

刘海,杜铮,郭翔,等.蔬菜种子精量直播技术与装备研究进展[J].华中农业大学学报,2025,44(1):225-238.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.01.025

蔬菜种子精量直播技术与装备研究进展

刘海¹,杜铮¹,郭翔¹,李华²,马翔远³,廖宜涛⁴

1. 武汉市农业科学院,武汉 430065; 2. 十堰市农机技术推广中心,十堰 442000;
3. 浙江大学工程师学院,杭州 310014; 4. 华中农业大学工学院,武汉 430070

摘要 简述了国内外蔬菜精量播种技术装备的研究进展,分析了国内外蔬菜生产概况和主要播种装备,重点阐述了蔬菜直播环节的精量和变量排种、种床成型、种沟成型和控制检测等关键技术装备及蔬菜智能化机械直播的动态,阐明了蔬菜机械化直播的研究重点和难点,归纳了蔬菜精量直播机排种系统和种床成型系统的优化设计方法,总结了蔬菜精量机械化直播的基础和核心,从蔬菜精量直播关键技术角度探讨了影响排种精度的关键因素,并阐明了蔬菜种子精量直播技术的实现方式。在系统总结和分析我国蔬菜种植特点和精量直播技术装备发展趋势的基础上,指出了现阶段蔬菜精量播种技术难点,提出了研究重点在于突破排种技术中的精量和变量排种、高速和高效播种的方法。同时通过分析国内外精量播种机发展现状,展望蔬菜精量直播技术未来发展趋势。

关键词 蔬菜;精量播种;排种器;直播;机械化

中图分类号 S233.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)01-0225-14

蔬菜是人们日常饮食中必不可少的食物之一^[1],也是我国销量最大的农产品之一^[2]。《中国统计年鉴》的最新统计数据显示,2014年至2023年,我国蔬菜的播种面积与产量均展现出稳健的增长趋势。截至2023年,全国范围内的蔬菜播种面积已达到2 280万hm²,蔬菜产量达8.208亿t。

我国蔬菜产业近年来实现了长足的发展,具体体现在播种面积和产量的稳步增长,以及蔬菜在种植业中占比的持续提升^[3-4]。鉴于我国农村劳动力流失的严峻现状,劳动力成本逐年攀升^[5],以机械化生产方式替代人工种植蔬菜可以降低劳动强度,现已成为我国设施蔬菜和露地生产发展的必然要求^[6]。国内蔬菜生产机械化水平不高^[7],特别是蔬菜种子精量直播技术水平有待提高^[8],蔬菜播种机具多为单一机具,复式作业机械较少,且存在机械闲置、利用率低、资源不能合理配置等问题,不能满足现代农业作业需求^[9],制约了蔬菜产业的发展。随着农业现代化进程加速,农业生产经营向机械化生产方式转型^[10],精量播种可降低生产成本,该播种方式提出了更加精细和高效的要求,能够适应现代农业发展的多元化需求。

当前部分区域的蔬菜种植仍依赖于传统人工精耕细作模式,该模式存在劳动强度大、劳动力成本高、种植工序多等不利因素,直接影响了我国蔬菜产业的发展^[11]。蔬菜的种类主要有叶菜类、根菜类、茎菜类等,蔬菜精量直播技术受到蔬菜播种农艺要求中种植密度的影响。不同蔬菜品种的农艺要求不同^[12],主要表现在对蔬菜种床制备和精量播种要求方面,如图1所示。其中,为蔬菜种子提供良好种床是蔬菜直播技术的基础,主要包括种床成型技术和种沟成型技术;蔬菜精量直播技术的核心是确保种子精确分布和种子的播深稳定,主要包括精量排种技术、导种技术和智能化技术,其中智能化技术已成为提高成苗率的关键,是现阶段的研究重点^[13]。

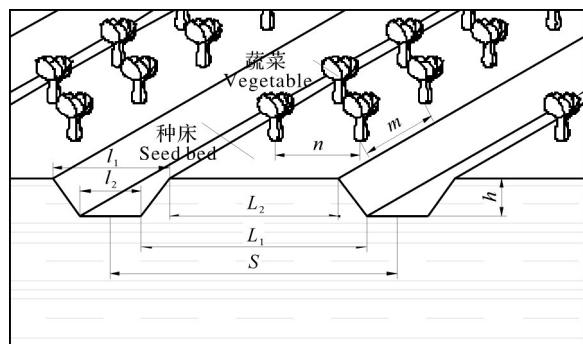
本文以蔬菜生产现状及相关装备为立足点,详细解析了影响蔬菜种子播种均匀性与成苗率的核心要素,聚焦精量排种、种床整理及智能化播种技术方面的研究。经系统性分析,指出了蔬菜播种技术面临的挑战与瓶颈,并据此展望了我国蔬菜精量直播技术的发展趋势。

收稿日期:2024-04-02

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD2000401);国家自然科学基金项目(32001427)

刘海,E-mail:lh@whiam.cn

通信作者:廖宜涛,E-mail:liaoetao@mail.hzau.edu.cn



n : 行距 Row spacing; m : 株距 Seedlings' spacing; h : 垒高 Ridge height; L_1 : 垒底宽 Width of ridge bottom; L_2 : 垒顶宽 Width of ridge surface; l_1 : 沟顶宽 Width of ditch top; l_2 : 沟底宽 Width of ditch surface; S : 垒间距 Ridge spacing.

图1 蔬菜直播工艺方案示意图

Fig.1 Schematic of technology scheme for vegetable seeding

1 蔬菜生产概况与播种装备分析

1.1 国内外直播技术装备

1) 国外直播技术装备。播种是农业生产中的核心环节,其作业质量对作物的品质与产量具有决定性的影响^[14]。国外学者和研究机构针对上述问题进行了研究,美国满胜(Monosem)公司推出了一款NG Plus M型快速播种机,该机作业速度最高可达13 km/h,田间作业质量高,播种均匀,能满足农艺要求(图2A)。Jack等^[15]研制了一种气力式单粒精密排种器,该排种器1次可以精密吸附1粒种子,种子经过导种管形成种子流,可分布于种床上实现单粒精密播种。Li等^[16]利用播种机的机电驱动系统调节排

种轴的转速,消除了链条传动的不稳定性,使得漏播指数降低3.54%,合格指数提升4.70%,满足了高速播种的需求。Johansen等^[17]开发了直接链接拖拉机的排种系统,能以单次最小充种量作业,使用该排种器可节约种子,结合小规模种植优化模式,这种小型播种机可以适应不同的农业生态环境需求。

国外学者和研究机构对气力式播种机进行了相关研究,Keep等^[18]采用流动扰动可视化和评估的光学流动剖面法研究气送式播种机的气力系统,试验表明气流为20 m/s、流量为5 kg/min时作物输送效果最优。奥地利奥地博田(Poettinger)VT 5000牵引式联合气动播种机1次可播种40行豌豆,采用折叠运输,可实现快速精量播种(图2B)。Kocher等^[19]对2种导种管条件种子播种株距的变化进行了评估,采用精度系数、标准重播指数和漏播指数对不同种子间距均匀性进行了测定,测得均匀性参数因导种管不同而存在差异,结果表明,圆形种子比扁平种子株距均匀性更好。Benjaphragairat等^[20]认为,在种子输送系统中,若缺乏恰当的导种管设计,将导致种子在种床内的纵向分布显著变差,说明导种管的合理配置对于确保田间作物株距的均匀分布具有直接影响。Gierz等^[21]研究发现,随着播种作业速度的增加,种子间的碰撞和弹跳现象加剧,导致种子位置偏移,无法满足高效精量播种。国外学者对中低速(3.2~8.0 km/h)下的排种系统作业效果进行了考察,结果显示,播种粒距的变异系数随着作业速度的提升而增大,说明播种机作业速度变化对播种性能指标有较大影响^[22]。



A: 满胜 NG Plus M 播种机 Monosem NG Plus M seeder; B: 奥地博田 VT 5000 播种机 Poettinger VT 5000 seeder; C: 大顺 4RXF-3000G 播种机 Dashun 4RXF-3000G seeder; D: 智田 2BQS-24 播种机 Zhitian 2BQS-24 seeder.

