速估测提供应用参考。AN等^[38]通过连续小波变换提取无人机高光谱影像小波特征,并结合SPAD测定的叶绿素含量,利用支持向量机回归建立水稻叶绿素含量估算经验模型。SHEN等^[39]通过无人机获取灌浆阶段稻田的高光谱数据,应用六种机器学习回归算法对作物产量估算获得了较好的效果,探索了无人机高光谱在水稻等作物产量估算方面的潜力。

利用机器学习、回归分析等数据驱动方法建立高光谱反射率与地面采样数据间的统计模型是目前基于无人机遥感技术进行农情监测最常用的手段,但该方法的物理意义和普适性存在一定的不足^[40],且数据质量与样本量极大地限制了数据驱动方法大规模应用于农情监测的可能。

2.2 基于无人机遥感数据驱动的作物精准施肥决策

目前基于无人机遥感技术制定作物精准施肥决策研究,主要技术方法是利用无人机搭载多光谱相机获取水稻冠层多光谱图像,通过构建NDVI等植被指数与氮素等参量建立回归模型,研究结果表明在产量相差不大的情况下,氮肥追施量均有一定程度的减少。臧英等^[41]通过无人机多光谱相机获取水稻冠层多光谱图像,分析氮素对NDVI值的影响,并建立基于标准种植比值法的水稻关键施肥节点的施肥决策模型,为实现作物养分管理决策支持系统提供了一种新的模型方法。董超等^[42]在冬小麦返青期利用无人机多光谱图像数据探究不同氮浓度处理下多光谱数据与冬小麦产量和施肥量的关系,构建基于植被指数的氮肥施肥模型,为冬小麦精准施肥提供了参考。ZHANG等^[43]开发了一种基于无人机多光谱数据的改进型充足度指数算法,用于小麦生长关键阶段的变量速率氮素推荐,在减少氮肥投入并保持产量不变的情况下,提高收获指数和氮素农学效率。

综上所述,现有基于无人机遥感技术制定的作物精准施肥决策以数据驱动为主,存在农学机理与普适性不足等问题。为解决这一问题,部分研究人员将无人机遥感数据与描述作物生长规律的机理模型耦合,在提升作物理化参量反演物理意义、普适性的同时,减少对数据的直接采集,提升对作物大规模生长监测和预测的精确性和实时性。

3 基于无人机遥感机理强化的作物精准施肥决策

针对目前无人机遥感数据指导施肥机理不足的问题,通过耦合无人机遥感数据与辐射传输模型(radiative transfer model, RTM)、作物生长模型等描述作物生长规律的机理模型,增强作物精准施肥决策的机理性与普适性,是目前作物精准施肥决策主要研究方向之一。

3.1 耦合无人机遥感数据和辐射传输模型的农情精准监测

辐射传输模型是定量遥感理论研究的重要组成部分,主要依据辐射传输方程建立。农业领域的辐射传输模型主要用于模拟农作物生长过程中的辐射条件以及作物生物理化参数反演。

叶片尺度的辐射传输模型根据不同的叶片物理结构假设,主要包括:PLATE、N-Flux、Compact spherical等^[44]。BARET等^[45]在PLATE模型的基础上提出的PROSPECT模型,是目前应用最广泛叶片

辐射传输模型。PEANUSAHA等^[46]利用PROSPECT-PRO模型逆运算得到模型输入参数的估计值,建立理化参数与植被叶片氮素含量的数学联系,进而实现对植被叶片氮素含量的反演。

在作物冠层辐射传输方面,主要通过植被二向反射特性描述光在作物冠层内部的传播和相互作用^[47]。以SAIL为代表的冠层辐射传输模型描述了光在作物冠层内传播和衰减的规律,其与叶片辐射传输模型PROSPECT耦合而成的PROSAIL模型,是当前用于描述作物冠层辐射传输过程最常用的机理模型之一^[48]。GIORGIO等^[49]通过无人机多光谱图像和PROSAIL模型构建混合回归反演方法,对LAI和叶片叶绿素含量进行估算。YIN等^[50]通过融合激光雷达点云和高光谱图像,构建特定于银杏树的叶色素含量查找表,绘制了不同树龄银杏树的色素分布图,验证了无人机遥感与PROSAIL模型结合在评估冠层色素含量方面的有效性。

