

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.001

油菜精量播种技术研究进展

廖庆喜^{1,2} 雷小龙^{1,3} 廖宜涛^{1,2} 丁幼春^{1,2} 张青松^{1,2} 王磊^{1,2}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070;
3. 四川农业大学机电学院, 雅安 625014)

摘要: 油菜精量播种技术是机械化、规模化种植实现节本增效的重要途径之一,也是油菜全程机械化的研究重点和难点。本文分析了国内外油菜生产概况和主要播种装备,重点阐述了油菜播种环节的精密排种、种床整理和播种智能化等关键技术研究现状和发展动态。油菜精密排种技术作为精密播种的基础和核心,依据不同的结构和原理分为单体式排种技术和集中式排种技术;阐明了油菜种植的播种深度和畦沟深度稳定性影响要素及其保证播种和畦沟深度及厢面平整度的实现方式;分析了油菜精密排种器漏播检测补种、自动导航和变量播种技术等3项油菜播种智能化技术的研究进展。在系统总结和分析我国油菜种植特点和发展趋势的基础上,指出了现阶段油菜精密播种技术难点,并提出高速、宽幅、高效和精密的气力式排种技术、播深稳定性调控技术、降附减阻防堵的耕整地技术和农机农艺农信深度融合技术是油菜精密播种技术的研究重点。自动导航、排种器漏播检测和变量播种等技术是提升油菜播种智能化水平的关键技术。

关键词: 油菜; 精密播种; 气力式排种技术; 播深稳定性

中图分类号: S223.2⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)09-0001-16

Research Progress of Precision Seeding for Rapeseed

LIAO Qingxi^{1,2} LEI Xiaolong^{1,3} LIAO Yitao^{1,2} DING Youchun^{1,2} ZHANG Qingsong^{1,2} WANG Lei^{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, Wuhan 430070, China

3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

Abstract: Rapeseed is an important oil plant in China. Precision seeding technology is an important method to decrease the costs and increase the efficiency of mechanical and scale operation for rapeseed and is also the important and difficult research point for rapeseed full mechanization. The planting status and main seeding equipments of rapeseed at home and abroad were concluded. The research status and development tendency for the key seeding technologies including precision seeding, seedbed preparation and intelligent seeding, were analyzed. Precision seeding technology, as the basic and key aspect for precision seeding, included one-row and centralized seeding technologies, according to different structure and principle of seeding device. The factor to affect the stability of seeding depth and furrow depth for rapeseed planting and the method to ensure the seeding depth, furrow depth and seedbed surface flatness were studied. The intelligent technologies for rapeseed sowing were consisted of technology of loss sowing detection and variable reseeding, automatic navigation and variable sowing. Moreover, the conclusion and prospection for the planting characteristics and development trend were provided from following three aspects: firstly, the precision seeding technology had the performance with high speed, wide work breadth, high efficiency and precision seeding; secondly, the technology to control the seeding depth, the tillage technology to reduce resistance and adherence were the research focus for improving rapeseed seedling rate and protecting seedlings from waterlogging; thirdly, combined agricultural machinery, agronomy and information technology is benefit to population structure and yield. Technologies of loss sowing detection and variable reseeding, automatic navigation and variable sowing promote the intelligent level of rapeseed planter and improve the intelligent development for rapeseed sowing.

Key words: rapeseed; precision seeding; pneumatic seeding technology; sowing depth's consistency

收稿日期: 2017-08-02 修回日期: 2017-08-22
基金项目: 国家自然科学基金项目(51575218)、国家油菜产业体系专项(CARS-13)、农业部科研杰出人才及其创新团队项目和湖北省技术创新专项重大项目(2016ABA094)
作者简介: 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等研究,E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

