

张季琴,刘 刚,张东峰,等. 固体颗粒肥变量撒施控制技术研究现状与展望[J]. 江苏农业科学,2022,50(20):69–77.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.20.010

固体颗粒肥变量撒施控制技术研究现状与展望

张季琴¹, 刘 刚², 张东峰¹, 姜碧琼¹, 仁重义¹

(1. 宁夏大学机械工程学院, 宁夏银川 750021; 2. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要:变量施肥技术能够按需精准投入肥料,在降低肥料使用量的同时提高作物产量,是实现现代绿色农业发展的重要手段。固体颗粒肥变量撒施控制技术作为变量施肥技术的重要组成部分,能够实现化肥“减量增效”提供技术支撑。系统分析固体颗粒肥变量撒施控制技术,重点阐述国内外变量撒施、条施控制、工况监测和颗粒肥排肥流量检测技术的研究现状。目前,国内外变量撒施控制技术已基本成熟,近年来的研究主要集中在撒肥盘结构参数优化方面;对于变量条施控制技术的研究主要集中在排肥轴转速控制算法方面,近年来对于排肥轴转速、排肥口开度双变量控制系统的研究已成为热点;工况信息的监测技术已经相对较成熟,但颗粒肥流量的在线检测仍是难点。我国固体颗粒肥变量撒施控制技术研究主要存在控制技术发展不均衡、系统通用性、智能化水平有待提高、市场化程度低等问题。最后为我国变量撒施控制技术的研究与发展提出建议。

关键词:固体颗粒肥;变量施肥;控制技术;工况监测;流量检测

中图分类号:S224.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)20-0069-08

化肥对提高作物产量,保障粮食安全具有重要作用^[1]。中国是世界上最主要的化肥生产和施用大国^[2]。据国家统计局数据,1979—2020 年,我国化肥施用总量从 1 086.3 万 t 增加到 5 250.7 万 t,化肥施用强度也从 73.16 kg/hm² 增加到 325.68 kg/hm²,远远超出发达国家防止化肥对水体造成污染的化肥施用上限值 225 kg/hm²^[3]。粮食作物平均过量施肥程度平均达到 36.94%^[2],但肥料的利用率仅为 30%~40%,单位质量化肥投入带来的粮食增产不断减少^[4-6]。肥料施用量的增加和利用效率的下降,不仅造成严重的经济损失,还带来严重的环境污染,如耕地土壤结构破坏、土壤板结和盐碱化^[7]、水环境恶化^[8]以及二氧化碳排放增加^[9]等。2021 年农业农村部、国家发展和改革委员会、科学技术部等印发《“十四五”全国农业绿色发展规划》,提出“以化肥减量增效为重点,集成推广科学施肥技术,培育扶持一批专业化服务组织,开展肥料统配统施社会化服务,鼓励农企合作推进测土配方施肥”的工作部署。因此,在保证粮食安全

的同时实施按需投入的变量施肥方案,逐步建立科学的施肥管理技术体系,这是实现农业绿色发展的关键。变量施肥装备作为化肥“减量增效”的重要载体,其控制技术的研究和分析对于引导智能变量施肥装备开发,促进农业现代化、绿色发展具有重要意义。因此,本试验系统分析固体颗粒肥变量撒施控制技术,重点阐述国内外在变量撒施、条施控制和作业监测方面的研究进展,并对目前存在的技术问题提出建议,为改变我国变量撒施装备研究技术现状、促进变量施肥技术发展提供参考。

1 变量施肥技术概况

变量施肥技术能够根据土壤和作物营养状况,按需精准投入肥料,有效降低肥料使用量,提高作物产量,在提高肥料利用率的同时减少土壤养分空间差异,减少环境污染,是现代精细农业的重要组成部分^[10]。胡中泽等认为,变量施肥技术能够有效提高玉米、小麦、水稻对氮肥、磷肥、钾肥的利用率^[11-13];陈静等认为,平衡土壤养分含量、改善土壤结构,具有良好的推广价值^[14]。国外变量施肥技术发展较早,已形成完整的变量施肥技术体系,具有成熟的变量智能化作业装备,已实现商品化、规模化的推广和应用^[15-16]。截至 2015 年年底,美国变量施肥技术的应用范围达到 63.6%^[17],在澳大利亚、加拿大以及一些欧盟国家也有一定的应用,并

收稿日期:2022-02-14

基金项目:宁夏自然科学基金(编号:2021AAC03119)。

作者简介:张季琴(1985—),女,甘肃陇西人,博士,讲师,主要从事精细农业关键技术研究。E-mail:zhjq2010jasmine@163.com。

通信作者:刘 刚,教授,博士生导师,主要从事电子信息技术在农业中的应用研究。E-mail:pac@cau.edu.cn。

取得较好的社会、经济和环境效益^[18]。我国在 20 世纪 90 年代以后开始精细农业的研究,变量施肥装备的研究主要以消化吸收再创新为主,经过科研人员多年的努力,已取得一定的成果,但我国农作物种植模式多种多样,各地区地形、地貌差异较大,现有变量施肥技术装备没有得到大规模的推广应用。变量施肥的实现方式主要有基于实时传感器和基于处方图 2 种,其核心是对施肥量进行变量控制。工况信息如作业车速、排肥驱动轴转速、排肥量信息等的实时检测是实现施肥量准确控制的基础。根据施入方式不同,固体颗粒肥的变量施用方式主要有撒施和条施 2 种。颗粒肥变量撒施控制技术主要包括撒施量控制与作业监测。撒施量控制主要包括离心变量撒施技术和条播变量施肥技术。作业监测主要包括工况信息监测技术和排肥流量检测技术(图 1)。