耦合无人机遥感数据和冠层辐射传输模型,通过查找表法、数值优化法估测水稻理化参量是目前基于物理驱动反演的主要方法^[51]。这两种方法的本质是将理化参量反演问题转变为辐射传输模型输入参数优化问题,然而模型模拟的高光谱反射率受多个输入参量共同影响,导致了作物理化参量反演存在“同谱异物”等病态反演问题^[52]。

3.2 耦合无人机遥感数据和作物生长模型的农情精准监测

作物生长模型最初的理论基础源于法国科学家REAUMUR在1735年提出的“积温学说”^[53],至上世纪60年代,随着计算机技术的发展,作物生长动态模拟模型的研究开始起步。目前作物生长模型是一个包含作物生理学、气象学、土壤学、水文学等多学科交叉的研究领域^[54],通过计算机模拟方法定量描述作物在单点尺度上受土壤、水肥等不同因素影响下生长发育动态过程的机理模型^[55]。

目前世界范围内使用广泛的作物生长模型以机理性模型为主,如WOFOST^[56]、EPIC^[57]、DSSAT^[58]、ORYZA^[59]等。我国作物生长模型奠基人高亮之教授于上世纪80年代研制的水稻栽培计算机模拟优化决策系统(RCSODS)是我国第一个可用于指导水稻高产栽培的大型计算机软件^[60],开创了我国研制作物生长模型的先河。目前我国作物生长模型领域研究也取得了丰硕成果,如南京农业大学曹卫星教授团队研制的RiceGrow模型^[61]、中国农业大学冯利平教授团队研制的小麦生长发育模拟模型WheatSM^[62]等。

尽管作物生长模型在模拟作物生长发育过程中具有较强的机理性,但其在表征大范围作物长势时难以描述作物在空间上的差异情况。无人机遥感数据具有空间连续性和实时性等优势,但难以揭示作物生长发育对田间管理和环境气象条件的响应机理^[63]。耦合遥感数据和作物生长模型可以在解决作物生长模型空间异质性的同时增强遥感机理性^[64-66],是大规模农情监测和预估产量的有效技术途径。PENG等^[67]以LAI为同化变量耦合无人机遥感数据与SAFY模型,实现在不同水处理下估算玉米产量,结果表明产量估算精度随水分胁迫的增加而降低。单变量同化难以全面描述作物生长过程中的复杂变化,导致模型预测结果与实际观测值之间存在较大偏差,作物生长模型同化多变量可以有效提高作物生长模型的预测能力和准确性^[68]。李金敏等^[69]采用集合卡尔曼滤波方法将LAI、土壤含水量(soil moisture, SM)、叶片氮积累量等数据与SWAP-WOFOST模型同化,较好地重现作物叶片氮素变化过程,有效地解决了水分和作物氮素状态错误估计对产量模拟的影响,提升了冬小麦作物生长模拟和产量估计的精度。

综上所述,目前的研究主要聚焦于利用集合卡尔曼滤波算法^[70]、四维变分算法^[71]、粒子滤波算法^[72]等同化方法,同化LAI^[73]、土壤含水量^[74]等状态变量,以实现无人机遥感数据和作物生长模型的耦合进行农情监测。此外,研究还向多源数据融合、多模型耦合的方向发展^[75]。同时,也有部分研究致力于通过耦合作物生长模型与辐射传输模型,将光谱数据与作物生长发育过程直接关联,旨在提高农情监测的可靠性^[76-77]。