引言

油菜是重要的油料作物,兼具饲料、绿肥、蔬菜、能源、旅游、蜜源等多方面的价值。根据农业区划和种植特点,中国油菜种植区域可分为冬油菜和春油菜两大产区。

冬油菜产区集中分布于长江流域,占总产 90% 以上,以稻-油或稻-稻-油水旱轮作为主。长期以来,该区域播种受前茬作物收获农时、土壤黏重板结和分散田块等影响,油菜机械化水平低下,2015 年机械化播种水平仅为 22.01%^[1],进而导致生产成本高、效益低,制约了油菜产业的发展。

提高我国油菜机械化播种水平是油菜种植节本增效的重要途径。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],“良种+良法+良田+良态+良机”配套技术可有效提高油菜生产效益,其中良种主要为杂交油菜种子,采用精量播种可节省种子成本;多样化的种植制度对油菜直播机(良机)播种质量提出了更高要求。油菜精量播种技术具有节种、省工和增效等优点,成为油菜机械化种植的发展趋势。

油菜精量播种技术是根据农艺要求的种植密度,以一定播种量将油菜种子均匀地播在种床适宜位置,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。油菜精量联合直播机采用耕播集成理念,一次性完成旋耕、灭茬、精量播种、施肥、开沟、覆土和开畦沟等油菜种植所有工序,实现一次性均匀出苗,省去间苗、补苗等环节,达到苗匀、苗齐、苗壮的出苗效果。油菜精量播种技术核心是种子均匀分布和播深稳定,提高种子成苗率。油菜机械化播种受地域种植制度、土壤质地、土壤墒情和播期等生产条件限制,冬油菜区的开畦沟技术和精量播种智能技术等已成为影响油菜播种成苗率的关键技术和研究热点。

本文在分析国内外油菜生产概况和播种装备基

础上,根据影响油菜播种均匀性和成苗率的主要因素,从油菜精量排种技术、种床整理技术和精量播种智能化技术 3 方面研究进行阐述,并分析现阶段油菜播种技术难点和存在问题,展望我国油菜精量播种技术发展趋势。

1 油菜生产概况与播种装备分析

1.1 油菜生产概况

1.1.1 国内外油菜生产概况

油菜属十字花科芸薹属,是一年生草本植物,包括白菜型、芥菜型和甘蓝型 3 种类型,在全球多个国家和地区作为主要油料作物种植,油菜种植面积分布如图 1 所示。加拿大、中国、欧盟、印度和澳大利亚是油菜籽生产大国,近年来中国、欧盟和印度的油菜种植规模保持稳定;加拿大采用休耕地复垦增加了种植面积,成为油菜最大生产国。

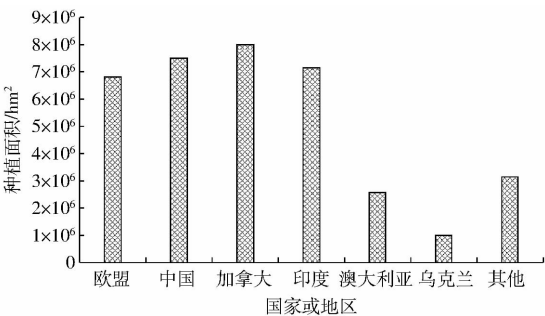


图 1 国内外油菜种植面积(2014 年)

Fig. 1 Planting area of rapeseed in the world (2014)

由于各国的地理位置和种植制度不同,决定油菜种植模式和种植机械化水平差异大(表 1)。加拿大、澳大利亚主要以春油菜为主,采用一年一熟种植制度;而中国、欧盟和印度主要种植冬油菜。加拿大、欧盟和澳大利亚的油菜种植区面积广阔、土壤粘性小,油菜机械化播种水平均很高,已实现全程机械化。中国的油菜机械化播种水平相对发达国家仍然低下,这受限于多元化的种植制度、土壤黏重板结和地块分散狭小等条件。

表 1 主要国家和组织的油菜种植概况^[3]

