doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.001

主要粮油作物精量播种技术与装备研究进展

廖宜涛[1,2]　谭　钰[1]　廖庆喜[1,2]　郑　娟[1]　王林松[3]　张青松[1,2]

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070;
3. 湖北省农业农村厅农机化管理处, 武汉 430064)

摘要: 粮油作物作为人类生存和发展的基础,其生产技术和播种技术一直是农业科学研究的重要领域。机械化播种作业对于提高粮油作物的产量和单位面积产量至关重要。本文分析了国内外主要粮油作物的生产概况和播种装备,从粮油作物的播种特点出发,结合不同粮油作物品种和不同播种农艺要求,重点阐述了粮油作物播种环节的精量排种、种床整理和播种智能化等方面的实际应用及前沿先进技术研究进展。在系统总结和分析我国主要粮油作物的种植特点和发展趋势的基础上,指出了现阶段主要粮油作物精量播种技术难点,并提出精量排种技术、种床整理技术、精量播种智能化技术是粮油作物精量播种技术的研究重点。自动导航、变量播种、播种检测等技术是提升我国主要粮油作物播种智能化水平的关键。

关键词: 粮油作物; 精量排种; 播种机; 智能化; 种床整理

中图分类号: S223.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)09-0001-19　　**OSID**:

Research Progress and Development Trends in Precision Seeding Technologies for Major Grain and Oil Crops

LIAO Yitao[1,2]　TAN Yu[1]　LIAO Qingxi[1,2]　ZHENG Juan[1]　WANG Linsong[3]　ZHANG Qingsong[1,2]

(1. *College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan* 430070, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan* 430070, *China*
3. *Agricultural Mechanization Management Division, Hubei Provincial Department of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan* 430064, *China*)

Abstract: The production and sowing technology of grain and oil crops has always been an important area of agricultural scientific research, as it is crucial for human survival and development. Mechanized sowing operations are crucial for improving the yield and production per unit area of grain and oil crops. The production profiles and sowing equipment of major grain and oil crops in China were analyzed, focusing on the practical applications and research progress of advanced technologies in the seeding process of these crops, including precision seeding, seed bed finishing, and sowing intelligence, in relation to the sowing characteristics of these crops and different varieties and sowing agronomic requirements. Based on a systematic summary and analysis of the planting characteristics and development trends of China's major grain and oil crops, the paper identified the technical challenges of precision sowing of these crops and proposed that precision seeding scheduling technology, seedbed finishing technology and precision sowing intelligence technology should be the main areas of research for precision sowing technology for grain and oil crops. Technologies such as automatic navigation, variable seeding and seeding detection were key to improve the level of intelligent sowing of major grain and oil crops in China.

Key words: grain and oil crops; precision sowing; seeder; intelligence; bed preparation

收稿日期: 2025-06-30　修回日期: 2025-07-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD200000403、2021YFD200000405)

作者简介: 廖宜涛(1982—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: liaoetao@mail.hzau.edu.cn

通信作者: 廖庆喜(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事油菜机械化生产技术与装备研究,E-mail: liaeqx@mail.hzau.edu.cn

0 引言

水稻、小麦、玉米、大豆和油菜构成了我国粮油作物的核心,这些作物不仅是国民的基本食粮来源,也是国家粮食安全的基石。然而,受耕地和水资源约束,我国依靠扩大种植面积来提高粮食产量的潜力已趋于饱和,因而依靠农业科技进步和种植结构优化提高粮油作物产能单产成为现阶段我国粮食生产的主要技术支撑。与世界先进水平相比,我国主要粮油作物面积单产提升仍有较大潜力,如我国油菜平均单产约 2 100 kg/hm^2,仅为欧盟油菜单产 65%;大豆单产约为 2 000 kg/hm^2,仅为巴西的 62.98%;玉米单产 6 300 kg/hm^2,仅为美国的 56.6%[1-2]。由于种植制度、栽培模式及技术条件在不同地区存在差异,各地粮油作物的单产水平也差距显著,如全国小麦平均单产为 6 000 kg/hm^2,而湖北省小麦平均单产仅为 4 000 kg/hm^2[3]。

机械化播种是实现粮油作物高产、稳产和高效生产的重要手段,其中精量播种技术是提高播种质量、优化作物群体结构的关键技术,可以显著提高生产效率并减轻劳动强度,全方位提高粮油作物机播质量,是大面积提升单产潜力的有效措施[4-5]。农业农村部农办机[2023]1 号文件《关于进一步做好机械化播种质量提升工作的通知》明确指出,机播质量直接影响作物出苗质量,直接关系作物单产水平,提出要围绕保障丰产增产所需播种密度和实现苗齐苗全苗壮,全力提升粮油作物机播作业质量。2025 年农业农村部在“全国农业机械化工作推进会议”也上提出,要深入学习贯彻习近平总书记关于农业机械化发展的系列重要指示精神,进一步强化责任担当,强化大面积单产提升机械化支撑,推动高性能播种机部署到一线。研究表明,高质量播种作业可以增加 10% 以上的高产潜能释放[6],因此研发和推广应用高性能播种装备,是推动大面积规模化提升粮油单产的重要途径。

近年来,随着《农业机械化促进法》、农机购置补贴等一系列扶持政策的促进,同时以农机合作社为代表的新型经营主体不断发展壮大,我国主要粮油作物生产的机械化率显著提高。最新统计数据表明,我国农作物耕种收综合机械化率超过 72%,但受限于多元化的种植制度、土壤黏重板结以及丘陵地块分散狭小等因素,播种环节整体上处于薄弱状态,且呈现不同作物、不同区域发展不平衡,不同层次技术应用不平衡、先进技术发展滞后等问题[7]。如全国玉米、大豆机械化播种水平超过 80%,而南方低缓丘陵区的机播率仅为 21%,西南丘陵山区的机播率仅为 11%;小麦全国机械化播种水平超过 90%,南方地区小麦机播水平不足 50%,排种技术以外槽轮机械式条播排种为主,大播量、高速、精量的排种技术仍需突破;油菜因籽粒小、重力小、易飘散,且种植区域多为南方丘陵山区,地形复杂、地块分散,机械化播种难度大,全国机播水平不足 40%,排种技术以窝眼轮机械式排种为主,高精度、单粒播种的气吸式排种技术应用较少[8-10];播种机的智能化技术仍面临多重瓶颈,如智能供种与补种系统应用缺乏;电驱/液压驱动的独立仿形系统成本高、维护难;智能监测与调控技术尚未规模化应用;基于机器视觉的漏播/重播识别技术,在南方黏重土壤条件下易出现误判,且传感器在粉尘、振动环境中的可靠性不足等。

国家高度重视机械化播种技术的发展,“十三五”、“十四五”期间持续立项“精量播种技术装备研发”、“高性能播种关键部件及智能播种机创制”等国家重点研发计划项目,支持播种技术装备创新,突破了适应黏重土壤的高质量种床整理与防堵防粘附、适宜高速作业多作物兼用短路径精量播种、高速播种作业参数智能监控-控制-管控等关键技术,形成了排种器关键技术突破、播种机创制、产业化应用的技术装备创新发展模式。国内知名和新型农机企业也相继推出相关播种机产品。

作为机械化播种的关键,排种技术对播种质量影响较大。排种器是播种机的核心工作部件,其工艺实质是借助机械或气力-机械耦合作用,将呈自然堆积状态的种子群有序离散为单粒或等粒距的均匀种子流,进而实现“群体→个体→均匀分布”的转化,其性能会影响田间出苗率和作物产量。这些年来国内外对播种机的研究改进,研究重点也都是针对排种器进行的。为实现作物的均匀单粒精量播种,各种不同原理的排种器被发明出来(表 1),早期排种器及相关研究以机械式为主,近年来气力式和机械气力组合式排种器是国内外研究重点和热点[11-14]。随着现代农业技术的快速发展,电驱式精量播种技术已成为提高粮油作物产量的重要手段。通过精准控制播种量、播种深度和播种密度,可以优化作物生长环境,提高作物产量和品质。

本文对中国主要粮油作物播种机械概况加以阐述,归纳分析国内外主要粮油作物典型播种机械化关键技术与装备的研究现状。从粮油作物精量排种技术、种床整理技术和精量播种智能化技术方面进行阐述,分析现阶段主要粮油作物精量播种技术发展的技术难点和存在问题,并展望未来发展趋势与研究方向。

表 1　各类型排种器及其特点

Tab. 1　Types of seed dispensers and their characteristics

类别	典型结构	工作原理	主要优点	主要缺点	适用场景
机械式	勺轮式、指夹式、外槽轮式、水平圆盘式	借助型孔、凹槽或夹持机构直接“舀-夹-携”种子	结构简单、成本低、易维护；指夹式精度可达千分之几重播率	速度小于等于 8 km/h；对种子尺寸分级要求高；高速时充种不稳、伤种	小规模、多作物、轻负荷播种
气力式	气吸式、气吹式、气压式	利用负压吸附或正压吹压，使种子贴附在型孔或窝眼	对种子形状尺寸适应性强；作业速度 10 ~ 22 km/h；伤种少	需风机、密封件，结构复杂；能耗高；成本高	规模化、高速、精量播种
集排式	中央滚筒/锥盘 + 气送分配	集中充种后通过气流或导轨分送到多行	一器多行（可达 60 行），结构紧凑，播幅宽	各行一致性受气流分配影响；调试复杂	宽幅高速条播、小粒径作物
机械－气力组合式	机械充种 + 气流清种/护种	机械初步充种，气流完成清种、留种、护种	兼具机械可靠与气力精量；气压需求低；粒距合格率大于 96%	结构复杂，需兼顾两套系统匹配	玉米、大豆等中粒作物高速精播
电驱式	伺服电机独立驱动排种盘	电机转速与机具速度同步，可实时调节粒距	电控精量、无级变速、区段控制；无需传统传动链	成本高，需电控系统抗干扰；维护技术要求高	智能农机、变量播种、无人农场

1　粮油作物生产概况与播种装备分析

1.1　主要粮油作物生产概况分析

粮油作物种植面积广、产量需求高、种类繁多。根据 2024 年国际统计年鉴数据可知，2023 年全球粮油作物种植面积约为 17.84 亿公顷，总产量约 28.74 亿吨。国内水稻、小麦、玉米、大豆和油菜构成我国粮油作物的核心，占所有粮油作物播种面积的 65% 以上，总产量超过 7 000 万吨，如图 1 和表 2 所示。

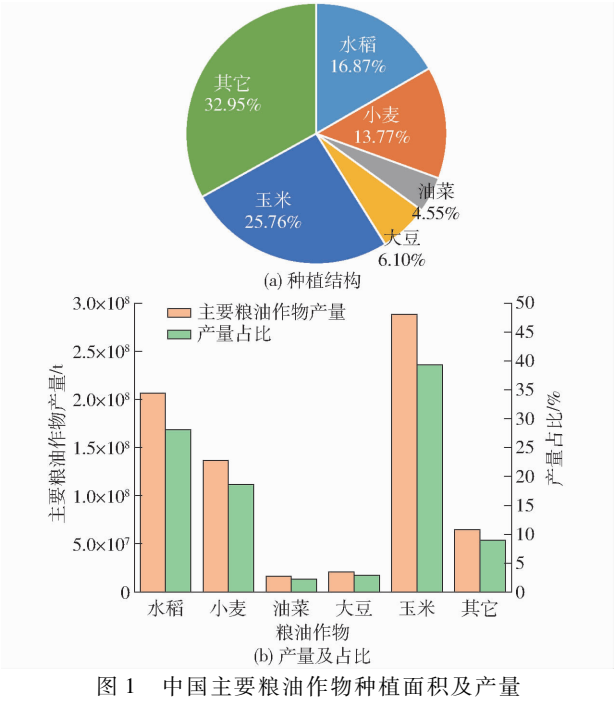


图 1　中国主要粮油作物种植面积及产量

Fig. 1　Area under cultivation and production of major grain and oil crops in China

