

万星宇, 廖庆喜, 廖宜涛, 等. 油菜全产业链机械化智能化关键技术装备研究现状及发展趋势[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(2): 24-44.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.02.004

油菜全产业链机械化智能化关键技术装备 研究现状及发展趋势

万星宇¹, 廖庆喜^{1,2}, 廖宜涛^{1,2}, 丁幼春^{1,2},
张青松^{1,2}, 黄凰^{1,2}, 陈慧¹, 朱龙图¹

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

摘要 油菜全产业链包括产前、产中、产后阶段, 发展各阶段机械化与智能化技术是实现油菜生产降本增效的重要途径之一。本文分析了国内外油菜全产业链生产概况和主要环节关键技术与装备发展现状, 概述了产前油菜小区育种、种子精细处理与产后油脂加工关键技术, 重点阐述了产中阶段耕整地、播种、收获、田间管理环节的重点技术发展动态, 涵盖了种床整理技术、开畦沟技术、深施肥与秸秆还田技术、单体式与集中式精量排种技术、无人机播种与病虫草害防控技术、分段与联合收获技术、饲用油菜收获技术及其配套装备。在系统总结和分析我国油菜产业特点和发展趋势的基础上, 指出了现阶段油菜全产业链机械化智能化发展存在区域不平衡、上下游阶段不平衡和各环节技术体系不平衡, 提出加快产前、产后成套装备研发, 促进油菜多功能开发利用, 实现产中各环节机械化水平均衡发展, 探索油菜机械化生产智能技术与无人系统, 形成政府推动-市场拉动-规模驱动-科技引领的发展路径, 是实现油菜全产业链高质量发展关键。

关键词 油菜; 油菜机械; 全产业链; 机械化; 智能化; 发展趋势; 成套装备; 多功能开发; 无人系统; 均衡发展

中图分类号 S 223.75 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)02-0024-21

油菜是我国最重要的油料作物之一, 具有饲料、绿肥、蔬菜、能源、旅游以及蜜源等多种功能和开发利用上的优势。我国主要油菜种植区域一般可分为冬播油菜和春播油菜两大产区, 其中冬油菜产区集中分布于长江流域, 占总产量的 90% 以上, 种植形式上以稻-油或稻-稻-油水旱轮作方式为主^[1]。按照油菜生产经营流程, 油菜全产业链包括产前、产中、产后三大阶段。产前阶段以育种和种子精细处理为主, 涵盖优良种子种苗繁育与推广、农资储备与供应等; 耕整地、播种、田间管理、收获是产中阶段的主要环节, 但各环节机械化整体水平不高且发展不均衡, 2019 年油菜机播率、机收率分别仅为 32.5% 和 44%; 产后阶段主要为油脂加工, 包括收获后油菜种子预处理、制油、精炼等环节。长期以来, 油菜全产业链三大阶段发展相对孤立, 综合机械化水平低下, 智能化进展缓慢, 进而导致生产成本低、效益低, 制约了油菜产业的发展。随着农业现代化进程快速推

进, 农业生产经营向以机械化为支撑的适度规模方式转型^[2], 打通我国油菜生产产前、产中、产后阶段技术与经营壁垒, 提高全产业链综合机械化、智能化水平是实现油菜产业高质量发展的重要途径。

本文在介绍国内外油菜生产与我国全产业链概况基础上, 比较了国内外油菜生产产前、产中、产后三大阶段主要环节机械化智能化关键技术与装备发展现状, 分析了现阶段油菜全产业链综合发展的技术难点和存在问题, 展望了我国油菜全产业链机械化智能化技术发展趋势。

1 油菜全产业链概述

油菜是十字花科芸薹属一年生草本植物, 主要分为白菜型、芥菜型和甘蓝型 3 种类型。由于其抗逆性强、适应范围广, 目前是全球许多国家和地区的主要油料作物之一^[1]。我国的油菜主产区一般可划分为冬播油菜区和春播油菜区。我国冬播油菜种植

收稿日期: 2021-01-18

基金项目: 国家油菜产业技术体系专项(CARS-12); 国家自然科学基金项目(51875229、52075210、32001427); 中国博士后科学基金项目(2020M682438)

万星宇, E-mail: wanxy@mail.hzau.edu.cn

通信作者: 廖庆喜, E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

区域主要集中在长江流域各省份,春播油菜种植区主要分布在青海、内蒙、甘肃等3省(区)^[1]。油菜全产业链指油菜生产的产前、产中、产后3个阶段,主要环节如图1所示。

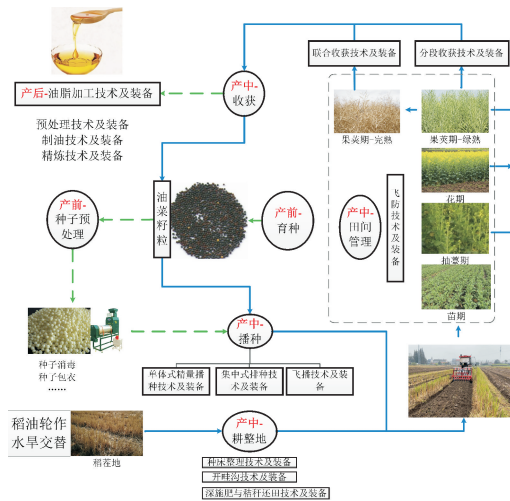


图1 油菜全产业链机械化生产主要环节

Fig.1 The main mechanized processes of the whole industrial chain of rapeseed production

产前阶段主要为油菜育种和种子精细处理,田间机械化育种技术与装备已发展成为特殊的、独立的机械化技术体系,以小区播种最为典型。种子精细处理指使用生物、物理、化学因子以精选或保护油菜种子,控制病虫害,提高油菜在不同土壤条件下的出苗率和幼苗素质,对于提高油菜“一播全苗”的稳定性、产量和品质有着重要意义,主要环节包括油菜种子清选、消毒浸种、包衣等。

产中阶段主要包括耕整地、播种、田间管理、收获等主要环节。耕整地是油菜种植的首要环节,其目的在于创造良好的土壤耕层构造和表面状态^[3],关键技术包括油菜种床整理、开畦沟、深施肥、秸秆还田等。播种是油菜生产的关键环节之一,现阶段主要应用精量播种技术将油菜种子以一定播种量均匀地播撒在种床适宜位置,保障了农艺要求的种植密度,为种子发芽、光水肥气充分利用、个体与群体均衡发育提供良好条件^[1]。田间管理是油菜生产的长周期环节,是油菜从播种到收获的整个生长过程所需的各种管理措施,包括间苗、追肥、防治病虫害等。收获是产中阶段的收尾环节,是高效低损获取清洁籽粒的关键,机械化收获在多熟制地区有利于缩短收获期,为及时栽种后茬作物创造条件^[4-5]。

产后阶段主要指油脂加工过程,是油菜生产商

品转化环节。油脂加工环节主要是从油菜籽粒中提取油脂,并对提取的毛油进行精炼,得到精制的食用油脂产品;同时,对油菜籽粒进行精深加工和综合利用,从油脂生产副产物中提取高附加值的产品。

协调同步发展产前、产中、产后阶段机械化生产关键技术与装备是提高企业、新型经营主体等抵御市场风险的能力,促进农业现代化,实现劳动力就业与油菜产业发展由产中集约向产前、产后阶段拓展的关键。

2 产前小区播种和种子精细处理技术与装备

2.1 小区播种技术与装备

小区播种机是培育新品种时专门用于田间试验的播种机,具有定量播种、自动清种等特点,高性能小区播种机的应用是提高小区育种试验,加快油菜新品种研发,促进育种产业发展的重要方式。

国外小区育种机械起步较早,小区播种机技术趋于成熟。国外生产小区播种装备的公司包括奥地利的温特斯泰格(Wintersteiger)、丹麦的霍尔(Haldrup)、美国的阿麦科(Almaco)、巴西的Maquinarium等,代表机型如图2A~C所示。温特斯泰格(Wintersteiger)公司研制了气吸组合式小区精量播种机^[6],实现了单粒排种,并通过安装电子调控器、播种定位控制器以及GPS模块,提高了自动化程度,实现了种子播量、播深等参数的可调可控^[7]。



A: Monoseed DT 小区单粒播种机 Monoseed DT precision spaced planter; B: Plotseed S 轻型小区条播播种机 Plotseed S light plot seeder; C: Seed Pro 360 小区单粒播种机 Seed Pro 360 precision spaced planter; D: XBJ-150 型自走式小区播种机 XBJ-150 self-driving plot seeder; E: 2BZXJ-1 手扶式小区育种播种机 2BZXJ-1 Walking type plot breeding; F: 全自动化小区精量播种机 Fully automatic precision seeder.

图2 油菜育种小区播种装备

Fig.2 Seeding equipment of rapeseed breeding plot

国内对小区育种机械的研究起步较晚,小区育种试验多采用人工播种的作业方式。随着种子产业的发展,玉米、大豆、苜蓿等大粒径作物的小区播种机发展迅速。2003年,黑龙江省农垦总局红兴隆农管局科研所成功研制 XBJ-150 系列小区播种机(图 2D),可实现不同种类种子及肥料的播量可调^[8]。2009年,黑龙江省东北农业大学成功研制了 2BZXJ-1 手扶式小区育种精密播种机(图 2E),可一次完成开沟、播种、覆土、镇压等作业工序,体积小、质量轻,可单人操作^[9]。2014年,中机美诺农机公司成功研制了全自动化的小区精量播种机(图 2F),具有自动化程度高、播种效率高、播种稳定性好等特点^[10]。然而,针对籽粒细小油菜的育种专用小区播种装备鲜有报道,我国大部分地区处于“无机可用”或“无好机可选”的状态,严重制约了油菜种业的发展。

2.2 种子精选处理技术与装备

产前种子精选处理包括种子清选、浸种消毒、包衣等环节。种子清选是指利用种子与杂余物物理和空气动力学特性差异,通过种子清选机械选出合格优良的种子。目前种子清选以风筛组合式清选方式为主,侯艳芳等^[11]利用悬浮速度的差异设计了由吸入型风选装置和下吹风装置组成的风选装置,获选率为 98.20%~99.50%;胡志超等^[12]针对现有风筛式清选机生产率低的问题,对振动喂料装置和主动力系统与筛体振动装置进行优化,研制了高效风筛式种子清选机,实际生产率可达 12.6 t/h。针对油菜种子粒径小、易破损等问题,提高种子清选机械适应性是解决专用化的关键。

现阶段浸种消毒研究以消毒工艺为主,万林等^[13]通过研究经 H_2O_2 浸泡的油菜种子出苗后生物酶活性及有机质的含量,得出过氧化氢浸种能促进苗期生长,提高产量;张顺凯等^[14]通过研究 H_2O_2 浸种对不同播期油菜生长发育的影响,得出 H_2O_2 浸种处理对早播油菜生产具有负向效应,但对晚播油菜生产具有显著的正向效应。目前与消毒浸种工艺的配套机械化技术与装备鲜有报道。

种子包衣是将农药、肥料、杀虫剂、杀菌剂等化学成分混合在一起,加入黏着剂或成膜剂通过搅拌或喷涂等方法包裹在种子的表面,是现代种子加工生产中的关键环节。具有代表性的种子设备有丹麦的兴百利(CIMBRIA)公司生产的 CC50 批次式包衣机、美国的 OLIVER 公司生产的 R534 批次式种子处理机等。任奕林等^[15]为解决包衣过程中种子

之间的粘接问题,设计了一种可自由拆卸式的对辊式滚筒机构油菜种子包衣设备,通过设置密布和相互配合的上凹槽和下凹槽,可实现油菜种子单独包衣。喻志成^[16]结合机器视觉技术,依据种子包衣后种衣的特点,提出使用机器视觉技术对种子包衣技术进行鉴定,提出了采用结合机器视觉技术的种子包衣智能化控制方式。

总体而言,我国产前种子精细处理设备多为通用机型,存在适应性差、作业质量不佳等问题,难以满足油菜高质量精细处理要求。油菜专用设备匮乏,需要围绕油菜种子粒径小、流动性好、含油量高、易破损等生产现实开发配套技术与装备。

3 产中环节关键技术与装备

3.1 耕整地技术与装备

1) 种床整理技术与装备。我国南方冬油菜主产区生产季节的降水量较大,因此,一般要求油菜种植耕整地机具作业后的种床厢面平整,具体而言细碎土层深度需在 8 cm 以上,地表平整度在 5 cm 之内,碎土率大于 50%,且开好厢沟、腰沟、畦沟(沟宽需 200~400 mm,沟深 150~300 mm)以便雨水及时排出,才能满足油菜种植的基本要求^[3]。

进行机械化耕整作业时,耕整机械的耕作深度主要由联合耕整、翻耕、旋耕、深松等机具作业深度及仿形机构共同决定^[3],研究耕深稳定性调控技术对后续油菜播种作业至关重要。国外如凯斯纽荷兰、约翰迪尔等大型农机公司研发的联合耕整机(图 3A)利用机具自身质量,通过调节行走支撑轮离地高度进而控制机具作业深度,可通过相关传感技术实时调节耕作深度。国内相关学者对耕整机具作业深度也进行了研究,万国伟等^[17]研制了一种液压驱动式圆盘耙,作业耕深为 85~120 mm,耕深稳定性变异系数为 9.6%。刘晓鹏等^[18]开发设计了一种联合耕整机,该耕整机主要采用主动式对置犁耕与被动式开畦沟、碎土、平整相结合的工艺方案,试验结果显示,该耕整机耕深稳定性系数达 90%以上。