Tab. 1 Planting's overview for rapeseed in the world

国家/组织	种植区域	种植类型	播种时间	种植制度	地理特点	机械化播种水平
加拿大	艾伯塔州、萨斯喀彻温、马尼托巴 3 省,北纬 49° 以北	春油菜	5 月	一年一熟	平原面积广大、灌溉水源充足	基本达到 100%
	长江流域、新疆、甘肃、青海和内蒙古	冬油菜 90%, 春油菜 10%	9—10 月/ 4—5 月	一年多熟/ 一年一熟	土壤黏重,雨水充足/地块面积大,土壤砂壤	22.01%
欧盟	德国、法国、英国、波兰等	冬油菜为主	10 月	一年两熟	平原面积广大、土壤粘性小	基本达到 100%
印度	拉贾斯坦邦、北方邦和哈里亚纳邦	冬油菜	9—10 月	一年两熟	高温、干旱	较低
澳大利亚	西澳、新南威尔士、维多利亚、南澳	春油菜	5 月	一年一熟	集中连片,土壤粘性小	基本达到 100%

1.1.2 中国油菜生产概况分析

油菜抗逆性强,适应范围广,按生态可将中国油菜主产区划分为冬油菜区和春油菜区。我国的油菜生产以冬油菜为主,其种植面积和产量均占全国的 90% 左右。冬油菜种植区域主要集中在长江流域各省份,具体包括长江上游优势区(四川、贵州、云南、重庆、陕西五省(市)),长江中游优势区(湖北、湖南、江西、安徽等四省及河南信阳地区),长江下游优势区(江苏、浙江两省)。春油菜种植区主要包括青海、内蒙、甘肃 3 省(区)。湖北、湖南、四川占全国油菜播种面积的比重均超过 10%,安徽、江西、贵州和江苏均在 5% 以上。春油菜主产区种植面积约为 8.2%。

据国家统计局和中国农业机械化年鉴统计数据,2015 年油菜机械化播种水平仅为 22.01%,北方春油菜区机械化水平相对较高,其中内蒙古的机械化播种水平超过 70%,基本实现全程机械化。南方冬油菜产区机械化播种水平普遍较低,仅有湖北省和河南省油菜机械化播种水平达到 30% 以上,如表 2 所示。油菜机械化播种水平程度低、技术层次低已成为制约我国油菜生产发展的瓶颈。

表 2 2015 年油菜主产区机械化播种水平

Tab.2 Seeding mechanization level of rapeseed producing area in 2015

序号	省份	机播水平/%	序号	省份	机播水平/%
1	内蒙古	72.79	9	四川	13.40
2	青海	66.35	10	湖南	9.54
3	甘肃	64.27	11	陕西	8.28
4	湖北	33.92	12	浙江	2.58
5	河南	31.37	13	云南	1.51
6	安徽	26.58	14	贵州	0.76
7	江西	26.13	15	重庆	0.68
8	江苏	16.78			

1.2 油菜播种装备分析

1.2.1 国外油菜播种装备

国外播种装备主要为大中型播种机,且播种机通用性高,可播种油菜、小麦、蔬菜等中小粒径种子。播种机主要分为机械式条播机、气吸式精量播种机

和气流输送集排式播种机等,均具有较高的作业效率。常用的国外油菜机械式条播机包括美国约翰迪尔公司(图 2a)、法国库恩公司、德国雷肯公司和阿玛松公司等生产的条播机。

气吸式精量播种机主要采用气吸式精密排种器,播种机的通用性、播种精度和作业效率不断提高。法国摩诺赛(Monosem)公司开发的 NG Plus 系列气吸式精量播种机(图 2b)、德国阿玛松公司研制的 ED 系列播种机、美国约翰迪尔公司生产的 MaxEmerge 5 气吸式精密播种机和凯斯纽荷兰公司生产的 DV 系列精量播种机等均具有精量播种、高速、宽幅和工作效率高等优点,适用于免耕播种。