随着全球人口增长，主要粮油作物的生产逐渐向高产、高效方向发展。欧美农业发达国家的玉米、大豆、小麦、油菜等粮油作物种植制度通常为一年一熟或者休耕模式、旱地大面积连片种植，相关机械化装备发展较为成熟，已基本实现全程机械化、生产标准化、农机农艺配套技术成熟，智能化深度应用，正向无人或少人化发展。大规模种植注重播种关键核心技术研究与开发、装备投入，同时功能组件搭载研究加快，电子技术应用从监测向智能控制过渡。

我国南北方地域差异较大，粮油作物种植有一年一熟、一年两熟或一年三熟制等不同种植模式。其中北方地区以一熟制为主，注重高速、高效、大规模、智能化的播种作业，以适应广阔的耕地和相对单一的作物种植结构。南方地区则注重多熟制的多作物兼用、精细化种植，以适应复杂的地形和水旱轮作的种植需求。北方平原以中大型播种机为主，基本实现了播种机械化，正向智能化、无人化发展。南方地区丘陵山区地貌突出，广泛采用中小型、多功能的播种装备，受限于水旱轮作、间作套种模式等多元化的种植制度、土壤黏重板结以及地块分散狭小等因素，机播水平远低于全国平均水平，“无机可播”、“无好机可播”问题突出。如我国油菜、小麦机播率分别为 38.81%、90.88%，南方地区油菜、小麦机播率分别为 39.55%、85.78%，低于全国平均水平。其中，贵州油菜、小麦机播率仅 9.77%、8.52%；云南油菜、小麦机播率仅 4.94%、26.72%[7]。

1.2　粮油作物精量播种装备分析

1.2.1　国外精量播种装备

国外针对粮油作物的播种装备主要为大中型播种机，具有高通用性，能够播种玉米、大豆、油菜、小麦等中小粒径种子，并展现出高效的作业性能。播种机依据其排种方式主要分为机械式、气吸式精量播种机和气力输送集排式播种机。

国外应用较早的播种机为机械式条播机，采用

表 2 国内外主要粮油作物种植基本情况

Tab. 2 Basic information on cultivation of major food and oil crops at home and abroad

作物	种植面积/hm²		产量/t		主产区分布		国内播种机械化率/%
	国内	全球	国内	全球	国内	国外	
水稻	2.9×10^7	1.6×10^8	2.8×10^7	5.37×10^8	南方和长江流域	印度、泰国、越南	56.30
小麦	2.4×10^7	2.23×10^8	1.38×10^8	7.9×10^8	北方地区、长江流域	美国、俄罗斯	90.88
玉米	4.4×10^7	4.1×10^7	2.0×10^7	1.24×10^9	东北、华北和西南地区	美国、巴西	80.00
大豆	1.2×10^7	1.2×10^8	2.0×10^7	4.20×10^8	东北地区	美国、巴西	87.40
油菜	7.3×10^6	4.3×10^7	1.6×10^7	7.8×10^7	长江流域和南方地区	加拿大、欧盟、印度、澳大利亚	38.81

勺夹式、指夹式、窝眼轮式等机械式排种技术，适用于玉米、大豆等作物。常见机具包括美国的约翰迪尔机械式条播机（图 2a），以其耐用性、播种精度、操作便利性和适应性等特点，在全球范围内得到了广泛应用。随着技术的发展，国际先进播种机以应用气力式排种技术为主，包括气吸式和气送式两类，均具有精量播种、高速、宽幅和工作效率高等优点。气吸式播种机如德国 Amazone 公司研制的 ED 系列高速播种机（图 2b）搭载 Xpress 排种系统，可实现低位投种和同步仿形，最高作业速度可达 15 km/h，满足大豆、玉米等 10 余种作物的高速单粒排种。美国 Kinze 公司生产的 5670 型气吸式多行可折叠播种机（图 2c），利用独立设计的平行杆结构改善了种子流通过区域的框架，为大豆、小麦等作物提供最佳窄行，通过调节吸孔大小以适应所有种子类型和大小。气送式播种机如美国约翰迪尔 N500C 气送式播种机（图 2d），采用直接气送式排种技术，集“大容量、免耕、电动精量、智能分区、一键校准”于一体，可同时满足小籽粒谷物条播与大豆单粒精播的需求，是北美洲及澳大利亚免耕/少耕体系中的主力机型。奥地利 Pöttinger 公司的分配气送式播种机（图 2e）和瑞士 Väderstad 公司 Disc Drill SD 型宽幅气送式播种机（图 2f）均采用分配气送式排种技术完成播种，适用于水稻、小麦、油菜等多作物兼用的密集条播。

国外农机领域先进性研究多为大体型机器，适用于宽幅高速作业场景，并不适用于我国农业地域差异大、南方地区地块分散、面积狭小、土壤黏重板结的现状。



(a) 美国约翰迪尔机械式条播机 (b) 德国Amazone气吸式播种机 (c) 美国Kinze 5670型气吸式播种机

(d) 美国约翰迪尔直接气送式播种机 (e) 奥地利Pöttinger分配气送式播种机 (f) 瑞士Disc Drill SD型宽幅气送式播种机

图 2 国外粮油作物播种机类型

Fig. 2 Types of seeders for grain and oil crops abroad

1.2.2 国内精量播种装备

国内针对小麦、玉米、大豆等主要粮油作物的播种机可分为撒播机、条播机、精量播种机、免耕播种机、整地施肥播种机和水稻直播机。这些播种机根据不同的作物和播种需求，配备不同类型的排种器，如槽轮式、轮式、窝眼式、指夹式和气力式等，以适应不同的播种要求。

据调查，我国免耕播种机保有量 111.78 万台，精量播种机为 417.24 万台，整地施肥播种机为 28.5 万台，水稻直播机为 4.1 万台[15]。在玉米和大豆等大粒径种子播种作业中，主要采用气吸式单粒精密排种，如德邦大为气吸式免耕播种机（图 3a）集开沟、施肥、播种等 6 项功能于一体，适用于玉米、大豆等中大型籽粒作物，作业速度已经突破 12 km/h。水稻、小麦、油菜等作物主要采用气力式排种技术。华中农业大学与东风井关公司联合开发的 2BQFX－12 型精量播种机（图 3b）可一次性完成旋耕、灭茬、开厢沟、施肥、播种等作业，采用正负气压组合式原理，实现油菜小粒径种子的单粒精量播种，但无法满足小麦、水稻等作物的大播量需求。华中农业大学

研制的稻麦油兼用气送式精量联合直播机(图 3c)集成了旋耕、开沟、破茬、带状种床旋耕、气力精量播种、肥料正位深施、覆土、地轮仿形等多项技术,实现了油菜、小麦和水稻的精量播种联合作业,该技术已在湖北、云南等地区进行示范推广,取得了良好的效果。当康农业装备公司的 2BBQ－2617 型谷物精量条播机(图 3d),播种机作业幅宽为 2.0～4.5 m,行距可在 125～250 mm 范围内调节,结合机械式、电控式、气吹式等多种控制方式,能够满足小麦、大麦、燕麦等作物的播种要求。农哈哈小麦播种机(图 3e)采用钉轮式排种器,可完成小麦等谷物类作物的条播作业,一次作业可完成开沟、播种、施肥、覆土、镇压、打竖畦等多项工序。在智能化应用方面,永祥 2BDGS 型水稻直播机(图 3f)采用智能 App 精准控制排种、排肥,配备自动测速、漏施监控、堵塞监控、料位监控等多种传感器,其智能控制和种肥同播技术,显著提高了水稻种植的效率和质量,播种效率为 0.3～0.5 km^2/h。

当前国产播种装备仍存在通用性不足、高速稳定性差等短板,尤其在玉米-油菜等跨尺度种子兼用场景中,排种合格率仅 85%～90%,较国际先进水平差距显著。



(a) 德邦大为气吸式免耕精量播种机　(b) 东风井关2BQFX-12型播种机　(c) 华中农业大学稻麦油兼用气送式播种机

(d) 当康2BBQ-2617型谷物精量条播机　(e) 农哈哈小麦播种机　(f) 永祥2BDGS型水稻直播机

图 3　国内粮油作物精量播种机类型

Fig. 3　Domestic precision planters for major grain and oil crops

2　粮油作物精量排种技术研究进展

2.1　排种技术发展历程

稻麦油豆玉等粮油作物的种子形态、粒径、大小各不相同,减少破损和堵塞,提高排种速度和多作物兼用是排种技术研究的关键点。通过对全球“排种”主题专利分析发现(图 4),最早的机械式排种技术专利出现在 1880 年,其结构简单、成本低廉[9];但由于机械式排种器主要依靠重力、弹簧力或离心力等处理种子,存在取种不稳、易伤种等缺陷,因此在机械式排种装置结构设计及技术优化进程中,利用气流压力作用对种子进行吸附或吹送,实现种子按照预定轨迹运移的气力式排种技术相关专利开始出现;气力式排种技术适应性强、易实现精量播种作业,且机械制造、风机等的产业发展为气力式排种装置结构创新提供了技术支撑,随后气力式排种技术专利申请数量增加,播种对象日趋丰富,结构持续优化至性能基本达到最优;2017 年后,全球排种装置相关专利申请数量持续减少,但融入检测、控制等技术的专利比例逐渐增多,表明以信息化技术为代表的智能化排种新技术系统正在形成。

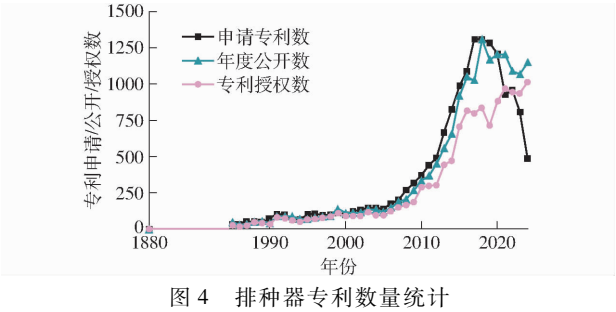


图 4　排种器专利数量统计

Fig. 4　Seed discharger patent number statistics

排种技术发展历程符合 S 曲线进化法则,即遵循萌芽、发展、成熟和衰退,然后新的技术系统诞生的生命周期[16]。结合农作物播种“种子量、位均匀一致“的农艺要求,排种技术从相对粗放的撒播、条播技术逐渐向行株距均匀分布、种植密度合理可控的精准播种发展,技术系统演变遵循理想度不断提高趋势。通过对 WoS 和 CNKI 数据库“排种”主题的文献进行计量学分析(图 5),排种技术研究从实现功能为主的单一主题研究逐渐过渡到参数标定、机构优化、机理分析、虚拟仿真、测控系统等垂

直细分主题的深入探索。排种趋势呈现高速精量、可控可调走向,数字化、智能化和跨学科方法在排种技术与装备间的应用逐渐成为新的焦点,同时新方法工具也被引入排种技术领域研究中,如滞后补偿算法、卫星定位方法、仿生学、TRIZ 理论、高速摄影等[10]。