一般耕作机具实现耕深稳定后,还需进行碎土平整作业,以避免播深不一致,导致油菜出苗不齐及长势不一致等问题^[1]。国外油菜用联合耕整机具一般通过后置安装钉齿耙、弹齿耙或者碎土辊以实现土地的细碎平整(图 3B、3C)^[3]。张青松等^[19]研制了一种深浅旋组合式种床整备装置,该装置采用多区段双螺旋线对称排列旋耕弯刀实现旋耕碎土,再

配合后拖板实现厢面平整,试验结果显示,该种床整备装置的碎土率与厢面平整度分别为 50.94%~64.64%和 22.12%~29.37%。

在保证厢面平整度与碎土率的基础上,还需满足油菜种植作畦开沟的农艺要求。现阶段油菜播种开畦沟装置的作业方式主要包括主动和被动开沟2种,其中主动开畦沟装置作业效果好,但功耗较高;被动开畦沟装置虽然结构简单,但难以保持作业稳定^[3]。张青松等^[20]设计了一种类铧式犁开畦沟装置,实现了前犁开沟起土、后犁收沟整形的开沟工艺。为满足土壤高含水率条件下的开畦沟作业要求,刘晓鹏等^[21]进一步设计了一种船型开沟器,该船型开沟器作业是可形成沟深 150~250 mm、上沟宽 250~350 mm、沟底宽 80 mm 的梯形畦沟。开畦沟技术是我国南方冬油菜产区油菜种植田间雨水顺利排出的重要保障。

种床整理是油菜播种重要环节,稳定的土层深度、适宜的细碎土壤和厢面平整度是保障油菜正常生长发育的必备条件。国外种床整理多采用大型化装备,作业效率高,但不适宜于我国南方油菜主产区土壤黏重板结、地表前茬作物秸秆残留量大等复杂田间工况,发展适应该地区种床整理的耕整地装备是研究难点。

2)深施肥和秸秆还田技术与装备。传统撒施或者机械混施于土壤表面的施肥方式,其肥料利用率一般不超过 30%。与之相比,肥料深施通过将肥料施入到种子的正下方或者侧下方土层指定深度,可有效降低肥料挥发和流失,肥料利用率可提高到 35%~40%。形式多样的深施肥铲(图 3D~G)是实现肥料深施的关键部件之一^[3]。国外联合耕整机由于作业幅宽大,一般多采用锄铲式或滑刀式深施肥铲,主要为多列交错布置以防止土壤拥堵,如约翰迪尔 1835 型联合耕整机的作业幅宽可达 18.3 m,其中深施肥铲布置成 4 列,每列铲体间距达 762 mm。受我国南方冬油菜产区田块面积小、田间转移不便等不利因素的影响,我国油菜深施肥装备作业幅宽一般较小,普遍作业幅宽为 2~4 m,机具作业速度一般不超过 7 m/s。为解决水旱轮作区深施肥铲易堵塞的问题,肖文立等^[22]设计了一种带切茬圆盘的类铧式深施肥装置,通过在施肥铲体前安装切茬圆盘,实现切茬、破土及深施肥的功能。廖宜涛等^[23]基于主动刮削防堵原理设计了一种油菜精量联合直播机主动防堵深施肥装置,可满足稻-油轮作区油菜

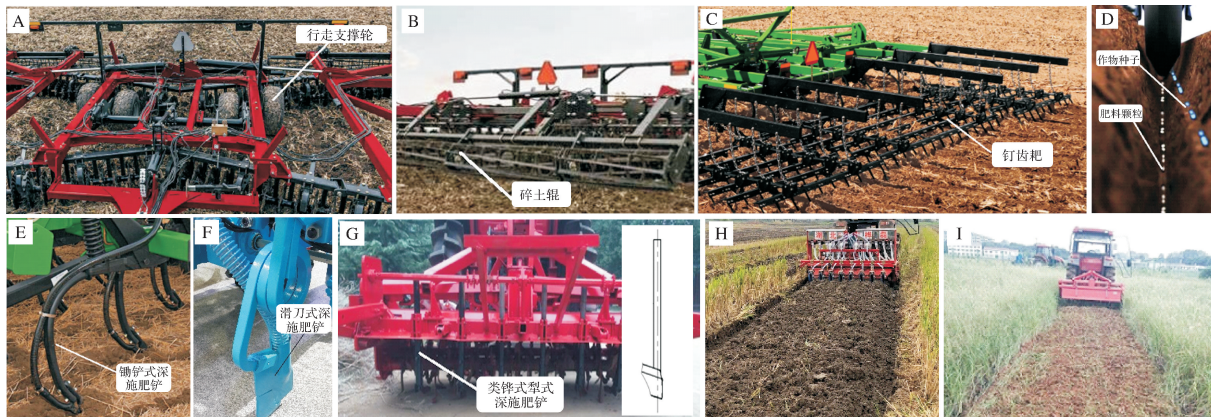
种植施肥播种农艺要求。在我国冬油菜产区,由于地表秸秆量大且韧性强,土壤黏重板结,油菜种植机具作业幅宽小,深施肥部件铲体及出肥口易堵塞,难以保证深施肥作业质量,采用仿生技术及创新性设计新型深施肥机是目前冬油菜产区深施肥部件研究的重点及难点^[3]。

秸秆还田不仅降低了秸秆焚烧所造成的大气污染,而且还可通过增加土壤有机质、改良土壤结构、促进微生物活力和作物根系发育等实现增产,进一步减少化肥施用量。国外地块广阔区域如加拿大等在播种油菜前,先通过大型联合耕整机对地表秸秆进行翻埋和还田处理,为后续的油菜播种提供了良好条件。目前我国南方冬油菜产区采用独特的水旱轮作模式,由于油菜播种时土壤黏重板结,且地表前茬作物秸秆高粗、残留量大,秸秆还田技术尚未成熟应用。为提高对复杂田间工况的适应性,魏国梁等^[24]设计了一种犁旋组合式油菜直播机(图 3H),该机型可一次性作业完成秸秆翻埋、碎土平整、开畦沟、施肥、播种等作业工序。廖庆喜等^[25]则设计了一种带状种床整理装置(图 3I),通过旋耕装置的灭茬刀组及带状旋耕刀组进行秸秆还田及种床整理。秸秆还田技术及装备的应用可实现田间大量秸秆的机械化埋覆,在减轻劳动强度的同时还可有效地避免机具堵塞,提高了油菜机械化播种效率。

3.2 精量播种技术与装备

随着农机农艺技术深度融合,傅廷栋院士提出油菜种植可因地、因时增加种植密度等建议,达到“以密增产、以密补迟、以密省肥、以密控草、以密适机”的效果。油菜种子具有粒径小、球形度高以及流动性较好等特点,但由于其表皮薄且含油量高,导致机播时易出现破损和堵塞现象,开发适用于油菜种子特殊生物学特性和密植农艺要求的排种器是目前油菜机械化精量播种的难点和关键点之一。此外,随着土地经营方式转变,以农业专业合作社、农机专业合作社和家庭农场为主体的适度规模经营成为发展趋势,对作物播种效率提出了更高要求。目前,油菜机械化精量播种主要由单体式排种、集中式排种、无人机排种等排种方式^[1]。

1)单体式精量排种技术与装备。单体式排种器可播种一行作物,依据作业幅宽及行距,播种机可模块化配置多个单体式排种器一次完成多行作业;油菜单体式精量排种主要包含机械式和气力式两类。汤楚宙等^[26]针对型孔轮式排种器设计了一种调节



A:联合耕整机限深单元 Depth limit unit of combined tillage equipment; B:联合耕整机碎土单元 Crushed soils unit of combined tillage equipment; C:联合耕整机平整单元 Leveling unit of combined tillage equipment; D:深施肥示意图 Schematic diagram of deep fertilization; E:锄铲式深施肥铲 Hoe shovel type deep fertilizing shovel; F:滑刀式深施肥铲 Sliding blade deep fertilizing shovel; G:类铧式深施肥铲 Ploughshare like deep fertilizing shovel; H:犁旋组合式油菜直播机 Plough rotary combined rapeseed direct seeder; I:灭茬旋耕双轴耕整机 Double axial rotary tillage machine.

图 3 种床整理、深施肥技术以及秸秆还田技术装备

Fig.3 Seedbed management equipment, and equipment for deep fertilizing, straw application

环以调节播量,研究了不同排种器结构尺寸及作业参数对排种均匀性及种子破损率的影响规律;张青松等^[27]设计了一种带缺口矩形勺式油菜精量穴播排种器,研究了型孔尺寸、数量、安装倾角和转速等因素对播种质量的影响规律。

气力式排种器相比于机械式排种器具有伤种率低及对种子适应性好等优点^[1],田波平等^[28]研制了2BFQ-6型油菜精量联合直播机,能一次完成开沟、起垄、播种、施肥等作业;舒彩霞等^[29]、廖宜涛等^[30]进一步分析了其气力系统工作特性并提出一种溢流释压的稳压方法,研究了各运行参数对排种质量的影响规律。为提高油菜精量直播机对播量变化的适应性,舒彩霞等^[31]设计了一种凸轮摇杆式播量调节装置,分析了调节装置运动学特性;为进一步提高正负气压式排种器对高速排种适应性,李兆东等^[32]设计了槽齿组合式吸种盘,采用动力学分析与 EDEM 仿真分析等手段研究了较优的槽齿结构型式及其对充种和吸种效果的影响机理。通过不断改进优化,2BFQ 系列播种机已在长江流域冬油菜种植区及部分春油菜种植区得到广泛应用。

2)集中式精量排种技术与装备。集中排种器(简称集排器)为 1 个排种部件、1 个种箱或者 1 个统一的输种系统同时排种,实现“一器多行”的精量排种装置,可实现高速、宽幅播种,显著提高工作效率,具有装种卸种方便、整机及传动结构简单等特点,已成为当前排种技术发展的趋势^[1]。根据排种

原理可分为机械离心式集排器、气力滚筒式排种器和气送式集排器(图 4)。

机械离心式排种器主要利用回转运动部件迫使种子在离心力作用下排出。廖庆喜等^[33]设计了一器多行机械离心式油菜排种器(图 4A),依靠回转的倒置内锥筒实现一器多行排种,同时结合 EDEM 软件模拟分析了排种过程,探明了种子量与临界转速之间的关系^[34],进一步通过优化型孔直径并设计枝状阀式分流装置提高了田间作业适应性^[35-36]。王都等^[37]为提高油菜离心式集排器充种稳定性,设计了一种“沙漏通道”型充种管,实现排种器种子流可控。机械离心式集排器结构简单且灵敏度高,但其排种量与播种机前进速度同步性不够^[1]。

气力滚筒式集排器(图 4B)应用气流正压或负压使种子吸附或压在型孔上,一次播种 6~8 行^[1]。基于正负气压组合式排种原理,李明等^[38]设计了一种气力滚筒式油菜精量集排器,建立了负压值、正压值与集排器结构参数和运行参数的数学关系模型。李兆东等^[39]采用气流清种与气压护种组合技术解决了种子易被剪切破坏的问题,设计了一种“倒方锥”型孔并应用于油菜精量气压式集排器。德国阿玛松公司研制了 EDX 气压式精密排种器^[40],可适应前进速度 15 km/h 的高速精量播种,完全满足大田块高效播种需求。

气送式集排器采用机械定量、气流一阶分配或二阶分配的方式排种,能适应多种作物高速、宽幅、

高效播种,已成为国内外排种器发展的主要方向^[1]。国外的气送式播种机主要应用于以大豆、麦类等为代表的中、大粒径作物种子精量条播。Downs等^[41]采用的Gandy5812型和FlexKing160型气送式集排器可将大豆、绿豆、高粱和小麦等种子平均分配至开沟器中。Kumar等^[42]比较了平行盘、封闭漏斗型和流线型分配器结构形状对排种性能的影响,发现供种速率和入口气压对分配均匀性影响较大。我国南方冬油菜产区多为稻油(麦)水旱轮作种植方式,油菜、小麦是主要冬季种植作物,为提高机具利用率,雷小龙等^[43-44]设计了油麦兼用型气送式集排器(图4C)以提高机具利用率,提出了一种倾斜锥柱状型孔和锥孔轮交错排布的结构,优化设计了文丘里管式供料装置和碗式枝状分配器。邢鹤琛等^[45]设计一种油菜双圈、小麦三圈型孔交错排布以及斜锥形型孔结构的油麦兼用集排器,基本满足长江中下游地区油菜和小麦播种要求。为实现油菜轻简化精量、高速播种,Ystkul等^[46]进行了气流集排的关键参数(空气速度,流量浓度和管道直径)与排种均匀性影响的研究。Mudarisov等^[47]为研究气送式集排器中种子、气流两相流的影响机制,开展了CFD-DEM耦合仿真,以数学模型的方式描述了集排器分种的过程。针对作业坡度对油菜气送式集排器性能影响的问题,王磊等^[48-49]应用EDEM、DEM-CFD仿真探究地表坡度对供种装置、集中分配器性能的影响规律,针对坡度变化范围大时供种量稳定性不足等问题,设计了一种调节弹簧调节清种毛刷与外切圆弧型孔轮距离以控制充种及清种量,实现坡地播种稳定供种。气送式集排器排种性能优越,可适应高速、宽幅、多种作物的精量播种,现阶段能满足油菜、小麦等小、中粒径种子的播种要求,有效提高了机具利用率和生产效率,是中国农业现代化进程中规模化经营机械化播种的发展趋势^[1]。