气流输送集排式播种机通过气流输送种子及肥料,简化了整机结构和传动系统,较机械式条播机具有更大的作业幅宽和更高的作业效率。气流输送集排式播种机可分为气流输送式免耕播种机和气流输送式复式作业播种机。气流输送式免耕播种机主要包括美国向日葵公司、约翰迪尔公司、凯斯公司、德国雷肯公司、阿玛松公司(图 2c)和意大利马斯奇奥公司等生产的播种机;气流输送式复式作业播种机包括奥地利博田公司和德国豪狮公司等生产的播种机。国外大型宽幅播种机适应我国北方春油菜大面积播种,我国长江中下游地区土壤黏重板结,秸秆量大,地块分散且狭小,主要为水旱轮作模式,国外大型播种机不适合我国冬油菜主产区油菜播种。

1.2.2 国内油菜播种装备

目前国内油菜播种方式可分为撒播、条播和精量播种。油菜撒播多以人工方式,曹秀英^[4]设计了以离心旋转盘式排种器为核心的撒播播种机。撒播播种机结构简单,但因不成行、对田面平整度要求较高和油菜播种需开畦沟等问题,实际生产中应用较少。

油菜条播机一般采用外槽轮式排种器,主要由传统的小麦或谷物条播机改装、演变而成。吴明亮等^[5]设计了 2BYF-6 型油菜免耕直播联合播种机,可一次完成开排水沟、播种、施肥和覆土作业(图 3a)^[6]。并进一步研发了 2BYD-6 型油菜浅耕直播施肥联合播种机,补充了浅耕、灭茬等功能,可



图 2 国外油菜播种机

Fig.2 Foreign planter for rapeseed

通过变速机构改变排种转速而调节和控制播种量,实现油菜播种变量可调。

为进一步提高油菜小粒径播种精度、节省种子,华中农业大学廖庆喜等^[7-9]研制了 2BFQ 系列油菜精量联合直播机,其中 2BFQ-4 型油菜精量联合直播机,以手扶拖拉机为配套动力,可一次完成耕整地、播种、施肥、开沟、覆土等工序,并可通过改变旋耕刀排列实现开沟播种,能满足小田块、丘陵等地区的小规模种植要求。以正负气压组合式精量排种技术为核心研发的 2BFQ 系列油菜精量联合直播机(图 3b),以大中型拖拉机为配套动力,集成旋耕、灭茬、开畦沟、精量播种、施肥、仿形驱动、覆土等多种功能,适应春油菜、冬油菜、少免耕等多种种植模式和农艺要求。近年来,以耕播集成技术为核心的 2BFQ 系列油菜精量联合直播机在湖北、湖南、江

西、安徽、浙江、江苏、陕西、四川、重庆、新疆等 19 省市区进行了示范与推广应用。

为提高播种机效率、节省加工成本和增加适应性,华中农业大学进一步研制了 2BFL-6 型中央集排离心式油菜精量联合直播机(图 3c)和 2BYMQ-10 型油麦兼用气送式联合直播机,均采用集排器为核心部件,实现了油菜的精少量播种,丰富了油菜精量播种机类型。

油菜精量播种机集成精量播种、耕整地、开畦沟和变量播种等功能,成为油菜机械化播种的发展方向。针对南方冬油菜产区土壤黏重板结、含水率高、前茬秸秆量大和地块偏小等问题,从排种技术、种床整理技术和智能化播种技术等方面提高油菜精量播种机播种质量和适应性是解决这些问题的关键。



(a) 2BYF-6型油菜免耕直播联合播种机



(b) 2BFQ-6型冬油菜精量联合直播机



(c) 2BFL-6型离心式油菜精量联合直播机

图 3 国内油菜播种机

Fig. 3 Rapeseed planter in China

2 油菜精量排种技术

2.1 油菜排种技术发展历程

油菜种子粒径小,球形度高,流动性较好,但表皮薄且含油量高,易发生破损和堵塞现象,是精量排种的难点和关键点。油菜排种技术经历了机械排种技术、气力式单体排种技术和集中排种技术的发展历程(表 3)。