3.3 耦合无人机遥感数据与养分需求机理的作物精准施肥决策

施肥决策的形成受作物种类、生长环境、土壤条件等条件复合影响,单一基于遥感技术制定的施肥决策虽然在一定程度上提高了施肥的精准度和效率,但难以准确反映作物实际的需肥情况和肥料利用率。为了解决这一问题,施肥决策的制定应加强农学机理的研究,将作物生长机理、养分吸收利用机理等纳入决策体系,以提高施肥决策的科学性和实用性。JIN等^[78]将利用数据同化方法将无人机

RGB图像数据反演LAI和实测LAI耦合,并将耦合结果引入RiceGrow模型中,制定施肥决策并构建无人机作业处方图实现水稻施肥精准作业,为精准化预测水稻施肥量提供了一种有效的技术方法。

此类研究以无人机遥感数据反演结果反映作物长势情况,通过耦合反演结果和作物生长模型,实现了作物生长发育过程的机理性模拟。但在表征作物长势方面仍以数据驱动方式反演LAI等理化参量为主,将反映光谱数据对理化参量响应机理的辐射传输模型引入施肥决策制定环节是下一步研究的重点。

4 无人机精准施肥作业关键技术

精准施肥决策的实施离不开无人机精准作业技术,农业无人机精准作业的关键技术主要包括超低空飞行控制技术、作业处方图技术和精准喷洒技术。

4.1 超低空飞行控制技术

在农业领域,无人机主要承担农情监测、施肥、浇灌、施药等农业任务,超低空飞行控制技术是其中至关重要的技术^[79],它为农用无人机在农业复杂地形环境下的飞行提供了保障。在实际应用过程中,考虑到农田的实际情况,如地形不平坦,超低空飞行控制技术从导航系统和飞行控制系统两个方面进行了妥善的解决。导航系统方面,借助激光设备^[80]、对地测距仪^[81]以及差分GPS定位系统^[82],实现精准定位,达到了厘米级别的定位精度。飞行控制系统方面,则通过去除超低空环境下的强地效影响和紊乱气流影响,确保无人机的稳定飞行。随着无人机技术的不断发展和完善,我国涌现了一大批如大疆农业、极飞科技等致力于农用无人机研制生产的企业,为我国精准农业的发展提供了有力的支持。

4.2 基于作业处方图实现无人机变量施肥

作业处方图是无人机按作物生长情况进行精准作业的关键技术之一。根据农用无人机的作业参数将大田块划分成栅格化的小区,结合各小区营养诊断结果和GPS坐标信息构建无人机变量喷施作业处方图。目前无人机作业处方图在灌溉^[83]、施药^[84]、施肥^[85]等领域得到了广泛应用。2021年大疆、极飞等农用无人机企业,分别推出可执行处方图的农用无人机,可以通过载入植被指数趋势图辅助指导田间变量追肥^[86-87]。于丰华等^[88]利用无人机遥感构建施肥量处方图指导农用无人机精准变量追肥,在水稻分蘖期追肥窗口期,根据无人机遥感营养诊断结果构建水稻分蘖期施肥量处方图,结合农用无人机作业参数对待施肥地块进行栅格划分,确定精准施肥量,并通过农用无人机进行精准施肥取得了较好的效果。

4.3 无人机精准喷施技术

无人机喷施的肥料以固体颗粒肥料和液体肥料为主^[89]。固体颗粒肥料持效期较长,能够稳定地为作物提供养分。通过无人机精确投放,固体颗粒肥料可以实现定点施肥,减少浪费,提高肥料利用率。液体肥料由于其渗透性强,作物吸收迅速,有利于作物快速生长。通过无人机喷洒,可以均匀覆盖作物。这两种肥料形式各具特点,适用于不同的施肥需求。无人机精准喷施技术使得肥料能够更精准、高效地施用于作物上,提高肥料利用率并促进作物生长。