3)无人机播种技术与装备。长江中下游地区丘陵、山区、河滩、坡地等冬闲田面积广阔,是油菜种植的潜在耕地资源之一,常规地面播种装备因适应性问题无法进入作业或进入作业的经济效益不高。配备高精度自主飞行功能的无人机体型小、作业灵活、可悬停、起降无需跑道、地形适应性好,可以实现航迹规划和自动导航飞行^[50],具有地面播种装备无法比拟的高通过性特点^[51-52],利用无人机飞播技术可完成复杂地貌的油菜种植。

油菜无人播种装备主要由无人机和播种装置组

成,无人机作为利用无线电遥控设备和自备程序控制装置操纵的不载人飞行器,可实现适应不同地貌和播量需求的油菜飞播。黄小毛等^[53]为有效解决农用无人机复杂边界田块下的油菜播种作业问题,引入贪婪算法、凸多边形最小跨度法和步进旋转法,提出一种对田块边界形状具有普适性意义的旋翼无人机作业路径规划算法。徐博等^[54]为实现多个作业区域不同播种效果,基于遗传算法与TSP问题得到区域间的优化作业顺序,研究了一种无人机全局航线规划算法。吴开华等^[55]为在坡地作业过程中保持稳定的仿地飞行以提高作业质量,通过前置毫米波雷达与对地毫米波雷达的高度进行多雷达高度信息融合以提高响应速度,并采用模糊PID控制算法控制无人机高度。针对无人机的研究主要为提高飞播作业过程的作业质量、效率和续航,重点开展无人机作业路径的规划和优化工作。

播种装置作为实现飞播的核心部件,其排种性能决定种子在地表分布的均匀性和一致性。张青松等^[56]为解决丘陵山区油菜种植面积逐步扩大和平原地区稻油茬口矛盾突出的问题,开发了与极飞P20四旋翼无人机平台配套的油菜无人机飞播装置和控制系统,设计的槽轮式排种装置可实现油菜条播;黄小毛等^[57]设计了基于离心条播式排种器的无人机油菜飞播装,优化了上凸锥筒离心式排种器结构,提出了一种与离心排种器配合使用可实现油菜条播的辅助导种装置;Wu等^[58]为实现坡地有效播种,设计了一种用于无人机的离心式排种装置,应用EDEM仿真分析离心式圆盘的转速、无人机的飞行高度和挡板环的角度对分布均匀性的影响。综上所述,现有针对无人机播种装备的研究主要集中于设计轻量化、结构简单的排种装置,通过仿真和试验分析无人机旋翼气流、排种装置、导种管对播种均匀性的影响,且为增加地表种子分布的有序性,无人播种逐渐由撒播到条播技术发展。

3.3 收获技术与装备

油菜属于无花序作物,植株高大、分枝多、成熟果荚易炸裂,机械化收获作业难度较大。现阶段油菜机械化收获方式主要有联合收获和分段收获两种形式。此外,为提高油菜种植附加价值,实现油菜多功能开发利用,饲用收获也逐步推广应用。

1)分段收获技术与装备。分段收获主要通过割晒机先将油菜割倒铺放于田间进行晾晒,利用后熟作用至油菜完全成熟后,再进行捡拾、脱粒作业。我

国油菜种植区域跨度较大,各地区油菜特性与成熟度不一致,增加了油菜的收获难度。分段收获充分利用了油菜的后熟作用,确保成熟度基本一致,对油菜的品种适应性较强,延长了收获期,可减小收获损失率并有效缓解轮作区茬口矛盾突出的问题,且收获后籽粒相对饱满、含水率基本一致,利于产后油脂加工,提高油脂品质^[59]。

割晒机主要通过立式或卧式割台输送装置将割倒后的油菜集中并有序铺放至田间,铺放方式可分为中间铺放与侧边铺放2种形式。因油菜植株高大,国内外油菜割晒机以卧式割台为主,2种铺放方式并存。发达国家已实现油菜规模化种植,形成了宽幅、大马力、专用化、智能化的油菜割晒装备,如John Deere公司研制的JD A400系列割晒机(图4D)采用中间铺放方式,割幅可达6.4 m,可根据需要调节割茬高度;加拿大MacDon公司研制的M200型割晒机(图4E),割幅为6.1~12.2 m,能够实现双向驾驶,收获效率高。在关键装置与调控技术研发上,Hobson等^[60]针对油菜收获时堵塞严重、损失较大的问题,设计了一种辅助输送装置,提高了油菜输送的流畅性。Foster等^[61]设计了一种配有速度控制系统的自走式油菜割晒机,可以根据作业需求调节收获速度,提高了收获的适应性。

我国油菜收获机械研究起步较晚,现阶段分段收获装备基本实现了切割、输送、铺放的功能,但存在输送效率低、铺放质量差、输送通道易堵塞等问题,限制了割晒机的工作效率。廖宜涛等^[62]针对南方小地块作业损失大、能耗高等问题,设计了一种用于小地块油菜分段收获的4SY-1.8型手扶式油菜割晒机,与手扶拖拉机配套作业,结构简单。韩彩锐等^[63]针对前悬挂油菜割晒机传动路径复杂、动力损失大等问题,设计了一套与4SY-1.8型油菜割晒机配套的液压驱动系统,各运动单元独立工作,提高了对不同品种油菜的适应性。王修善等^[64]针对现有油菜割晒机适应性差等问题,设计了一种4SY-2.0型油菜割晒机,采用履带式底盘和立式割台作业,可根据地形调整割茬高度,油菜铺放整齐均匀。石增祥^[65]等以联合收获机为动力平台设计了4SY-2.2型油菜割晒机(图4F),实现油菜的单侧铺放。

油菜输送和铺放的过程中,机具参数与油菜特殊生物学特性不匹配是导致铺放效果不佳的重要原因。金诚谦等^[66]基于4SY-2型油菜割晒机研究了油菜形态、成熟度、输送机构参数、铺放装置参数以

及排禾口等因素对铺放质量的影响。蒋亚军等^[67]针对4SY-2.9型油菜割晒机(图4G)机架振动幅度大等问题,基于Ansys对机架进行了建模分析,得到了六阶模态下机架的频率与振型,提出了增加拱门结构的设计方案,降低了割晒机工作时的共振。李海同等^[68]为提高手扶立式油菜割晒机的作业性能,基于Ansys和Adams建立了割晒机与油菜植株的刚柔耦合模型,并进行了仿真试验,得到了前进速度、割茬高度、植株密度、摩擦系数等因素对油菜铺放质量的影响,为割晒机的作业参数优化提供了理论支撑。

综上所述,国外因田块面积大,油菜割晒机以宽幅、大喂入量、大马力、广适性为特点,多采用中间铺放方式,基本实现了油菜茎秆的有序条铺。我国南方冬油菜种植区受田块面积小、水旱轮作田间工况复杂等制约,宽幅割晒机难以应用推广,有限割幅内实现茎秆有序铺放是割晒机研发的难点;此外,实现割晒机组前进速度、拨禾轮转速、输送装置运行参数等的综合适配是提高割晒机对油菜植株适应性的关键。

2)联合收获技术与装备。联合收获是使用联合收获机一次性完成油菜切割、脱粒、分离、清选等主要工序的收获方式,具有省时省力、作业效率高、适宜抢农时等优点,可适应我国绝大部分地区的油菜种植环境。得益于水稻、小麦等粮食作物联合收获技术的快速发展,稻麦联合收获已形成了较为成熟的机械化收获技术与装备体系。然而,由于油菜植株高大、成熟度不一致、角果易炸裂等特殊生物学特性,由稻麦联合收获平台发展而来的油菜联合收获机适应性不足,综合损失率居高不下。2019年我国油菜机收率仅为44%,远低于小麦、水稻的机械化收获水平。目前油菜联合收获机总体上向广适性、大喂入量、智能化、功能集成化方向发展,图4H和图4I为国内外典型油菜联合收获机。

油菜联合收获机由割台、脱粒分离装置、清选装置等组成,割台工作过程中割刀、侧边切割器往复运动及拨禾轮击打是导致割台振动与落粒损失的主要因素之一,植株接触部件的优化是提高油菜联合收获机适应性、减少籽粒损失的关键^[69]。在解决割台均匀喂入的问题上,李海同等^[70]提出了具有茎秆切割、输送、复切功能的分体组合式割台及其复切输送器间隙自适应调节机构;朱剑等^[71]开发了一种基于嵌入式的电液比例控制系统,提升了割台工作高度

调整实时性和准确性;庄肖波等^[72]提出一种基于鲁棒反馈线性化割台高度控制策略,提升喂入量的稳定性、降低整机各环节的作业负荷波动。目前割台损失仍是整机主要损失之一,低损均匀喂入是提升后续工作部件性能的关键。

针对脱粒分离装置大喂入量作业适应性要求,国内外围绕脱粒元件的选择与优化设计、脱粒间隙可调结构设计及相关参数匹配设计开展了研究。唐忠等^[73]研究了不同脱粒元件的脱粒分离的性能影响,试验得出短纹杆综合脱粒性能较优。邸志峰等^[74]设计了一种纹杆块与钉齿组合式轴流脱粒滚筒;谢芳平等^[75]、耿端阳等^[76]设计了柔性脱粒滚筒,均为脱粒元件的设计与选型提供依据。李耀明等^[77]设计了由凹板间隙调节系统和凹板筛后侧油压力采集系统组成的脱粒滚筒负荷监测和凹板间隙调节装置;王勋威等^[78]设计了一种直径可调的脱粒滚筒,通过改变脱粒滚筒直径,实现脱粒间隙调节。脱粒分离装置作为联合收获机的核心装置,其物料处理能力的提升是实现联合收获机喂入量提升的关键,围绕大喂入量及其波动变化作业开展脱粒滚筒结构设计、脱粒分离装置的参数优化与匹配是未来发展方向。

清选装置以风机与振动筛组合式清选装置为主,也有部分中小型联合收获机采用旋风分离清选装置。针对风筛组合式清选装置主要开展了筛分机理探究、风机和筛体优化、气流场和物料耦合分析等研究。童水光等^[79]、樊晨龙等^[80]、王立军等^[81]为优化风机和筛体分别提出了双风道六出风口风机、圆锥形风机、双层振动清选装置以提高清选系统的工作性能。李耀明等^[82]针对清选筛脱出物易粘附、堵塞清选筛的问题开展了仿生筛的研究,明确脱出物粘附规律与仿生筛的结构设计。在清选装置内气流场和物料运动分析研究中计算流体力学 CFD 和颗粒离散元 DEM 及其耦合的方法应用广泛,李洋等^[83]研制了多风道清选试验台以研究脱出物喂入量对清选装置内部气流场的影响;李洪昌等^[84]对风筛式清选装置进行 CFD 与 DEM 软件耦合仿真,得到脱出物在清选室内的运动规律及脱出物颗粒运动轨迹。此外,廖庆喜等^[85]基于短程收获原理,开发了利用悬浮气流清选的旋风分离清选系统,验证了旋风分离应用于油菜清选的可行性。随着油菜单位产量的不断提高,需要进一步研究清选装置的结构与运动参数匹配、脱出物与清选装置耦合、脱出物组

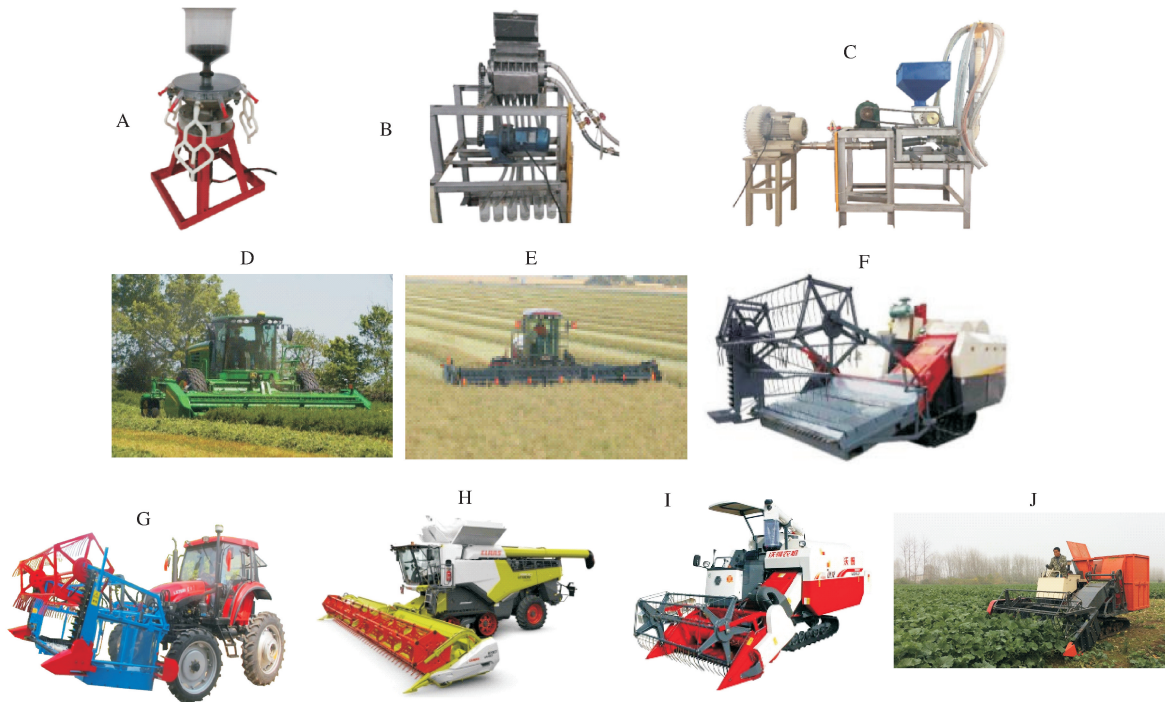
分分配、关键装置布局优化在联合收获机有限空间内合理布局,提高清选装置性能及效率。