从油菜排种技术发展趋势来看,油菜排种初始阶段使用改进小麦等外槽轮式和窝眼轮式的机械排种器。为降低种子破损率和精量播种,气吸式和正负气压组合式排种器实现油菜单粒精量播种。随着农机农艺技术深度融合,傅廷栋院士提出因地、因时增加种植密度,可达到“以密增产、以密补迟、以密省肥、以密控草、以密适机”的效果。为满足规模化种植和适度增密的需要,进一步提高播种效率和简化整机结构,机械离心式、气力滚筒式和气送式等集排技术得以快速发展。综合来看,油菜排种技术经历撒播一条播—精量播种—单粒精密播种的过程。由于区域性多样化种植制度及农业机械化水平差异,目前油菜机械化播种处于单体式和集中式排种等多种方式并存的状态。

表 3 油菜排种技术发展历程

Tab.3 Development path of seeding technology for rapeseed

排种技术	典型排种器	类型	特点
机械排种技术	机械撒播	撒播	结构简单,成本低,播种量大,均匀性差
	外槽轮式排种器	条播	种子破损率高
	窝眼轮式排种器	穴播	
气力式单体排种技术	气吸式排种器	单粒精密播种	播种精量,伤种率低,适应速度较低
	正负气压组合式排种器		
集中排种技术	机械离心式集排器	精量条播	高速、宽幅,启停同步性较差
	气力滚筒式集排器	精量播种	排种精量,高速受限
	气送式集排器	精量条播	高速、宽幅、高效,适应种子范围广

2.2 单体式油菜精量排种技术

单体式排种器即“一器一行”排种器,早期应用于油菜播种的单体式排种器及相关研究以机械式为主,现阶段的研究和应用主要为气力式排种器。

张宇文等^[10-11]采用排种孔内设置推种齿原理设计了多功能精密排种器,实现油菜种子精密播种;并优化设计推种轮齿形曲线,明显降低了油菜种子破损率。袁文胜等^[12]设计了一种异形孔窝眼轮式

油菜排种器,型孔采用螺旋线布置,提高了播种合格率和降低了种子破损率。汤楚宙等^[13]在偏心轮型孔轮式排种器基础上,设计了由型孔轮和调节环组成的变量型孔轮式排种器,实现了油菜等小粒径种子的变量条播。吴明亮等^[14]设计了 2BF-6 型稻茬田油菜免耕联合直播机,采用外槽轮式排种器,调节囊种的型孔数量和外槽轮堵头长度调节播种量。油菜机械式精量排种器主要通过改变型孔形状和容积实现精量排种,受油菜种子含油率高,机械作用导致种子破损易堵塞型孔,影响种子充种和排种性能,且靠重力充种,不利于播种量的精确控制。

气力式排种器具有对种子形状适应性好、破损率低、作业质量高、排种均匀性好,适用于高速作业和通用性强等特点,主要应用气流压力,对种子进行吹送或吸附,使种子按一定轨迹完成排种,主要分为气吸式和正负气压组合式等类型排种器(图 4)^[4]。