在喷施装置方面,研究人员主要关注喷嘴的设计、液体的雾化效果以及喷施的精准度。通过优化喷嘴结构,改善液体的雾化效果,可以提高农药或化肥的利用率,减少浪费。李普等^[90]设计了一种基于模糊PID控制的四旋翼无人机叶面肥控制系统,解决了四旋翼无人机叶面肥喷施流量控制精度较低的问题。此外,研究无人机在喷施颗粒时的飞行高度、速度和喷施量等参数,是确保颗粒肥能够准确地喷洒到目标区域的关键所在。徐陶等^[91]探究多旋翼无人机单位面积液体喷施量、飞行高度及授粉方式等对雾滴沉积分布及液体授粉效果的影响。

5 问题与展望

基于无人机遥感技术的作物精准施肥决策研究目前已取得显著成果,但仍面临一些挑战。本研究通过对相关研究进行总结,探讨现阶段作物精准施肥存在的问题与发展建议。

第一,基于专家系统、知识图谱等信息技术制定的作物精准施肥决策,其决策效果依赖于数据的

准确性和完整性。鉴于农业领域数据的多样性和不确定性,如何采用更为科学的方法收集、整合并处理数据,是推动信息技术制定高效、准确作物精准施肥决策的关键途径之一。

第二,构建回归模型等数据驱动方式制定施肥决策是目前最常用的方式。无人机遥感凭借其其在时空分辨率上的优势,已成为田块尺度农情监测的重要工具。目前利用无人机遥感技术进行作物长势监测以基于数据驱动的理化参量反演和预估产量为主,为制定施肥决策提供了数据支撑。施肥决策的制定目前主要以建立统计模型为主,其中大多数模型依赖于无人机遥感信息与实地观测数据建模。这种方法对数据采集条件和数据样本量有着较高的要求,同时施肥决策的普适性与机理性仍显不足。

第三,加强无人机遥感与机理模型深入融合,提升施肥决策的科学性和普适性。将无人机遥感数据与描述作物生长规律的辐射传输模型、作物生长模型相耦合,以实现作物大规模生长监测和预测的精确性和实时性,是提升作物农情监测机理性的有效途径,从而为精准施肥研究奠定坚实的数据基础。尽管目前在农情监测方面已有一定的机理研究,但制定的施肥决策普适性与机理性仍显不足。未来研究应进一步加强机理与统计方法的结合,提升施肥决策的精准性和实用性。

第四,优化无人机精准作业技术确保施肥决策准确高效执行。施肥决策的执行离不开无人机精准作业技术,深入研究超低空飞行控制技术,并充分利用作业处方图指导农用无人机精准变量施肥,同时针对不同肥料特性优化无人机喷施策略。优化无人机精准作业关键技术,是作物精准施肥决策准确执行的重要保证。

参考文献:

- [1] 王丹丹,陈焕轩,张 翀,等.中国玉米百千克籽粒地上部吸氮量的空间差异及驱动因素[J].中国农业科学,2023,56(20):3996-4009.
- [2] 张鹏飞,周怀平,杨振兴,等.有机无机肥配施对谷子产量及经济效益的影响[J].山西农业科学,2023,51(7):756-763.
- [3] 梁 晋,刘仕元,王帅彬,等.基于无人机遥感的花生氮营养反演研究[J].中国油料作物学报,2020,42(6):1043-1050.
- [4] 王亚华.推进乡村振兴与建设农业强国[J].求索,2023(1):113-119.
- [5] 中华人民共和国农业农村部.农业农村部关于印发《到2025年化肥减量化行动方案》和《到2025年化学农药减量化行动方案》的通知[EB/OL].(2022-11-18)[2024-6-23].http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202212/t20221201_6416398.htm.
- [6] 王 楠,庄卫东.变量施肥技术的研究现状与发展建议[J].现代化农业,2024(3):77-79.
- [7] 陈鲁威,曾 锦,袁全春,等.无人机遥感监测果树氮素含量研究进展[J].中国农机化学报,2024,45(2):235-243.
- [8] 王 磊,周建平,许 燕,等.农用无人机的应用现状与展望[J].农药,2019,58(9):625-630,634.
- [9] 廖 娟,陶婉琰,臧 英,等.农作物病虫害遥感监测关键技术研究进展与展望[J].农业机械学报,2023,54(11):1-19.
- [10] ZHANG B, WU Y F, ZHAO B Y, et al. Progress and challenges in intelligent remote sensing satellite systems[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2022, 15: 1814-1822.
- [11] SUN Z Y, WANG X N, WANG Z H, et al. UAVs as remote sensing platforms in plant ecology: Review of applications and challenges[J]. Journal of Plant Ecology, 2021, 14(6): 1003-1023.
- [12] 罗锡文,胡 炼,何 杰,等.中国大田无人农场关键技术研究与实践[J].农业工程学报,2024,40(1):1-16.
- [13] 李俊杰,邹洪琴,许发辉,等.土壤微生物量氮对小麦各生育期氮素形态的调控[J].植物营养与肥料学报,2021,27(8):1321-1329.
- [14] FAGERIA N K, MOREIRA A, DOS SANTOS A B. Phosphorus uptake and use efficiency in field crops[J]. Journal of Plant Nutrition, 2013, 36(13): 2013-2022.
- [15] TORABIAN S, FARHANGI-ABRIZ S, QIN R J, et al. Potassium: A vital macronutrient in potato production—a review[J]. Agronomy, 2021, 11(3): 543.
- [16] YAN S C, WU Y, FAN J L, et al. Optimization of drip irrigation and fertilization regimes to enhance winter wheat grain yield by improving post-anthesis dry matter accumulation and translocation in Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2022, 271: 107782.
- [17] TAMBURINI G, VAN GILS S, KOS M, et al. Drought and soil fertility modify fertilization effects on aphid performance in wheat[J]. Basic and Applied Ecology, 2018, 30: 23-31.