3) 饲用收获技术与装备。为增加油菜种植附加值,提高农户种植积极性,除油用外,油菜的茎、叶可作为鲜喂饲料直接供牲畜食用,也可青贮后作为春冬饲草的重要来源,缓解冬春季节青饲料严重缺乏的问题,且饲用油菜作饲料具有种植成本低、产量高、适口性好、蛋白质和脂肪含量高等优点,对于我国畜牧业的发展具有促进作用。目前,青饲收获技术和装备发展相对成熟,典型装备包括纽荷兰公司 FR9040 青贮收获机、CLAAS(科乐收) JAGUAR 970 自走式青贮饲料收割机、新疆牧神 4QZ-3000A 型自走式青(黄)贮饲料收获机、中机美诺 9265A 自走式饲料收获机等,但饲用油菜专用收获装备鲜有报道。

饲用收获技术关键在于切碎技术的研究,茎秆切碎质量的高低是评价饲料优劣的重要标准。公谱等^[86]研究表明切碎方式不仅影响切碎效果,且对畜禽采食率、饲料营养价值等影响显著,切碎方式的选择要综合饲喂对象、饲料种类、饲料后续处理和功耗等多方面的因素。按照切碎方式的不同,切碎装置可分为盘刀式和滚刀式 2 种类型^[87]。盘刀式切碎装置用于饲用油菜收获时,油菜受过度揉搓挤压,导致汁水溢出无法饲喂,而且切碎后物料易在长而窄的输送通道内堵塞而无法继续作业。蒋亚军等^[88]针对长江中下游地区饲用油菜生物量大、含水率高,缺乏适用收获机械的问题,开发了饲用油菜专用收获机(图 4J),开展了冬春鲜喂饲用油菜机械化收获切碎装置设计与试验。吴巧梅等^[89]对平板刀式滚筒切碎装置的参数进行试验优化,在满足抛扔条件下,应尽量选择较大的切割前角,刀片的安装隙角要尽可能小。饲用油菜收获期长、不同生育期物料特性差异大、喂入量大、含水率高等特殊生物学性状是导致常规青贮收获机适应性不高的主要原因^[90-91],同时饲用油菜作为新型饲料,其适口性、饲喂效果与机械化收获装备参数匹配关系亟待深入研究。

3.4 病虫害害无人机防治技术与装备

无人机植保作业对不同地形、地块大小和作物高度适应性好,具有作业效率高、应对突发灾害能力强等特点。国内相关企业生产了系列化的植保无人机,如大疆 T 系列植保无人机、极飞 P 系列植保无人机等。为提高施药的均匀性、减小药液的飘逸损失和节能高效作业,众多学者开展了无人机喷药系



A:机械离心式 Mechanical centrifugal type; B:气力滚筒式 Pneumatic drum type; C:气送式 Pneumatic conveying type; D:约翰迪尔 JD A400油菜割晒机 John Deere JD A400 windrower for rapeseed harvesting; E:MacDon M200 油菜割晒机 MacDon M400 windrower for rapeseed harvesting; F:4SY-2.2 型油菜割晒机 4SY-2.2 type of windrower for rapeseed harvesting; G:4SY-2.9 型油菜割晒机 4SY-2.9 type of windrower for rapeseed harvesting; H:CLAAS Lexion8700-7600 联合收获机 CIAAS Lexion 8700-7600 combine harvester; I:沃得 4LZ-5.0E联合收获机 WODE 4LZ-5.0E combine harvester; J:饲用油菜收获机 Forage rapeseed harvester.

图 4 油菜精量播种与收获机械装备

Fig.4 Rapeseed precision sowing and harvesting machinery and equipment

统关键部件结构优化、作业参数和作业效果实时检测等研究。

喷药系统合理的结构设计和作业参数控制是良好作业效果的重要保证。李熙等^[92]采用在药箱设置水平和竖直阻尼隔板的结构方案,降低了药液晃动对无人机稳定运行的不利影响。姜锐等^[93]设计一种通过采集药箱内外气压差值及无人机倾斜角度,利用混合数字滤波算法准确获取药箱液量的监测装置。何勇等^[94]详细分析了不同喷嘴的结构、特点和适用场景,介绍了喷嘴性能评价指标及测试方法,提出应结合作物、喷药需求以及作业环境三因素进行施药决策。刘洋洋等^[95]通过建立阀门开度与作业高度、作业速度和施药量的分级控制算法,构建多信息监测与变量施药系统。此外,仿真模拟分析是研究施药效果的有效措施,张豪等^[96]采用 CFD 方法分析了悬停高度、生长阶段和自然风速等因素对无人机下洗气流场的影响规律,研究得出自然风影响下洗气流分布对称性,沿逆风方向调整可改善施药效果。Wen 等^[97]采用生成对抗网络模型提取

样本特征来预测单旋翼无人机气流场,获得比 CFD 模型更快的数据压缩速度和更高压缩率。

喷药效果的精准高效观测是评价作业质量和改进喷药系统的重要依据。张瑞瑞等^[98]采用荧光示踪法与水敏纸法研究了不同飞行速度和飞行高度条件下施药雾滴沉积特性。王志坤等^[99]设计一种无人机喷药雾滴沉积飘移立体分布的测试方法,通过在地面和空中布设沉积和飘移收集器,研究了不同机型和喷头作业时的沉积和飘移特性。王昌陵等^[100]设计一种仿真果园试验台,通过在地面、冠层、空中等处设置沉积和飘移收集装置,提出可采用雾滴空间飘移指数评价药液雾滴空间飘移特性。利用无人机技术可解决因油菜生育后期植株高大、分枝众多等因素导致田间封行,传统植保机械难以作业的难题,开放环境下实现雾滴均匀覆盖、提高续航时间及作业效率仍是重大挑战。

4 产后油脂加工技术与装备

油脂是人体所需能量和脂肪酸的重要来源之

一。油脂加工设备包括了从油菜籽粒收获后的干燥、清理、分选、储藏及输送,籽粒的预处理、预榨、浸出、精炼、包装与副产品的精深加工等全过程各个单元操作所需的各种专用设备和通用设备。通过制油工艺改良提高油料产品转化率和利用率,对协调产业发展,推进农业增效,促进农民增收,保障农村稳定,提高城乡居民生活水平和质量具有重要的现实意义。

脱皮冷榨制油工艺是近几年国内外涌现出的新型工艺技术,可减少加工物料的高温处理,所得油脂品质高且降低了加工能耗和成本^[101]。脱皮与皮仁分离是制油前预处理中重要环节,也是双低菜籽高效加工研究的难点和热点。德国凯姆瑞亚·斯凯特公司与德国埃森综合大学食品工艺系合作开发了一种油菜籽破壳及壳、仁分离设备;采用相对运动的2个圆辊对油菜籽进行压碎的破壳方式,壳、仁分离则采用了高压电场分离法^[102]。中国农业科学院油料作物研究所应用离心撞击式脱皮和综合分离原理,研制出油菜籽干法脱皮机与皮仁分离系统^[103]。

传统热榨-浸出菜籽油加工工艺生产的油脂色泽深、酸值高等缺点^[104]。与传统的油菜籽制油普遍采用蒸炒、预榨、浸出工艺不同,低温压榨不需蒸炒,能耗较低,且冷榨制油工艺一般为全机械过程,经螺旋压榨机压榨后过滤。双螺旋压榨机由于具有油脂高效提取、饼粕质量好和工艺成本低等优点而得到广泛推广,现已出现了多种新型低温压榨工艺技术和设备^[105]。国内在相应低温压榨设备加工能力和规模方面不断扩大,如低温螺旋榨油机^[106]、单螺杆油料冷榨机^[107]、油料冷榨机^[108]等。然而,我国油菜生产经营规模相对较小,油菜产后油脂加工环节缺少成套产地加工设备,导致收获后油菜籽粒无法及时处理,延长了产后加工周期,提高了高含水率油菜籽粒霉变风险,造成籽粒损失。

5 油菜无人农场关键技术与装备

农场由于其特殊规模效应,在农业生产领域具有重要的作用,伴随农业的发展,农场经历了传统农场到机械化农场到自动化农场再到目前的无人农场。无人农场是在人不进入农场的情况下,采用物联网、大数据、人工智能、5G、机器人等新一代信息技术,通过对农场设施、装备、机械等远程控制或智能装备与机器人的自主决策、自主作业,完成所有农场生产、管理任务的一种全天候、全过程、全空间的

无人化生产作业模式(图5),无人农场的本质是实现机器换人^[109]。全天候、全过程、全空间的无人化作业是无人农场的基本特征。

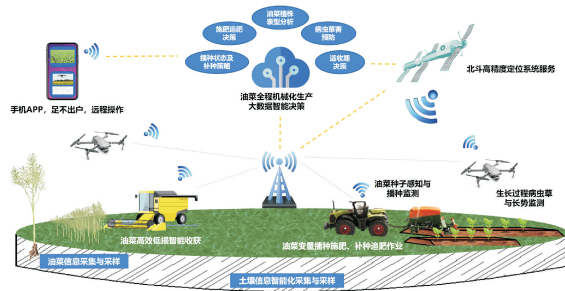


图5 油菜无人农场概念

Fig.5 Concept of rapeseed unmanned farm

2017年英国哈勃亚当斯农业大学研究团队率先建立了世界首个无人农场,同年日本建立了世界首个蔬菜无人农场,随后美国、韩国等也开始布局无人农场,我国在山东、江苏、福建、黑龙江等地陆续开展了无人农场的应用探索。国内规模最大、由碧桂园控股有限公司与北大荒集团联合打造的建三江无人化农场试验示范项目,已经分别在大豆、玉米、水稻田块和实验场地进行了耕整地、播种、插秧、喷药、喷肥、收获、运粮等农业生产全过程的无人化作业现场演示,为油菜无人农场的布局奠定了坚实的基础。

油菜无人农场的建立要依托作物生产全程无人自主作业、作业环节自主完成和油菜生长全程自动监控等环节。作物生产全程无人自主作业包括耕整地、种植、田间管理和收获各环节。生产环节无人化包括从机库到田间及完成作业后回到机库的全过程,需要无人驾驶耕整作业机械、无人驾驶种植机械、无人驾驶田间管理机械和无人驾驶收获机械的支撑。作物生长全程自动监控包括从耕整到收获各阶段植株的生长状况及需水、施肥和喷药的监测及决策。

我国南方地区由于土地规模和经营模式,成为阻碍油菜无人农场规模化发展推广的重要因素,目前国内尚未见针对油菜生产的无人农场,但随着机器人、物联网、人工智能等先进技术不断应用到农业生产经营的耕种管收等各个环节,油菜无人农场的建立指日可待,其中自动驾驶技术应用最为广泛,播种环节智能化生产也是保证后续收获与田间管理环节标准化的基础。

5.1 产中作业自动驾驶技术

产中作业自动驾驶技术是提高田块资源利用率

的有效措施,可保证作业机具在工况复杂田块内的对行准确度和直线行驶精度,其关键技术包括田间载具(拖拉机、收获机等)位置定位、导航路径跟踪控制和定位数据整合等,主要采用厘米级定位系统 RTK GPS(real time kinematic)全球导航卫星系统 GNSS(global navigation satellite system)获取设备的当前位置,实现产中作业机械自动驾驶实时控制^[1]。

针对拖拉机导航,为提高导航和定位精度,Kaivosoja 等^[110]开发了 GNSS 错误模拟器。以东方红 X804 拖拉机为平台,罗锡文等^[111]开发了基于 RT-KDGPS 的自动导航控制系统,应用了跨行地头转向控制方法。黎永键等^[112]结合了 RTKDGPS 定位和双闭环转向控制,提高了拖拉机自动转向系统性能。针对收获机导航,张成涛等^[113]设计了谷物联合收割机视觉导航系统,考察了电控全液压转向系统的操纵性能。丁幼春等^[114]设计了一种基于单神经元 PID 的联合收获机导航控制器;曾宏伟等^[115]、吴刚等^[116]、张成涛等^[117]、关卓怀等^[118]针对导航路径提取方法分别提出了区域生长算法、基于改进平滑度纹理特征的视觉导航路径识别算法、基于改进 Hough 变换(HT)的直线检测算法等方法,有效提升了收割区域和未收割区域识别的精度、速度、抗干扰能力,为导航提供了深厚的研究基础。