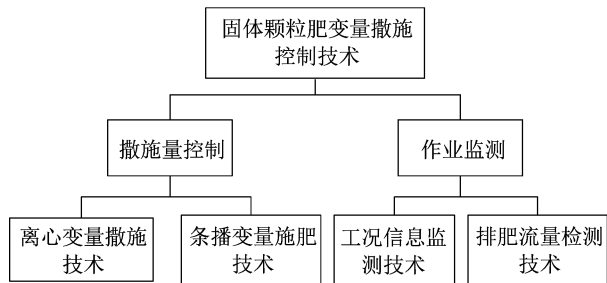


图1 固体颗粒肥变量撒施控制技术

2 撒施量控制技术

固体颗粒肥变量施肥装备是变量撒施技术实施的载体,其关键是对撒施量的精准控制。排肥器作为肥料撒施的直接执行机构,其结构形式决定了控制方式。撒施装备主要有离心撒肥机、条播施肥机两大类,其变量撒施控制技术如下。

2.1 离心变量撒肥技术

离心撒肥机一般利用圆盘转动产生的离心力将肥料抛洒出去,具有撒施幅宽大、作业效率高等特点,但肥料撒施横向稳定性较低,一般应用于大规模田块基肥、追肥作业^[19]。撒肥机下料口的开度决定了排肥量,撒肥圆盘的转速和结构参数影响肥料撒施幅宽与分布均匀性。因此,变量撒肥机的控制技术主要包括下料口尺寸控制技术以及撒肥圆盘结构参数优化技术。

2.1.1 下料口尺寸控制技术 变量撒肥机一般通过液压马达或电机对下料口尺寸进行自动调节,从而实现对撒肥量的精准控制^[20-21]。根据排肥口位置不同,撒肥量控制方式主要有 2 种,第 1 种是肥箱侧面排肥,即在肥箱侧面开排肥口,通过控制排肥门的开度,实现排肥量的调节;第 2 种是肥箱底部排肥,即在肥箱底部开排肥口,通过调节排肥装置动盘相对于定盘的转角,实现排肥量的调节(表 1)。

表 1 撒肥机下料口结构形式

类型	总体结构	工作原理	特点
肥箱侧面排肥		通过电动推杆或液压带动排肥门上下移动,实现排肥口尺寸的自动调节。肥料经排肥口落到链条上,经链轮传动,落到撒肥圆盘,经撒肥圆盘转动抛洒出去	肥箱容量大、排肥量大,变量撒施范围广,可用于有机肥的撒施,主要用于大田撒施作业
肥箱底部排肥		通过电动推杆或液压带动盘旋转,改变排肥动盘与定盘的相对位置,实现下料口尺寸自动调节。肥料经排肥口直接落到撒肥盘,经撒肥圆盘转动抛洒出去	结构紧凑、机动灵活,可用于大面积撒肥,也可用于局部区域如果园、茶园等的撒肥

肥箱侧面排肥方式通过液压马达或电机驱动排肥门上下移动,实现撒肥量变量调节。国外如

Fulton 等研发出一种利用液压比例阀控制排肥门开度的双边盘变量撒施机,建立了撒肥量分布模型,

并对不同施肥量下开环控制、闭环控制以及手动控制的作业性能进行对比分析,结果表明,闭环控制方式具有更好的控制精度和变量施肥一致性^[22-24]。Kweon 等分析肥箱侧面排肥、肥箱底部 2 种下料方式的肥料分布特性,针对大排量情况下肥料撒施均匀性低的问题提出优化控制方法,并提高了肥料撒施的均匀性^[25]。国内如张睿等研发的链条输送式抛撒机,采用电动推杆驱动排肥门移动,位移传感器实时获取开度位置信息作为反馈,对排肥门开度进行闭环控制,实现排肥量变量调节,填补了中国变量撒肥机械的空白^[20]。现有变量撒肥机大多采用肥箱底部排肥方式,通过液压马达或电机驱动肥箱底部排肥动盘转动,进而实现撒肥量的调节。国外如 Han 等研发出一种单元盘撒肥机,在排肥动盘两侧连接电动推杆,可以实现排肥动盘双向调节,并分析下料口调节方向对肥料撒施均匀性的影响,构建撒肥量控制模型,提出一种优化控制方法,根据目标撒肥量选择下料口调节方向,改善撒肥均匀性^[22];国内如施印炎等研发出一种采用步进电机驱动齿轮齿条结构调节排肥动盘转角,实现施肥量自动调节的双圆盘变量撒肥机^[21,24],并对齿轮齿条、电动推杆、丝杠滑块 3 种下料口尺寸调节装置进行运动分析^[25-27],结果表明,对同一目标旋转角,电子推杆下料口调节装置的响应时间最短。

2.1.2 撒肥圆盘结构参数优化技术 撒肥圆盘是离心式变量撒肥机的核心部件,主要由撒肥盘、叶片、匀肥罩等组成。肥料从下料口落下之后进入匀肥罩,经匀肥出口,通过撒肥圆盘的离心力撒施出去,主要有单圆盘和双圆盘 2 种结构。变量撒肥机结构参数如圆盘直径、叶片形状、叶片转角等均会影响撒施肥料的分布特性^[26],为了进一步提高撒肥机横向撒施的均匀性,国内外学者基于离散单元法(DEM)、多因素响应面分析法等对撒肥圆盘结构参数进行优化。van Liedekerke 等分析德国 AMAZOME 的 ZA-M 悬挂式双圆盘撒肥机施肥过程中的颗粒运动轨迹,采用离散单元法研究撒肥圆盘直径、叶片形状、叶片长度、安装角等对撒肥分布的影响^[27-28]。Przywara 分析撒肥圆盘的结构参数,如撒肥盘转速、叶片角度和撒肥盘转速对撒施效果的影响,发现平均撒施角受到撒肥盘肥料喂入角、撒肥盘叶片角和肥料种类的影响,平均撒施直径受撒肥盘转速影响^[29]。Shi 等通过基于 EDEM 软件的仿真撒肥试验,分析叶片倾角、撒肥高度及撒肥圆