- [18] 徐洋,杜森,钟永红,等.测土配方施肥项目十五年进展与展望[J].中国土壤与肥料,2023(3):236-244.
- [19] 尹彦鑫,孟志军,赵春江,等.大田无人农场关键技术研究现状与展望[J].智慧农业(中英文),2022,4(4):1-25.
- [20] 闫彩霞,吴中能,刘俊龙,等.林木营养理论与营养诊断技术研究进展[J].中国农学通报,2023,39(35):35-40.
- [21] 张福锁.测土配方施肥技术[M].北京:中国农业大学出版社,2011.
- [22] 何山,孙媛媛,沈掌泉,等.大数据时代精准施肥模式实现路径及其技术和方法研究展望[J].植物营养与肥料学报,2017,23(6):1514-1524.
- [23] 陈天恩,赵春江,陈立平,等.测土配方施肥辅助决策平台的研究与应用[J].计算机应用研究,2008,25(9):2748-2750,2774.
- [24] 谢美玲,巫亚芳.基于开源WebGIS的测土配方施肥信息系统建设[J].地理空间信息,2020,18(8):60-62,7.
- [25] 杨兴,朱大奇,桑庆兵.专家系统研究现状与展望[J].计算机应用研究,2007,24(5):4-9.
- [26] 陈朗,刘文欢,刘思雨,等.柑橘营养施肥推荐专家系统的建立与验证[J].农业工程学报,2023,39(1):146-154.
- [27] 侯云鹏,孔丽丽,徐新朋,等.基于养分专家系统推荐施肥在东北玉米上的长期综合效应[J].农业工程学报,2021,37(19):129-138.
- [28] 成科扬,王宁,师文喜,等.深度学习可解释性研究进展[J].计算机研究与发展,2020,57(6):1208-1217.
- [29] GUNNING D,STEFIK M,CHOI J,et al.XAI-Explainable artificial intelligence[J].Science Robotics,2019,4(37):eaay7120.
- [30] 周俊,郑彭元,袁立存,等.基于改进CASREL的水稻施肥知识图谱信息抽取研究[J].农业机械学报,2022,53(11):314-322.
- [31] 许多,鲁旺平,许瑞清,等.基于农业时空多模态知识图谱的水稻精准施肥决策方法[J].华中农业大学学报,2023,42(3):281-292.
- [32] 戈为溪,周俊,袁立存,等.基于知识图谱与案例推理的水稻精准施肥推荐模型[J].农业工程学报,2023,39(2):126-133.
- [33] GE W X,ZHOU J,ZHENG P Y,et al.A recommendation model of rice fertilization using knowledge graph and case-based reasoning[J].Computers and Electronics in Agriculture,2024,219:108751.
- [34] 于丰华,张鸿刚,金忠煜,等.水稻农学理化参量无人机遥感反演研究现状与展望[J].沈阳农业大学学报,2023,54(2):248-256.
- [35] 马宇靖,吴尚蓉,杨鹏,等.油料作物产量遥感监测研究进展与挑战[J].智慧农业(中英文),2023,5(3):1-16.
- [36] 彭涛,赵丽,张爱军,等.土壤全氮的无人机高光谱响应特征及估测模型构建[J].农业工程学报,2023,39(4):92-101.
- [37] 刘涛,张寰,王志业,等.利用无人机多光谱估算小麦叶面积指数和叶绿素含量[J].农业工程学报,2021,37(19):65-72.
- [38] AN G Q,XING M F,LIAO C H,et al.Estimating chlorophyll content of rice based on UAV-based hyperspectral imagery and continuous wavelet transform[C]//IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.Waikoloa,HI,USA.IEEE,2020:5270-5273.
- [39] SHEN Y Y,YAN Z Y,YANG Y J,et al.Application of UAV-borne visible-infrared pushbroom imaging hyperspectral for rice yield estimation using feature selection regression methods[J].Sustainability,2024,16(2):632.
- [40] FUTERMAN S I,LAOR Y,ESHEL G,et al.The potential of remote sensing of cover crops to benefit sustainable and precision fertilization[J].The Science of the Total Environment,2023,891:164630.
- [41] 臧英,侯晓博,汪沛,等.基于无人机遥感技术的黄华占水稻施肥决策模型研究[J].沈阳农业大学学报,2019,50(3):324-330.
- [42] 董超,赵庚星,宿宝巍,等.基于无人机多光谱影像的冬小麦返青期变量施氮决策模型研究[J].光谱学与光谱分析,2019,39(11):3599-3605.
- [43] ZHANG J Y,WANG W K,KRIENKE B,et al.In-season variable rate nitrogen recommendation for wheat precision production supported by fixed-wing UAV imagery[J].Precision Agriculture,2022,23(3):830-853.
- [44] ABDELBAKI A,UDELHOVEN T.A review of hybrid approaches for quantitative assessment of crop traits using optical remote sensing:Research trends and future directions[J].Remote Sensing,2022,14(15):3515.
- [45] FÉRET J B,BERGER K,DE BOISSIEU F,et al.PROSPECT-PRO for estimating content of nitrogen-containing leaf proteins and other carbon-based constituents[J].Remote Sensing of Environment,2021,252:112173.
- [46] PEANUSAHA S,POURREZA A,KAMIYA Y,et al.Nitrogen retrieval in grapevine (*Vitis vinifera* L.) leaves by hyperspectral sensing[J].Remote Sensing of Environment,2024,302:113966.