自动导航系统的核心是导航路径规划及路径跟踪控制方法,多以农机运动学或动力学为基础,采用模糊控制、人工神经网络、最优控制等方法设计控制模型^[1]。为提高较高含水率条件下的追踪功能,Xiong 等^[119]建立了拖拉机动态模型。Zhang 等^[120]为控制拖拉机路径跟踪设计了最优分数阶比例微分控制器,降低了闭环系统绝对误差,减少了作物破坏。为提高拖拉机轨迹追踪控制精度及其对环境干扰的鲁棒性,Erkan 等^[121]提出了分布式非线性预测控制方法。为有效估测农机的航向角度,张智刚等^[122]采用基于协方差函数的加窗估计算法在线估计电子罗盘和微机械陀螺的测量方差。为实现东方红拖拉机的液压转向,张闻宇等^[123-124]设计了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纯追踪控制方法;为解决播种导航作业起始位姿调整和套行作业自动转弯过程中人工操作配合难度大的问题,进一步提出了双切圆寻线模型控制方法。丁幼春等^[125]设计了一种基于免疫 PID 的小型履带式油菜播种机导航控制器,提高了轻简

化智能化播种机对南方稻茬田土壤黏湿、田块小的适应性。为了实现自主导航拖拉机离开卫星定位系统时能够持续可靠工作,田光兆等^[126]提出了基于三目视觉的拖拉机行驶轨迹预测方法,该方法可用于短时预测拖拉机的行驶轨迹,为自主导航控制提供依据。张华强等^[127]为提升农机作业时直线行驶的精度,提出一种通过 PSO 算法动态确定纯追踪模型前视距离的路径跟踪算法,能有效地提高农机作业时的直线行驶精度。自动导航技术已逐步应用于规模化的农业生产,但针对油菜产中作业过程智能化技术与装备的实用性、适应性、可靠性仍需要进一步研究。

5.2 漏播检测与实时补种技术

漏播检测与实时补种技术可实时监测播种质量参数,并及时反馈漏播状态,有效避免了后期补苗或补种作业^[1]。光电检测是作物种子漏播检测的有效手段之一,以 Precision Planting 和 John Deere 等为代表的国外公司开发了光电检测装置并安装于导种管内,可实时探测和反馈排种量及排种时间间隔,但光电检测方法对排种速度快、种子粒径小的油菜高通量排种检测适应性不足^[1],李明等^[128]提出了一种基于排种频率的检测方法,可有效检测漏播程度。为实现小粒径油菜种子精量排种器重播条件下的漏播检测,丁幼春等^[129]提出了一种同步检测排种盘转速与排种脉冲、双重阈值约束排种频率与时间间隔的检测方法;进一步设计了油菜精量排种器种子流传感装置,提高了小粒径油菜种子排种量的监测准确性,实现了油菜种子流排种频率与排种总量的实时监测^[130],并针对油菜精量排种器的漏播问题,设计了螺管式补种器对漏播进行补种^[131];同时结合基于时变窗口的漏播检测方法,优化了螺管式补种装置结构,集成了基于 PWM 驱动直流电机与无线传输方式,构建了变量补种策略,实现了精量排种器漏播实时检测与变量补种有机融合,解决了油菜机械化排种漏播的问题^[132]。通过采用排种频率法、排种脉冲同步和碰撞信号等方法可实现油菜种子漏播状态的检测,但由于油菜籽粒径小、流动性好,还需进一步提高实时检测漏播状态准确度并降低补种响应时间。

5.3 变量播种施肥技术

变量播种施肥强调按需播种或施肥,是最大限度提高资源利用率、省种省肥的有效措施。变量播种施肥技术以决策分析系统为核心,通过液压、电动

等技术执行可控播种或施肥作业。实施过程中需将机具前进速度、产量分布图、油菜播期和品种等参数反馈给智能控制系统,控制系统则控制液压、电动元件驱动精量排种器与排肥器转动,实时调节排种量和肥量。Amazon 公司研制的气送式集排系统供种装置采用液压驱动系统,可通过控制终端实时调节排种器转速实现变量播种。Michihisa^[133]基于处方图设计了变量播种与施肥控制系统,可利用电机驱动控制排种器、排肥器转速,并与 TTKGPS 导航技术配合实现变量播种和施肥。张伏等^[134]为提高传统播种施肥控制系统播种施肥利用率和效能低的问题,设计了一种可实现人机交互变量播种施肥系统。针对国内变量施肥控制系统与排肥监测系统集成化程度低,电动机驱动变量施肥系统动态响应研究不够深入,杨硕等^[135]设计了基于电动机驱动、支持多路播种施肥监测的变量施肥控制系统。变量播种技术所依赖的自动控制、导航技术、决策分析、液压和电控等多种技术在我国农机领域的应用尚处于发展阶段,亟需加快相关技术研发以适应我国农业现代化发展需要。

6 技术难点分析与发展趋势

中国油菜种植区域主要分布在长江流域,具有一年多熟种植制度、土地分散、地块狭小和土壤黏重板结等典型特征,但是产前、产中、产后阶段发展不均衡、不充分,导致生产手段落后、成本高、综合效益低,严重影响民众油菜种植的积极性。三大阶段发展不均衡主要体现在区域不平衡、上下游阶段不平衡和各环节技术体系不平衡三大方面。发展不充分包括整个油菜生产产业发展总量不够丰富、发展程度不够高、发展态势不够稳固,体现在油菜产中耕种收全程机械化技术与装备不能很好地满足当前和未来现代农业生产的需要,存在机械化、智能化水平低、部分装备缺乏的现实问题;技术层面急需解决油菜生产的产前技术装备加快研发,产中作业装备的进一步优化改进和提高适应性,产后高品质菜籽油产地加工机械和成套装备不足;同时全产业链机械装备智能化参数调控技术和基于物联网、大数据等前沿技术的智能化管理与精准作业系统是迫切需要攻克的关键技术。

6.1 全产业链机械化智能化技术难点

1) 油菜育种、种子精细处理与收获后产地加工机械和成套装备发展不足,要求产前、产后机具作业

适应性强。油菜育种以小区育种为主,小区播种是开展育种田间试验的关键环节,然而油菜籽粒与水稻、小麦等作物不同,籽粒直径集中于 1.5~2.2 mm,小区播种、筛分、包衣等产前环节技术难度大。现阶段适宜小粒径油菜的小区播种机仍然匮乏,产前精细处理研究以工艺改良为主,缺乏适宜大规模生产的油菜种子产前处理配套机械化技术与装备。产后预处理环节不及时,经联合收获或分段收获后,一般通过人工筛分籽粒中的杂余,结合晾晒控制籽粒含水率以便后续储存及加工,处理周期长、场地需求大、质量难以保证,导致收获后油菜籽粒处理滞后,进而引起霉变和运输损失,影响产后油脂品质。

2) 油用油菜生产经济效益有待提高,油菜种植附加产值不足,农户种植积极性不足,要求拓展油菜多功能开发利用。根据油菜生育进程进行综合开发利用,可实现油菜“一菜多用”,提高油菜种植效益,促进种养结合、用养结合,加快一、二、三产业融合,但饲用、菜用、肥用油菜生产机械化技术与装备仍然不足,需要加强油菜全价值链生产技术与装备发展。

3) 油菜产中种植区域多样、作业工况复杂,各环节机械化生产水平不均衡,标准化与规模化生产需要加强。冬油菜种植区域大多为分散种植,经营规模小,不利于耕整地、播种、收获等关键环节大型机械作业;各地种植自然条件不一,栽培制度和技术多样化,油菜生育期内不同阶段植株性状差异大,不同环节机械化作业标准差异大,要求产中作业装备结合油菜农艺要求,开展上下游环节适应性优化。

4) 围绕油菜全生育期开发的农机、农艺与信息化技术融合亟待突破。优选适应全产业链机械化生产的油菜良种,规范各区域油菜栽培模式及轮作模式种植要求以提高成苗率,满足油菜产中机械化收获对油菜植株株型、分枝和成熟度等需求,最终获取高品质油菜籽粒并提取绿色安全食用油。随着农业信息技术的快速发展,农业传感器、精细作业与智能装备和物联网等技术和装备综合应用于油菜生产各阶段的系统决策、油菜长势监测和机械化装备控制,有效提高了资源利用率和工作效率。

6.2 全产业链机械化智能化发展趋势

1) 加快油菜种子精细处理与产地加工技术与装备的研发,加强油菜全产业链技术体系建设。研究油菜产前种子精细处理技术装备,产后针对菜籽烘干不及时导致大量联合收获菜籽霉变损失严重,开发适合我国小规模 and 规模化生产经营的高品质菜籽

油产地加工机械和成套装备。

2)探索油菜全价值链开发利用,提高油菜生产附加值。系统研究油菜饲用、肥用、菜用、花用、蜜用等多功能开发利用的生物特性与各功能模块的技术要求,重点研发饲料油菜的高效切碎技术、肥用的低耗切碎与深埋技术、菜用的高效有序切割采摘技术等关键技术及其配套装置,创制油菜多功能开发利用的饲用收获、油菜茎有序收获和油菜高效深埋还田等系列装备,满足不同功能要求,提升油菜的附加值。

3)均衡发展油菜产中阶段规模化经营,实现高质高效油菜生产。随着农业现代化发展进程快速推进,我国土地经营方式已向适度规模化经营转变,客观引导产业链上下游扩大生产规模,通过节本增效创收,以育种技术、种子精细处理技术、耕播集成技术、近地面航空播施关键技术、油菜分段与联合收获技术等为支撑,结合油菜种植农艺,融合机械化生产智能技术与无人系统,应用农业传感器技术、精细作业技术与智能装备和物联网技术等,探索作物长势监测和机械装备控制方式、病虫害草害防治、大数据决策等先进技术,有效提高油菜生产机械的智能化水平,提高资源利用率和作业效率。

4)油菜产业将随着农业人口、土地规模和科技发展的变化,在不同阶段有不同的发展动力,形成“政府推动-市场拉动-规模驱动-科技引领”的发展路径。政府推动:现阶段油菜种植规模偏小,传统小农依然是油菜生产主体,政府应通过购机补贴、作业补贴、扶持项目、购买服务等方式推广先进适用的技术装备,加强机耕道、机库棚、维修中心、丘陵山区宜机械化改造等基础设施建设,补齐油菜产业发展的短板;市场拉动:经市场竞争存活的新型农业经营主体逐渐成为油菜种植主力军,油菜多功能开发技术及装备有无的问题基本解决,普通农户能够通过土地流转、全程托管、委托作业服务等方式间接实现全程机械化;规模驱动:职业农业将成为油菜生产的主体,土地规模化发展加速,平原和丘陵较平地块的油菜种植实现了规模经济,山区通过发展油菜旅游等方式提高种植效益,油菜全程全面机械化基本实现;科技引领:物联网、大数据、云计算、移动互联网、虚拟现实、人工智能等智能农业技术在油菜生产中大量应用,油菜生产和管理实现了机械化、自动化、信息化和智能化,油菜产业将在科技的引领下实现高质量发展。

参考文献 References

- [1] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等.油菜精量播种技术研究进展[J].农业机械学报,2017,48(9):1-16.LIAO Q X, LEI X L, LIAO Y T, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed [J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2017, 48(9): 1-16 (in Chinese with English abstract).
- [2] 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 Chinese society of agricultural engineering, 2017, 33(6): 246-256 (in Chinese with English abstract).
- [3] 张青松,廖庆喜,肖文立,等.油菜种植耕整地技术装备研究与发展[J].中国油料作物学报,2018,40(5):702-711.ZHANG Q S, LIAO Q X, XIAO W L, et al. Research process of tillage technology and equipment for rapeseed growing [J]. Chinese journal of oil crop sciences, 2018, 40(5): 702-711 (in Chinese with English abstract).
- [4] 金梅,吴崇友,汤庆.油菜收获时间与方式对菜籽含油量及蛋白质含量的影响[J].中国农业大学学报,2016,21(7):29-36.JIN M, WU C Y, TANG Q. Effects of different harvest periods and methods on the oil and protein contents of rapeseed [J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(7): 29-36 (in Chinese with English abstract).
- [5] 朱明,陈海军,李永磊.中国种业机械化现状调研与发展分析[J].农业工程学报,2015,31(14):1-7.ZHU M, CHEN H J, LI Y L. Investigation and development analysis of seed industry mechanization in China [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2015, 31(14): 1-7 (in Chinese with English abstract).
- [6] WINTERSTEIGER A G. Plot seeders [M]. Ried, Innkreis: Wintersteiger A G, 2009: 4-21.
- [7] WINTERSTEIGER A G. Precision spaced planters [M]. Ried, Innkreis: Wintersteiger A G, 2009: 2-27.
- [8] 王德成,贺长彬,武红剑,等.苜蓿生产全程机械化技术研究现状与发展分析[J].农业机械学报,2017,48(8):1-25.WANG D C, HE C B, WU H J, et al. Review of alfalfa full-mechanized production technology [J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2017, 48(8): 1-25 (in Chinese with English abstract).
- [9] 陈海涛,王业成.2BZXJ-1型小区大豆(玉米)育种精量播种机研发成功[J].大豆科技,2009(6):15.CHEN H T, WANG Y C. 2BZXJ-1 type soybean (corn) breeding precision seeder has been successfully developed [J]. Soybean science & technology, 2009(6): 15 (in Chinese).
- [10] 李建东,杨薇,高波,等.全自动化的小区精量播种机的研制[J].农机化研究,2014,36(4):60-64.LI J D, YANG W, GAO B, et al. Development of the automatic plot precise seeder [J]. Journal of agricultural mechanization research, 2014, 36(4): 60-64 (in