盘转速对撒肥均匀性的影响,并获得了最佳控制参数组合^[30]。Yang 等对 3 种不同类型肥料的撒肥过程进行仿真试验^[31-32];通过设计响应面分析和单因素试验,分析撒肥高度、叶片位置角、下料位置角对双圆盘撒施肥料撒施均匀性的影响,并对参数组合进行优化,从而改善肥料撒施的均匀性。此外,国内学者还对甩盘^[33]、锥盘^[34]等不同结构撒肥圆盘的参数优化进行探索。

总体而言,针对撒施量的控制技术基本成熟,近年研究主要集中在撒肥盘结构参数优化方面。


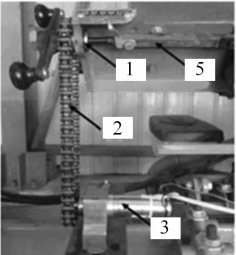
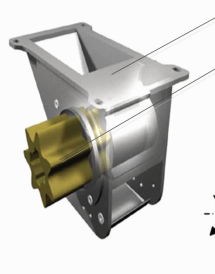
2.2 条播变量施肥技术

条播施肥机主要通过排肥轴带动排肥器转动排肥,通过开沟器将肥料施入一定深度,能更好为种子提供养分,但其作业幅宽小,作业效率低,一般用于作物基肥和种肥的施用。常见条播施肥机的排肥器有外槽轮式、行星轮式、螺旋式、振动式、钉齿式等^[35]。其中,外槽轮排肥器以其结构简单、成本低廉、各行排肥量一致性好等优点在条播变量施肥机中应用广泛。目前,变量施肥机外槽轮排肥器的排肥量调节主要有排肥轴转速控制、排肥口开度控制、排肥轴转速和开度双变量控制 3 种方式(表 2)。

2.2.1 排肥轴转速控制技术 通过自动调节外槽轮排肥轴转速实现施肥量调节是目前最常用的一种变量施肥作业方式,但其低速作业时排肥脉动明显,排肥均匀性较差。对排肥轴转速的精确控制是实现该类型变量施肥机精准变量施肥的关键,一般通过在排肥轴的一侧安装霍尔效应传感器或编码器进行测速,将转速信息反馈给控制系统实现闭环控制。主要控制技术为比例-积分-微分(proportion-integration-differentiation, PID)控制。通过结合智能算法对 PID 控制参数进行整定,实现排肥轴转速的精确控制,如基于神经网络的 PID 参数优化算法^[38]、径向基神经网络 PID 算法^[39]、模糊 PID 算法^[40]、基于遗传优化的 RBF-PID 算法^[41-44]等。

2.2.2 排肥口开度控制技术 外槽轮排肥器中槽轮伸出阻塞套的长度为外槽轮的有效工作长度或排肥口开度。以排肥口开度控制调节施肥量的变量施肥系统,将原有机或手动开度调节方式转变为液压马达或电机驱动方式,进而实现开度的自动调节。受原机械结构和安装空间限制,该控制方式实现的难点是机械结构的改装。Alameen 等搭建的变量施肥试验平台,采用气缸驱动排肥口开度调节

表 2 外槽轮排肥器控制特性

控制方式	总体结构	工作原理	特点
排肥轴转速控制		一般采用液压马达或者电机驱动排肥轴,实现排肥量的自动调节	结构简单,控制方便,应用范围广,但施肥量调节范围小,低速排肥脉动明显、排肥均匀性性较差
排肥口开度控制		通过液压马达或电机调节阻塞套的轴向位移量,改变外槽轮的有效工作长度,实现排肥量的自动调节	机构所占空间较小,但改装难度大、调节过程轴向阻力大
转速、开度双变量控制		排肥轴转速、排肥口开度采用液压或电机驱动,实现转速、开度双变量自动调节,进而自动调节排肥量	施肥量调节范围广、控制精度高、排肥稳定性好,但非优控制序列组合的排肥效果差,需对其进行优化

杠杆,进而实现开度变量调节^[31];Su 等改造了法国库恩公司的 Maxim2 气吸式点播机,采用伺服电机,通过链轮传动和丝杠结构实现外槽轮有效工作长度的自动调节^[45];戚武振等研发的稻麦变量施肥机,采用一种丝杠排肥轴连接机构,以步进电机为动力,通过驱动排肥轴轴向移动,带动排肥器开度自动调节^[46]。

2.2.3 排肥轴转速、开度双变量控制技术 排肥轴转速、开度双变量控制方式是指排肥器的排肥轴、排肥口均可自动调节施肥量,通过将转速、开度原有的手动或机械驱动方式改造为液压或电机自动控制方式^[47-48]。由于排肥轴转速、排肥口开度以及排肥量的关系不再是线性关系,且非优控制序列组合的排肥效果较差,因此对双变量控制方式的研究主要集中在排肥量控制模型构建以及控制序列优化方面。古玉雪等基于高斯过程(gaussian process, GP)算法构建外槽轮排肥轴转速、排肥口有效工作