- [47] WU S B, WEN J G, LIU Q H, et al. Improving kernel-driven BRDF model for capturing vegetation canopy reflectance with large leaf inclinations[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 2639–2655.
- [48] YANG P Q, VAN DER TOL C, YIN T G, et al. The SPART model: A soil-plant-atmosphere radiative transfer model for satellite measurements in the solar spectrum[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 247: 111870.
- [49] IMPOLLONIA G, CROCI M, BLANDINIÈRES H, et al. Comparison of PROSAIL model inversion methods for estimating leaf chlorophyll content and LAI using UAV imagery for hemp phenotyping[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(22): 5801.
- [50] YIN S Y, ZHOU K, CAO L, et al. Estimating the horizontal and vertical distributions of pigments in canopies of Ginkgo plantation based on UAV-borne LiDAR, hyperspectral data by coupling PROSAIL model[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(3): 715.
- [51] LI J T, WIJEWARDANE N K, GE Y F, et al. Improved chlorophyll and water content estimations at leaf level with a hybrid radiative transfer and machine learning model[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 206: 107669.
- [52] 许童羽, 白驹驰, 郭忠辉, 等. 基于无人机高光谱遥感的水稻氮营养诊断方法[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(2): 189–197, 222.
- [53] RÉAUMUR R. Termometric observations made at Paris during the year 1735, compared to those made below the equator on the Isle of Mauritius, at Algiers and on few American Islands[J]. *Acad Sci Memoirs Acad Sci Paris*, 1735, 545: 329–341.
- [54] 朱 艳, 汤 亮, 刘蕾蕾, 等. 作物生长模型(CropGrow)研究进展[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(16): 3235–3256.
- [55] 蒙继华, 王亚楠, 林圳鑫, 等. 作物生长模型研究现状与展望[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(2): 1–15, 27.
- [56] DE WIT A, BOOGAARD H, FUMAGALLI D, et al. 25 years of the WOFOST cropping systems model[J]. *Agricultural Systems*, 2019, 168: 154–167.
- [57] HAMES J S, COOTER E, PILANT A N, et al. Comparison of EPIC-simulated and MODIS-derived leaf area index (LAI) across multiple spatial scales[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(17): 1–22.
- [58] PIERRE J F, SINGH U, RUIZ-SÁNCHEZ E, et al. Development of a cereal - legume intercrop model for DSSAT version 4.8[J]. *Agriculture*, 2023, 13(4): 845.
- [59] LI T, ANGELES O, MARCAIDA M 3rd, et al. From ORYZA2000 to ORYZA (v3): An improved simulation model for rice in drought and nitrogen-deficient environments[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 237/238: 246–256.
- [60] 高亮之, 金之庆. RCSODS—水稻栽培计算机模拟优化决策系统[J]. *计算机农业应用*, 1993(3): 14–20.
- [61] TANG L, ZHU Y, HANNAWAY D, et al. RiceGrow: A rice growth and productivity model[J]. *NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences*, 2009, 57(1): 83–92.
- [62] CHEN X G, BAI H Q, XUE Q Y, et al. WheatSM V_{5.0}: A python-based wheat growth and development simulation model with cloud services integration to enhance agricultural applications[J]. *Agronomy*, 2023, 13(9): 2411.
- [63] 蒋雪松, 黄林峰, 贾志成, 等. 基于光谱遥感技术的作物营养诊断研究进展[J]. *林业工程学报*, 2023, 8(6): 13–23.
- [64] 何 泽, 李世华. 水稻雷达遥感监测研究进展[J]. *遥感学报*, 2023, 27(10): 2363–2382.
- [65] 郭建茂, 李 羚, 钱娅, 等. 遥感信息与作物生长模型结合研究进展[J]. *气象科学*, 2023, 43(1): 101–109.
- [66] 宋丽娟, 叶万军, 陆忠军, 等. 遥感与作物生长模型数据同化在水稻上的应用进展[J]. *中国稻米*, 2020, 26(5): 84–89.
- [67] PENG X S, HAN W T, AO J Y, et al. Assimilation of LAI derived from UAV multispectral data into the SAFY model to estimate maize yield[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(6): 1094.
- [68] 黄健熙, 黄 海, 马鸿元, 等. 遥感与作物生长模型数据同化应用综述[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(21): 144–156.
- [69] 李金敏, 韩景晔, 余丹阳, 等. 水氮数据联合驱动的冬小麦数据同化研究[J]. *节水灌溉*, 2021(7): 7–13.
- [70] ZHANG Y X, WALKER J P, PAUWELS V R N. Assimilation of wheat and soil states for improved yield prediction: The AP-SIM-EnKF framework[J]. *Agricultural Systems*, 2022, 201: 103456.
- [71] ZHANG Y X, HUANG J X, HUANG H, et al. Grassland aboveground biomass estimation through assimilating remote sensing data into a grass simulation model[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(13): 3194.
- [72] 张树誉, 孙辉涛, 王鹏新, 等. 基于同化叶面积指数和条件植被温度指数的冬小麦单产估测[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(6): 266–271, 293.
- [73] 马战林, 文 枫, 周颖杰, 等. 基于作物生长模型与机器学习算法的区域冬小麦估产[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(6): 136–147.
- [74] 刘正春, 徐占军, 毕如田, 等. 基于4DVAR和EnKF的遥感信息与作物模型冬小麦估产[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(6): 223–231.
- [75] 赵 钰, 杨武德, 段丹丹, 等. 基于数据同化系统的作物产量预测研究进展[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*,