- Chinese with English abstract).
- [11] 侯艳芳,于占海.5XUF-10.0型风筛式清选机的设计[J].农业装备技术,2008,34(4):38-39.HOU Y F,YU Z H. Design of type 5XUF-10.0 air screen cleaning machine[J].Agricultural equipment & technology,2008,34(4):38-39(in Chinese).
- [12] 胡志超,彭宝良,王海鸥,等.5X-12型风筛式清选机的研制[J].江苏农业科学,2009,37(6):436-439.HU Z C,PENG B L,WANG H O,et al. Development of 5X-12 type air screen cleaning machine[J]. Jiangsu agricultural sciences,2009,37(6):436-439(in Chinese).
- [13] 万林,张曼,钟飞燕,等.H₂O₂浸种处理对晚直播油菜苗期耐寒性的影响[J].中国油料作物学报,2015,37(6):811-819.WAN L,ZHANG M,ZHONG F Y,et al.Effects of seed soaking with hydrogen peroxide on seedling cold tolerance of late direct-sowing rape[J].Chinese journal of oil crop sciences,2015,37(6):811-819(in Chinese with English abstract).
- [14] 张顺凯,王端,陶雨佳,等.H₂O₂浸种对晚直播油菜生长及产量的影响[J].中国油料作物学报,2019,41(4):559-567.ZHANG S K,WANG D,TAO Y J,et al.Effects of seeds soaking with hydrogen peroxide on growth and yield of rapeseed at different sowing dates[J].Chinese journal of oil crop sciences,2019,41(4):559-567(in Chinese with English abstract).
- [15] 任奕林,李宝军,李猛,等.一种油菜种子包衣设备:CN108934280A[P].2018-09-26.REN Y L,LI B J,LI M,et al. A kind of rapeseed coating equipment:CN108934280A[P]. 2018-09-26(in Chinese).
- [16] 喻志成.基于机器视觉的蔬菜种子包衣机智能控制系统研究[D].上海:上海交通大学,2017.YU Z C.Research on intelligent control system of vegetable seed coating machine based on computer vision[D].Shanghai:Shanghai Jiaotong University, 2017(in Chinese with English abstract).
- [17] 万国伟,舒彩霞,刘晓鹏,等.液压驱动式圆盘耙设计与仿真试验[J].华南农业大学学报,2017,38(5):117-124.WAN G W,SHU C X,LIU X P,et al.Design and simulation of hydraulic driven disc harrow[J].Journal of South China Agricultural University,2017,38(5):117-124(in Chinese with English abstract).
- [18] 刘晓鹏,张青松,肖文立,等.稻油轮作区驱动圆盘犁对置组合式耕整机设计与试验[J].农业机械学报,2017,48(12):33-41.LIU X P,ZHANG Q S,XIAO W L,et al.Design and experiment on symmetrical driven disc plows combined tillage machine for rice-rapeseed rotation area[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery,2017,48(12):33-41(in Chinese with English abstract).
- [19] 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.Study on reducing adhesion and resistance and simulation analysis about ditching and rotary soil engaged tools for rape planter[D].Wuhan:Huazhong Agricultural University,2017(in Chinese with English abstract).
- [20] 张青松,廖庆喜,汲文峰,等.油菜直播机开沟犁体曲面优化与试验[J].农业机械学报,2015,46(1):53-59.ZHANG Q S,LI-AO Q X,JI W F,et al.Surface optimization and experiment on ditch plow of direct rapeseed seeder[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery,2015,46(1):53-59(in Chinese with English abstract).
- [21] 刘晓鹏,肖文立,马磊,等.油菜联合直播机组合式船型开沟器设计与开沟质量试验[J].农业机械学报,2017,48(11):79-87.LIU X P,XIAO W L,MA L,et al.Design and ditching quality experiment on combined ship type opener of direct rapeseed seeder[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery,2017,48(11):79-87(in Chinese with English abstract).
- [22] 廖庆喜,肖文立,舒彩霞,等.带切茬圆盘的类铧式犁施肥装置:CN206118394U[P].2017-02-01.LIAO Q X,XIAO W L,SHU C X,et al.Class share plough fertilizer injection unit of stubble disc is cut in area:CN206118394U[P].2017-02-01(in Chinese).
- [23] 廖宜涛,高丽萍,廖庆喜,等.油菜精量联合直播机深施肥装置设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(2):65-75.LIAO Y T,GAO L P,LIAO Q X,et al.Design and test of side deep fertilizing device of combined precision rapeseed seeder[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery,2020,51(2):65-75(in Chinese with English abstract).
- [24] 魏国梁,张青松,刘立超,等.犁旋组合式油菜直播机扣垡装置设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(6):38-46.WEI G L,ZHANG Q S,LIU L C,et al.Design and experiment of plowing and rotary tillage buckle device for rapeseed direct seeder[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery,2020,51(6):38-46(in Chinese with English abstract).
- [25] 廖庆喜,张笋,丁幼春,等.带状种床整备装置:CN206542710U[P].2017-10-10.LIAO Q X,ZHANG S,DING Y C,et al.Banded seed bed reorganizes and outfit device:CN206542710U[P]. 2017-10-10(in Chinese).
- [26] 汤楚宙,罗海峰,吴明亮,等.变容量型孔轮式排种器设计与试验[J].农业工程学报,2010,26(12):114-119.TANG C Z,LUO H F,WU M L,et al.Design and test on seed metering device with variable capacity model-hole roller[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering,2010,26(12):114-119(in Chinese with English abstract).
- [27] 张青松,余琦,王磊,等.油菜匀式精量穴播排种器设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(6):47-54.64.ZHANG Q S,YU Q,WANG L,et al Design and experiment of scoop-type precision hole metering device for rapeseed[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery,2020,51(6):47-54,64(in Chinese with English abstract).
- [28] 田波平,廖庆喜,黄海东,等.2BFQ-6型油菜精量联合直播机的设计[J].农业机械学报,2008,39(10):211-213.TIAN B P,LI-AO Q X,HUANG H D,et al.Design of 2BFQ-6 rape precision combined direct seeder[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery,2008,39(10):211-213(in Chinese).
- [29] 舒彩霞,韦跃培,廖宜涛,等.油菜气力式排种系统参数对其负压特性的影响及风机选型[J].农业工程学报,2016,32(10):

- 26-33. SHU C X, WEI Y P, LIAO Y T, et al. Influence of air blower parameters of pneumatic seed-metering system for rapeseed on negative pressure characteristics and air blower selection[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2016, 32(10): 26-33 (in Chinese with English abstract).
- [30] 廖宜涛, 舒彩霞, 廖庆喜, 等. 油菜精量直播机气力式排种系统稳压控制方法与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 49-56. LIAO Y T, SHU C X, LIAO Q X, et al. Air pressure stabilizing method and experiment of pneumatic seed-metering system of precision rapeseed planter[J]. Chinese society of agricultural engineering, 2017, 33(15): 49-56 (in Chinese with English abstract).
- [31] 舒彩霞, 付云开, 王磊, 等. 油菜精量直播机凸轮摇杆式播量调节机构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 17-25. SHU C X, FU Y K, WANG L, et al. Design and experiment of cam-rocker sowing rate adjusting mechanism for rapeseed precision direct seeding machine[J]. Chinese society of agricultural engineering, 2020, 36(10): 17-25 (in Chinese with English abstract).
- [32] 李兆东, 杨文超, 武尧尧, 等. 油菜气力盘式精量排种器槽齿辅助充种性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 57-66. LI Z D, YANG W C, WU Y Y, et al. Performance analysis and experiments of seed filling assisted by groove-tooth of pneumatic disc precision metering device for rapeseed[J]. Chinese society of agricultural engineering, 2020, 36(20): 57-66 (in Chinese with English abstract).
- [33] 廖庆喜, 张宁, 张朋玲, 等. 一器多行离心式油菜排种器[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 48-51, 95. LIAO Q X, ZHANG N, ZHANG P L, et al. Centrifugal metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2012, 43(2): 48-51, 95 (in Chinese with English abstract).
- [34] 廖庆喜, 张朋玲, 廖宜涛, 等. 基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 109-114. LIAO Q X, ZHANG P L, LIAO Y T, et al. Numerical simulation on seeding performance of centrifugal rape-seed metering device based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2014, 45(2): 109-114 (in Chinese with English abstract).
- [35] 曹秀英, 廖庆喜, 丛锦玲, 等. 离心式油菜精量排种器型孔结构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(S1): 40-46. CAO X Y, LIAO Q X, CONG J L, et al. Design and experiment on metering hole structure of centrifugal precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2014, 45(S1): 40-46 (in Chinese with English abstract).
- [36] 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 X Y, LIAO Y T, LIAO Q X, 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 with English abstract).
- [37] 王都, 舒彩霞, 廖宜涛, 等. 集排离心式油菜精量排种器充种控制方法与试验[J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(6): 182-189. WANG D, SHU C X, LIAO Y T, et al. Control method and test of seed-filling of centralized centrifugal precision seed-metering device for rapeseed[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2019, 54(6): 182-189 (in Chinese with English abstract).
- [38] 李明, 刘晓辉, 廖宜涛, 等. 气力滚筒式油菜精量集排器[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 68-73. LI M, LIU X H, LIAO Y T, et al. Pneumatic cylinder-type centralized precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2013, 44(12): 68-73 (in Chinese with English abstract).
- [39] 李兆东, 雷小龙, 曹秀英, 等. 油菜精量气压式集排器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 9-17. LI Z D, LEI X L, CAO X Y, et al. Design and experiment of pneumatic-typed precision centralized metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2015, 31(7): 9-17 (in Chinese with English abstract).
- [40] Anon. ED precision air seeder[EB/OL]. [2021-03-12]. <http://www.amazone.net/1262.asp>.
- [41] DOWNS H W, TAYLOR R K. Evaluation of pneumatic granular herbicide applicators for seeding small grains in Oklahoma[J]. Applied engineering in agriculture, 1986, 2(2): 58-63.
- [42] KUMAR V J F, DIVAKER-DURAIRAJ C. Influence of head geometry on the distributive performance of air-assisted seed drills[J]. Journal of agricultural engineering research, 2000, 75(1): 81-95.
- [43] 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 X L, LIAO Y T, LI Z D, et al. Design and experiment of seed feeding device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2015, 31(20): 10-18 (in Chinese with English abstract).
- [44] LEI X L, LIAO Y T, LIAO Q X. 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] 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 H C, LIAO Q X, WANG L, 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 with English abstract).
- [46] YATSKUL A, LEMIERE J P. Establishing the conveying parameters required for the air-seeders[J]. Biosystems engineering, 2018, 166(2): 1-12.
- [47] 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/OL].Computers and electronics in agriculture, 2020, 16: 105151 [2021-03-16]. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105151>.
- [48] 王磊,席日晶,廖宜涛,等.地表坡度对油菜宽幅精量免耕播种机排种性能的影响[J].农业工程学报,2020,36(7):11-21. WANG L, XI R J, LIAO Y T, et al. Effects of land slope on seeding performance of a broad width precision no-tillage planter for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2020, 36(7): 11-21 (in Chinese with English abstract).
- [49] 王磊,廖宜涛,张青松,等.油菜集排器供种装置侧向倾斜排种性能试验与分析[J].农业工程学报,2020,36(19):1-10. WANG L, LIAO Y T, ZHANG Q S, et al. Experiments and analysis on seeding performance of seed feeding device of rapeseed centralized metering device under lateral tilt[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2020, 36(19): 1-10 (in Chinese with English abstract).
- [50] 曹光乔,李亦白,南风,等.植保无人机飞控系统航线规划研究进展分析[J].农业机械学报,2020,51(8):1-16. CAO G Q, LI Y B, NAN F, et al. Development and analysis of plant protection UAV flight control system and route planning research [J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2020, 51(8): 1-16 (in Chinese with English abstract).
- [51] CAI G W, DIAS J, SENEVIRATNE L. A survey of small-scale unmanned aerial vehicles: recent advances and future development trends[J]. Unmanned systems, 2014, 2(2): 175-199.
- [52] 黄小毛,唐灿, TANG Lie, 等.含障碍物多田块下旋翼无人机作业返航补给规划研究[J].农业机械学报,2020,51(7):82-90, 71. HUANG X M, TANG C, TANG L, et al. Refill and recharge planning for rotor uav in multiple fields with obstacles [J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2020, 51(7): 82-90, 71 (in Chinese with English abstract).
- [53] 黄小毛,张垒, TANG Lie, 等.复杂边界田块旋翼无人机自主作业路径规划[J].农业机械学报,2020,51(3):34-42. HUANG X M, ZHANG L, TANG L, et al. Path planning for autonomous operation of drone in fields with complex boundaries[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2020, 51(3): 34-42 (in Chinese with English abstract).
- [54] 徐博.植保无人机航线规划方法研究[D].北京:中国农业大学,2017. XU B. Research on route planning for plant protection unmanned aerial vehicles[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [55] 吴开华,孙学超,张竞成,等.基于高度融合的植保无人机仿地飞行方法研究[J].农业机械学报,2018,49(6):17-23. WU K H, SUN X C, ZHANG J C, et al. Terrain following method of plant protection UAV based on height fusion[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2018, 49(6): 17-23 (in Chinese with English abstract).
- [56] 张青松,张恺,廖庆喜,等.油菜无人机飞播装置设计与试验[J].农业工程学报,2020,36(14):138-147. ZHANG Q S, ZHANG K, LIAO Q X, et al. Design and experiment of rapeseed aerial seeding device used for UAV[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2020, 36(14): 138-147 (in Chinese with English abstract).
- [57] 黄小毛,徐胡伟,张顺,等.油菜成条飞播装置设计与试验[J].农业工程学报,2020,36(5):78-87. HUANG X M, XU H W, ZHANG S, et al. Design and experiment of a device for rapeseed strip aerial seeding[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2020, 36(5): 78-87 (in Chinese with English abstract).
- [58] SUGIURA R, NOGUCHI N, ISHII K. Remote-sensing technology for vegetation monitoring using an unmanned helicopter [J]. Biosystems engineering, 2005, 90(4): 369-379.
- [59] 吴崇友,肖圣元,金梅,油菜联合收获与分段收获效果比较[J].农业工程学报,2014,30(17):10-16. WU C Y, XIAO S Y, JIN M. Comparison on rape combine harvesting and two-stage harvesting[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2014, 30(17): 10-16 (in Chinese with English abstract).
- [60] HOBSON R N, BRUCE D M. PM-power and machinery: seed loss when cutting a standing crop of oilseed rape with two types of combine harvester header[J]. Biosystems engineering, 2002, 81(3): 281-286.
- [61] FOSTER C A, STROSSER R P, PETERS J, et al. Automatic velocity control of a self-propelled windrower[J]. Computers and electronics in agriculture, 2005, 47(1): 41-58.
- [62] 廖宜涛,陈传节,舒彩霞,等.4SY-1.8型手扶式油菜割晒机设计与试验[J].农业机械学报,2014,45(S1):94-100. LIAO Y T, CHEN C J, SHU C X, et al. Design and experiment of 4SY-1.8 rape walking windrower[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2014, 45(S1): 94-100 (in Chinese with English abstract).
- [63] 韩彩锐.4SY-1.8型油菜割晒机液压驱动系统设计与试验研究[D].武汉:华中农业大学,2014. HAN C R. Design and experiment study on hydraulic driving system of 4SY-1.8 rape windrower[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [64] 王修善,刘大为,李旭,等.4SY-2.0型自走式油菜割晒机的设计与试验[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2016,42(4):445-453. WANG X S, LIU D W, LI X, et al. Design and experiment of 4SY-2.0 self-propelled rape windrower[J]. Journal of Hunan Agricultural University (natural sciences), 2016, 42(4): 445-453 (in Chinese with English abstract).
- [65] 石增祥.4SY-2.2型油菜割晒机的设计与试验研究[D].长沙:湖南农业大学,2017. SHI Z X. Design and experiment of 4SY-22 rapeseed windrower[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [66] 金诚谦,吴崇友,金梅,等.4SY-2型油菜割晒机设计与试验[J].农业机械学报,2010,41(10):76-79. JIN C Q, WU C Y, JIN M, et al. Design and experiment of 4SY-2 rape windrower[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery,