长度和排肥量之间的预测模型,构建多目标优化问题模型,并提出控制序列优化方法,验证了双变量控制方式的优越性^[49-50]。陈满等基于近地光谱监测技术和模糊 PID 控制技术,设计出一种轴分段式冬小麦双变量精准施肥机,采用 Bisquare 估计稳健回归方法分析双变量施肥控制模型^[51-52]。赵学观等发现,影响充肥特性的主要参数即为排肥轮转速、排肥口开度、排肥轮倾角^[53]。为了进一步扩展双变量施肥装备的适应性,提高施肥量控制准确性和稳定性,张季琴等开发出一种排肥单体独立双变量施肥控制系统,基于广义回归神经网络(general regression neural network, GRNN)算法构建螺旋外槽轮排肥器的排肥量预测模型,提出一种基于分解的差分进化算法(multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition, MOEA/D)对控制序列进行优化,并取得较好的控制效果^[54-56]。

排肥轴转速、排肥口开度双变量控制方式与单一变量控制方式相比,可以通过转速和开度组合的协调控制,避免施肥量较小时排肥轴转速过低带来的排肥脉动问题以及转速过高时带来的施肥精度低和种子破损问题,可以有效扩展施肥量的调节范围,提高施肥量控制的准确性和稳定性^[57],对该类设备的研发、系统集成及控制技术的研究已成为当前变量施肥技术研究的重要内容。

3 作业监测技术

完善的变量施肥作业监测系统是保证作业可靠的关键。变量施肥作业监测技术主要包括对作

业工况,如机具位置、作业车速、肥箱余量等的检测和排肥量的检测。目前变量施肥作业过程中工况信息的监测技术已经相对较成熟,但颗粒肥流量的在线监测仍是一个难点。

3.1 工况监测技术

为了保证变量施肥装备的正常作业,变量施肥机作业工作过程中需要对影响作业的信息进行监测,对作业过程中的故障进行报警。国内外学者对变量施肥工况监测技术进行了大量研究,已实现变量施肥机的行进速度、位置、肥箱余量、下料口开度、撒肥盘、排肥轴转速等的检测,以及对堵塞故障的报警。主要研究成果见表 3。

表 3 工况监测技术

序号	检测参数	传感器类型	主要特点	参考文献
1	作业车速/机具位置	GPS、GNSS	定位频率高、测速精度高,遮挡会影响信号强度,适合开阔的大田作业环境	[58-59,62]
2	肥箱余量	称质量传感器、光电传感器、电容传感器	检测精度受作业环境如振动、光线、温度、发动机电磁波等影响	[57,60]
3	下料口开度	编码器、位移传感器	撒肥盘转角通过编码器检测、肥门开度、有效工作长度采用位移传感器,检测精度高、应用较成熟	[45,63]
4	撒肥盘/排肥轴转速	增量式旋转编码器	编码器检测角度、速度精度均较高,但对作业环境要求较高	[64-65]
5	堵塞	光电传感器、电容传感器	检测精度受环境灰尘、光线、温度、电磁波影响较大	[66-68]

最初变量施肥装备的作业车速通过在地轮安装霍尔效应传感器进行检测,随着 GPS、GNSS 定位系统的普及,机具定位和行进速度逐步采用 GPS、GNSS 进行检测,测速精度能够达到 0.1 m/s,水平定位精度能够达到 0.01 m。肥箱余量的检测一般通过在肥箱底部或肥箱内侧安装传感器进行检测,但田间作业环境复杂,作业振动、环境光线等因素均会影响其检测精度,目前余量检测精度能够到达到 95% 以上。撒肥圆盘、排肥轴转速的检测主要通过安装在驱动轴安装增量式编码器进行精确检测,检测精度由编码器型号决定;肥箱底部下料口开度主要通过编码器检测排肥动盘转角获得,条播施肥机的有效工作长度采用位移传感器,检测精度较高,应用较成熟。堵塞报警检测已经较成熟,堵塞检测精度能够达到 100%,满足变量作业的使用要求。

3.2 排肥流量监测技术

固体颗粒肥排肥流量的实时监测是进行变量施肥闭环控制以及作业效果在线评价的关键,变量撒肥机的排肥量可以根据肥箱质量以及下料口开度进行预测,但变量条播机按行作业,其复杂的肥料特性以及非接触式测量要求,使得条播机颗粒肥流量在线监测仍然是一个难点。

现有固体颗粒肥排肥流量的检测方法主要有间接检测法和直接检测法。间接检测法包括排肥轴转速间接测量、肥箱体积预测;直接检测法包括称质量法、电容法、图像法、微波法。其检测原理及主要特点见表 4。

间接检测法中,基于排肥轴转速的排肥量间接测量方法应用最广泛。通过标定模型,对排肥量进行预测,受不同肥料充肥性能差异、故障等影响,检测精确度较低。基于肥箱余量的预测方法,根据排肥过程中肥箱剩余体积变化差值对排肥量进行预测。其中,基于单线激光雷达的检查方法检测时,首先采用单线激光雷达扫描获取肥箱余量表面特征,并对肥箱余量体积进行三维重构,通过计算一定时间间隔内的体积变化量,即可获得排肥量^[74]。但其检测精度受排肥速度影响,单位时间排肥量较小时,肥箱余量体积变化不大,检测精度较低。此外,这种检测方法只能对肥箱的整体排肥量进行预测,当 1 个肥箱连接多个排肥器时,无法对单行排肥情况进行准确检测。