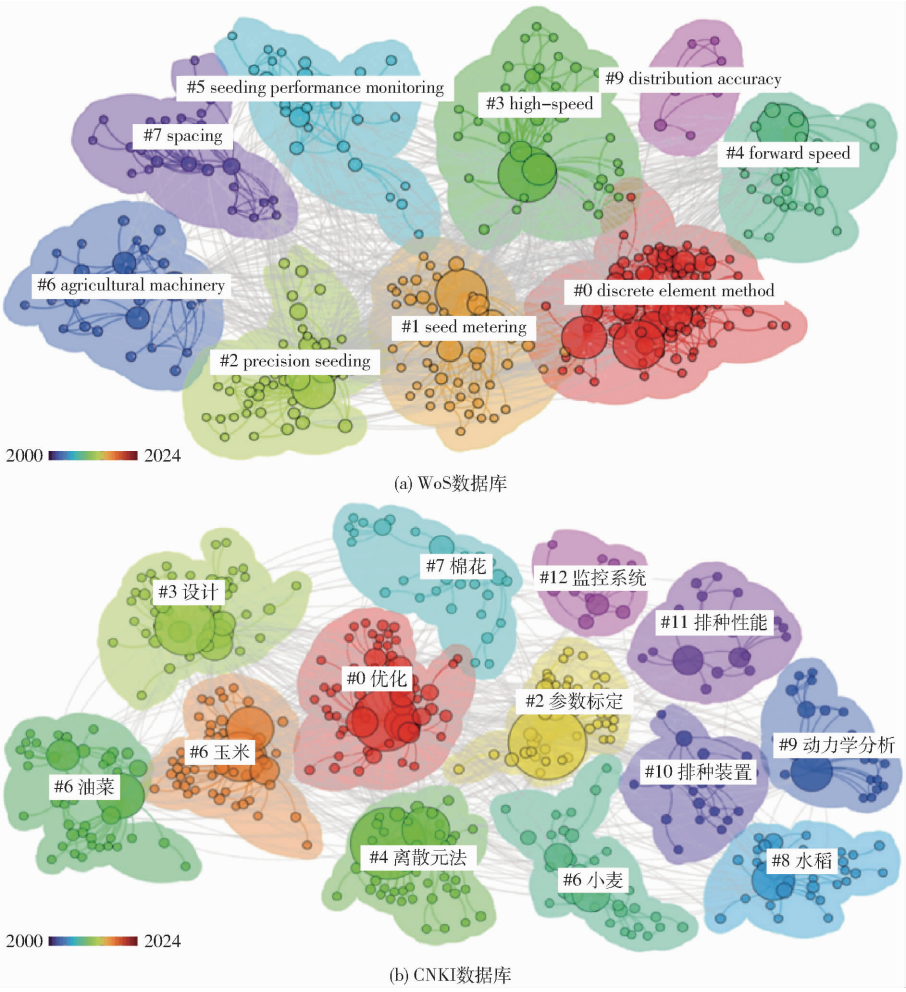


图 5 排种技术相关论文关键词聚类知识图谱

Fig. 5 Knowledge map of keyword clustering for papers related to seeding techniques

2.2 机械式精量排种技术

机械式排种器主要分为外槽轮式、窝眼轮式、圆盘式和指夹式等。外槽轮式和窝眼轮式排种器利用种子自重填充轮槽或窝孔,实现种子群向有序种子流转化;通过调节槽轮槽腔大小,改变容积调节播量,并可用于不同作物的条播播种[17]。采用窝眼型孔少粒或单粒取种,实现多粒穴播或单粒精量播种,使株距分布更均匀[18]。以韩国 Jang Automation 公司为代表,采用窝眼轮式排种技术开发了 JP 系列(手推式)、JAS 系列(自走式)播种机,结构简单,通过更换窝眼形状合适的排种轮,用于各类中小籽粒作物单粒精播或多粒穴播。这类机械式排种器主要依靠重力充种,机械清种护种,存在种子易挤压或剪切破碎、易发生重播漏播等问题。

外槽轮排种器在多种作物播种作业中表现出较高的适应性和可靠性,能播各种粒型的光滑种子,在我国大部分谷物条播机均采用外槽轮式排种器[19]。圆盘式排种器主要用于中耕作物的穴播和单粒精量播种。根据圆盘回转平面的相对位置,分为水平、倾斜和竖直 3 种形式。其中,水平圆盘式因其结构简单、工作稳定性高,在低速作业时能够保持出色的播种质量,因此被广泛应用于大豆等作物的精量播种技术中[20-22]。指夹式排种器能够实现种子的准确、间距均匀的排列,提高播种的效率和一致性,但其几何尺寸相对偏大,主要用于玉米、大豆等大籽粒的单粒精量播种[23-24],能够在 6 ~ 12 km/h 高速度下工作。近年来,有学者设计了高速机械离心式集排器(图 6)[25],采用被动式供种、“圆孔 + 渐变孔柱”组合式型孔投种原理,解决了油菜高速作业时供种及投种能力不足,导致排种量与作业速度不匹配、排种性能不稳定等问题。

2.3 气吸式精量排种技术

气吸式排种技术利用负压吸附种子,实现精确排种,对种子大小和形状适应性强,吸种过程无剪切

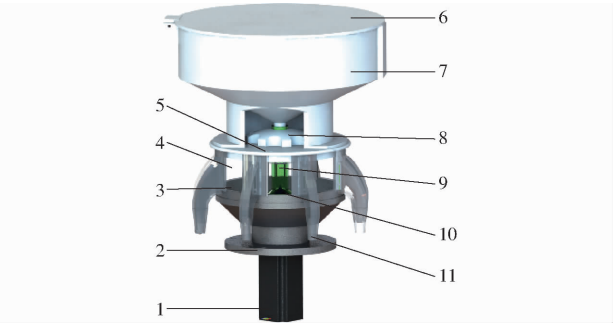


图 6　机械离心式集排器结构图[25]

Fig. 6　Mechanical centrifugal collector for oilseed rape

1. 电机　2. 定锥壳体　3. 动锥体　4. 环状型孔筒　5. 上盖板　6. 种箱盖　7. 种箱　8. 调节旋钮　9. 限种套筒体　10. 分种锥体　11. 导种嘴

载荷，损伤率低，播量控制精度高，适用于油菜、大豆、玉米、水稻等作物的单粒或多粒穴播。相比机械式排种器，它对不规则种子的适应性更强，通过调节气流强度，可适应不同形状、大小和质量的种子。该技术伤种率低，适合高速、宽幅、大田作业，便于精量播种，已成为国内外主要发展趋势。

当前国际主流机型，均采用模块化气吸式排种系统，实现了播种精度、作业效率与多作物适应性的突破性提升。在玉米和大豆等大粒径种子播种作业中，主要采用气吸式单粒精密排种，如德国 HORSCH 公司 Maestro SW 气吸式精量播种机搭载的排种器依靠负压-正压双路气吸系统，12 km/h 仍可单粒精播；美国 John Deere 和 Precision Planting 公司生产的气吸式单粒精量排种器，在 6.0 ~ 9.4 km/h 的作业速度下，田间试验合格指数可保持在 96% ~ 98%，兼用玉米、大豆等大粒径种子与大籽粒谷物。

近年来国内科研人员也开展了基于气吸原理的排种技术研究。如针对玉米、大豆等较大籽粒单粒精量播种，开发了种盘与负压腔同步旋转气吸式[26]、配置倾斜凸台取种结构的可调扁平种子吸附姿态气吸式[27]、单风道单排种盘双行气吸式[28]、玉米大豆兼用腔盘组合孔式[29]等单粒精播排种器。针对小麦籽粒形状不规则、播种量大的难点，将排种元件由排种盘变异为排种滚轮，设计了缝隙式小麦精量排种器、多行并排的滚轮式排种器，并运用流体仿真优化了吸种功能面的结构[30-33]；为提升吸种的稳定性与可靠性，结合重力充种和气力吸种，开发的气吸型孔组合式精量排种器，可有效提高取种质量、降低吸种压力[34]。该类型排种器适应较大籽粒的单粒精播，无法满足小籽粒如油菜等的单粒精播。

为满足小籽粒精量播种要求，有学者利用正负气压组合式原理，采用 TRIZ - AD 现代设计理论，设计了结构紧凑的油菜气吸式电驱式精量排种器（图 7），通过更换不同直径和结构的吸种孔，配以气力参数调节，可实现更多类型种子单粒排种[9]。针对水稻直播种植方式，为解决种子表面性状导致流动性差的问题，有研究采用气力滚筒集排式排种器，通过设计楔形搅种装置实现均匀供种，达到（2 ± 1）粒水稻穴播的精量排种[35]；同时通过研究籽粒被吸附的姿态，设计具有填充导流功能的吸种盘，实现杂交稻单粒播种[36]。为适应谷子、小麦等作物一穴多粒的作物精量排种，研制了具有群组吸孔的气吸式导轮型谷子精量排种器[37-38]等。

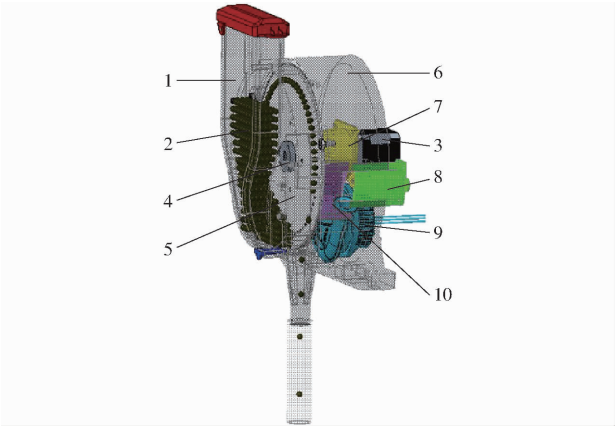


图 7　油菜气吸式精量排种器结构图[9]

Fig. 7　Air-aspirated precision seed discharger for oilseed rape

1. 种仓　2. 油菜籽　3. 电机　4. 法兰　5. 排种盘　6. 气室　7. 电机套　8. 调压板　9. 风机　10. 隔压板

气吸式排种器排种性能主要受型孔结构、工作负压、工作转速及种子大小等因素影响。为充分利用气吸式排种技术对种子大小、形状适应性，扩大排种器的适用范围，现有研究常采用更换具有不同吸孔大小的排种盘，结合工作气压调整，实现相似形态特性及播种要求作物的兼用排种。但目前国内对种子形态差异大、播种形式不同的兼用排种相关研究较少，气吸式排种技术兼用广适度研究和关键部件应用存在不足。

2.4　气送式精量排种技术

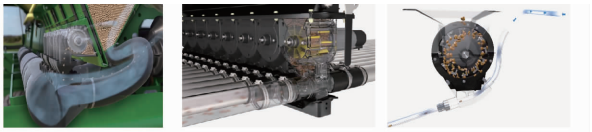
气送式排种采用定量集中供种、正压气流输种、分配器多行随机分种的集排形式，可以在高速作业下保持稳定的排种精度和气压环境，降低系统复杂性和能耗的同时适用于小麦、油菜、水稻等多作物兼用的密集条播[39-43]，其排种过程中，种子以群体形式与气流混合后再进行随机分配，运移过程中种子自由度处于欠约束状态，播种方式为精量条播，难以实现粒距均匀的单粒精播或多粒穴播[44-46]，根据气流分配形式可分为直接气送式和分配气送式。

2.4.1　直接气送式精量排种技术

直接气送式排种技术主要采用“机械式精量排

种+气力输送”形式,适用于各种类型的种子。种子经精密排种器单粒化后,与低速气流均匀混合,利用气体的动力将种子沿管道直接输送到播种位置。可实现播种单体的同步仿形、低位投种,一器多行远距离输送宽幅播种,具有作业速度快、播种均匀性好、机具振动影响小等优点。

美国约翰迪尔 N500C 气送式播种机采用型孔轮供种气送式集排器(图 8a)实现大豆的单粒精播;法国 KUHN 公司的 Fenix III 槽轮供种气送式排种器(图 8b)通过更换不同类型槽轮可实现小麦、水稻等作物的密集条播;奥地利 Pöttinger 气送式播种机采用指夹供种气送式排种器(图 8c)实现玉米的单粒精播。