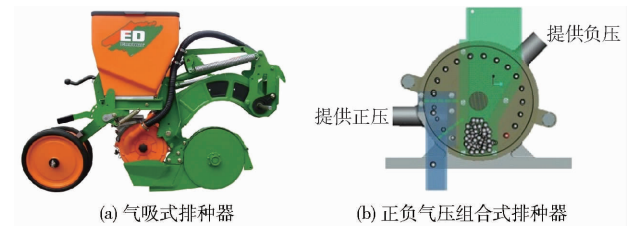


图 4 单行气力式排种器

Fig. 4 Pneumatic metering device for one row

气吸式精密排种器应用气流负压吸附种子至投种区完成吸种、携种过程,在投种区依靠种子重力完成投种过程,通过改变排种盘型孔尺寸可实现不同类型作物单粒精密排种。垂直圆盘式气吸式精密排种器不易损伤种子,对种子尺寸要求不严,可适用于较高速播种,通用性较好,广泛应用于精密播种^[15]。影响气吸式排种器排种性能的主要因素为吸室真空度和排种盘转速,刘文忠等^[16]发现影响气吸式排种装置排种性能的结构参数包括吸种孔直径、结构形式、吸种孔数量和分布形式等,优化得出排种盘转速和气吸室真空度的最佳组合。李耀明等^[17-18]对气吸式排种器气流场进行了深入研究,通过建立气吸振动式排种器吸种过程三维力学模型和运用 Fluent 软件计算了油菜种子在吸种口附近的受力,采用锥孔、增大型孔直径和压差可提高吸种能力。龚志强等^[19]研究了吸盘式精密排种装置吸种区域气流场中的种子颗粒受力情况,得出影响种子受力的主要因素为:种子与吸孔的距离、种子姿态、相对压力和吸孔孔径。

国外典型精密播种机主要选用气吸式排种器(图 4a),具有精量播种、高速、智能和工作效率高等优点,在加拿大和欧洲等国家和地区大型农场应用

于油菜精量播种。国外相关学者通过试验研究进一步提高种子粒距均匀性,KARAYEL 等^[20]构建了种子物料特性参数与气流压强之间的数学模型,用于指导不同作物播种时压强调节。ARZU 等^[21-22]采用响应面法来优化气吸式精密排种器的孔径和气流压强以提高粒距均匀性;气吸式排种盘型孔数和前进速度对粒径均匀性均有显著影响,前进速度达 2 m/s 时排种性能显著下降。综合来看,气吸式精密排种器广泛应用于多种作物尤其是中、大粒径种子作物精密播种,油菜种子粒径范围约为 1.5 ~ 2.5 mm,粒径小、质量轻、吸种型孔小、易堵塞,不外加载荷作用仅靠重力难以及时投种,而添加刮种装置易发生种子破损。

基于油菜种子物料特性和精量播种要求,廖庆喜等提出了负压吸种、正压吹种的正负气压组合式排种技术(图 4b),设计的正负气压组合式油菜精量排种器的气室分为负压区和正压区,负压区呈马蹄形,可实现油菜种子单粒精密播种,解决了型孔堵塞与种子破损等难题^[23],以正负气压组合式油菜精量排种器为核心设计了 2BFQ 系列油菜精量联合直播机^[24]。进一步分析了气力系统和排种机理,通过分析排种盘转速、风机转速和正压泄气孔直径对排种性能的影响,表明风机转速及其与排种盘转速的交互作用是影响各行排种量及其一致性的首要因素^[25],并进一步根据排种器数量预测风机选型^[26]。余佳佳等^[27-28]对该排种器进行了结构解析和排种过程仿真分析,分析了正负气压与排种盘转速的匹配关系,优化了排种器正负压气孔和气室容积等结构参数。丛锦玲等^[29-30]在正负气压组合式排种器的排种盘嵌入导种条,通过导种条扰动种群提高充种性能,可实现油麦兼用排种。

2.3 油菜集中式排种技术

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。集排器能实现高速、宽幅播种,显著提高工作效率,方便装种卸种,简化整机及传动结构,成为排种技术发展的趋势。根据排种原理可分为 3 类:机械离心式集排器、气力滚筒式排种器和气送式集排器(图 5)。

廖庆喜等^[31]设计了一器多行机械离心式油菜排种器(图 5a),其核心部件为倒置内锥筒,依靠种子离心力实现一器多行排种,结构简单。应用 EDEM 软件对离心式排种过程进行数值模拟,结果表明内锥筒中的种子量增加降低了临界转速^[32];优化型孔直径可保证型孔不堵塞^[33],并设计枝状阀式分流装置将单个型孔的排出种子分成 2 行,提高了