直接测量方法中,基于称质量法的颗粒肥流量检测传感器体积较大,结构复杂,须要对被检测装备做较大的改装。因此,进行田间应用推广有一定

表 4 颗粒肥流量检测技术

类型	颗粒肥检测方法	检测原理	检测精度 (%)	主要特点	参考文献
间接法	排肥轴转速间接测量	通过检测排肥轴转速,根据标定试验,估算流量	—	结构简单,安装方便,应用范围较广,预测精度较低	[64-65, 69-71]
	肥箱体积预测	基于深度、激光雷达等传感器,提取肥箱余量表面特征,并对其进行三维重建,根据体积变化差值,估算流量	95.34~97.66	结构较复杂,只能监测与肥箱相连的所有排肥口的总排肥量,检测精度受排肥速度影响	[72-74]
直接法	称质量法	利用皮带秤对排肥口的实时流量和累积流量进行称重,根据作业车速,计算单位面积施肥量	98.24	需对检测设备进行改装,检测精度受振动影响较大,只能监测与肥箱相连的所有排肥口的总排肥量	[75-76]
	电容法	肥料经过电容场时介电常数发生变化,通过捕捉不同流量颗粒肥经过电容极板空间时引起的电容变化对流量进行检测	96.25~97.81	体积小,可以实现单行排肥管肥量监测,但电容信号易受温度、湿度、电磁波等影响	[59,77]
	图像法	利用高速相机拍摄肥料下落过程,对图像进行处理得到肥料颗粒下落的直径和数量,结合肥料密度实现施肥量的在线检测	95.34~97.66	需设置黑箱环境排肥,排肥粉末影响图像采集效果,且图像处理时间较长	[78]
	微波法	根据多普勒效应,构建多普勒回波信号与颗粒肥下落速度、管道颗粒浓度关系模型,对颗粒肥流量进行检测。	95.00~97.20	结构简单,体积小,可安装在肥管外侧,且能实现对单行排肥量的监测,但数字信号处理方法影响检测精度	[79-81]

的难度。基于电容法开发的流量传感器,体积小,质量轻,能够直接安装在肥管上,对单行颗粒肥流量实现在线检测,但容易受作业温度、肥料湿度以及发动机电磁波等影响。图像法需要获取清晰有效的落肥颗粒图像,但实际作业环境较复杂,灰尘、肥料粉末等容易覆盖镜头,影响图像采集质量。基于微波多普勒法开发的流量检测传感器具有结构简单、安装方便,检测时不干扰流体等特点,逐渐受到专家学者关注。为了进一步提高颗粒肥流量检测精度,专家学者对噪声去除方法进行探索,如卡尔曼滤波去噪^[80]、小波阈值去噪^[82]、基于经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)的小波阈值去噪法^[83],以及干扰抑制方法,如单元平均恒虚警(cell average constant false alarm rate, CA- CFAR)干扰抑制方法^[79]等。经过改进,微波多普勒法室内检测精度能够达到 99.80%~97.20%,田间试验检测精度能够达到 91.42%^[83]。

4 分析与展望

目前我国颗粒肥变量撒施控制技术研究存在以下主要问题:第一,变量控制技术发展不均衡,系统通用性较差。我国变量撒施控制技术研究较早,撒肥量控制、工况监测等技术较成熟;由于不同作物变量条施机的结构差异较大,变量控制、肥管内颗粒肥流量在线监难度较大,变量条施控制技术相对不成熟。此外,研发的变量控制系统缺乏标准的通信协议和接口,导致不同系统之间不兼容,系统

通用性较差。第二,系统集成度不高,智能化水平有待提高。我国现有变量撒施机的研究以中小型为主,变量撒施控制和工况监测的研究相对独立,集成变量控制与工况监测的系统较少。对于肥料撒施控制的研究以直线作业方式为主,缺乏对复杂作业环境和不同作业轨迹自适应控制方法的研究。第三,市场化程度低,适应性有待提高。目前,我国对于变量施肥技术的研究主要集中在科研院所,主要针对变量控制技术难点问题的攻克,技术向产品的转化较少,研制出的成熟产品不多。此外,我国不同地区地形地貌差异较大,种植模式多样,进而对变量施肥系统的适应性提出更高的要求。

为了进一步提高我国变量施肥装备的性能,促进变量施肥技术发展,可以从以下几个方面进行突破。第一,扩展故障监测对象,研究故障预警技术。目前工况监测中对故障的监测主要集中在肥管堵塞等方面,变量施肥装备各部分的运行状态均会影响作业效果,完善故障监测体系、扩展监测对象能够提高系统无障碍工作时间,提高作业效率。进行故障预警技术研究,有助于提前发现设备问题,节省故障解决时间。第二,攻克变量条施机颗粒肥流量在线检测难题,研究闭环控制技术,加强施肥数据的收集与分析。颗粒肥流量在线检测是实现变量施肥闭环控制的前提。攻克颗粒肥流量在线检测技术有助于肥料施用信息的收集和分析,以及对变量施肥系统作业性能进行在线评价。第三,研究自适应控制技术,提高系统的兼容性和适应性,并

促进技术转化和推广。研究不同作业轨迹自适应变量控制方法,提高变量施肥系统对不同作业环境的适应能力。确立变量施肥设计行业规范,统一软件设计标准、通信协议,提高变量施肥控制系统的兼容性。积极探索技术转化模式,促进变量施肥技术产业化、商品化。第四,研究无人机变量撒肥技术。无人机具有机动灵活、操纵简单、成本低、获取影像速度快、地面分辨率高等优点。随着无人航空技术的普及,无人机已经在土壤和作物长势信息获取方面得到广泛应用。通过研究无人机变量撒施技术,可以实现对山地、不规则田块等区域的变量施肥作业,进一步丰富我国变量施肥装备体系。

参考文献:

- [1] 白由路. 高效施肥技术研究的现状与展望[J]. 中国农业科学, 2018, 51(11): 2116–2125.
- [2] 郭巧苓. 中国主要粮食作物过量施肥程度及其影响因素分析[D]. 江西财经大学, 2019.
- [3] 刘钦普, 孙景荣, 濮励杰. 中国及欧美主要国家化肥施用强度与综合效率比较研究[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 9–16.
- [4] 孔凡斌, 郭巧苓, 潘 丹. 中国粮食作物的过量施肥程度评价及时空分异[J]. 经济地理, 2018, 38(10): 201–210.
- [5] 侯萌瑶, 张 丽, 王知文, 等. 中国主要农作物化肥用量估算[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(4): 360–367.
- [6] 史常亮, 李 赞, 朱俊峰. 劳动力转移、化肥过度使用与面源污染[J]. 中国农业大学学报, 2016(5): 169–180.
- [7] 涂张焕, 丰文庆, 徐唐奇. 土壤板结原因分析及其对作物吸水性的影响研究[J]. 陕西农业科学, 2020, 66(12): 71–73.
- [8] 杜 鹏, 王乐宜, 周皓媛, 等. 农业面源污染时空分布及污染源解析——以安徽怀远县为例[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(2): 139–149.
- [9] Balafoutis A, Beck B, Fountas S, et al. Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation, farm productivity and economics[M]. Basel: MDPI AG, 2017: 1339.
- [10] 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.
- [11] 胡中泽, 陈春英, 夏 炎, 等. 测土配方施肥对粳稻南粳 9108 肥料利用率的影响[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(9): 1743–1744.
- [12] 秦永美, 郑爱霞. 测土配方施肥对小麦氮磷钾肥利用率的影响[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(18): 90–91.
- [13] 李忠芹, 张文君, 万丹凤, 等. 桦甸市玉米测土配方施肥与常规施肥肥料利用率分析[J]. 现代农业科技, 2020(21): 20–21.
- [14] 陈 静, 吴永常, 陈立平, 等. 基于部分预算法的玉米大田变量施肥经济效益分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 141–146.
- [15] Guerrero A, de Neve S, Mouazen A M. Data fusion approach for map – based variable – rate nitrogen fertilization in barley and wheat[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 205: 104789.
- [16] Martins R N, Pinto F D A D, Moura A D D, et al. Nitrogen variable rate fertilization in corn crop prescribed by optical sensor[J].

- Journal of Plant Nutrition, 2020, 43(11): 1681–1688.
- [17] 王 媛, 严 琳. 精准农业各项技术在美国应用现状[J]. 农业机械, 2016(4): 66–68.
- [18] Ekerli Y E, Say S M, Keskin M, et al. Adoption of precision agriculture technologies in developed and developing countries[J]. The online journal of science and technology, 2018, 8(1): 7–15.
- [19] Thaper R K, Fulton J P, McDonald T P, et al. Potential of fertilizer segregation during application using spinner disc spreader[J]. Precision Agriculture, 2022, 23(1): 83–100.
- [20] 张 睿, 王 秀, 赵春江, 等. 链条输送式变量施肥抛撒机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012(6): 20–25.
- [21] 施印炎, 陈 满, 汪小昆, 等. 离心匀肥罩式水稻地表变量撒肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018(3): 86–93.
- [22] Han C, Lee S, Hong Y, et al. Development of a variable rate applicator for uniform fertilizer spreading[J]. International journal of agricultural and biological engineering, 2019, 12(2): 82–89.
- [23] Fulton J P, Shearer S A, Higgins S F, et al. Rate response assessment from various granular vrt applicators[J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(6): 2095–2103.
- [24] Fulton J P, Shearer S A, Chabra G, et al. Performance assessment and model development of a variable rate, spinner disc fertilizer applicator[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(5): 1071–1081.
- [25] Kweon G, Grift T E. Feed gate adaptation of a spinner spreader for uniformity control[J]. Biosystems Engineering, 2006, 95(1): 19–34.
- [26] 施印炎. 基于水稻光谱信息的离心式变量撒肥机的研制[D]. 南京: 南京农业大学, 2018.
- [27] van Liedekerke P, Tijskens E, Dintwa E, et al. A discrete element model for simulation of a spinning disc fertilizer spreader I. Single particle simulations[J]. Powder Technology, 2006, 170(2): 71–85.
- [28] Przywara A. The impact of structural and operational parameters of the centrifugal disc spreader on the spatial distribution of fertilizer[J]. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 2015, 7: 215–222.
- [29] Shi Y Y, Hu Z C, Wang X C, et al. Motion analysis and system response of fertilizer feed apparatus for paddy variable – rate fertilizer spreader[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 153: 239–247.
- [30] Shi Y Y, Man C, Wang X C, et al. Numerical simulation of spreading performance and distribution pattern of centrifugal variable – rate fertilizer applicator based on DEM software[J]. Computers and electronics in agriculture, 2018, 144: 249–259.
- [31] Yang L, Chen L, Zhang J, et al. Fertilizer sowing simulation of a variable – rate fertilizer applicator based on EDEM[J]. IFAC – Papers On Line, 2018, 51(17): 418–423.
- [32] van Liedekerke P, Tijskens E, Dintwa E, et al. DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader[J]. Powder Technology, 2009, 190(3): 348–360.
- [33] 杨立伟, 陈龙胜, 张俊逸, 等. 离心圆盘式撒肥机撒肥均匀性试