(a) 型孔轮供种气送式 (b) 槽轮供种气送式 (c) 指夹供种气送式

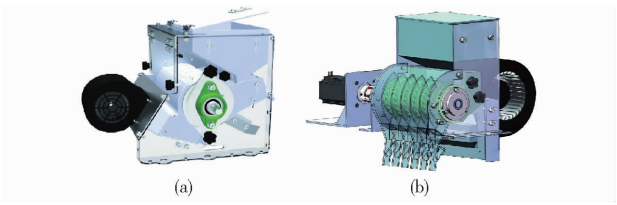
图 8 国外直接气送式排种器

Fig. 8 Overseas direct air-fed seed dischargers

国内生产企业和学者近年来也根据农机领域发展需要,采用直接气送式排种原理开发多种机型,如湖北永祥农机装备有限公司开发的 12 行气力式播种机采用可更换排料轮结构的直接气送式排种系统实现水稻、小麦、油菜等作物的兼用条播,实现1 ~6 m 幅宽动态调节与播量随速控制。华中农业大学[47]研制了小粒径种子兼用精量集排器(图 9a),该集排系统满足芝麻、油菜、小白菜等小粒径种子的穴播要求。为解决芝麻种子球形度低、流动性差,难以实现精量播种的实际问题,廖庆喜等[48]设计了一种倾斜齿勺式型孔充种、气送辅助导种的芝麻精量集排器(图 9b),满足芝麻田间播种要求。

2.4.2 分配气送式精量排种技术

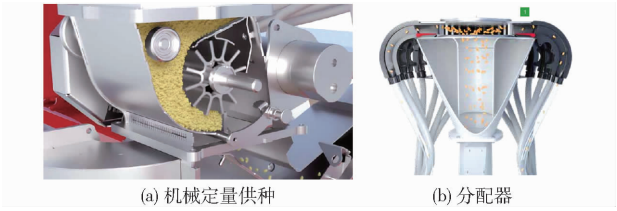
分配气送式排种技术主要采用“机械定量供种(图 10a)+气流分配成行(图 10b)+气力输送”形式,可实现“一器多行”,具有作业幅宽大、作业速度快、适用范围广等优点,已在美国、法国、德国、意大利等发达国家得到大规模推广使用,代表机型如法国库恩 Maxima 精量播种机、美国 John Deere 公司生产的 N500C 系列大型宽幅气送式播种机、德国 Amazone 公司研制的 DMC 6000 - 2C 大型气送式播种机、瑞士 Väderstad 公司生产的 Disc Drill SD Opener 宽幅气送式播种机等均采用分配气送式排种技术。



(a) (b)

图 9 国内直接气送式排种器

Fig. 9 Domestic direct air-fed seed dischargers



(a) 机械定量供种 (b) 分配器

图 10 分配气送式排种技术

Fig. 10 Distribution of air-fed seed discharge technology

国内研究者也在不断探索和改进这一技术,以适应国内农业的需求。雷小龙等[50-51]采用机械定量供种和气流分配成行的方式对油麦兼用型气送式集排器进行了深入研究(图 11a),提出倾斜锥柱状型孔和锥孔轮交错排布结构,实现油菜、小麦兼用及变量定量供种;优化设计了文丘里管式供料装置和碗式枝状分配器[49],并采用 DEM - CFD 气固耦合方法分析集排系统气流场分布和种子运动特性[44]。为解决大播量工况下供种量不足等问题,施彬彬等[52]进一步设计了一种立槽式高通量油麦兼用供种装置(图 11b),解决了小麦大播量工况下供种量不足等问题。为解决稻麦种子流动性差、高速供种稳定性不佳等问题,李晓冉等[53]进一步设计了稻麦油兼用型孔轮(图 11c),通过快速调节型孔轮个数及转速实现调节播量和稻麦油兼用。



(a) 油菜气送式集排系统 (b) 油麦兼用气送式集排系统 (c) 稻麦油兼用高速气送式播种机

图 11 分配气送式排种器

Fig. 11 Distribution of air-fed

国内外对分配气送式排种技术的研究主要围绕“气流-种子耦合场的均匀调控”为核心目标。通过机械定量-气流分行-气力输送一体化设计，实现“一器多行”宽幅、高速、广适播种。

2.5　多作物兼用精量排种技术

随着现代农业对轮作、套种等多样化种植需求的增加，兼用型排种器因其高效、通用等特点成为粮油作物播种设备的发展趋势。国外的气流输送技术宽幅播种机虽适合北方大规模作业，但难以适应南方黏重土壤、秸秆量大、地块分散及水旱轮作等特点。国内播种机多配置单作物排种器，种植水稻、油菜、小麦等作物时需频繁更换排种器，导致成本高、效率低、资源浪费。开发高性能兼用型精量排种器可提高农机利用率，降低人力成本，提升经济效益。

国内研究聚焦于适应地域多样性的兼用型技术突破。为解决多作物兼用问题，学界通过融合集中式排种与气流输送技术，开发出多作物适配方案。例如，华中农业大学基于最速降线原理设计的 2BQFX－12 型播种机，可兼容水稻、小麦、油菜等粒径差异显著的种子。张开兴等[54]采用双圆盘旋转组合的气吸式排种器，适应不同粒径种子的兼用播种。韩丹丹等[55]通过盘腔同步旋转降低摩擦和气压损失，优化玉米、大豆等中大粒径种子的播种性能。杜俊等[56]结合滚筒式与气吸式排种器，优化窝眼形状，实现水稻和小麦的兼用播种。曹梅[57]针对小粒径种子设计倾斜齿勺式型孔充种装置，结合气送辅助投种，提高精量播种效果。邢鹤琛等[58]开发斜锥型孔轮式集排器，通过调节型孔轮和充种漏斗，实现油菜和小麦的兼用播种。为解决落种序列性较差、单粒播种难度大等问题，雷小龙[59]采用机械定量供种和气流分配成行的方法，优化油麦兼用型集排器的播种均匀性。以上研究提升了排种器对不同作物种子的适应性，提高了播种效率和精度，但适应广度仍然有待提高。

机械式、气吸式和气送式 3 种排种器，各有优劣，如表 3 所示，机械式已退出高速市场，气吸式是当前精量单粒主流，气送式在大于等于 15 km/h 宽幅作业上具备潜力，但国产机型尚需突破 12 km/h 以上稳定性。目前我国兼用型排种器仍以气力式为主，主要解决机械式排种器易损种、精度低等问题。相比单体排种器，兼用型集排器可同时完成 3 行以上作业，能简化播种机结构并提高效率。现有排种器设计主要依据经验，研究以解决单作物精量排种为主，部分兼用性排种技术研究局限于相似尺度作物的应用拓展，多作物兼用的精量排种理论研究相对滞后，兼用排种系统开发及优化设计方法缺乏。

表 3　排种技术适应性对比

Tab. 3　Comparison of adaptability of seed-rowing technologies

维度	机械式	气吸式	气送式
作业速度	≤5 km/h	≥15 km/h	12～15 km/h
排种精度	合格指数为 80%～85%，重播、漏播率高	合格指数 94%～98%，重播率小于等于 3%，漏播率小于等于 4%	合格指数 91%～97%，重播率小于等于 6%，漏播率小于等于 3%
种子损伤率	≥3%	≤0.5%	≤0.8%
兼用性	换排种轮，5～6 种作物	换排种盘即可，大于等于 10 种作物	换分配头或孔板，稻麦油通用
能耗与维护	最低，免真空	需真空风机，密封要求高	需中压风机，能耗中等
适用场景	低速、小地块、低成本	中高速、精量单粒、免耕	高速宽幅、条播/单粒两用

3　种床整理技术

精量排种技术的核心目标是通过精准播种实现作物种植高效高产，而种床整理是这一过程中不可或缺的重要环节。良好的种子-土壤接触条件、适宜的播种深度和均匀性能在提高机械化效率、排种精度和减少种子损失的同时促进种子的发芽率、出苗整齐度、植株生长一致性及最终产量。

3.1　秸秆清茬处理技术

保护性耕作模式中的秸秆还田环节能够改善土壤结构，培肥地力，并显著提高土壤微生物活性。然而，大量秸秆的存在也可能导致播种机堵塞，因此在免耕播种前通常需要进行清茬处理[60]。例如，美国 Precision Planting 和 John Deere 公司生产的免耕播种机配备被动轮盘式清秸拨茬装置，具有灵活性好、仿形效果好和适用性强等优势。

目前，清茬装置主要分为两类：主动式清茬机构和被动式清茬机构。主动式清茬机构适用于高速旋耕作业，但存在能耗高、动土量大、机器振动和噪声大、作业环境差以及安全性差等问题。被动式清茬装置多为破茬刀和清茬轮的组合装置，对秸秆覆盖量的适应性较差，难以有效解决秸秆覆盖量大时的堵塞问题[61]。针对以上问题，贾洪雷等[62]在康达农业机械有限公司生产的 2BMZF－2 型免耕播种机上，改进设计一种具有凹面结构的秸秆清茬机构，可有效清洁玉米秸秆粗大量多的种床、减少机具堵塞。

为解决我国南方稻-油或稻-稻-油水旱轮作的油菜种植模式下刀辊易缠草、秸秆埋覆性能差等问题，廖庆等[63]设计了驱动圆盘犁与双刃型旋耕刀组合式耕整机(图 12)进行清茬处理。

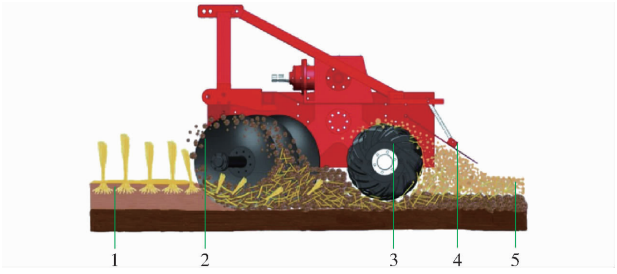


图 12 清茬处理示意图[63]

Fig. 12 Schematic of clear stubble treatment

1. 未耕地表 2. 驱动圆盘犁组 3. 双刃型旋耕装置 4. 平土拖板 5. 种床厢面

针对我国南方地区多作物的轮作模式，如水稻-油菜、水稻-小麦等，在联合播种前的清茬处理至关重要。为了提高播种质量和作业效率，需要在高效清茬装置的设计和秸秆处理方式的优化方面实现技术突破，实现对秸秆的深埋、覆盖等处理。

3.2 起垄整形技术

起垄整形控制技术是影响种子发芽率及幼苗长势的重要因素之一，通过合理的地形改造和土壤管理，为作物提供更好的生长环境。通过采用仿形平整拖板、耕深调节系统等技术提高厢面平整度，可以更好地控制播种深度，为种子萌发和幼苗生长创造良好的条件。国内外现有的起垄整形装置多由开沟部件和旋耕集土装置配合作业，先整理出预设沟型，再采用成型板或者整形辊整形[64-66]。国外代表机型如意大利 Hortech 公司设计的 Perfecta 整地机(图 13a)、德国 GRIMME 集团 GF 系列旋耕起垄机(图 13b)、日本 Kubota 公司超碎土成型旋转 RT 系列开沟起垄机(图 13c)和松山株式会社 BUR2210H-4L 型起垄机(图 13d)都具有较好的整形效果，已大规模推广使用。

随着对生产效率要求的不断提高，国内针对起垄整形装置的研究越来越广泛，多采用将开沟机与碎土部件结合，并搭配整形部件，以期一次作业完成垄体和排水畦沟的构建。肖文芳等[67]通过扣垡犁、旋耕刀、开沟犁和拖板组合实现稻茬田种床构建，林静等[68]开发了集灭茬、深松、旋耕、起垄和整形于一体的联合作业机。刘海等[69]采用犁铧开沟配合整形弧板增强沟墙稳定性。针对长江中下游稻油轮作区特殊工况，廖庆喜团队[70-71]设计了旋切式微垄种床装置(图 14a)，通过农机农艺融合，利用微垄栽培模式的微地形差异实现排水或集水，增强种床抵御