- 2010,41(10):76-79(in Chinese with English abstract).
- [67] 蒋亚军,廖宜涛,秦川,等.4SY-2.9型油菜割晒机机架振动分析及改进[J].农业工程学报,2017,33(9):53-60.JIANG Y J,LI AO Y T,QIN C,et al.Vibration analysis and improvement for frame of 4SY-2.9 typed rape windrower[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering,2017,33(9):53-60 (in Chinese with English abstract).
- [68] 李海同,吴崇友,沐森林,等.基于ANSYS-ADAMS的立式油菜割晒机铺放角形成机理[J].农业工程学报,2020,36(14):96-105.LI H T,WU C Y,MU S L,et al.Formation mechanism of laying angle of vertical rape windrower based on ANSYS-ADAMS[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering,2020,36(14):96-105 (in Chinese with English abstract).
- [69] 冉军辉,沐森林,李海同,等.油菜联合收获机往复式双动割刀行星轮驱动器设计与试验[J].农业工程学报,2020,36(9):17-25.RAN J H,MU S L,LI H T,et al.Design and test of planet gear driver of reciprocating double-acting cutter for rapeseed combine harvester[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering,2020,36(9):17-25 (in Chinese with English abstract).
- [70] 李海同,万星宇,王华,等.油菜联合收获机集成式纵轴流脱粒装置设计与试验[J].农业机械学报,2017,48(5):108-116.LI H T,WAN X Y,WANG H,et al.Design and experiment on integrated longitudinal axial flow threshing and separating device of rape combine harvester[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery,2017,48(5):108-116 (in Chinese with English abstract).
- [71] 朱剑,尹文庆,谢蓓.基于嵌入式的电液比例控制系统在联合收割机制台高度控制中的应用[J].液压与气动,2012(1):83-86.ZHU J,YIN W Q,XIE B.The application of embedded electrohydraulic proportional control system for combine harvesters header height control[J].Chinese hydraulics & pneumatics,2012(1):83-86(in Chinese).
- [72] 庄肖波,李耀明.基于鲁棒反馈线性化的联合收获机制台高度控制策略[J].农业机械学报,2020,51(11):123-130.ZHUANG X B,LI Y M.Header height control strategy of harvester based on robust feedback linearization[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery,2020,51(11):123-130 (in Chinese with English abstract).
- [73] 唐忠,李耀明,徐立章,等.不同脱粒元件对切流与纵轴流水稻脱粒分离性能的影响[J].农业工程学报,2011,27(3):93-97.TANG Z,LI Y M,XU L Z,et al.Effects of different threshing components on grain threshing and separating by tangential-axial test device[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering,2011,27(3):93-97 (in Chinese with English abstract).
- [74] 邸志峰,崔中凯,张华,等.纹杆块与钉齿组合式轴流玉米脱粒滚筒的设计与试验[J].农业工程学报,2018,34(1):28-34.DI Z F,CUI Z K,ZHANG H,et al.Design and experiment of rasp bar and nail tooth combined axial flow corn threshing cylinder [J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering,2018,34(1):28-34(in Chinese with English abstract).
- [75] 谢方平,罗锡文,卢向阳,等.柔性杆齿滚筒脱粒机理[J].农业工程学报,2009,25(8):110-114.XIE F P,LUO X W,LU X Y,et al.Threshing principle of flexible pole-teeth roller for paddy rice[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering 2009,25(8):110-114 (in Chinese with English abstract).
- [76] 耿端阳,谭德蕾,于兴瑞,等.玉米柔性脱粒滚筒脱粒元件设计与试验[J].吉林大学学报(工学版),2020,50(5):1923-1933.GENG D Y,TAN D L,YU X R,et al.Design and test of corn flexible threshing cylinder element[J].Journal of Jilin University(engineering and technology edition),2020,50(5):1923-1933(in Chinese with English abstract).
- [77] 李耀明,王建鹏,徐立章,等.联合收获机脱粒滚筒凹板间隙调节装置设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(8):68-75.LI Y M,WANG J P,XU L Z,et al.Design and experiment on adjusting mechanism of concave clearance of combine harvester cylinder[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery,2018,49(8):68-75 (in Chinese with English abstract).
- [78] 王勋威,谢斯平,李旭,等.可调间隙脱粒分离装置的设计与试验[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2019,45(2):205-211.WANG X W,XIE Z P,LI X,et al.Design and experiment on threshing and separation device with adjustable concave clearance[J].Journal of Hunan Agricultural University(natural sciences),2019,45(2):205-211 (in Chinese with English abstract).
- [79] 童水光,沈强,唐宁,等.纵轴流清选装置混合流场数值模拟与优化试验[J].农业机械学报,2016,47(7):135-142.TONG S G,SHEN Q,TANG N,et al.Numerical simulation and optimization experiment of mixed flow field on longitudinal axial flow cleaning device[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery,2016,47(7):135-142(in Chinese with English abstract).
- [80] 樊晨龙,崔涛,张东兴,等.纵轴流联合收获机双层异向清选装置设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(S1):239-248.FAN C L,CUI T,ZHANG D X,et al.Design and experiment of double-layered reverse cleaning device for axial flow combine harvester[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery,2018,49(S1):239-248(in Chinese with English abstract).
- [81] 王立军,李瑞,于泳涛,等.玉米籽粒收获机双层不平行振动筛设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(7):130-139.WANG L J,LI R,YU Y T,et al.Design and test of double-layer non-parallel vibrating screens[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery,2019,50(7):130-139 (in Chinese with English abstract).
- [82] 李耀明,马征,徐立章.油菜混合物与仿生筛面基体间的粘附特性[J].农业机械学报,2012,43(2):75-78,84.LI Y M,MA Z,XU L Z.Adhesion property between rape mixture and bionic

- screen matrix[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2012, 43(2): 75-78, 84 (in Chinese with English abstract).
- [83] 李洋,徐立章,周莹,等.脱出物喂入量对多风道清选装置内部气流场的影响[J].农业工程学报,2017,33(12):48-55.LI Y, XU L Z, ZHOU Y, et al. Effect of extractions feed-quantity on airflow field in multi-ducts cleaning device[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2017, 33(12): 48-55 (in Chinese with English abstract).
- [84] 李洪昌,李耀明,唐忠,等.风筛式清选装置振动筛上物料运动 CFD-DEM 数值模拟[J].农业机械学报,2012,43(2):79-84.LI H C, LI Y M, TANG Z, et al. Numerical simulation of material motion on vibrating screen of air-and-screen cleaning device based on CFD-DEM[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2012, 43(2): 79-84 (in Chinese with English abstract).
- [85] 廖庆喜,万星宇,李海同,等.油菜联合收获机旋风分离清选系统设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(14):24-31.LIAO Q X, WAN X Y, LI H T, et al. Design and experiment on cyclone separating cleaning system for rape combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14): 24-31 (in Chinese with English abstract).
- [86] 公谱,李玲,刘江平,等.我国小型青饲料切碎机械的研究与发展现状[J].农机化研究,2014,36(6):237-241.GONG P, LI L, LIU J P, et al. The research and development status of small size green fodder cutter mill in China[J].Journal of agricultural mechanization research, 2014, 36(6): 237-241 (in Chinese with English abstract).
- [87] 蒋亚军,廖宜涛,廖庆喜.冬春鲜喂饲用油菜收获机滚刀式切碎装置设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(2):102-111. JIANG Y J, LIAO Y T, LIAO Q X. Design and experiment on cylinder-type chopping device of harvester for fodder rapeseed in winter and spring[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2019, 50(2): 102-111 (in Chinese with English abstract).
- [88] 邓春岩,陈芳,邓晨,等.小型秸秆切碎机的设计[J].农机化研究,2011,33(7):141-143,150.DENG C Y, CHEN F, DENG C, et al. The design of a mini-type of straw-cutting[J].Journal of agricultural mechanization research, 2011, 33(7): 141-143, 150 (in Chinese with English abstract).
- [89] 赵清华,车刚,万霖,等.新型青贮饲料收获机滚筒切碎器的设计与试验研究[J].黑龙江八一农垦大学学报,2006,18(6):43-46.ZHAO Q H, CHE G, WAN L, et al. Design and experimental study on new type shredding drum of cylinder-type forage harvester[J].Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University, 2006, 18(6): 43-46 (in Chinese with English abstract).
- [90] 廖宜涛,廖庆喜,周宇,等.饲料油菜薹期收获茎秆破碎离散元仿真参数标定[J].农业机械学报,2020,51(6):73-82. LIAO Y T, LIAO Q X, ZHOU Y, et al. Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in bolting stage[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2020, 51(6): 73-82 (in Chinese with English abstract).
- [91] 廖宜涛,王在腾,廖庆喜,等.果荚初期饲料油菜茎秆离散元接触模型参数标定[J].农业机械学报,2020,51(S1):236-243. LIAO Y T, WANG Z T, LIAO Q X, et al. Calibration of discrete element model parameters of forage rape stalk at early pod stage[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2020, 51(S1): 236-243 (in Chinese with English abstract).
- [92] 李熙,张俊雄,曲峰,等.农用无人机药箱防晃内腔结构优化设计[J].农业工程学报,2017,33(18):72-79. LI X, ZHANG J X, QU F, et al. Optimal design of anti sway inner cavity structure of agricultural UAV pesticide tank[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2017, 33(18): 72-79 (in Chinese with English abstract).
- [93] 姜锐,周志艳,徐岩,等.植保无人机药箱液量监测装置的设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(12):107-115. JIANG R, ZHOU Z Y, XU Y, et al. Design and experiment of liquid quantity monitor for pesticide tank in spraying UAV[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2017, 33(12): 107-115 (in Chinese with English abstract).
- [94] 何勇,肖舒裴,方慧,等.植保无人机施药喷嘴的发展现状及其施药决策[J].农业工程学报,2018,34(13):113-124. HE Y, XIAO S P, FANG H, et al. Development situation and spraying decision of spray nozzle for plant protection UAV[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2018, 34(13): 113-124 (in Chinese with English abstract).
- [95] 刘洋洋,茹煜,陈青,等.无人机变量施药实时监控系统设计及试验[J].农业机械学报,2020,51(7):91-99. LIU Y Y, RU Y, CHEN Q, et al. Design and test of real-time monitoring system for UAV variable spray[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2020, 51(7): 91-99 (in Chinese with English abstract).
- [96] 张豪,祁力钧,吴亚垒,等.无人机果树施药旋翼下洗气流场分布特征研究[J].农业工程学报,2019,35(18):44-54. ZHANG H, QI L J, WU Y L, et al. Distribution characteristics of rotor downwash airflow field under spraying on orchard using unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2019, 35(18): 44-54 (in Chinese with English abstract).
- [97] WEN S, SHEN N W, ZHANG J T, et al. Single-rotor UAV flow field simulation using generative adversarial networks[J/OL]. Computers and electronics in agriculture, 2019, 167: 105004 [2021-03-16]. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105004>.
- [98] 张瑞瑞,李龙龙,文瑶,等.植保无人机喷施雾滴沉积特性的荧光示踪分析[J].农业工程学报,2020,36(6):47-55. ZHANG R R, LI L L, WEN Y, et al. Fluorescence tracer method for analysis of droplet deposition pattern characteristics of the sprays applied via unmanned aerial vehicle[J].Transactions of the