- 2024,50(2):161-171.
- [76] HUANG J X, MA H Y, SEDANO F, et al. Evaluation of regional estimates of winter wheat yield by assimilating three remotely sensed reflectance datasets into the coupled WOFOST - PROSAIL model[J]. *European Journal of Agronomy*, 2019, 102: 1-13.
- [77] 吴 伶, 刘湘南, 周博天, 等. 多源遥感与作物模型同化模拟作物生长参数时空域连续变化[J]. *遥感学报*, 2012, 16(6): 1173-1191.
- [78] JIN Z Y, GUO S E, LI S L, et al. Research on the rice fertiliser decision-making method based on UAV remote sensing data assimilation[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, 216: 108508.
- [79] 沈德战, 张 园, 韦丽娇, 等. 无人机施药技术研究现状与趋势分析[J]. *现代农业装备*, 2024, 45(1): 31-37.
- [80] 冯 刚, 张林杰, 黄 筱, 等. 轻小型机载激光雷达在风电场测图中的应用[J]. *城市勘测*, 2024(1): 161-164.
- [81] 秦安碧, 赵友贵, 李成勇. 激光测距仪辅助无人机物质配送系统设计探讨[J]. *激光杂志*, 2018, 39(8): 127-131.
- [82] 张海峰. 基于RTK的高精度差分定位无人机系统设计[J]. *测绘与空间地理信息*, 2022, 45(2): 126-129.
- [83] 祝长鑫, 赵伟霞, 单志杰, 等. 变量灌溉处方图设计中无人机飞行高度和起飞时间确定[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(5): 61-69.
- [84] 闫春雨, 黎文华, 兰玉彬, 等. 基于无人机多光谱遥感的棉花脱叶效果监测及处方图生成研究[J]. *南京农业大学学报*, 2022, 45(4): 799-808.
- [85] 包明艳, 骆庭宝, 鲁良宣. 无人机光谱影像与变量施肥技术在水稻追肥中的集成应用[J]. *安徽农学通报*, 2023, 29(10): 144-147.
- [86] 李艳大, 舒时富, 陈立才, 等. 基于便携式作物生长监测诊断仪的江西双季稻氮肥调控研究[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(2): 100-106.
- [87] 裴信彪, 吴和龙, 马 萍, 等. 基于无人机遥感的不同施氮水稻光谱与植被指数分析[J]. *中国光学*, 2018, 11(5): 832-840.
- [88] 于丰华, 曹英丽, 许童羽, 等. 基于高光谱遥感处方图的寒地分蘖期水稻无人机精准施肥[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(15): 103-110.
- [89] 唐 汉, 王金武, 徐常塑, 等. 化肥减施增效关键技术研究进展分析[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(4): 1-19.
- [90] 李 普, 梁春英, 王宏立, 等. 基于模糊PID的无人机叶面肥喷施控制策略研究[J]. *农机化研究*, 2023, 45(9): 110-115.
- [91] 徐 陶, 李 雪, 祁雁楠, 等. 水平棚架式梨树多旋翼无人机液体授粉试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(增刊2): 136-141.

[责任编辑 马迎杰]