(a) Perfecta整地机 (b) GF系列旋耕起垄机

(c) RT系列开沟起垄机 (d) BUR2210H-4L型起垄机

图 13 国外起垄整形装置

Fig. 13 Foreign ridging shaping devices

不良气候的能力，优化种沟微环境，解决了强降雨导致的积水渍害幼苗根系问题。针对稻油轮作区土壤黏重、水稻收获留茬量高、油菜精量联合直播种床整理稳定性不足、平面厢面沥水效果差等问题，廖宜涛等[72]设计了具有旋耕灭茬、垄沟开设、厢面整形和播深控制等复合功能的凸垄厢面构建装置(图 14b)，有效解决了该区域联合播种难题。从区域与作物适应性来看，长江流域稻油轮作区面临油菜、小麦等作物播种时的厢面不平、沟形不稳等问题，相关研究通过旋耕起垄埋茬、封闭型开畦沟等工艺优化种床整理效果，北方地区强化单体仿形、播深调节等功能，以适应北方平原大面积耕作对高精度播种的需求。



(a) 微垄种床装置 (b) 凸垄厢面构建装置

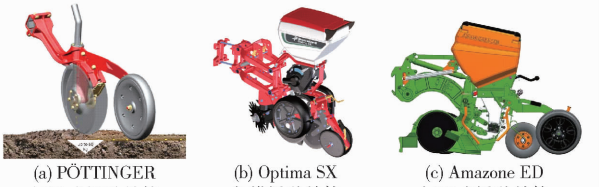
图 14 油菜联合直播机种床制备装置

Fig. 14 Seed bed preparation for oilseed rape combine seeder

3.3 种沟成型技术

适宜的种沟成型技术可以减少种子触土弹跳位移，提高种子分布的均匀性、播深一致性及出苗率。播种深度是由开沟器、覆土装置和仿形装置等因素共同决定。开沟器是影响开沟和播种深度的关键部件，常见粮油作物的开沟器主要有圆盘式、滑刀式、锄铲式、复合式等类型。为减少土壤扰动并提高沟形稳定性，李运通等[73]设计了圆盘滑刀式开沟器。赵淑红等[74]设计的锯齿式开沟器有效解决了免耕播种时的秸秆堵塞和垄向偏移问题。张志丰等[75]采用仿生设计方法对开沟器曲面进行优化设计，显著降低了犁地阻力并提升了开沟效率。研究者们主要通过仿生技术对开沟器优化设计[76-77]、减黏降阻处理及开发开沟、回土、镇压一体化的单体集合式播

种单体[78-79]，可提升开沟性能和播种深度。常见播种单体集合式有奥地利 PÖTTINGER 公司气送式播种单体（图 15a）、格兰 Optima SX 高速播种单体（图 15b）、Amazone ED 系列气吸式播种单体（图 15c）等，多采用圆盘式开沟器。



(a) PÖTTINGER 气送式播种单体　(b) Optima SX 免耕播种单体　(c) Amazone ED 气吸式播种单体

图 15　单体集合式播种单体

Fig. 15　Typical structures of modular seeders with integrated sowing units

针对秸秆覆盖地，交错型双圆盘开沟采用中心错位设计，可有效切断残茬和杂草，如洛阳市鑫乐公司研发的圆盘锯齿开沟器集成铡草和防缠绕功能，能一次性完成苗带处秸秆的铡切、灭茬、分茬、开沟及碎土工序。凸面双圆盘开沟器应用广泛，如大华宝来 2BFY－10 型油菜、小麦多功能精量播种机采用该结构，配合独立仿形功能和液压控制，可适应水田、旱田等多场景作业，同时通过电机驱动排种避免地轮打滑导致的缺苗问题。

当前，种沟成型技术仍面临土壤适应性不足、黏重土壤环境下的开沟器粘土、高速作业稳定性欠佳，如高速入土困难、排种性能不稳定、种子弹跳、回流堵塞、复杂场景适应能力有限等挑战。为此，需进一步加强农机-农艺-农情融合研究，结合不同作物农艺需求与田间实际条件，优化技术方案与装备设计。

3.4　播深稳定性控制技术

为解决播种作业过程中地表起伏造成的播种下压力波动、开沟深度稳定性差问题，现有精量播种机通常在播种单体上施加额外的下压力以保证播种深度稳定[80]。其下压力调节装置按照工作部件主要分为气动式[81]、液压式[82]和推杆式[83]3 种。仿形机构能够顺应地表的起伏变化，精准地开垦出均匀一致的种沟，主动仿形因其在调整播种单体压力的同时能够实时控制播种深度，正逐渐成为研究的重点[84]。为适应高速、高精度播种需求，学者通过系统反馈和下压力调整，增强开沟深度稳定性，避免压实，提升出苗率和产量[85-86]。

沟深的精确检测和控制是保证播种质量的关键，目前采用超声波、光学测距、压力和角度传感器等技术进行沟深检测[87]。此外，播深控制系统、液压技术和仿生技术应用，更有效地引导种子至预定播种位置，降低土壤阻力和粘性。

4　精量播种智能化技术分析

精量播种智能化技术是现代农业技术的重要组成部分，利用传感器、控制系统、数据驱动决策、物联网、人工智能、自动驾驶与导航技术等，实现种子的精准投放和田间管理，是提升我国粮油作物播种智能化水平的关键技术和精准农业发展方向（图 16）。近年来，由“单机智能”向“云-边-端”协同，多源感知提供实时数据，AI 大数据完成毫秒级决策，电驱/气力精量系统执行亚厘米级作业，正在支撑全国玉米、大豆、小麦等主要粮油作物大面积单产提升行动，如 5G＋北斗融合定位为高速播种机提供亚行级轨迹跟踪；电驱排种器配合 AI 变量控制，实现播种密度、深度、肥量的在线三重调控等。

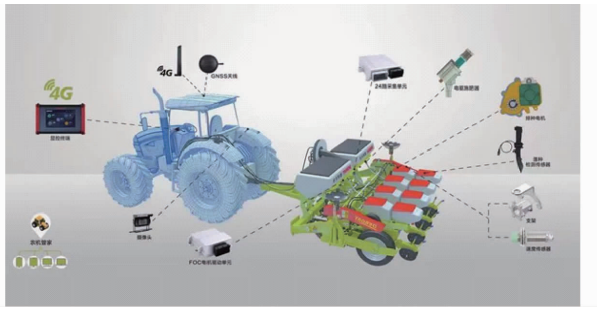


图 16　精量播种智能集成技术

Fig. 16　Integration technology of intelligent precision seeding

4.1　播种检测技术

播种检测技术是现代农业中用于精准监控播种过程的关键技术，通过集成传感、数据传输与分析等手段，实现对播种作业关键参数的实时监测与调控，以满足农业生产对播种精度的严格要求。例如，油菜种植中播量需控制在 4.5～6.0 kg/hm^2，小麦播种则要求播量为 150～225 kg/hm^2，播量差别较大。传统播种作业依赖人工经验调整，易导致播量偏差、漏播等问题。而播种检测技术通过实时数据反馈，可动态优化播种参数，有效解决“凭经验调整”的局限性。该技术的核心功能主要包括种子流的实时检测（图 17）、播种量与播种深度的精准监测、漏播情况的快速识别以及播种质量信息的全程追溯[88]。

在检测技术手段上，国内外已形成电容检测法、视觉检测法、压电检测法及光电检测法等多元化技术体系，这些技术各有优劣，例如，视觉检测法具有高精度和实时性，但成本较高；而光电检测法则具有结构简单、成本低廉的优点，但在复杂环境下可能受到干扰。有学者利用以上技术开发了针对玉米和水稻的播种质量监控系统[89-90]，以及针对油菜的播量监测与漏播检测技术[91]。然而，这些技术大多仍处于实验室研究与测试阶段，部分技术在粉尘、强光等

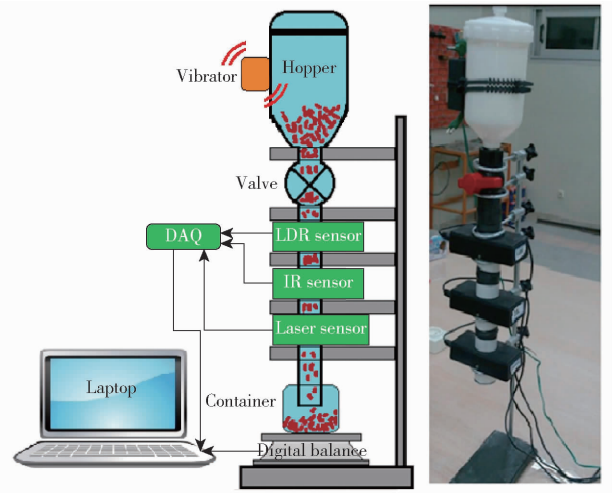


图 17 种子流监测[88]

Fig. 17 Seed flow monitoring

复杂环境下对作物播种检测的适用性仍有待提升。

4.2 粒距控制技术

粒距控制技术[92-93]对于提高作物产量、优化种植密度和减少种子浪费具有重要意义(图 18)。目前,播种机驱动方式主要分为地轮驱动、液压驱动和电机驱动 3 种类型。地轮驱动主要借助链条或齿轮将地轮动力传递给排种器,存在滑移率高、土壤适应性差等问题,不易进行粒距精准控制。

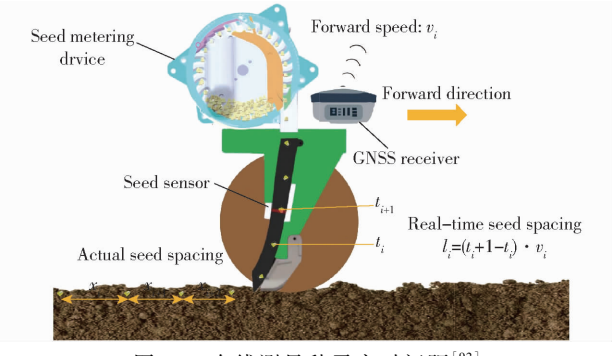


图 18 在线测量种子实时间距[92]

Fig. 18 Online measurement of real-time seed spacing

为解决以上问题,国内学者研发了以无刷直流电机或液压马达为驱动源的电驱排种系统,以雷达、GPS 和北斗导航系统为测速单元,以 STM32 单片机为控制核心的粒距控制系统[94-96]。付卫强[97]基于 GNSS/IMU 组合测速的玉米播种电液驱动控制方法,使粒距合格指数提高 8.75%。KOLEY 等[98]通过雷达测速精确匹配种子计量装置速度与播种机前进速度,显著提高播种机运行质量。丁友强等[99]设计了基于 GPS 测速的电驱式玉米精量播种机控制系统,利用 Android 手机终端设置参数,GPS 接收器采集速度信息,主控制器实时调节排种器驱动电机转速,实现精量播种。由此可知,作业速度检测是关键,常见的测速方式主要包括霍尔传感器测速、编码器测速、雷达测速和卫星定位系统测速[100-101]。研究者以实时运行速度和目标种子间距为输入,以驱动电机转速为输出,驱动排种轴获得精准播种,具有动力传输更稳定、种植精度和可靠性更高的优点[102-103]。

采用电驱播种技术和卫星定位技术,实现穴距的精确调整以及种子的三维定位(坐标与深度),从而构建智能决策播种方案,进一步提高了播种精度和粒距均匀性。基于全球卫星导航系统(GNSS)的精准定位是电动播种机系统(ESS)的关键,利用卫星数据精确控制电动机,确保种子准确放置和分布,因其高效性而被广泛应用。