图2 蔬菜精量直播装备

Fig.2 Precision seeding equipment for vegetable seeds

2) 国内直播技术装备。国内直播技术装备较多^[23],针对小粒径种子的研究正逐步深入,一般小粒径种子粒径比较小^[24],种皮光滑,播种量不容易控制^[25],在播种的过程中会出现播种过密,浪费种子,后期间苗需工耗时^[26],尤其对于小白菜这种对农时要求比较高、田间株距行距比较小的小粒径作物来说不太合适,这表明集排式精量播种技术有望

成为小粒径作物播种领域的一种重要发展趋势^[27]。

研究播种机的核心问题是解决排种器的问题,排种器作为核心部件^[28],其好坏直接决定着播种机性能的优越和田间播种质量的好坏^[29]。国内常见蔬菜精量直播机型主要有青岛大顺的4RXF-3000G旋耕气吸一体式播种机(图2C),该机型可一次完成旋

耕、起垄、施肥、滴灌、播种功能,并实现1次1粒播种,省去人工间苗成本。还有湖北钟祥智田的2BQS-24气吸式单粒精密播种机(图2D),该机型1次行程可播种24行,可用于小白菜、油菜、萝卜的精量播种,其成型的垄体厢面平整,有利于蔬菜出苗。江苏省镇江市农业机械技术推广站设计研发的ZBG-6B型条播机,配套选用陕西省宝鸡市农科所发明的多功能精量播种器,采用窝孔推卸式精量排种和外槽轮常量排种2种排种方式,不仅可以播种油菜、小白菜等小粒径种子,也可播种水稻、小麦等较大粒径种子。张中锋等^[30]设计的2BMK-6型铺膜铺管施肥播种机,保证了播种的精量性,可实现种子精准定位,完成精密播种,实现种子的空间定位。刘海等^[31]设计了一种蔬菜联合播种机,该机可实现施肥、旋耕、起垄、开沟、播种、覆土联合播种作业,整机采用模块化设计方式简化结构,适用于旱地大田精量播种作业。

综上所述,国外普遍采用高速播种装备的根本动因源于农业发展的内在需求。为应对大规模、高效率的农业生产模式,先进且高效的播种技术成为

不可或缺的一环。具体而言,高速播种装备以其卓越的性能,显著提升了播种作业的效率,有效降低了对人力资源的依赖,并显著减少了生产成本。这些技术特性精准地满足了现代农业对高效率、低成本的追求,从而在学术层面上解释了国外高速播种装备广泛应用的深层原因。

1.2 国内外蔬菜播种技术装备

1)国外蔬菜播种技术装备。国外很早就开始了小粒径种子机械式播种技术的研发。现阶段,农业机械生产中的大型播种机占据主流地位,这些播种机具备高度的通用性,能够满足油菜、蔬菜等小粒径类球形种子的播种需求。在蔬菜播种领域,播种机主要分为三大类别:机械式播种机、气吸式播种机和气送式播种机。此类蔬菜播种机的生产作业效率较高,但部分蔬菜播种机的排种器对种子有着较为严格的要求,尤其是针对粒径较小的蔬菜种子,通常需要经过丸粒化处理以满足播种机的作业要求,从而确保播种的精准性和作业效率。国外具有代表性的播种机制造商主要包括法国库恩公司、英国施丹西公司等,如图3所示。



A:库恩 Maxima 播种机 Maxima seeder;B:雷肯 Solitair 播种机 Solitair seeder;C:雷肯 Saphir-7 机械式精量播种机 Saphir-7 mechanical precision seeder;D:播蓝特JPH 系列蔬菜精量播种机 JPH series vegetable precision seeder.

图3 国外代表性蔬菜播种机

Fig.3 Representative vegetable seeders from abroad

由于机械式播种机特定的结构和工作原理,在播种蔬菜种子时,时常会对种子造成一定程度的损伤,从而影响蔬菜生产效率。国外机械式播种机技术研发较早,现已有效降低了机械式播种机的破种率。德国雷肯公司生产的Saphir-7机械式精量播种机可一次性实现种床整理和播种作业(图3C),适合传统性耕作和保护耕作方式的播种作业,可播种豌豆种子,其作业宽幅为2.5~4.0 m,配套电脑控制终端,操作简易,精确控制播种量。韩国播蓝特JPH系列蔬菜精量播种机采用圆盘式排种器(图3D),行距株距及播深可根据农艺要求进行调节,根据种床宽度配有精密播种单体,实现了分体式精密播种,但价格较高。

随着国外农业规模化生产的发展,农场主对蔬

菜播种机的播量和播速提出了更高要求,于是各研究机构及学者研发出了气力式播种机。此类播种机对种子损伤小、通用性好,且播种精度高、效率高,适合高速作业。目前已经形成较完整的蔬菜种植机械化体系,精量播种技术日益成熟,针对气力式播种机的研发为实现高效、高质的播种技术奠定了基础。法国Monosen公司研发的NGPLuS气吸式播种机通过工艺和材料的革新,提高了播种机的播种精度及使用寿命。德国Amazone公司生产的ED系列精量播种机采用特制的播种盘,该播种盘不受前进速度和播种模式影响,种子通过真空吸附到提升孔中,提升孔采用锥形设计,确保种子在自由落体中离开播种盘。相较于机械式播种机,气吸式播种机以气吸式排种器为核心,在播种精度、通用性和作业效率方

面均提升显著。如意大利Maschio的MT播种机和美国约翰迪尔(John Deere)公司生产的Max Emerge 5气吸式精量播种机(图4),均被广泛应用于甜菜的播种作业中,具有卓越的性能和广泛的适用性。



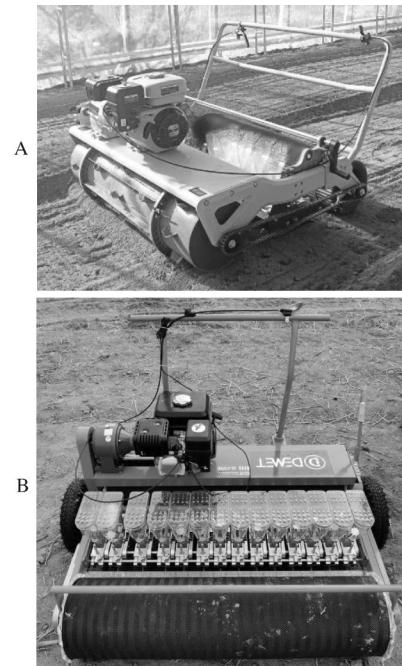
A:意大利Maschio的MT播种机MT seeder;B:美国约翰迪尔的Max Emerge播种机Max Emerge seeder.

图4 国外气吸式播种机
Fig.4 International pneumatic planters

国外的气吸式播种机采用了气流输送技术来传送种子或颗粒肥料,极大地简化了播种机的整体结构,该类播种机较传统的条播机在作业幅宽和作业效率上均有显著的提升,非常适合在我国北方地区进行大面积蔬菜的播种作业。我国长江中下游地区土壤特性黏重且易板结,同时秸秆量大、地块分散且面积狭小,且该地区多采用水旱轮作的农业模式,这些特殊条件限制了国外大中型蔬菜精量播种机的适用性。这些机器虽然技术先进,但在面对复杂多变的田间环境时,可能无法充分发挥其高效、精准的性能,因此并不完全适合该地区的蔬菜播种需求。

2)国内蔬菜播种技术装备。目前我国尚未形成完善的蔬菜种植机械化水平评价体系^[32]。国内能够生产符合蔬菜精量播种的有德易播机械发展公司生产的2BS-1-130型气吸式小颗粒精量播种机,适用于大面积播种小颗粒种子,播种效率高,精度高,空穴率低。黑龙江德沃公司生产的2BQS-8X型气力式蔬菜播种机采用1行双苗带播种形式,适用于垄上或者整地做畦,1行双苗带密植作业,苗间距6~13 cm,根据用户需求可定制2、4、6行等不同行数。河南豪丰机械制造有限公司研发的2HBJ-4型胡萝卜精量播种机,可以一次完成施肥、起垄、镇压、播种和覆土等多项农艺过程,生产效率进一步提高。悦田2BST-XQ4A气吸式起垄播种机,可实现起垄、播种

一体化作业,可根据地面高度自适应平衡,宽度调节可由数字显示,播种高度及角度可调,电气化控制,高精度播种,工作效率高。基于以上优点,愈来愈多的研究人员对其进行优化、改进,且应用于实际生产过程中,进一步完善气吸式精量播种装置^[33]。国内的蔬菜播种机以小型、精量为主,该类播种机可以开种沟,但作业前需要另外开沟、起垄,一般具有自走功能,另外还带有手动控制部件,主要代表有德易播DB3S03X播种机和吉福瑞DMBS14播种机,如图5所示。



A:德易播DB3S03X播种机DB3S03X seeder;B:吉福瑞DMBS 14播种机DMBS14 seeder.