- 验[J]. 农业机械学报,2019,50(增刊1):108-114.
- [34]刘彩玲,黎艳妮,宋建农,等. 基于 EDEM 的离心甩盘撒肥器性能分析与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(14):32-39.
- [35]Alameen A A, Al - Gaadi K A, Tola E. Development and performance evaluation of a control system for variable rate granular fertilizer application[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019,160:31-39.
- [36]胡东彬. 锥盘式撒肥装置的参数优化与试验研究[D]. 石河子:石河子大学,2021.
- [37]张汉林. 电动变量施肥控制系统的设计与试验研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2017.
- [38]宿 宁. 精准农业变量施肥控制技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2016.
- [39]Yuan J, Liu C, Li Y, et al. Gaussian processes based bivariate control parameters optimization of variable - rate granular fertilizer applicator[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2010,70(1):33-41.
- [40]怀宝付. 基于神经网络的变量施用颗粒肥控制系统研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2012.
- [41]呼云龙. 基于 RBF - PID 算法的变量施肥控制系统研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2016.
- [42]陈 满,鲁 伟,汪小昆,等. 基于模糊 PID 的冬小麦变量追肥优化控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2016(2):71-76.
- [43]黄丽萍,梁春英,王振民,等. 电动变量施肥控制系统的 PID 参数优化[J]. 农机化研究,2020,42(10):32-36.
- [44]黄丽萍. 遗传优化 RBF - PID 的电动变量施肥控制系统研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2020.
- [45]Su N, Xu T, Song L, et al. Variable rate fertilization system with adjustable active feed - roll length [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering,2015,8(4):19-26.
- [46]戚武振,王金星,刘双喜,等. 稻麦变量施肥机控制系统设计与试验[J]. 农机化研究,2019,50(8):72-79.
- [47]刘成良,苑 进,刘建政,等. 基于 ARM 和 DSP 的双变量施肥控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2010,41(增刊1):233-238.
- [48]吴金林. 双变量施肥机结构及液压调控系统设计[D]. 石河子:石河子大学,2014.
- [49]古玉雪,苑 进,刘成良. 基于模糊系统的开度转速双变量施肥控制序列生成方法[J]. 农业工程学报,2011(11):134-139.
- [50]苑 进,刘成良,古玉雪,等. 基于相关向量机的双变量施肥控制序列优化[J]. 农业机械学报,2011,42(增刊1):184-189.
- [51]陈 满,施印炎,汪小昆,等. 冬小麦双变量施肥控制策略研究[J]. 江苏农业科学,2018(11):58-62.
- [52]陈 满,鲁 伟,汪小昆,等. 基于模糊 PID 的冬小麦变量追肥优化控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(2):71-76.
- [53]赵学观,何亚凯,王松林,等. 双变量排肥系统充肥性能分析与试验研究[J]. 农机化研究,2020,42(6):104-110.
- [54]张季琴,刘 刚,胡 号,等. 双变量螺旋外槽轮排肥器控制序列对排肥性能的影响[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):137-144.
- [55]张季琴,刘 刚,胡 号,等. 排肥单体独立控制的双变量施肥控制系统研制[J]. 农业工程学报,2021,37(10):38-45.
- [56]Zhang J, Liu G. Effects of control sequence optimisation on the performance of bivariate fertiliser applicator [J]. Computers and Electronics in Agriculture,2022,192:106594.
- [57]张 睿,王 秀,赵春江,等. 链条输送式变量施肥抛撒机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2012(6):20-25.
- [58]冯慧敏,高娜娜,孟志军,等. 基于自动导航的小麦精准对行深施追肥机设计与试验[J]. 农业机械学报,2018(4):60-67.
- [59]安晓飞,付卫强,王 培,等. 小麦种行肥行精准拟合变量施肥控制系统研究[J]. 农业机械学报. 2019,50(增刊1):96-101.
- [60]高富强. 气吸式玉米免耕播种机播种施肥性能优化与试验研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2016.
- [61]田雅楠. 基于单片机的肥箱料位检测装置设计与试验研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2020.
- [62]赵学观,金 鑫,邹 伟,等. 基于双测速模式的玉米追肥机控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):145-153.
- [63]翟振林. 播种施肥一体机称重式播量检测装置的设计与试验[D]. 南京:南京农业大学,2017.
- [64]王大可,衣淑娟,赵 雪,等. 气吸精播机施肥量无线计量监测系统研究[J]. 农机化研究,2017(3):84-88.
- [65]马秀莲,衣淑娟,赵 斌,等. 玉米精播机施肥作业性能实时监测系统研究[J]. 农机化研究,2015(12):20-22.
- [66]杨 硕,王 秀,翟长远,等. 支持种肥监测的变量施肥系统设计及试验[J]. 农业机械学报,2018(10):1-13.
- [67]陈 幸,姬江涛,贺智涛,等. 玉米免耕变量施肥播种机作业质量监控系统设计与试验[J]. 农机化研究,2022,44(6):53-58.
- [68]翟长远,杨 硕,张 波,等. 支持故障报警的果园对靶变量排肥系统[J]. 农业机械学报,2015(10):16-23.
- [69]赵 斌,衣淑娟,戈天剑,等. 基于 SI4432 的精播机种肥作业无线监测系统研究[J]. 农机化研究,2015(12):23-25.
- [70]Reyes J F, Esquivel W, Cifuentes D, et al. Field testing of an automatic control system for variable rate fertilizer application[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2015,113:260-265.
- [71]Jafari M, Hemmat A, Sadeghi M. Development and performance assessment of a DC electric variable - rate controller for use on grain drills [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010,73(1):56-65.
- [72]Tola E, Kataoka T, Burce M, et al. Granular fertiliser application rate control system with integrated output volume measurement[J]. Biosystems Engineering,2008,101(4):411-416.
- [73]Zhao J, Wang X, Tian H, et al. A fertilizer discharge detection system based on point cloud data and an efficient volume conversion algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 185:106131.
- [74]郭春江. 基于单线激光雷达的变量施肥机排肥量测量系统设计与开发[D]. 吉林:吉林大学,2020.
- [75]余洪锋,丁永前,谭星祥,等. 施肥机施肥性能检测装置的设计与试验[J]. 南京农业大学学报,2016(3):511-517.
- [76]Yu H, Ding Y, Fu X, et al. A solid fertilizer and seed application rate measuring system for a seed - fertilizer drill machine [J]. Computers and Electronics in Agriculture,2019,162:836-844.
- [77]周利明,马 明,苑严伟,等. 基于电容法的施肥量检测系统设