4.3 变量播种技术

变量播种技术(VRS)是一种依据土壤肥力、光照强度等环境因素的空间异质性来调整作物播种量,并依靠软件生成的处方图进行精确播种,从而实现作物生长环境与播种量合理精准匹配的精细农业技术[104]。Ag Leader 公司研究表明,采用变量播种技术可使玉米每公顷增产 943 kg[6],可见变量播种技术不仅能够帮助粮油作物增加产量,还可节约良种。变量播种技术主要依赖于先进的定位系统(如 GPS、北斗)、实时传感技术和智能控制系统。通过定位系统识别设定的田间区域,实时传感技术采集机具行进速度、作物生长状态等影响因素,智能控制系统则根据这些信息做出相应的判断操作,实现播种量的精确调节。

国外开展了基于管理区和基于模型的播量决策方法研究,且研发了多种播量决策平台,而国内对于播量决策方法的研究鲜有报道。国外研发了多种变量播种装备且市场应用比例逐年增加。国内主要集中在电驱排种方面,对于变量播种装备的研究较少。播量决策是变量播种过程中的核心环节,决策的合理与否直接影响变量播种作业效果。国外对于变量播种决策方法的研究相对较多,国内研究较少。依据作业区域进行播量的精准调控是实施变量播种的最终环节,播量调控效果直接决定播种作业质量。为实现播种作业过程中实时快速精准的播量调控,国内外科研机构和农机企业开展了对变量播种控制系统的研究。如美国 Precison Planting 公司基于 20/20 SeedSense 控制器开发了变量播种控制系统。国内 HE 等[105]在电驱式玉米精量排种控制系统的基础上,提出了基于 Android 的处方图构建方法,建立了变量播种控制系统决策模型,设计了基于处方图的变量播种控制系统。

在播量精准调控方面,国外凭借技术优势研制了多种不同架构的变量播种控制系统并投入市场,得到一定规模的应用。我国智能播种作业装备的研

发起步较晚，在变量作业相关的核心技术领域，如播量决策技术和处方图构建技术方面，研究相对较少，主要集中在电驱式精量播种控制系统的研究上，主要从作业速度检测、排种器驱动方式以及控制系统架构优化等方面对电驱播种控制系统展开研究，涉及变量播种核心技术较少。

5　粮油作物播种技术难点分析与发展展望

随着现代农业生产规模化、精准化、无人化发展，高速、耕播集成和智能化的高性能播种装备已成为研究重点与难点。近年来，我国主要粮油作物机械化生产进程加快，但精量播种技术与国外发达国家仍有差距。受轮作、套行种植制度影响，加之部分区域耕地零散、土壤黏重板结、地块狭小及稻茬地等因素，国外大型播种机械在我国推广应用受限。因此，需研发适配我国粮油种植环境的播种机械，重点突破排种、起垄整形、开种沟等播种关键技术，并融合农业信息、导航、雷达测速等智能化技术，以实现精准高效种植作业。

5.1　技术难点

（1）种植制度与耕地条件带来的适应性不足。我国粮油作物普遍采用轮作如麦豆轮作或套行种植如玉米套种大豆，不同作物的播种行距、深度、密度要求差异显著，现有播种机械难以兼顾多作物、多模式的精准作业需求。套种场景中，需在已有作物行间完成播种，机械对行精度要求高，易出现漏播或伤苗问题。区域耕地零散、土壤黏重板结、稻茬地残留秸秆量大，易导致开沟器堵塞、种沟成型差，影响种子覆土均匀性；沙质土壤则存在播种深度不稳定的问题。土壤工作部件面临通过性不足的问题，需适应不同土壤特性，对土壤工作部件的结构和材料进行设计与优化研究至关重要。

（2）排种器性能与种子适应性不足。我国粮油作物种植区域广泛、地形多样，种子品种繁多且物理特性差异大，耕作制度复杂，增加了排种器设计的复杂性。传统排种器，如窝眼轮、型孔轮对油菜、芝麻等小粒种子，或大豆、玉米等大粒种子的兼容性差，易出现漏播、重播或种子破损。精量排种需根据种子形状（如椭圆、扁平）、粒径差异动态调整参数，但现有机械自动化调节能力不足。

（3）播种机具通用性与多功能性较差。油菜、小麦、大豆等粮油作物的播种农艺差异大，如油菜需浅播、大豆需深播，现有机械往往仅针对单一作物设计，换作其他作物时需大量人工调试，甚至更换核心部件。播种与施肥、秸秆处理等环节的机械协同性不足。难以实现“耕-播”一体化作业，导致作业效率低、能耗高。

5.2　发展趋势

（1）播种机向高速宽幅、多功能集成化与模块化发展。我国幅员辽阔，地形地貌多样，在北方地区地块平坦、土壤墒情好，重点开发宽幅高速的高效播种机；在南方多熟制区域，农时紧张且水旱轮作田块面积适中，通过农机农艺融合，集成起垄、开沟、播种、覆土、施肥等多道工序的耕播一体化高效播种机开发成为趋势。而面向丘陵地带，开发轻便型、模块化的精量播种机具，以适应不同地形和种植模式。

（2）排种器向兼用性和可靠性发展。传统机具改进依赖经验设计，针对性与标准化不足，直接影响播种质量与适应性。因此，需从 3 方面突破：优化播种机结构参数，研究排种器对种子多样性的适应性，强化种子互换性以满足多样化需求；提升排种器性能、精度及适应性，构建精量播种协同增效体系；加强高性能精量排种基础理论研究，构建兼用性、普适性与可靠性强的播种方式及控制策略。

（3）播种技术向电驱、数字、智能化发展。排种系统将向集种子流状态监测，排种信号处理、传输、控制、存储和管理于一体的可视化综合控制系统发展。开发基于北斗、雷达等传感器的随速播种系统成为趋势，此外，需开展智能测控系统研究，以解决排种器漏播、重播、堵塞等问题，提升播种机作业性能和机收操作的便利性。

参　考　文　献

[1] SUN Jiaze, ZHANG Yan, ZHANG Yuting, et al. Precision seeding compensation and positioning based on multisensors[J]. Sensors, 2022, 22(19): 7228 - 7228.

[2] LIU Yingxia, HEUVELINK G B M, BAI Zhanguo, et al. Analysis of spatio-temporal variation of crop yield in China using stepwise multiple linear regression [J]. Field Crops Research, 2021, 264:108098.

[3] ZHANG Qingsong, LIAO Haoling, YANG Honghong, et al. Measuring carbon emissions from green and low-carbon full-life-cycle feeding in large-scale pig production systems: a case study from Shaanxi Province[J]. Agriculture, 2023, 13(12): 2281.

[4] TANG Han, XU Fudong, XU Changsu, et al. The influence of a seed drop tube of the inside-filling air-blowing precision seed-metering device on seeding quality[J]. Computers and Electronics in Agriculture. 2023, 204: 107555.

[5] TANG Han, XU Changsu, WANG Ziming, et al. Optimized design, monitoring system development and experiment for a long-

belt finger-clip precision corn seed metering device[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 814747.
[6] 杨丽,颜丙新,张东兴,等. 玉米精量播种技术研究进展[J]. 农业机械学报,2016,47(11):38-48.
YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38-48. (in Chinese)
[7] 廖宜涛,施彬彬,王传奇,等. 南方丘陵山地油菜和小麦播种机械化发展现状与趋势[J]. 农业工程学报,2025,41(1):12-26.
LIAO Yitao, SHI Binbin, WANG Chuanqi, et al. Development status and trend of mechanization of rapeseed and wheatsowing in hilly and mountainous region of southern China[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(1): 12-26. (in Chinese)
[8] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2024.
[9] 郑娟,廖宜涛,廖庆喜,等. 基于 TRIZ-AD 的集成式油菜气力精量排种装置设计[J]. 农业工程学报,2023,39(14):49-59.
ZHENG Juan, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Design of the integrated precision pneumatic seed metering device for rapeseed using TRIZ-AD[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(14): 49-59. (in Chinese)
[10] 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 Juan, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Trend analysis and prospects of seed metering technologies[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(24): 1-13. (in Chinese)
[11] 赵鹏飞,邓敏,王孟盛,等. 气力斜盘式小麦宽苗带匀播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(7):38-47.
ZHAO Pengfei, DENG Min, WANG Mengsheng, et al. Design and experiment of pneumatic swash plate wheat wide-seedling-belt uniform sowing device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 38-47. (in Chinese)
[12] 罗海峰,刘光辉,吴明亮,等. 外凸扰种仿形型孔气吸式水稻芽种精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(3):227-239.
LUO Haifeng, LIU Guanghui, WU Mingliang, et al. Design and experiment of precision seed metering device for rice bud seed with protruding disturbing species[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 227-239. (in Chinese)
[13] 王韦韦,宋岚洲,石文兵,等. 气吸双行错置式玉米密植精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(3):53-63.
WANG Weiwei, SONG Lanzhou, SHI Wenbing, et al. Design and experiment of air-suction double-row staggered precision seed metering device for maize dense planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 53-63. (in Chinese)
[14] 廖宜涛,刘嘉诚,廖庆喜,等. 正负气压组合滚轮式油菜精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(5):63-76.
LIAO Yitao, LIU Jiacheng, LIAO Qingxi, et al. Design and test of positive and negative pressure combination roller type precision seed-metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 63-76. (in Chinese)
[15] 欧阳安,王明磊,崔涛,等. 粮食作物生产装备应用现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报,2024,45(10):298-304.
OUYANG An, WANG Minglei, CUI Tao, et al. Application status and development trend of mechanized equipment for grain crop production[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(10): 298-304. (in Chinese)
[16] 李春燕. 基于专利信息分析的技术生命周期判断方法[J]. 现代情报,2012,32(2):98-101.
LI Chunyan. The distinguishing methods of technology lifecycle based on patent analysis[J]. Journal of Modern Information, 2012, 32(2): 98-101. (in Chinese)
[17] ZHAO Jiale, ZHANG Chengliang, WEI Yanpeng, et al. Design and testing of planting unit for rice dry-direct-seeding planter in cold region[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2023, 16(4): 76-84.
[18] QIAO Xindan, LIU Dequan, WANG Xiaolei, et al. Design and experiment of double-row seed-metering device for buckwheat large ridges[J]. Agriculture, 2023, 13: 1953.
[19] 周海波,梁秋艳,魏天路,等. 双级振动精密排种器外槽轮式定量供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(增刊1):57-61,83.
ZHOU Haibo, LIANG Qiuyan, WEI Tianlu, et al. Design and experiment of quantitative seed supply device with fluted roller used for double-vibrating precision seed meter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.1):57-61, 83. (in Chinese)
[20] 和贤桃,齐浩君,张东兴,等. 丘坡地水平圆盘式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(1):151-163.
HE Xiantao, QI Haojun, ZHANG Dongxing, et al. Design and test of horizontal disc maize precision seed metering device on hilly land[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 151-163. (in Chinese)
[21] 耿端阳,张明源,何珂,等. 倾斜双圆环型孔圆盘式玉米排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(1):68-76.
GENG Duanyang, ZHANG Mingyuan, HE Ke, et al. Design and experiment of declined disc plate with double ring corn metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 68-76. (in Chinese)
[22] 崔清亮,侯华铭,郑德聪,等. 倾斜圆盘式谷子精少量排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(12):17-23.
CUI Qingliang, HOU Huaming, ZHENG Decong, et al. Design and test of tilt dise-type fine and small-amount seed metering device for foxtail millet[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12): 17-23. (in Chinese)
[23] 刘忠军,刘立晶,杨学军,等. 指夹式玉米免耕精量播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(增刊2):1-6.
LIU Zhongjun, LIU Lijing, YANG Xuejun, et al. Design and experiment of no-till precision planter for corn[J]. Transactions