图5 国内蔬菜播种机
Fig.5 Domestic vegetable planters

综上所述,针对蔬菜播种技术装备,国内外在自动化与智能化集成水平、播种作业的精准性与稳定性、环境适应性与作业多样性,以及技术革新与研发潜力等核心维度上,展现出了显著的技术差异。针对当前状况,我国有必要进一步深化蔬菜播种技术装备的研发与创新投入,致力于提升技术整体层次与创新能力,以匹配和满足不同地区农业生产实践的多元化需求。

2 蔬菜精量直播关键技术分析

2.1 蔬菜播种机排种技术

1)精量排种技术。精量排种技术是一种先进的播种方法,国外对小粒径作物精量播种技术的研究

从20世纪中期开始^[34],主要代表有法国Pneumasem型12行气吸播种机,该机型采用了机械式精量播种技术,该技术的显著特点是结构简单、易于操作,但在实际播种过程中,该播种方式偶尔会出现伤种现象,同样还有采用圆盘式精量排种器的西德CG-6精量播种机,也可适用于蔬菜播种^[35]。Yazgi等^[36]采用响应面法优化气吸式精量排种器的粒距均匀性,并采用高速摄像等方法测定气吸式排种盘不同型孔数对排种均匀性的影响。Siemens等^[37]比较了气力式集排器与带式排种器不同投种高度的排种性能。Kamgar等^[38]设计了一种新型的播种机,根据数字编码器的计算误差信号和输出信号,确定了播种率,通过动态试验比较了该样机和普通播种机在前进速度分别为4、6和8 km/h时的性能,其结果表明单粒播种率提高对播种率影响不大。

国内生产的气吸式播种机在小粒径种子精量排种控制方面得到了广泛使用,市场上也有相关的精量排种控制技术与装备^[39-40]。李金凤^[41]设计了一种针对小粒径蔬菜种子的气吸式精密排种器,该排种器的核心在于其可旋转组合变换型孔孔径的双圆盘结构。为了优化排种性能,她进一步建立了种子在吸种过程中所受吸附力与排种盘孔径、种子直径等关键工作参数之间的数学模型,以此为基础进行精准调控与优化设计。李晓冉等^[42]设计了一种独立气道式蔬菜精量排种器,并优化了该排种器的关键部件,优化结果表明,当排种盘转速为19 r/min,负压绝对值为1.7 kPa时,合格指数为96.43%,满足国家标准要求。丁杨^[43]设计了一种气力式辣椒排种器,利用耦合理论对供种过程中辣椒种群的运动特性进行了研究,确定了最佳气送速度,并通过仿真分析验证了排种系统的合理性。

国内外排种器各自展现出显著的优势与局限性。国外排种器因其高效率、高精度和高质量的特性而享有广泛赞誉,这主要归因于其先进的设计理念、精密的制造工艺以及严格的质量控制。然而,这些优势往往伴随着高昂的价格,进口排种器的成本显著增加了播种机的整体生产成本,对于预算有限的农户或农业企业而言,可能构成一定的经济压力。相较之下,国内排种器在价格上表现出明显的优势。这些排种器通过本土化生产和成本优化,显著降低了价格,有效地降低了播种机具的制造成本。尽管在性能上可能与国外高端产品存在一定差距,但其高性价比使得国内排种器成为广大农户和中小型农

业企业的首选,特别适合于广泛的推广和应用。

2)导种技术。导种技术是确保种子在种床中实现均匀分布的关键,其对于优化作物种植模式、提高农作物产量和最终产品品质具有至关重要的作用^[44-45]。国外学者研究得出,在播种过程中,导种和投种环节是确保种子有序入土的最后步骤,它们的精确性和均匀性对种子的田间分布有着直接影响^[46]。奥地利Wintersteiger公司研发了一种Mono-seed TC型自走式小区单粒播种机,其排种器由1对组合吸缝盘和驱动格轮组成,排种器与开沟器被整合为一体,该方式降低投种高度,减少种子与土壤的弹跳和滑移,进一步提升播种的精确性^[47]。

近年来,我国已有很多研究机构、企业和学者对导种技术开展研究^[48],因而产生了很多播种系统的相关成果。廖宜涛等^[49]针对导种环节种子流均匀性降低的问题,研究了导种过程种子流的有序性,明确了导种管曲线、内径和长度是导致碰撞的主要因素,通过对导种管结构的改进,优化种子的分布。马成成等^[50]设计了导种装置的人字形纹路,优化了导种装置结构,利用图像目标追踪技术进行对比试验,结果表明播种速度较快时的合格指数优于无人字形纹路拨指轮,有利于提高播种质量。

综上所述,导种技术的研究和应用对于提高农作物的产量和质量具有重要意义。通过深入研究导种装置及其配件结构,明晰种子在导种装置中的迁移机理,综合考虑各种种子着床的影响因素,可以进一步提高播种质量。

2.2 种床制备技术

1)种床成型技术。种床成型技术是控制播种机精度的先决条件^[51-52],种床成型是农业生产中的关键环节,旨在构建出理想的土壤结构,形成优质的种床环境,从而为种子的萌发和幼苗的茁壮成长提供最佳条件。优质的种床不仅能够有效减少种子在接触土壤时的弹跳位移,还能显著提升种子的分布均匀性、播深一致性以及出苗率。因此,种床的质量直接关系到精量播种的效果,是确保精量播种技术成功实施的重要保障。Usaborisut等^[53]揭示了拖拉机在田间频繁作业对土壤造成的严重压实问题,这种压实现象直接对后续作物的生长状况和产量产生了不利影响。该研究不仅证实了联合耕整技术在提高作业效率与效果方面的实用性和可行性,还促进了该技术的进一步发展和应用。与此同时,国外联合耕整机产品种类也较多,多以宽幅高效为主,适用于

田间灭茬或苗床整备作业。

种床成型技术主要对种床结构、功能及其成型原理进行研究,种床成型中镇压及开沟环节是必不可少的。种床成型时的厢面平整度不高,会导致种床表面不平处积累渍水,蔬菜种子长期浸泡于内影响其萌芽,特别是在长江流域,由于土壤水分蒸发较慢,容易导致水分滞留,进而引发渍害问题。此外,厢面的不平整也会显著影响播种的深度,成为影响作物生长的一个重要因素。为了有效应对这一问题,可以采用仿形平整拖板、耕深调节系统或激光平地机等先进技术手段来提升厢面的平整度。这些技术的应用能够更精准地控制播种深度,为作物的健康生长提供更加有利的土壤环境。张青松等^[54]设计了一种在开畦沟作业前使用的特殊犁具,该犁具确保了畦沟能够挖掘至预定的深度,同时,其配备的类铧式后犁则有效促进了土壤的顺利回填与整理,从而保证了大田中畦沟的规整形态。针对土壤含水率较高、开沟作业难度增加的情况,刘晓鹏^[55]提出了一种船型开沟器的设计方案,这种开沟器特别适用于土壤黏重、易板结且含水量高的环境,能够在大田作业中稳定地形成符合要求的畦沟,显著提升了开沟作业的效率与质量。肖文芳^[56]设计了一款集犁翻埋茬、侧边作畦开沟于一体的直播种床整理机,巧妙融合了犁翻部件、旋耕部件以及开畦沟部件,能够一站式完成秸秆全量还田、土壤细碎平整以及精准开畦沟等多重任务。种床构建技术的研发已成为当前播种技术领域的重要探索方向,它不仅体现了农业机械化与种植技术的深度融合,也是农机与农艺交叉学科研究的前沿阵地。上述以沟型稳定、降阻减黏和降低功耗为目的的种床成型技术趋近成熟,也是未来农业机械化种床成型技术的研究重点。