贾昭炎,王成成,曹春晖,等. 深度共熔溶剂预处理木质纤维素研究进展[J]. 江苏农业科学,2022,50(20):77-85.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.20.011

深度共熔溶剂预处理木质纤维素研究进展

贾昭炎^{1,2}, 王成成^{1,2}, 曹春晖^{1,2}, 刘 洋^{1,2}, 奚永兰², 刘明庆³

(1. 江苏大学农业工程学院, 江苏镇江 212013; 2. 江苏省农业科学院, 江苏南京 210014;

3. 生态环境部南京环境科学研究所, 江苏南京 210042)

摘要:木质纤维素是自然界含量丰富的可再生能源,可转化为生物燃料及其他化工产品,有望代替传统化石燃料,助力碳达峰。但木质纤维素拥有复杂的化学结构,在合理利用前需进行预处理。传统预处理方法存在工艺复杂、成本高等问题。而深度共熔溶剂(DES)作为一种新型的预处理生物质溶剂,在生物质分离方面具有巨大潜力,已得到众多科研工作者认可。本文综述了 DES 预处理木质纤维素相关研究,对 DES 进行了详细介绍及分类,根据化学组成将其分为 I、II、III、IV 型 4 种类型的 DES。阐明了 DES 预处理木质纤维素三大组分(木质素、半纤维素、纤维素)的作用机制。并分别对 DES 预处理木质纤维素三大组分的研究进展进行了总结。在去除木质素时,采用酸度较强的物质作为氢键供体(HBD)制备 DES 或者选用羧基、胺/酰胺基类 DES 对木质素的去除效果会更好。另外,相较于纯 DES,加水会降低 DES 的黏度,有利于木质素的溶解。但过量的水会降低 DES 中氢键的数量,反而不利于木质素的溶解。关于 DES 分离半纤维素的研究目前大多数集中于预处理条件优化等方面,众多研究表明,以氯化胆碱为氢键受体(HBA)的 DES 去除半纤维素能力更强。通常情况下,DES 在分离三大组分时都希望减少纤维素的溶解,提高半纤维素和木质素的去除率。但也有很多学者进行了提高纤维素在 DES 中溶解度的研究,然而提升效果并不明显。本文还分析了摩尔比、DES 类型和反应温度等因素对预处理效果的影响。众多研究表明,当改变 HBD/HBA 的摩尔比时,DES 预处理效果也各不相同。DES 类型和反应温度也会影响木质纤维素的预处理效果。当 HBD 均为多元醇时,对木质素的去除率为丙二醇>乙二醇>丙三醇。在一定温度范围内,温度提高可获得较好的预处理效果及提高糖收率,但过高的温度会造成较大的糖损失。最后还针对 DES 存在的问题,对 DES 的有效设计及未来大规模应用和经济效益前景进行了展望。

关键词:共熔溶剂;木质纤维素;生物质;预处理;DES

中图分类号:TQ353.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)20-0077-09

在人们环保意识日益增强和化石燃料储量逐

渐下降的双重现实下,可再生资源利用受到越来越多国家的重视。而木质纤维素生物质属于自然界中来源广泛、易于降解和获取的可再生天然资源,同时也是地球上最为丰富的有机碳源,被视为化石燃料的最佳替代品。木质纤维素常见于草、木材(如桉木、杨木等)、秸秆及由其产生的固体废弃物,对其各组分进行合理开发利用可转化为能源燃料,逐步代替传统不可再生的化石燃料,而且通过生物、物理或化学方法还可获得各种可再生的生物基

收稿日期:2021-11-24

基金项目:江苏省自然科学基金(编号:BK20201242);国家重点研发计划(编号:2018YFD1100600);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(编号:GYZX210514)。

作者简介:贾昭炎(1997—),男,河南濮阳人,硕士研究生,从事农业废弃物资源化利用研究。E-mail:2212016017@stmail.uj.s.edu.cn。

通信作者:刘明庆,硕士,工程师,主要从事农业农村污染防治。
E-mail:lmq@nies.org。

计与试验[J]. 农业工程学报,2017(24):44-51.

[78] Back S W, Yu S H, Kim Y J, et al. An image-based application rate measurement system for a granular fertilizer applicator[J]. Transactions of the ASABE, 2014; 679-687.

[79] Huang J, Yang L, Zhang J, et al. Granular fertilizer mass flow measurement and vehicle experiments based on microwave doppler method[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2021, 37(1): 135-147.

[80] 杨立伟,黄家运,张季琴,等. 基于微波多普勒法的施肥质量流

量检测系统研究[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):210-217.

[81] Han J. Granular fertilizer mass prediction forelectric fertilizer distribution device based on ransac[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2019, 17(4): 135-147.

[82] 郭思可. 双变量玉米施肥量监测系统的研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2021.

[83] 韩 静. 基于微波多普勒效应的颗粒肥料质量流量测量系统研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2020.