of the CSAE, 2016, 32(Supp.2): 1 – 6. (in Chinese)
[24] 张红梅,张晨明,李志杰,等. 基于 EDEM – RecurDyn 的玉米指夹式排种器振动特性分析与优化[J]. 农业机械学报, 2023,54(增刊 1):36 – 46.
ZHANG Hongmei, ZHANG Chenming, Ll Zhijie, et al. Simulation analysis and optimization of vibration characteristics of corn finger clip seeding devicebased on EDEM – RecurDyn coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp.1): 36 – 46. (in Chinese)
[25] 廖庆喜,沈文惠,王磊,等. 油菜高速机械离心式集排器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(7):154 – 167.
LIAO Qingxi, SHEN Wenhui, WANG Lei, et al. Design and experiment of high-speed mechanical centrifugal centralized seed metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 154 – 167. (in Chinese)
[26] 颜丙新, 张东兴, 崔涛, 等. 排种盘和负压腔室同步旋转气吸式玉米精量排种器设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 15 – 23.
YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, CUI Tao, et al. Design of pneumatic maize precision seed-metering device with synchronous rotating seed plate and vacuum chamber[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 15 – 23. (in Chinese)
[27] 陈玉龙, 刘泽琪, 韩杰, 等. 气吸式排种器扁平种子吸附姿态调节机构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(23): 1 – 11.
CHEN Yulong, LIU Zeqi, HAN Jie, et al. Design and experiments of the flat seed-adsorbing posture adjustment mechanism for the air-suction metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(23): 1 – 11. (in Chinese)
[28] 李玉环, 杨丽, 张东兴, 等. 豆类作物一器双行气吸式高速精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 61 – 73.
LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with single seed-metering plate for double-row[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 61 – 73. (in Chinese)
[29] 任定林,刘涛,夏守浩, 等. 玉米大豆兼用腔盘组合孔式排种盘设计与充种性能试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 73 – 89.
REN Dinglin, LIU Tao, XlA Shouhao, et al. Design and seed filling performance test of cavity plate combination hole type seeding plate for corn and soybean[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 73 – 89. (in Chinese)
[30] 赵晓顺, 于华丽, 马跃进, 等. 负压式小麦精量排种器参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 11 – 18.
ZHAO Xiaoshun, YU Huali, MA Yuejin, et al. Parameter optimization and experiment of negative pressure precisionseed-metering device for wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(11): 11 – 18. (in Chinese)
[31] 赵金, 张晋国, 粘永康, 等. 圆管锥面缝隙式小麦气吸播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1): 34 – 42.
ZHAO Jin, ZHANG Jinguo, NlAN Yongkang, et al. Design and test of wheat seeder with suction and metering device with cone surface of circular tube[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.1): 34 – 42. (in Chinese)
[32] 柏文杰, 李颖, 于华丽, 等. 正负压式精量排种器设计与仿真优化[J]. 河北农业大学学报, 2022, 45(4): 115 – 122.
BAl Wenjie, Ll Ying, YU Huali, et al. Design and simulation optimization of positive and negative pressure seed-metering device[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2022, 45(4): 115 – 122. (in Chinese)
[33] ZHAO Xiaoshun, BAI Wenjie, LI Jincai, et al. Study on positive-negative pressure seed metering device for wide-seedling-strip-seeding[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(6): 124 – 133.
[34] 程修沛, 卢彩云, 孟志军, 等. 气吸型孔组合式小麦精密排种器设计与参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 1 – 9.
CHENG Xiupei, LU Caiyun, MENG Zhijun, et al. Design and parameter optimization on wheat precision seed meter with combination of pneumatic and type hole[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 1 – 9. (in Chinese)
[35] 王宝龙, 王在满, 罗锡文, 等. 杂交稻气力滚筒集排式排种器楔形搅种装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 1 – 8.
WANG Baolong, WANG Zaiman, LUO Xiwen, et al. Design and experiment of wedge churning device for pneumatic cylinder-type seed metering device for hybrid rice[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(23): 1 – 8. (in Chinese)
[36] 臧英, 何思禹, 王在满, 等. 气力式包衣杂交稻单粒排种器研制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 10 – 18.
ZANG Ying, HE Siyu, WANG Zaiman, et al. Design of pneumatic single seed metering device for coated hybrid rice[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(1): 10 – 18. (in Chinese)
[37] 朱佳骏, 刘军, 傅永斌, 等. 气吸式谷子穴播排种器的设计与试验研究[J]. 河北农业大学学报, 2023, 46(5): 111 – 117.
ZHU Jiajun, LIU Jun, FU Yongbin, et al. Design and experiment of a suction type millet precision seed meter[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2023, 46(5): 111 – 117. (in Chinese)
[38] 王芳, 吕冰, 王洪明, 等. 气吸式谷子排种装置吸种孔的结构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 30 – 36.
WANG Fang, LÜ Bing, WANG Hongming, et al. Structural design and test of seed-suction hole of air-sucking seed-metering

device for millet[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(8): 30 - 36. (in Chinese)

[39] YATSKUL A, LEMIERE J. Establishing the conveying parameters required for the air-seeders[J]. Biosystems Engineering, 2018, 166(2): 1 - 12.

[40] MUDARISOV S, BADRETDINOV I, RAKHIMOV Z, et al. Numerical simulation of two-phase "air-seed" flow in the distribution system of the grain seeder [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 168: 105151.

[41] HU Hongji, ZHOU Zhonglin, WU Wencheng, et al. Distribution characteristics and parameter optimisation of an air-assisted centralized seed-metering device for rapeseed using a CFD - DEM coupled simulation[J]. Biosystems Engineering, 2021, 208: 246 - 259.

[42] 王磊, 廖宜涛, 万星宇, 等. 油麦兼用型气送式集排器混种部件设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 68 - 79.
WANG Lei, LIAO Yitao, WAN Xingyu, et al. Design and test on mixing component of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 68 - 79. (in Chinese)

[43] 雷小龙, 廖宜涛, 丛锦玲, 等. 油菜小麦兼用气送式直播机集排器参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12):16 - 26.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, CONG Jinling, et al. Parameter optimization and experiment of air-assisted centralized seed-metering device of direct seeding machine for rape and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 16 - 26. (in Chinese)

[44] LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LIAO Qingxi. Simulation of seed motion in seed feeding device with DEM - CFD coupling approach for rapeseed and wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 131: 29 - 39.

[45] WANG Lei, CONG Jinling, REN Ning, et al. Influence of surface slope on the seeding performance of air-assisted centralized metering device for rapeseed based on numerical simulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 218: 108734.

[46] WANG Yingbo, HE Mengzhu, YAN Qiuhan, et al. DEM - CFD simulation and seed orientation evaluation of a self-suction wheat shooting device[J]. Powder Technology, 2023, 427: 118746.

[47] 王宝山,王磊,廖宜涛,等. 小粒径种子精量穴播集排器型孔轮设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2022,53(11): 64 - 75,119.
WANG Baoshan, WANG Lei, LIAO Yitao, et al. Design and test of seeding wheels of precision hole-seeding centralized metering device for small particle size seeds [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 64 - 75,119. (in Chinese)

[48] 廖庆喜,曹梅,王宝山,等. 齿勺气送式芝麻精量集排器设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(8):65 - 76.
LlAO Qingxi, CAO Mei, WANG Baoshan, et al. Design and experiment of slotted-tooth spoon hole and air-assisted precision centralized metering device for sesame [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 65 - 76. (in Chinese)

[49] 曹秀英,廖宜涛,廖庆喜,等. 油菜离心式精量集排器枝状阀式分流装置设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 77 - 84.
CAO Xiuying, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment on valve-branch distributor of centrifugal precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 77 - 84. (in Chinese)

[50] 雷小龙,廖宜涛,李兆东,等. 油麦兼用型气送式集排器供种装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(20):10 - 18.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Design and experiment of seed feeding device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 10 - 18. (in Chinese)

[51] 雷小龙,廖宜涛,李兆东,等. 油麦兼用气送式集排器搅种装置设计及充种性能试验[J]. 农业工程学报,2016,32(18): 26 - 34.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Design of seed churning device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat and experiment on seed filling performance[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(18): 26 - 34. (in Chinese)

[52] 施彬彬,王传奇,陈雪儿,等. 油麦兼用气送式集排器立槽式供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(9): 102 - 115.
SHI Binbin, WAN Chuanqi, CHEN Xueer, et al. Design and experiment of vertical groove seed feeding device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 102 - 115. (in Chinese)

[53] 李晓冉,廖庆喜,王磊,等. 稻麦油兼用高速气送式集排器型孔轮设计与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(14):35 - 48.
LI Xiaoran, LIAO Qingxi, WANG Lei, et al. Design and experiments of the type-hole wheel with high-speed air-assisted centralized metering device for rice, wheat and rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(14): 35 - 48. (in Chinese)

[54] 张开兴,李金凤,宋正河,等. 变粒径双圆盘气吸式精量排种器优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(6):52 - 63.
ZHANG Kaixing, LI Jinfeng, SONG Zhenghe, et al. Optimum design and test of variable diameter double disc air suction

precision seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 52 – 63. (in Chinese)
[55] 韩丹丹,何彬,周毅,等. 气吸式密植精量排种器的设计与试验[J]. 华中农业大学学报,2023,42(1):237 – 247.
HAN Dandan, HE Bin, ZHOU Yi, et al. Design and experiment of air suction type dense planting precision seed metering device[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(1): 237 – 247. (in Chinese)
[56] 杜俊,夏俊芳,张居敏,等. 稻麦兼用型气力滚筒式精量排种器设计与试验[J]. 华中农业大学学报,2020,39(3):127 – 134.
DU Jun, XIA Junfang, ZHANG Jumin, et al. Design and experiment of pneumatic drum type metering device for rice and wheat[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(3): 127 – 134. (in Chinese)
[57] 曹梅. 小粒径种子兼用集排播种单体设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学, 2023.
CAO Mei. Design and experiment of multi-purpose centralized precision seeding unit for small particle size seeds[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023. (in Chinese)
[58] 邢鹤琛,廖庆喜,王磊,等. 油麦兼用斜锥型孔轮式集排器设计与试验 [J]. 华中农业大学学报, 2019, 38 (5): 143 – 151.
XING Hechen, LIAO Qingxi, WANG Lei, et al. Design and test of oblique taper hole-type wheel centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(5): 143 – 151. (in Chinese)
[59] 雷小龙. 油麦兼用型气送式集排器设计及其工作机理[D]. 武汉:华中农业大学,2017.
LEI Xiaolong. Design and working mechanism of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017. (in Chinese)
[60] 姚文燕,赵殿报,苗河泉,等. 免耕播种机浅旋清茬斜置式防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(8):42 – 52.
YAO Wenyan, ZHAO Dianbao, MIAO Hequan, et al. Design and experiment of oblique anti-blocking device for no-tillage planter with shallow plowing stubble clearing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 42 – 52. (in Chinese)
[61] 陈海涛,高伟,王星,等. 玉豆带状复合种植免耕精量播种覆秸一体机设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(4):202 – 212,223.
CHEN Haitao, GAO Wei, WANG Xing, et al. Design and experiment of integrated machine for no-till precision seeding and straw mulching for corn and soybean strip compound planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(4):202 – 212,223. (in Chinese)
[62] 贾洪雷,刘行,余海波,等. 免耕播种机凹面爪式清茬机构仿真与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(11):68 – 77.
JIA Honglei, LIU Hang, YU Haibo, et al. Simulation and experiment on stubble clearance mechanism with concave claw-type for no-tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 68 – 77. (in Chinese)
[63] 廖庆喜,谢昊明,张青松,等. 驱动圆盘犁与双刃型旋耕刀组合式耕整机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(7): 99 – 110,195.
LIAO Qingxi, XIE Haoming, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of driven disc plow and double-edged rotary tillage combined tiller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 99 – 110, 195. (in Chinese)
[64] 王星,张颖,付闯,等. 大型净作精播机配套折叠式种床整备装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(4):174 – 185,240.
WANG Xing, ZHANG Ying, FU Chuang, et al. Design and experiment of front-folding straw clearing and blocking device for wide conventional planters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(4):174 – 185,240. (in Chinese)
[65] 侯锡彬,崔舒然,李明森,等. 1ZLZ – 300 型全幅复式种床整地机设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊 1): 125 – 134.
HOU Xibin, CUI Shuran, LI Mingsen, et al. Design and experiment of 1ZLZ – 300 full width compound seed bed preparation machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(Supp. 1):125 – 134. (in Chinese)
[66] 廖庆喜,张季钦,张青松,等. 平行犁组翻扣与旋耕组合式油菜种床制备装置研究[J]. 农业机械学报,2024,55(10): 190 – 201.
LIAO Qingxi, ZHANG Jiqin, ZHANG Qingsong, et al. Design and test of rapeseed seed bed preparation device combined with parallel plow group turnbuckle and rotary tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024, 55(10):190 – 201. (in Chinese)
[67] 肖文芳,舒彩霞,廖庆喜,等. 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[J]. 华中农业大学学报,2019, 38(6):139 – 146.
XIAO Wenfang, SHU Caixia, LIAO Qingxi, et al. Design and test of tillage machine combined with plough and rotary for managing seedbed before planting rapeseed by burying of rice straw incorporated into soil [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(6): 139 – 146. (in Chinese)
[68] 林静,张桐嘉,陈彬,等. 深松灭茬旋耕起垄联合作业机设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(2):28 – 39.
LIN Jing, ZHANG Tongjia, CHEN Bin, et al. Design and test of subsoiling rotary rilling and rilling combined operating machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 28 – 39. (in Chinese)
[69] 刘海,张青松,廖宜涛,等. 小白菜复式播种机犁旋辊压驳岸型种床起垄装置研究[J]. 农业机械学报,2021,52(11):