2)种沟成型技术。种沟成型技术与播种机播深有关,蔬菜种子的播深对作物出苗和生长至关重要,播种机的播深不稳定会使蔬菜幼苗长势不一致。合适的播种深度可为蔬菜种子发芽提供良好的生长条件,确保开沟深度一致性,为幼苗生长环境提供良好保障^[57-59]。相关学者对种沟成型技术及其装备进行了深入研究,其中,Barr等^[60]设计了一种镂腿式开沟器,通过减少土壤的不必要扰动来有效降低作业阻力,使得播种机的行进速度能够提升至16 km/h。此外,该开沟器还配备了先进的控制系统,能够精确定调节仿形机构的位置,确保在不同地形和作业条件下播种深度的均匀一致。赵淑红等^[61]进一步根据作业

要求,设计了一种滑推式开沟器,具有上宽下窄的结构,易将土壤推回沟内,具有良好的回土性能。为更好地适应不同作业工况,马云海等^[62]融合了土壤动物的减黏脱土生物学特性与超高分子量聚乙烯材料的优异性能,设计出一种创新的仿生波纹形开沟器。这种开沟器在作业过程中展现出的减黏降阻效果,相较于传统开沟器有着更为显著的提升。

种沟成型技术研究在国内外均取得了显著进展,该技术能够依据地表起伏变化开出深度一致的种沟,确保种子准确投放至预设深度位置。当前,通过应用仿形设计、播深调节机制和自适应技术等手段,进一步优化了种子投放的精确性和稳定性,这已成为蔬菜精量直播技术的重要发展方向。国外生产厂家在开沟器的制造上采用高强度材料构建导种装置,展现出卓越的耐用性,但相应的成本也较高,导致产品价格较为昂贵。相对而言,国内的导种装置在保持较高性价比的同时,设计之初便充分考虑到其在不同工况和田间作业环境下的适应性,便于快速更换和调整,从而更有效地满足多样化的农业生产需求。

2.3 智能化技术

1)应用研究技术。国外学者采用神经网络模型、统计模型、随机化设计等应用研究技术开展播种装备的研究。Wojtkowski等^[63]通过室内试验和数字DEM模拟,通过对2个接触模型拟合的标准方法确定材料参数与接触时间,并比较弹塑性模型和粘弹性模型适用性。Taghinezhad等^[64]利用Catia软件对排种器进行设计和建模,研究了排种器吸种管长度和速度对种子的影响,应用层次分析法来选择提高株距均匀性和排种器充种的最佳组合。采用离散元法对种子投送装置的工作过程进行仿真分析时,需要建立种子的三维颗粒模型和拨指同步带的模型,并且需要给出二者的物理性质参数^[65]。Kayacan等^[66]使用分布式非线性控制方法追踪拖拉机轨迹,提高了预测控制精度和对抗环境干扰的鲁棒性。

蔬菜播种机中排种器的作业对象一般为作物种子,比如油菜、小白菜种子均属于小粒径散粒体物料,种子在排种器内受到的各种压力及运动规律较难确定,离散单元法作为仿真颗粒物料运动和机械特性可靠的数值技术,可揭示种子的运动过程^[67],国内外学者利用该技术开展排种器的研究^[68]。Han等^[69]采用离散元法和计算流体力学的耦合方法,对排种器内种子运动进行了数值模拟,并分析了排种

过程中种子所受曳力的变化情况及清种和压种性能。龚智强等^[70]运用Fluent软件得到吸盘式精量排种装置吸种区域气流场中的种子颗粒受力情况及主要影响因素。史嵩等^[71]设计了一种气压组合孔式玉米精量排种器,采用EDEM软件分析种群内摩擦力及不同型孔结构排种盘的种群运动规律。杨善东等^[72]设计了一套侧正压排种器,对排种过程开展动力学分析并分别对排种性能指标建立了回归数学模型。韩丹丹等^[73]运用EDEM-CFD耦合分析方法建立玉米籽粒粘结颗粒模型,分析排种过程中圆粒种子所受曳力的变化情况及清种和压种性能。陈玉龙等^[74]利用EDEM对凸勺边缘结构进行仿真和优化试验,发现当凸勺边缘为两侧倾斜时排种性能较优。姚露等^[75]用三元二次回归正交组合试验建立供种速率、供种速率稳定变异系数以及破损率与转速、叶片宽度、导程之间的数学模型,分析得到影响供种速率的因素。

为研究排种器工作过程,可采用高速摄像技术和试验台架分析种子的实际投种轨迹^[76]。雷小龙等^[77]结合JPS-12种床试验台和高速摄像技术,对不同种层调节板倾角和种层厚度的种群运动与供种性能进行了仿真与试验研究。臧英等^[78]采用高速摄影技术观察研究了水稻气力式排种器的携种区,从理论角度分析了飞种问题并建立了力学模型。丁幼春等^[79]运用高速摄影技术及碰撞动力学模型,记录并分析了油菜种子与聚偏氟乙烯压电薄膜的碰撞轨迹。

目前我国蔬菜播种机研究已开始面向蔬菜农艺结合技术,因农艺要求决定了蔬菜精量播种设备的设计要求^[80]。为满足各蔬菜种子的精量播种要求,需要考虑如下情况:首先,需要采用气力式播种技术,同时蔬菜种植要求小株距、小行距,且气力式排种器的转速有限定要求,这就决定排种器上的吸孔、吸嘴等位置要密集^[81];其次,蔬菜虽然是在蔬菜生产基地种植,但是在田间播种就需要考虑拖拉机的振动、倾斜以及如何避开田间喷水管道等因素,这就决定了蔬菜播种设备必须结构简单,工作稳定性可靠性高^[82];最后,蔬菜品种比较多,从菜心、甘蓝到小白菜、萝卜等,这就要求蔬菜播种设备的适用性一定要广泛^[83]。

2)控制检测技术。控制检测技术装备贯穿于播种机各关键部件,实时监测播种质量是不可或缺的技术支撑,对于预防后续补苗或补种的繁琐工作至关重要。随着传感技术、自动控制系统及信息处理

技术的飞速进步,智能农机装备正引领行业潮流,智能化播种机亦成为该领域的重要发展方向。这类智能化精量播种机集成了多项关键技术:首先是漏播检测与实时补种技术,它能够不间断地监控排种状态,即时评估并反馈排种性能,一旦发现漏播立即自动补种,有效防止因漏播导致的产量损失;其次是自动导航技术,依托GPS或北斗等卫星导航系统,实现精准对行作业,不仅提升了行驶直线度,还大幅减轻了驾驶员的劳动强度,同时优化了土地利用率和作业路径规划;最后是变量播种技术,该技术依据土壤肥力、播种时间、作物品种及种植要求等变量因素,灵活调整播种量,确保作物生长的最佳条件,实现精准农业管理。综上所述,智能化精量播种机通过集成自动导航、漏播检测及变量播种等先进技术,正引领着农业向实时、精准、高效的播种模式迈进。

自动导航技术装备与种床精量整理有关,在蔬菜机械化播种作业中,引入自动导航技术能够显著提升大田资源的利用效率,并确保播种轨迹的高度准确性,为作物生长中后期的智能化管理及最终的高效收获奠定坚实基础。这一技术的核心在于农机定位、精准跟踪控制以及数据整合等关键环节的紧密协作。黎永键等^[84]通过设计基于RTK-DGPS精准定位技术与双闭环转向控制策略相结合的自动导航系统,成功提升了拖拉机的自动转向性能,实现了更为精确、稳定的导航作业,进一步推动了蔬菜播种作业的智能化与自动化进程。

在蔬菜精量直播技术中,部分学者将自动导航技术嵌入其中,张闻宇等^[86]设计了一种自适应变论域模糊控制器,提出了基于SVR逆向模型的拖拉机导航追踪控制方法,实现了拖拉机的液压转向控制,适用于蔬菜精量直播过程中的自动对行作业。自动导航技术现已广泛应用于农业机械化生产,能有效控制拖拉机转向,利于播种机智能化发展。变量播种技术是一项重要的创新,它与播种机的排种器紧密相关。这项技术是实现按需播种的关键,旨在通过精确控制种子的投放量,以最大限度地利用农业资源并减少种子的浪费。变量播种技术的核心在于一个决策分析系统,该系统能够接收来自多个来源的信息,如前进速度、产量分布图、播期以及品种特性等。基于这些信息,智能控制系统会实时调整液压或电动元件,进而驱动精量排种器以适当的转速工作,从而实现对排种量的精确调节,达到变量播种的目的。这种技术不仅提高了播种的精准度和效