- Chinese society of agricultural engineering, 2020, 36(6): 47-55 (in Chinese with English abstract).
- [99] 王志翀, Andreas Herbst, Jane Bonds, 等. 植保无人机低空低量施药雾滴沉积飘移分布立体测试方法[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4): 54-62. WANG Z C, HERBST A, BONDS J, et al. Stereoscopic test method for low-altitude and low-volume spraying deposition and drift distribution of plant protection UAV [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2020, 36(4): 54-62 (in Chinese with English abstract).
- [100] 王昌陵, 何雄奎, 曾爱军, 等. 基于仿真果园试验台的植保无人机施药雾滴飘移测试方法与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 56-66. WANG C L, HE X K, ZENG A J, et al. Measuring method and experiment on spray drift of chemicals applied by UAV sprayer based on an artificial orchard test bench [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2020, 36(13): 56-66 (in Chinese with English abstract).
- [101] 吴谋成. 油菜籽加工与综合利用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2009. WU M C. Rapeseed processing and comprehensive utilization [M]. Beijing, China Light Industry Press, 2009 (in Chinese).
- [102] 黄庆德, 黄凤洪, 李文林, 等. 菜籽脱皮加工技术实践与应用[J]. 中国油脂, 2003, 28(1): 24-26. HUANG D Q, HUANG F H, LI W L, et al. Study and practice of rapeseed dehulling process [J]. China oils and fats, 2003, 28(1): 24-26 (in Chinese with English abstract).
- [103] 李文林, 黄凤洪. YTP75 型菜籽脱皮与皮仁分离系统的研制与应用[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 98-102. LI W L, HUANG F H. Research and application of YTP75 rapeseed dehuller and separating system [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2007, 23(3): 98-102 (in Chinese with English abstract).
- [104] 张明, 万楚筠, 黄凤洪. 亚临界萃取菜籽脱皮低温压榨饼中油脂[J]. 中国油脂, 2015, 40(5): 14-17. ZHANG M, WANG C Y, HUANG F H. Subcritical extraction of oil from dehulled cold-pressed rapeseed cake [J]. China oils and fats, 2015, 40(5): 14-17 (in Chinese with English abstract).
- [105] 李文林, 黄凤洪, 顾强华, 等. 双螺杆冷榨机的研制与应用[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 91-95. LI W L, HUANG F H, GU Q H, et al. Research and application of twin-screw press for cold pressing of de-hulled rapeseed [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2006, 22(6): 91-95 (in Chinese with English abstract).
- [106] 刘大川, 叶平, 张麟, 等. 低温螺旋榨油机: CN2584406Y [P]. 2003-11-05. LIU D C, YE P, ZHANG L, et al. Low temperature screw oil press: CN2584406Y [P]. 2003-11-05 (in Chinese).
- [107] 李子明, 相海, 潘小平, 等. 单螺杆油料冷榨机: CN101434130 [P]. 2009-05-20. LI Z M, XIANG H, PAN X P, et al. Single screw rod oilseed cold pressing expeller: CN101434130 [P]. 2009-05-20 (in Chinese).
- [108] 忻耀年. 油料冷榨机: CN2789011 [P]. 2006-06-21. XIN Y N. Oil cold press: CN2789011 [P]. 2006-06-21 (in Chinese).
- [109] 李道亮, 李震. 无人农场系统分析与发展展望[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 1-12. LI D L, LI Z. System analysis and development prospect of unmanned farming [J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2020, 51(7): 1-12 (in Chinese with English abstract).
- [110] KAIVOSOJA J, LINKOLEHTO R. GNSS error simulator for farm machinery navigation development [J]. Computers and electronics in agriculture, 2015, 119: 166-177.
- [111] 罗锡文, 张智刚, 赵祚喜, 等. 东方红 X-804 拖拉机的 DGPS 自动导航控制系统[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 139-145. LUO X W, ZHANG Z G, ZHAO Z X, et al. Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X-804 tractor [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2009, 25(11): 139-145 (in Chinese with English abstract).
- [112] 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 Chinese society for agricultural machinery, 2017, 48(2): 11-19 (in Chinese with English abstract).
- [113] 张成涛, 谭彧, 吴刚, 等. 谷物联合收割机电控全液压转向系统建模与仿真[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20): 11-17. ZHANG C T, TAN Y, WU G, et al. Modeling and simulation of electronic control full hydraulic steering system for grain combine harvester [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2013, 29(20): 11-17 (in Chinese with English abstract).
- [114] 丁幼春, 夏中州, 彭靖叶, 等. 联合收获机单神经元 PID 导航控制器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(7): 34-42. DING Y C, XIA Z Z, PENG J Y, et al. Design and experiment of the single-neuron PID navigation controller for a combine harvester [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2020, 36(7): 34-42 (in Chinese with English abstract).
- [115] 曾宏伟, 雷军波, 陶建峰, 等. 低对比度条件下联合收割机导航线提取方法[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4): 18-25. ZENG H W, LEI J B, TAO J F, et al. Navigation line extraction method for combine harvester under low contrast conditions [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2020, 36(4): 18-25 (in Chinese with English abstract).
- [116] 张成涛, 谭彧, 吴刚, 等. 基于达芬奇平台的联合收获机视觉导航系统路径识别[J]. 农业机械学报, 2012, 43(S1): 271-276. ZHANG C T, TAN Y, WU G, et al. Visual navigation system path recognition algorithm based on davinci platform for combine harvester [J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2012, 43(S1): 271-276 (in Chinese with English abstract).
- [117] 吴刚, 谭彧, 郑永军, 等. 基于改进 Hough 变换的收获机器人行走目标直线检测[J]. 农业机械学报, 2010, 41(2): 176-179. WU

- G, TAN Y, ZHENG Y J, et al. Walking goal line detection based on improved hough transform on harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2010, 41(2): 176-179 (in Chinese with English abstract).
- [118] 关卓怀, 陈科尹, 丁幼春, 等. 水稻收获作业视觉导航路径提取方法[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 19-28. GUAN Z H, CHEN K Y, DING Y C, et al. Visual navigation path extraction method in rice harvesting[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2020, 51(1): 19-28 (in Chinese with English abstract).
- [119] HAN X Z, KIM H J, KIM J Y, et al. Path-tracking simulation and field tests for an auto-guidance tillage tractor for a paddy field[J]. Computers and electronics in agriculture, 2015, 112: 161-171.
- [120] ZHANG M N, LIN X Z, YIN W Q. An improved tuning method of fractional order proportional differentiation (FOPD) controller for the path tracking control of tractors[J]. Biosystems engineering, 2013, 116(4): 478-486.
- [121] 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.
- [122] 张智刚, 罗锡文. 农业机械导航中的航向角度估计算法[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 110-114. ZHANG Z G, LUO X W. Adaptive weighted fusion algorithm for orientation evaluation of agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2008, 24(5): 110-114 (in Chinese with English abstract).
- [123] 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 Chinese society for agricultural machinery, 2015, 46(3): 43-50 (in Chinese with English abstract).
- [124] 张闻宇, 丁幼春, 王雪玲, 等. 基于 SVR 逆向模型的拖拉机导航纯追踪控制方法[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 29-36. ZHANG W Y, DING Y C, WANG X L, et al. Pure pursuit control method based on SVR inverse-model for tractor navigation[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2016, 47(1): 29-36 (in Chinese with English abstract).
- [125] 丁幼春, 何志博, 夏中州, 等. 小型履带式油菜播种机导航免疫 PID 控制器设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 12-20. DING Y C, HE Z B, XIA Z Z, et al. Design of navigation immune controller of small crawler-type rape seeder[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2019, 35(7): 12-20 (in Chinese with English abstract).
- [126] 田光兆, 顾宝兴, Mari Irshad Ali, 等. 基于三目视觉的自主导航拖拉机行驶轨迹预测方法及试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 40-45. TIAN G Z, GU B X, MARI I A, et al. Traveling trajectory prediction method and experiment of autonomous navigation tractor based on trinocular vision[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2018, 34(19): 40-45 (in Chinese with English abstract).
- [127] 张华强, 王国栋, 吕云飞, 等. 基于改进纯追踪模型的农机路径跟踪算法研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 18-25. ZHANG H Q, WANG G D, LYU Y F, et al. Agricultural machinery automatic navigation control system based on improved pure tracking model[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2020, 51(9): 18-25 (in Chinese with English abstract).
- [128] 李明, 丁幼春, 廖庆喜. 气力式油菜精量排种器田间漏播检测方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(S1): 27-31. LI M, DING Y C, LIAO Q X. Loss sowing detection in field of pneumatic precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2010, 26(S1): 27-31 (in Chinese with English abstract).
- [129] 丁幼春, 王雪玲, 廖庆喜. 基于时变窗口的油菜精量排种器漏播实时检测方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 11-21. DING Y C, WANG X L, LIAO Q X, et al. Method of real-time loss sowing detection for rapeseed precision metering device based on time changed window[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2014, 30(24): 11-21 (in Chinese with English abstract).
- [130] 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 Chinese society of agricultural engineering, 2017, 33(9): 29-36 (in Chinese with English abstract).
- [131] 丁幼春, 王雪玲, 廖庆喜, 等. 油菜籽漏播螺旋管式补种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 16-24. DING Y C, WANG X L, LIAO Q X, et al. Design and experiment on spiral-tube reseeding device for loss sowing of rapeseed[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2015, 31(22): 16-24 (in Chinese with English abstract).
- [132] 丁幼春, 杨军强, 张莉莉, 等. 油菜精量排种器变量补种系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16): 27-36. DING Y C, YANG J Q, ZHANG L L, et al. Design and experiment on variable reseeding system for rapeseed precision metering device[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2018, 34(16): 27-36 (in Chinese with English abstract).
- [133] MICHIIHISA I. Variable rate control of equipment for wheat sowing and fertilizing applications[J]. Journal of the Japanese society for agricultural machinery, 2009, 71(4): 90-96.
- [134] 张伏, 陈天华, 陈建, 等. 基于 MCGS 的播种施肥控制系统设计与仿真[J]. 河北农业大学学报, 2019, 42(4): 117-121. ZHANG F, CHEN T H, CHEN J, et al. Design and simulation of seeding and fertilizing control system based on MCGS[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2019, 42(4): 117-121 (in Chinese with English abstract).
- [135] 杨硕, 王秀, 翟长远, 等. 支持种肥监测的变量施肥系统设计与

试验[J].农业机械学报,2018,49(10):145-153. YANG S, WANG X, ZHAI C Y, et al. Design and test on variable rate fertilization system supporting seeding and fertilizing monito-

ring[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2018, 49(10): 145-153 (in Chinese with English abstract).

Situation and prospect of key technology and equipment in mechanization and intelligentization of rapeseed whole industry chain

WAN Xingyu¹, LIAO Qingxi^{1,2}, LIAO Yitao^{1,2}, DING Youchun^{1,2},
ZHANG Qingsong^{1,2}, HUANG Huang^{1,2}, CHEN Hui¹, ZHU Longtu¹

1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Agricultural Equipment
in Mid-Lower Yangtze River, Wuhan 430070, China

Abstract The rapeseed whole industry chain of includes the stages of pre-production, mid-production, and post-production. The development of mechanization and intelligent technology at each stage is one of the important ways to achieve cost-saving and efficiency-increasing in rapeseed production. This article analyzed the general situation at home and abroad of the rapeseed whole industry chain and the development status of key technologies and equipment in the main links. The key technologies in plot breeding and seed precise treatment at the stage of pre-production and rapeseed oil processing at the stage of post-production were summarized. It focused on the development trends of key technologies in soil tillage, sowing, harvesting, and field management at the stage of mid-production. It covered technologies and equipment in seedbed managing, furrow opening, deep fertilization, straw returning, single and centralized precise sowing, drone sowing, disease-pest-weed control, windrower, combine harvesting, and forage rapeseed harvesting in detail. Based on the systematic summary and analyses of the characteristics and development trends of the rapeseed industry in China, it is pointed out that there are regional imbalances, imbalances at the stages of upstream and downstream, and imbalances in the technical system of each link in the mechanized and intelligent development of the rapeseed whole industry chain. It is proposed to accelerate the research and development of series of equipment at the stages of pre-production and post-production, promote the multi-functional development and utilization of rapeseed, realize the balanced development of mechanization in all links of rapeseed production, explore the intelligent technology and unmanned system of rapeseed mechanized production. The formation of a development path driven by the government promoting, market pulling, scale production driving, and science and technology leading is the key to achieving the high-quality and efficient development of the rapeseed whole industry chain.

Keywords rapeseed; rape machinery; whole industry chain; mechanization; intelligentization; development trends; complete equipment; multifunctional development; unmanned system; balance development

(责任编辑:陆文昌)