图5 油菜精量集排器

Fig. 5 Precision centralized metering device for rapeseed

田间作业适应性^[34]。机械离心式集排器结构简单,但排种量受排种器转速影响,其灵敏度高,与播种机前进速度同步性不够。

气力滚筒式集排器(图5b)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。李明等^[35-36]设计了一种气力滚筒式油菜精量集排器,该排种器采用正负气压组合式排种原理,播种行数为6行;并建立了负压值、正压值与结构参数和运行参数的关系模型。李兆东等^[37-38]为解决清种、护种环节易剪切破坏种子的问题,采用气流清种与气压护种组合技术,设计了一种具有“倒方锥”型孔的“一器六行”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^[39],可适应前进速度15 km/h的高速精量播种。气力滚筒式集排器多为6~8行,能达到精量播种要求。

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,田块面积相对较大,对作业效率提出了更高要求。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。国外气送式播种机主要包括:美国Sunflower公司生产的气流式条播机、John Deere公司生产的1890型免耕播种机^[40]、加拿大Flexi-coil公司生产的5000HD型气力式条播机^[41]、德国Amazone公司生产的Primera DMC牵引式播种机^[42]、美国凯斯公司生产的Flex Hoe系列气流播种机和德国雷肯(LEMKEN)公司生产的Solitair系列气力式精量播种机^[43]等。国外的气送式播种机主要针对大豆、麦类等中、大粒径作物种子精量条播,适用于传统型耕作及保护性耕作,也可应用于油菜宽幅播种。DOWNS等^[44]应用2种气送式集排器Gandy 5812和Flex-King 160研究播种大豆、绿豆、高粱和小麦等种子的性能,排种部件作为一个独立部分为其定量供种,气流将种子平均分配至开沟器中。KUMAR等^[45]比较了平行盘、封闭漏斗型和流线型分配器3

种气送式集排器分配器结构形状对排种性能的影响,流线型分配器的分配均匀性最好,供种速率和入口气压对分配均匀影响较大。李中华等^[46-47]研究了外槽轮供种机构对正压式气流排种器供种苜蓿、披碱草和玉米的排种性能;同时采用CFD方法对排种器内部流场进行仿真模拟,发现分配器中的涡流现象影响排种均匀性。常金丽等^[48]设计了2BQ-10型气流一阶集排式排种系统。

根据长江中下游地区稻-油(麦)水旱轮作种植制度和油菜、小麦为该区域主要冬季种植作物,为提高机具利用率和节省成本,雷小龙等^[49-51]设计了油麦兼用型气送式集排器(图5c),提出了一种倾斜锥柱状型孔和锥孔轮交错排布的结构,可实现油菜、小麦兼用和变量与定量供种;优化设计了文丘里管式供料装置^[52]和碗式枝状分配器,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^[53],优化集排器结构,以该集排器为核心的2BYMQ-10型油麦兼用气送式联合直播机和2BFQ-18型油菜免耕精量联合直播机已在湖北、新疆多地开展生产性考核。

气送式集排器具有优越的排种性能,适应高速、宽幅、多种作物精量播种,能满足现阶段油菜、小麦等小、中粒径的播种要求,有效提高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。

3 种床整理技术

精量播种技术要求是农作物种子按一定粒距均匀地播在一定深度的种沟内,覆盖适量的细湿土,为种子发芽提供良好条件。田间播种作业过程中,地面起伏不平造成开沟深度难以一致和种子发生弹跳现象,影响粒径均匀性和播种深度。同时,油菜属直根系忌水作物,在冬油菜产区生长期间强降雨月份较多,排、灌水通畅是保证油菜成苗率的关键因素。