率,还有助于优化农作物的生长环境,促进农业生产的可持续发展。

3 蔬菜精量直播技术难点分析与发展趋势

3.1 蔬菜精量直播技术难点与问题

尽管我国蔬菜机械化生产的发展速度有所加快,但与国外发达国家的蔬菜精量直播技术水平相比,仍存在一定差距。我国蔬菜种植一般实行轮作种植制度,鉴于我国部分区域耕地分布零散、地块尺寸相对较小的实际情况,国外设计的大型播种机械在我国的普及与应用面临诸多挑战。为了更好地适应我国独特的蔬菜种植环境和需求,有必要致力于研发符合中国国情的蔬菜精量直播机,以满足精准、高效的蔬菜种植作业要求,我国未来蔬菜精量直播技术难点主要包含:

(1)播种器的播种精度和可靠性。我国对播种器的开发水平已有较大提高,但未来在播种器播种性能、播种速度、播种精度、播种适应性等方面仍需提高。利用先进的漏播检测装置研究播种器的工作过程,分析形成种子漏播、重播、堵塞和破碎的原因,并且在实际生产过程中采用智能化方式提高播种机的性能,保证种子定位于种床上的粒距均匀性。注重室内台架试验研究和计算机模拟与仿真研究,采用各种先进的监视和检测装置,提高蔬菜精量播种器的可靠性。国外研发的播种器可靠性优于国内的播种器,为了提高播种器的性能,往往忽视了对种子破碎机制的深入研究,原始的判断方式难以分析种子的破碎和堵塞原因,可采用高速摄影和图像处理等先进研究方法,针对播种器的可靠性进行试验分析。针对播种精度和可靠性,应聚焦于关键部件的参数优化设计,通过精准调整和优化关键参数,以提升播种器的整体性能。同时,加强播种器制造工艺的研发与创新,利用先进的加工技术和材料科学,提高制造工艺水平,确保播种器的高精度和高可靠性。此外,降低生产成本也是研发过程中的重要考量因素,通过优化生产流程、提高生产效率以及引入成本效益分析等方法,实现播种器的低成本制造。研制播种精度高、可靠性高的新型播种器,是未来蔬菜精量直播技术发展的核心目标,旨在满足现代农业对精准播种、高效作业和可靠运行的需求,推动蔬菜种植业的可持续发展。

(2)播种机的适应性和通过性。由于我国蔬菜

种植模式多,对播种机的适用性提出了较高要求。播种器结构、功能相对单一,导致播种机一般只能用于部分地区特定蔬菜播种,无法根据不同蔬菜播种需求进行调整,可能造成资源浪费、机具闲置。需要加强现有播种机结构参数优化和改进设计,针对种子物理特性研究播种器对种子多样化的适应性,使其适应播种机的多样化作业,加强种子互换研究。基于农村耕地的集中规模化,大面积耕地模式势在必行,研究适应性强、轻简、高效的播种机是发展趋势。当前蔬菜精量直播技术的土壤工作部件在作业性能方面存在通过性不足的挑战。鉴于土壤工作部件直接与土壤环境发生交互,其必须适应不同物理和化学特性的土壤条件。此外,考虑到播种机在长时间使用过程中可能遭遇的磨损问题,对土壤工作部件的结构和材料进行优化研究显得尤为重要。理想的土壤工作部件设计应兼具适应性和通过性,以便根据种植模式的变化灵活调整,从而打破种子类型与地域限制,提升播种机的适应性和通过性,进而实现播种作业的高效性和可靠性。这一研究方向对于推动蔬菜精量直播技术的持续发展和广泛应用具有重要意义。

3.2 蔬菜精量直播发展趋势

蔬菜精量直播技术的持续进步,离不开国内外农机制造企业、科研机构以及农业技术推广部门的紧密合作与鼎力支持。为了推动农业机械化进程,关键在于设计并制造出符合中国独特种植模式和农艺规范要求的播种机械,以满足现代农业生产的实际需求。当前,随着国内外农业科技水平的迅速提升,蔬菜种子精量直播技术与装备在不断完善,正朝着远程操控和自动化方向发展。我国农业机械化的发展已经迈入了一个崭新的阶段,不再仅仅追求数量的增长,而是更加注重质量的提升、效率的加速以及精准化的操作。这一时期的农业机械化,正朝着精量播种、高效高速作业以及高质量生产的目标迈进,未来蔬菜精量直播研究主要有如下趋势:

(1)农机农艺融合发展趋势。农机与农艺的深度融合对于我国蔬菜精量直播技术的推广具有举足轻重的意义,结合农业传感器、精细作业、智能化装备以及物联网等先进技术,形成了一个全面的应用体系。这个体系贯穿于蔬菜精量直播的控制方法、播种对象的长势监测、播种作业的实时检测以及系统的智能决策等各个环节,以此显著提升农业资源的利用效率,并大幅度提高作业的质量,推动农业生

产的精准化、高效化和智能化发展。

(2)变量、精量高效播种发展趋势。以提升蔬菜机械直播的均匀性和播种效率为目标,推动农机播种领域向更高速、精准和高效的方向发展;采用示范方式,为进行规模化经营的用户提供具有变量、精量、高速、高效特点的蔬菜精量播种机;引导农业生产采用规模化种植蔬菜的方式,以进一步提升农业生产的效率和效益。

(3)智能化播种发展趋势。针对不同蔬菜种植条件以及不同区域播期对蔬菜单粒种子定位、播种密度、施肥量及播量的不同需求,深入研究电液驱动、精确变量播种施肥、仿形自适应调整、GPS定位与自动导航以及作业质量与播种机工作状态实时监控等先进技术,推动播种作业的智能化发展。通过技术应用,实现远程控制的变精量播种作业。

4 展望

蔬菜精量直播技术涵盖了种床成型技术、精量排种技术以及控制检测技术等核心内容。当前,尽管我国在此领域的研究已取得显著进展,但由于地域差异、生产方式及习惯的多样性,以及播种机结构和形式的多样性,使得部分播种机仅能在特定地区适应生产,难以实现全面的通用性。

在规模化的农业生产中,播种机的作业速度、播种质量及可靠性已成为衡量高效农业生产的重要指标。因此,针对重点品种的关键环节技术及装备的研究亟待加强。其中,精量排种技术作为蔬菜精量直播技术的基石,其研究与发展对于提高播种精度和效率至关重要。同时,控制检测技术的推进是蔬菜精量直播技术向智能化发展的关键,它能够实现对播种过程的实时监控和精准控制,从而确保播种质量和效率的稳定提升。

综上所述,蔬菜种子精量直播技术的发展是农业机械化、智能化和高效化的重要方向。通过深入研究和持续创新,我们有望克服地域和生产方式的差异,实现播种机的全面通用性和高效性,为现代农业的可持续发展提供有力支撑。