40 – 48,77.
LIU Hai, ZHANG Qingsong, LIAO Yitao, et al. Design of plow-rotary and roll-forming revetmentstyle seed bed ridging device of combined precision seeder for brassica chinensis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 40 – 48, 77. (in Chinese)

[70] 李蒙良,王立宗,廖庆喜,等. 油菜机直播微垄种床制备过程旋耕后土壤离散元参数标定[J]. 农业工程学报, 2023, 39(20): 10 – 19.
LI Mengliang, WANG Lizong, LIAO Qingxi, et al. Calibration of rototilled soil discrete element parameters after rotary tillage in the preparation process of rapeseed mechanized direct seeding micro-ridge seed bed[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(20): 10 – 19. (in Chinese)

[71] 李蒙良,廖庆喜,裴立民,等. 油菜直播机旋切式微垄种床制备装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023, 54(5): 47 – 58,90.
LI Mengliang, LIAO Qingxi, PEI Limin, et al. Design and experiment of rotary-cut micro-ridge seedbed device for rapeseed direct seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 47 – 58, 90. (in Chinese)

[72] 廖宜涛,武安阳,秦永豪,等. 油菜精量联合直播机凸垄厢面构建装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(12): 121 – 133.
LIAO Yitao, WU Anyang, QIN Yonghao, et al. Design and experiment of convex ridge surface shaping device for rapeseed direct seeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 121 – 133. (in Chinese)

[73] 李运通,郑娟,张百祥,等. 圆盘滑刀式小粒径蔬菜窄行密植播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(1): 197 – 209.
LI Yuntong, ZHENG Juan, ZHANG Baixiang, et al. Design and testing of a disc-sliding knife narrow-row precision seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 197 – 209. (in Chinese)

[74] 赵淑红,杨罗罗,张鑫,等.大豆垄上双行免耕播种机锯齿式开沟器设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(1):74 – 84.
ZHAO Shuhong, YANG Luoluo, ZHANG Xin, et al. Design and experiment of zigzag opener for double-row no-tillage seeding on soybean ridge[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 74 – 84. (in Chinese)

[75] 张志丰,张峻霞,张琰.基于仿生设计方法的开沟器优化设计[J].计算机集成制造系统,2022,28(4):1143 – 1149.
ZHANG Zhifeng, ZHANG Junxia, ZHANG Yan. Optimization design of furrow opener based on bionics design[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(4): 1143 – 1149. (in Chinese)

[76] 贾洪雷,郑嘉鑫,袁洪方,等.仿形滑刀式开沟器设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(4):16 – 24.
JIA Honglei, ZHENG Jiaxin, YUAN Hongfang, et al. Design and experiment of profiling sliding-knife opener [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(4):16 – 24. (in Chinese)

[77] 刘瑞,李衍军,刘春晓,等.铲式宽苗带燕麦播种开沟器设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(9):89 – 96.
LIU Rui, LI Yanjun, LIU Chunxiao, et al. Design and experiment of shovel type wide seedling belt oat seeding furrow opener [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 89 – 96. (in Chinese)

[78] 赵淑红,谭贺文,王加一,等.多功能集成式播种开沟器的设计与试验[J].农业工程学报,2018,34(11):58 – 67.
ZHAO Shuhong, TAN Hewen, WANG Jiayi, et al. Design and experiment of multifunctional integrated seeding opener[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11): 58 – 67. (in Chinese)

[79] 贾洪雷,郑健,赵佳乐,等.仿蚯蚓运动多功能开沟器设计及参数优化[J].农业工程学报,2018,34(12):62 – 71.
JIA Honglei, ZHENG Jian, ZHAO Jiale, et al. Design and parameter optimization of earthworm-like multi-function opener [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 62 – 71. (in Chinese)

[80] 曹鑫鹏,王晨,彭晨,等.气动式播种下压力调节装置优化设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(5):257 – 267.
CAO Xinpeng, WANG Chen, PENG Chen, et al. Optimization design and experiment of pneumatic seeding downforce regulating device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 34(5): 257 – 267. (in Chinese)

[81] 高原源,王秀,杨硕,等. 播种机气动式下压力控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(7):19 – 29,83.
GAO Yuanyuan,WANG Xiu, YANG Shuo, et al. Design and test of pneumatic downforce control system for planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 19 – 29, 83. (in Chinese)

[82] ZHOU Liming, MA Yihua, ZHOU Haiyan, et al. Design and test of sowing depth measurement and control system for no-till corn seeder based on integrated electro-hydraulic drive[J]. Applied Sciences, 2023, 13(10): 5823.

[83] 赵乃辰. 基于多传感器数据融合的播深检测与控制系统研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学,2023.
ZHAO Naichen. Research on seeding depth detection and control system based on multi-sensor data fusion[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[84] YANG R, WANG Z, SHANG S, et al. The design and experimentation of EVPlVs – PlD harvesters' header height control system based on sensor ground profiling monitoring[J]. Agriculture, 2022, 12(2): 282.

[85] JING H R, ZHANG D X, WANG Y X, et al. Development and performance evaluation of an electro-hydraulic downforce control system for planter row unit[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 172: 105073.

[86] 付作立,宫志超,褚青昕,等.高速免耕玉米播种单体镇压力主动调控系统设计与试验[J].农业机械学报,2024, 55(11):273 – 284.

FU Zuoli, GONG Zhichao, CHU Qingxin, et al. Design and test of active control system for soil compaction of high speed no-tillage maize planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11): 273 – 284. (in Chinese)

[87] LI H, HE J, WANG C, et al. Research progress on the development of the planter unit for furrowing control and the depth measurement technology[J]. Applied Sciences, 2023, 13(21): 2076 – 3417.

[88] KARIMI H, NAVID H, BESHARATI B, et al. A practical approach to comparative design of non-contact sensing techniques for seed flow rate detection[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 142: 165 – 172.

[89] 王在满,裴娟,何杰,等. 水稻精量穴直播机播量监测系统研制[J]. 农业工程学报,2020,36(10):9 – 16.
WANG Zaiman, PEI Juan, HE Jie, et al. Development of the sowing rate monitoring system for precision rice hill-drop drilling machine[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(10): 9 – 16. (in Chinese)

[90] 和贤桃,丁友强,张东兴,等. 玉米精量排种器电驱 PID 控制系统设计与性能评价[J]. 农业工程学报,2017,33(17): 28 – 33.
HE Xiantao, DING Youqiang, ZHANG Dongxing, et al. Design and evaluation of PID electronic control system for seedmeters for maize precision planting[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(17): 28 – 33. (in Chinese)

[91] 丁幼春,王凯阳,刘晓东,等. 中小粒径种子播种检测技术研究进展 [J]. 农业工程学报, 2021, 37(8): 30 – 41.
DING Youchun, WANG Kaiyang, LIU Xiaodong, et al. Research progress of seeding detection technology for medium and smallsize seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(8): 30 – 41. (in Chinese)

[92] XIE Chunji, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. A real-time seed spacing wireless remote online measurement system: investigating factors influencing measurement accuracy, determining the optimal installation position for seed sensors to improve measurement precision [J]. Measurement, 2025, 244: 116534 – 116534.

[93] XIE Chunji, ZHANG Dongxing , YANG Li, et al. Research and analysis on the influence of different speed measurement methods on the monitoring accuracy of seed spacing[J]. Agriculture, 2023, 13 (1): 128.

[94] 杜兆辉,和贤桃,杨丽,等. 玉米精准变量播种技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报,2023,39(9):1 – 16.
DU Zhaohui, HE Xiantao, YANG Li, et al. Research progress on precision variable-rate seedingtechnology and equipment for maize[J] . Transactions of the CSAE, 2023, 39(9): 1 – 16. (in Chinese)

[95] WANG Yunxia, ZHANG Wenyi, QI Bing, et al. Research on control system of corn planter based on radar speed measurement [J]. Agronomy, 2024, 14(5): 1043.

[96] 徐琪蒙,李洪文,何进,等. 小麦播种自走式农用移动平台设计与试验[J]. 农业工程学报,2021,37(14):1 – 11.
XU Qimeng, LI Hongwen, HE Jin, et al. Design and experiment of the self-propelled agricultural mobile platform for wheat seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(14): 1 – 11. (in Chinese)

[97] 付卫强. 玉米免耕精量播种质量控制关键技术研究[D]. 北京:中国农业大学, 2019.
FU Weiqiang. Study on key technology of quality control for maize no-tillage drilling machinery [D]. Beijing: China Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[98] KOLEY S, BHATT Y C, SINGH G B, et al. Development of electronic metering mechanism for precision planting of seeds [J]. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 2017, 6: 3481 – 3487.

[99] 丁友强,杨丽,张东兴,等. 基于 GPS 测速的电驱式玉米精量播种机控制系统[J]. 农业机械学报,2018,49(8):42 – 49.
DING Youqiang, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Control system of motor-driving maize precision planter based on gps speed measurement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 42 – 49. (in Chinese)

[100] 施彬彬,郑娟,王磊,等. 小粒径种子气力自适应排种系统设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2023, 54 (8): 30 – 41.
SHI Binbin, ZHENG Juan, WANG Lei, et al. Design and experiment of pneumatic adaptive seeding system for small particle size seeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 30 – 41. (in Chinese)

[101] 廖庆喜,罗湛程,杨恒,等. 基于 RTK 测速的油菜直播机随速可控可调排种控制系统研究[J]. 农业机械学报,2024, 55(9):65 – 74.
LIAO Qingxi, LUO Zhancheng, YANG Heng, et al. Variable-rate seeding control system based on RTK speed measurement for rapeseed direct seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 65 – 74. (in Chinese)

[102] CAY A, KOCABIYIK H, MAY S. Development of an electro-mechanic control system for seed-metering unit of single seed corn planters—Part I: design and laboratory simulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 144: 71 – 79.

[103] CAY A, KOCABIYIK H, MAY S. Development of an electro-mechanic control system for seed-metering unit of single seed corn planters—Part II: field performance[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 145: 11 – 17.

[104] PACCIORETTI P, CÓRDOBA M, BALZARINI M. FastMapping: software to create field maps and identify management zones in precision agriculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 175:105556.

[105] HE X, ZHANG D, YANG L, et al. Design and experiment of a GPS-based turn compensation system for improving the seeding uniformity of maize planter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 187: 106250.