参考文献 References

- [1] 洪娟.武汉市三种蔬菜主栽品种养分吸收与优质高效施肥技术研究[D].武汉:华中农业大学,2022.HONG J.Study on nutrient absorption and high-quality and efficient fertilization techniques of three main vegetable varieties in Wuhan[D].Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022(in Chinese with English abstract).
- [2] 祁亚卓,相姝楠.国内外蔬菜播种机的研究现状与发展趋势[J].中国农机化学报,2020,41(1):205-208.QI Y Z, XIANG S N.Research status and development trend of vegetable seeder at home and abroad[J].Journal of Chinese agricultural mechanization, 2020, 41(1) : 205-208 (in Chinese with English abstract).
- [3] 邓兰欣.生产支持政策对蔬菜种植规模影响的实证研究[D].武汉:华中农业大学,2022.DENG L X.An empirical study on the influence of production support policy on vegetable planting scale[D].Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [4] 吴文勤.我国蔬菜生产集聚的时空特征和影响因素分析[D].武汉:华中农业大学,2015.WU W J.Spatial and temporal characteristics and influencing factors of vegetable production agglomeration in China [D].Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015(in Chinese with English abstract).
- [5] 吴瑛莉.新时期金华市农业机械化发展研究[D].杭州:浙江大学,2016.WU Y L.Research on the development of agricultural mechanization in Jinhua City in the new period[D].Hangzhou: Zhejiang University, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [6] 祝广辉.蔬菜钵苗旋转式取苗机构的参数优化与试验研究[D].杭州:浙江理工大学,2015.ZHU G H.Parameter optimization and experimental study of rotary seedling picking mechanism for vegetable bowl seedlings [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2015(in Chinese with English abstract).
- [7] 吴传云,王建合,杨瑶,等.我国经济作物产业发展现状与机械化趋势分析[J].中国农机化学报,2024,45(1):1-13. WU C Y, WANG J H, YANG Y, et al. Analysis of the development status and mechanization trends of economic crop industry in China[J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2024,45(1):1-13(in Chinese with English abstract).
- [8] 郑娟,廖宜涛,廖庆喜,等.播种机排种技术研究态势分析与趋势展望[J].农业工程学报,2022,38(24):1-13.ZHENG J, LIAO Y T, LIAO Q X, et al.Trend analysis and prospects of seed metering technologies [J]. Transactions of the CSAE, 2022,38(24):1-13(in Chinese with English abstract).
- [9] 邱兆美,张巍朋,赵博,等.小粒种子电动播种机作业质量监测系统设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(4):77-83. QIU Z M, ZHANG W P, ZHAO B, et al.Design and test of operation quality monitoring system for small grain electric seeder[J].Transactions of the CSAM, 2019, 50(4):77-83 (in Chinese with English abstract).
- [10] 信桂新,杨朝现,邵景安,等.基于农地流转的山地丘陵区土地整治技术体系优化及实证[J].农业工程学报,2017,33(6):246-256.XIN G X, YANG C X, SHAO J A, et al.Optimization and demonstration of land consolidation technical system in mountainous and hilly region based on farmland transfer [J].Transactions of the CSAE, 2017, 33(6) : 246-256 (in Chinese with English abstract).

- nese with English abstract).
- [11] 肖体琼,崔思远,陈永生,等.我国蔬菜生产概况及机械化发展现状[J].中国农机化学报,2017,38(8):107-111.XIAO T Q, CUI S Y, CHEN Y S, et al. Development status of vegetable production and its mechanization in China [J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2017, 38(8) : 107-111 (in Chinese with English abstract).
- [12] 车艳芳,杨英茹.白菜萝卜辣椒种植技术[M].石家庄:河北科学技术出版社,2014.CHE Y F, YANG Y R. Cultivation techniques of Chinese cabbage, radish and pepper [M]. Shijiazhuang: Hebei Science & Technology Press, 2014 (in Chinese).
- [13] 陈永生,李莉.蔬菜生产机械化范例和机具选型[M].北京:中国农业出版社,2017:1-5.CHEN Y S, LI L. Examples of vegetable production mechanization and machine selection [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017:1-5(in Chinese).
- [14] TURAN J, VIŠACKI V, SEDLAR A, et al. Seeder with different seeding apparatus in maize sowing[J]. Acta universitatis agriculturae et silviculturae mendelianae brunensis, 2015, 63 (1):137-141.
- [15] JACK D S, HESTERMAN D C, GUZZOMI A L. Precision metering of *Santalum spicatum* (Australian Sandalwood) seeds[J]. Biosystems engineering, 2013, 115(2):171-183.
- [16] LI Y, HE X T, TAO C, et al. Development of mechatronic driving system for seed meters equipped on conventional precision corn planter[J]. International journal of agricultural & biological engineering, 2015, 8(4):1-9.
- [17] JOHANSEN C, HAQUE M E, BELL R W, et al. Conservation agriculture for small holder rainfed farming: opportunities and constraints of new mechanized seeding systems [J]. Field crops research, 2012, 132:18-32.
- [18] KEEP T, NOBLE S D. Optical flow profiling method for visualization and evaluation of flow disturbances in agricultural pneumatic conveyance systems[J]. Computers and electronics in agriculture, 2015, 118:159-166.
- [19] KOCHER M F, COLEMAN J M, SMITH J A, et al. Corn seed spacing uniformity as affected by seed tube condition[J]. Applied engineering in agriculture, 2011, 27(2):177-183.
- [20] BENJAPHRAGAIRAT Jiraporn, SAKURAI Hai, ITO Nobutaka. 大蒜播种机播种器及开沟器设计与控制(摘选)[J]. 农业工程, 2011, 1(2) : 109-110. BENJAPHRAGAIRAT J, SAKURAI H, ITO N. Design and control of metering system and furrow openers for garlic planter[J]. Agricultural engineering, 2011, 1(2):109-110(in Chinese with English abstract).
- [21] GIERZ Ł, KESKA W. Simulation and laboratory tests of transport time of rape grain in the drill seed tube[J]. Journal of research & applications in agricultural engineering, 2012, 57(2): 73-78.
- [22] BOYDAS M G. Effect of cup size, seed characteristics and angular speed on the performance of an automatic potato planter under laboratory conditions [J]. Tarım bilimleri dergisi, 2017: 317-327.
- [23] 李兆东,孙誉宁,杨文超,等.光束阻断式小粒蔬菜种子漏充与堵孔同步检测系统研究[J].农业机械学报,2018,49(8): 119-126.LI Z D, SUN Y N, YANG W C, et al. Design of synchronous detection system of missing filling seeds and suction hole blocking based on beam blocking for small vegetable grains [J]. Transactions of the CSAM, 2018, 49(8) : 119-126 (in Chinese with English abstract).
- [24] 刘海,杜铮,李旭,等.小白菜种子机械物理特性试验[J].中国农机化学报,2023,44(3):88-93.LIU H, DU Z, LI X, et al. Experimental study on mechanical and physical properties of pakchoi seeds [J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2023, 44(3):88-93(in Chinese with English abstract).
- [25] 殷德峰.气力窝眼轮式小粒径种子播种器设计与试验研究[D].武汉:华中农业大学,2017.YIN D F. Design and experimental study of pneumatic socket wheel small particle seed metering device [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017(in Chinese with English abstract).
- [26] 吴飞.蔬菜小粒径种子毯状苗播种装置设计与研究[D].杭州:浙江理工大学,2016.WU F. Design and research on seeding device for carpet seedlings of vegetable small-sized seeds [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [27] 殷复伟.行株距配置对宽幅播种小麦产量形成的影响[D].泰安:山东农业大学,2017.YIN F W. Effect of row-plant spacing configuration on yield formation of wide sowing wheat [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [28] 刘海,廖宜涛,王磊,等.小白菜正负气压组合式精量播种器设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(10):54-65.LIU H, LIAO Y T, WANG L, et al. Design and experiment of positive and negative pressure combination precision metering device for pakchoi [J]. Transactions of the CSAM, 2022, 53(10) : 54-65 (in Chinese with English abstract).
- [29] 孟华,王茜,李晓红,等.定扰动辅助充种大豆播种器设计与试验[J].中国农机化学报,2023,44(6) : 18-25.MENG H, WANG X, LI X H, et al. Design and experiment of soybean seed metering device with constant disturbance aided filling soybean [J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2023, 44(6) : 18-25(in Chinese with English abstract).
- [30] 张中锋,石林雄,史芳志,等.2BMK-6型铺膜铺管施肥播种机的设计与试验[J].中国农机化学报,2019,40(11):13-19. ZHANG Z F, SHI L X, SHI F Z, et al. Design and test on 2BMK-6 type film and tube spreading fertilization and seeding machine [J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2019, 40(11):13-19(in Chinese with English abstract).
- [31] 刘海,杜铮,李旭,等.蔬菜联合播种机关键部件结构设计[J].中国农机化学报,2020,41(5):64-68.LIU H, DU Z, LI X, et al. Design on key parts of vegetable combine seeder [J]. Journal

- of Chinese agricultural mechanization, 2020, 41(5): 64-68 (in Chinese with English abstract).
- [32] 史玉豪. 大白菜精量排种系统的设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016. SHI Y H. Design and experiment of precision seeding system for Chinese cabbage [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [33] 曾山, 文智强, 刘伟健, 等. 气吸式小粒蔬菜种子精量穴播排种器优化设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(6): 52-59. ZENG S, WEN Z Q, LIU W J, et al. Optimal design and experiment of air-suction precision hole sowing seed metering device for small-grain vegetable seed [J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 52-59 (in Chinese with English abstract).
- [34] 王金武, 唐汉, 王奇, 等. 基于EDEM软件的指夹式精量排种器排种性能数值模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 43-50. WANG J W, TANG H, WANG Q, et al. Numerical simulation and experiment on seeding performance of pick-up finger precision seed-metering device based on EDEM [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21): 43-50 (in Chinese with English abstract).
- [35] YAZGI A, DEĞIRMENCİOĞLU A. Measurement of seed spacing uniformity performance of a precision metering unit as function of the number of holes on vacuum plate [J]. Measurement, 2014, 56: 128-135.
- [36] YAZGI A, DEĞIRMENCİOĞLU A. Optimization of the seed spacing uniformity of a vacuum type precision seeder using spherical materials [J]. Biosystems engineering, 2000, 79(3): 347-356.
- [37] SIEMENS M C, GAYLER R R. Improving seed spacing uniformity of precision vegetable planters [J]. Applied engineering in agriculture, 2016, 32(5): 579-587.
- [38] KAMGAR S, NOEI-KHODABADI F, SHAFAEI S M. Design, development and field assessment of a controlled seed metering unit to be used in grain drills for direct seeding of wheat [J]. Information processing in agriculture, 2015, 2(3/4): 169-176.
- [39] 林翩, 廖庆喜, 王磊, 等. 芝麻精量穴播排种器吸种性能分析与试验[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(5): 195-206. LIN P, LIAO Q X, WANG L, et al. Seed suction performance and experiment of sesame precision hole seeding metering device [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(5): 195-206 (in Chinese with English abstract).
- [40] 莫定红, 舒彩霞, 廖宜涛, 等. 油菜正负气压组合式穴播器设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(4): 219-230. MO D H, SHU C X, LIAO Y T, et al. Design and experiment of positive and negative pressure combined dibbler for rapeseed [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(4): 219-230 (in Chinese with English abstract).
- [41] 李金凤. 小粒径蔬菜种子气吸式精密排种器的设计与试验研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019. LI J F. Design and experimental research of small-size vegetable seeds air suction precision seeder [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [42] 李晓冉, 张银平, 刁培松, 等. 单盘多行独立气道式蔬菜精量排种器设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(2): 28-36. LI X R, ZHANG Y P, DIAO P S, et al. Design and experiment of vegetable precision seed metering device with a single plate and multiple rows with independent airway [J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2022, 43(2): 28-36 (in Chinese with English abstract).
- [43] 丁杨. 气力式辣椒排种器的设计与试验[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020. DING Y. Design and experiment of pneumatic pepper seed metering device [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [44] KOSARIYA Y K, JOGDAND S V, VICTOR V M. Study on the physico-engineering and morphological characteristics of different seed potato tubers [J]. Akinik publications, 2021, 10(7): 1661-1666.
- [45] 肖文立, 肖文芳, 廖宜涛, 等. 油菜直播机犁式正位深施肥装置设计与性能试验[J]. 华中农业大学学报, 2018, 37(4): 131-137. XIAO W L, XIAO W F, LIAO Y T, et al. Design and performance test of plough-type positive deep fertilization device for rapeseed direct planter [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2018, 37(4): 131-137 (in Chinese with English abstract).
- [46] XI X B, GAO W J, GU C J, et al. Optimisation of no-tube seeding and its application in rice planting [J]. Biosystems engineering, 2021, 210: 115-128.
- [47] 杨薇. 玉米育种精量播种关键技术与装备研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2019. YANG W. Research on key technologies and equipment of precision sowing in maize breeding [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Science, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [48] 廖宜涛, 李成良, 廖庆喜, 等. 播种机导种技术与装置研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 1-14. LIAO Y T, LI C L, LIAO Q X, et al. Research progress of seed guiding technology and device of planter [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 51(12): 1-14 (in Chinese with English abstract).
- [49] 廖宜涛, 孙迈, 廖庆喜, 等. 油菜精量播种导种环节种子流有序性分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(23): 23-35. LIAO Y T, SUN M, LIAO Q X, et al. Ordering of seed flow in seed guiding of precision sowing for rapeseed [J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(23): 23-35 (in Chinese with English abstract).
- [50] 马成成, 衣淑娟, 陶桂香, 等. 带式玉米高速导种装置旋夹纳种机理分析与参数优化[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 134-143. MA C C, YI S J, TAO G X, et al. Mechanism analysis and parameter optimization of corn seeds receiving by rotating clamp of belt-type high-speed seed guiding device [J].

- Transactions of the CSAM, 2023, 54(7):134-143(in Chinese with English abstract).
- [51] 郑嘉鑫.大豆精密播种机种沟构建技术及开沟装置研究[D].长春:吉林大学,2017.ZHENG J X.Furrow construction technology and furrowing machine for soybean precision planters [D]. Changchun: Jilin University, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [52] 马磊,廖庆喜,魏国梁,等.油菜联合直播机种床松旋装置设计与试验[J].华中农业大学学报,2019,38(6):132-138.MA L, LIAO Q X, WEI G L, et al. Design and test of seedbed sub-soiling and rotating device for rapeseed combined planter [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38 (6) : 132-138 (in Chinese with English abstract).
- [53] USABORISUT P, PRASERTKAN K. Performance of combined tillage tool operating under four different linkage configurations[J]. Soil and tillage research, 2018, 183:109-114.
- [54] 张青松.油菜直播机开沟旋耕降附减阻机理与仿真分析[D].武汉:华中农业大学,2017.ZHANG Q S. Mechanism and simulation analysis of drag reduction by ditching and rotary tillage of rape direct seeding machine [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [55] 刘晓鹏.油菜直播机开沟耕整地部件设计及其工作机理[D].武汉:华中农业大学,2018.LIU X P. Design and working mechanism of ditching and soil preparation components of rape direct seeding machine [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [56] 肖文芳.犁旋组合式稻茬全量还田油菜直播种床整理机设计与试验[D].武汉:华中农业大学,2019.XIAO W F. Design and experiment of plough-rotary combined rice stubble full-returning rape direct seeding seedbed finishing machine [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [57] GESCH R W, DOSE H L, FORCELLA F. Camelina growth and yield response to sowing depth and rate in the northern Corn Belt USA [J]. Industrial crops and products, 2017, 95: 416-421.
- [58] KÜHLING I, REDOZUBOV D, BROLL G, et al. Impact of tillage, seeding rate and seeding depth on soil moisture and dryland spring wheat yield in Western Siberia [J]. Soil and tillage research, 2017, 170:43-52.
- [59] BERTI M T, JOHNSON B L. Switchgrass establishment as affected by seeding depth and soil type [J]. Industrial crops and products, 2013, 41:289-293.
- [60] BARR J B, DESBOLLES J M A, FIELKE J M. Minimising soil disturbance and reaction forces for high speed sowing using bentleg furrow openers [J]. Biosystems engineering, 2016, 151:53-64.
- [61] 赵淑红,刘宏俊,张先民,等.滑推式开沟器设计与作业性能优化试验[J].农业工程学报,2016,32(19):26-34.ZHAO S H, LIU H J, ZHANG X M, et al. Design and optimization experiment of working performance of sliding push opener [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32 (19) : 26-34 (in Chinese with English abstract).
- [62] 马云海,马圣胜,贾洪雷,等.仿生波纹形开沟器减黏降阻性能测试与分析[J].农业工程学报,2014,30(5):36-41.MA Y H, MA S S, JIA H L, et al. Measurement and analysis on reducing adhesion and resistance of bionic ripple opener [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30 (5) : 36-41 (in Chinese with English abstract).
- [63] WOJTKOWSKI M, PECEN J, HORABIK J, et al. Rapeseed impact against a flat surface: physical testing and DEM simulation with two contact models [J]. Powder technology, 2010, 198(1):61-68.
- [64] TAGHINEZHAD J, ALIMARDANI R, JAFARI A. Design, development and evaluation of a new mechanism for sugarcane metering device using analytical hierarchy method and response surface methodology [J]. Sugar Tech, 2015, 17 (3) : 258-265.
- [65] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modelling (DEM) of tillage: accounting for soil cohesion and adhesion [J]. Biosystems engineering, 2015, 129:298-306.
- [66] KAYACAN E, KAYACAN E, RAMON H, et al. Distributed nonlinear model predictive control of an autonomous tractor: trailer system [J]. Mechatronics, 2014, 24(8):926-933.
- [67] REZVANI F, AZARGOSHASB H, JAMIALAHMADI O, et al. Experimental study and CFD simulation of phenol removal by immobilization of soybean seed coat in a packed-bed bioreactor [J]. Biochemical engineering journal, 2015, 101:32-43.
- [68] LEI X L, LIAO Y T, ZHANG Q S, et al. Numerical simulation of seed motion characteristics of distribution head for rapeseed and wheat [J]. Computers and electronics in agriculture, 2018, 150:98-109.
- [69] HAN D D, ZHANG D X, JING H R, et al. DEM-CFD coupling simulation and optimization of an inside-filling air-blowing maize precision seed-metering device [J]. Computers and electronics in agriculture, 2018, 150:426-438.
- [70] 龚智强,陈进,李耀明,等.吸盘式精密排种装置吸种过程气流场中种子受力研究[J].农业机械学报,2014,45(6):92-97. GONG Z Q, CHEN J, LI Y M, et al. Seed force in airflow field of vacuum tray precision seeder device during suction process of seeds [J]. Transactions of the CSAM, 2014, 45 (6) : 92-97 (in Chinese with English abstract).
- [71] 史嵩,张东兴,杨丽,等.基于EDEM软件的气压组合孔式播种器充种性能模拟与验证[J].农业工程学报,2015,31(3): 62-69. SHI S, ZHANG D X, YANG L, et al. Simulation and verification of seed-filling performance of pneumatic-combined holes maize precision seed-metering device based on EDEM [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31 (3) : 62-69 (in Chinese with English abstract).

- [72] 杨善东,张东兴,刁培松,等.侧正压玉米排种器的设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(S1):8-13.YANG S D, ZHANG D X, DIAO P S, et al. Design and experiment of side positive pressure seed metering device [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31 (S1) : 8-13 (in Chinese with English abstract)..
- [73] 韩丹丹,张东兴,杨丽,等.基于EDEM-CFD耦合的内充气吹式排种器优化与试验[J].农业机械学报,2017,48(11):43-51.HAN D D, ZHANG D X, YANG L, et al. Optimization and experiment of inside-filling air-blowing seed metering device based on EDEM-CFD [J]. Transactions of the CSAM, 2017, 48(11):43-51(in Chinese with English abstract).
- [74] 陈玉龙,贾洪雷,王佳旭,等.大豆高速精密播种机凸勾排种器设计与试验[J].农业机械学报,2017,48(8):95-104.CHEN Y L, JIA H L, WANG J X, et al. Design and experiment of scoop metering device for soybean high-speed and precision seeder [J]. Transactions of the CSAM, 2017, 48(8):95-104(in Chinese with English abstract).
- [75] 姚露,廖庆喜,王磊,等.油菜旋转盘式高速集排器螺旋供种装置设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(6):78-88.YAO L, LIAO Q X, WANG L, et al. Design and experiment of spiral seed feeding device in spinning disc high-speed metering device for rapeseed [J]. Transactions of the CSAM, 2022, 53(6):78-88(in Chinese with English abstract).
- [76] YU J J, LIAO Y T, CONG J L, et al. Simulation analysis and match experiment on negative and positive pressures of pneumatic precision metering device for rapeseed [J]. International journal of agricultural and biological engineering, 2014, 7(3): 1-12.
- [77] 雷小龙,廖宜涛,李兆东,等.种层厚度对油麦兼用集排器供种装置充种性能的影响[J].农业工程学报,2016,32(6):11-19.LEI X L, LIAO Y T, LI Z D, et al. Effects of seed layer thickness on seed filling performance of seed feeding device for rapeseed and wheat [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32 (6):11-19(in Chinese with English abstract).
- [78] 袁英,邢赫,王在满,等.水稻气力式排种器挡种装置设计与试验[J].农业机械学报,2015,46(5):33-38.ZANG Y, XING H, WANG Z M, et al. Design and experiment of shield device on rice pneumatic metering device [J]. Transactions of the CSAM, 2015, 46 (5) : 33-38 (in Chinese with English abstract).
- [79] 丁幼春,杨军强,朱凯,等.油菜精量排种器种子流传感装置设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(9):29-36.DING Y C, YANG J Q, ZHU K, et al. Design and experiment on seed flow sensing device for rapeseed precision metering device [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33 (9) : 29-36 (in Chinese with English abstract).
- [80] 李姗姗.油菜气力滚筒式精量集排器排种过程分析及性能试验[D].武汉:华中农业大学,2017.LI S S. Analysis of seed metering process and performance experiment on pneumatic cylinder-type centralized precision metering device for rapeseed [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [81] 李骅,马云龙,於海明,等.群组吸孔气吸式芹菜播种器设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(3):87-95.LI H, MA Y L, YU H M, et al. Design and experiment of group air-suction type celery seed metering device [J]. Transactions of the CSAM, 2023, 54(3):87-95(in Chinese with English abstract).
- [82] 刘彩玲,李方林,姜萌,等.点胶-纸带式小粒径种子蔬菜精密播种机设计与试验[J].农业工程学报,2022,38(13):20-29.LIU C L, LI F L, JIANG M, et al. Design and experiment of the spotting glue-paper tape precision seeder for small seed vegetables[J].Transactions of the CSAE, 2022,38(13):20-29 (in Chinese with English abstract).
- [83] 罗本钒.小白菜遗传多样性分析及优良性状鉴定与利用[D].武汉:华中农业大学,2015.LUO B F. Genetic diversity analysis of pak-choi and identification and utilization of good traits [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [84] 黎永键,赵祚喜,黄培奎,等.基于DGPS与双闭环控制的拖拉机自动导航系统[J].农业机械学报,2017,48(2):11-19.LI Y J, ZHAO Z X, HUANG P K, et al. Automatic navigation system of tractor based on DGPS and double closed-loop steering control [J]. Transactions of the CSAM, 2017, 48 (2) : 11-19(in Chinese with English abstract).
- [85] 王鹤,胡静涛,高雷.农业机械自动导航车轮转角测量误差补偿模型[J].农业机械学报,2014,45(8):33-37.WANG H, HU J T, GAO L. Compensation model for measurement error of wheel turning angle in agricultural vehicle guidance [J]. Transactions of the CSAM, 2014, 45 (8) : 33-37 (in Chinese with English abstract).
- [86] 张闻宇,丁幼春,廖庆喜,等.拖拉机液压转向变论域模糊控制器设计与试验[J].农业机械学报,2015,46(3):43-50.ZHANG W Y, DING Y C, LIAO Q X, et al. Variable universe fuzzy controller for tractor hydraulic steering [J]. Transactions of the CSAM, 2015, 46(3):43-50(in Chinese with English abstract).

Progress on technology and equipment of precision and direct seeding for vegetable seeds

LIU Hai¹, DU Zheng¹, GUO Xiang¹, LI Hua², MA Xiangyuan³, LIAO Yitao⁴

1. Wuhan Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430065, China;

2. Shiyan Agricultural Machinery Technology Promotion Center, Shiyan 442000, China;

3. College of Engineers, Zhejiang University, Hangzhou 310014, China;

4. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract This article briefly reviewed the progress on the technology and equipment of precision and direct seeding for vegetables at home and abroad. The overview of vegetable production and major seeding equipment worldwide was analyzed. The key technical equipment and the dynamics of intelligent mechanized direct seeding of vegetables including the precision and variable seed metering, seedbed formation, seed furrow shaping, and control detection were emphasized. The focus and difficulties of studying the mechanized direct seeding of vegetables were clarified. The optimized methods for designing the seed metering system and the forming system of seedbed for the mechanized direct seeding of vegetables were summarized. The foundation and core of mechanized precision and direct seeding of vegetables was highlighted. The key factors affecting the accuracy of seeding were identified from the perspective of key technologies for precision and direct seeding of vegetables and the implementation methods of precision and direct seeding technology for vegetable seeds were elucidated. The difficulties in precision seeding technology for vegetables at the current stage were pointed out, and the focus was proposed to break through the methods of precision and variable seeding, high-speed and efficient seeding in sowing technology based on a systematic summary and analysis of the characteristics of vegetable planting in China and the development trend of technology and equipment for precision and direct seeding. The trend of developing precision and direct seeding technology for vegetables was prospected by analyzing the current development status of precision seeders at home and abroad. It will provide a reference for the theoretical studies and the development of precision seeders for vegetables in China, which is of significant importance for the advancement of high-speed precision seeding technology in China.

Keywords vegetables; precision seeding; metering device; direct seeding; mechanization

(责任编辑:陆文昌)