3.1 播深稳定性控制技术

种子位于土壤的位置对作物出苗和直立至关重

要,合适的播种深度可为种子发芽提供良好的水分、气流通透性和温度等生长条件,保证一致的播种深度可为一次性全苗、壮苗、齐苗提供保障^[54]。播种深度太小,幼苗直立性差,易发生倒伏;播种深度太大,种子出苗率下降;保护性耕作应增加播种深度,传统耕作则需适当降低播种深度^[55]。播种深度也与土壤类型密切相关^[56],长江流域为冬油菜主产区,前茬主要为水稻,土壤黏重板结,田块因含水率高易发生地面凹陷,造成地面平整度降低,从而对播深稳定性影响较大,使油菜幼苗长势不一致(图 6a)。根据地面起伏实现播种深度一致,可使油菜种子集中均匀出苗(图 6b)。

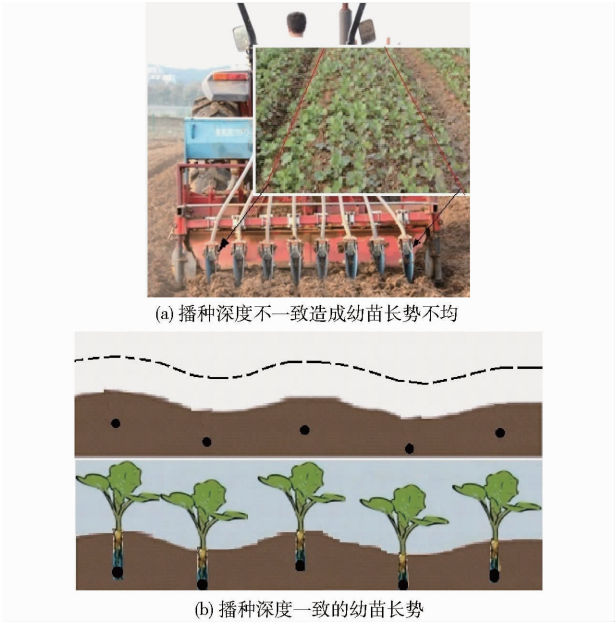


图 6 播种深度一致性对油菜出苗影响示意图
Fig. 6 Effects of seeding depth uniformity on emergence for rapeseed

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,种子定位(即播种深度)过程如图 7 所示。开沟器是影响开沟和播种深度的关键部件,常用的开沟器有圆盘式、锄铲式和滑刀式等类型,圆盘式开沟器不扰动土层,能使种子落于湿土并完成土壤回流覆土;锄铲式开沟器会扰动土层,主要用于轻质土壤;滑刀式开沟器沟型整齐、沟底平整、深度稳定,不搅乱土层,结构如图 8 所示。

相关学者对开沟器结构进行优化,并与仿形机

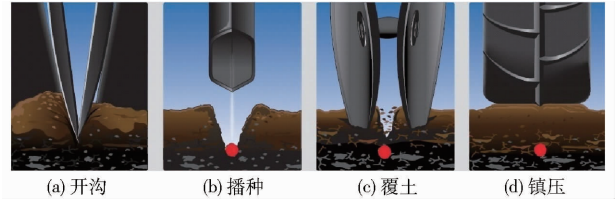


图 7 种子定位过程
Fig. 7 Seed positioning processes



图 8 开沟器类型
Fig. 8 Openers' types

1. 圆盘开沟器 2. 平行四连杆仿形机构 3. 镇压轮 4. 大圆盘
5. 小圆盘 6. 液压仿形机构 7. 锄铲式开沟器 8. 滑刀式开沟器

构配合保证播深稳定性。圆盘式开沟器因结构简单、切割残茬能力强和动力消耗低等优点,广泛应用于国内外播种机^[57-58]。通过仿生技术对圆盘开沟器表面处理、大小圆盘错位排布等方法减粘降阻和保证播种深度。John Deere 和 Amazone 等公司应用圆盘式开沟器与平行四连杆仿形机构配合(图 9a),保证圆盘开沟器随地表上下浮动,从而保持播深一致。赵淑红等^[59]进一步根据作业要求,设计了双向平行四杆仿形机构,可实现上下、左右仿形。

为更好地适应不同作业工况,马云海等^[60]利用土壤动物的减黏脱土特性和超高分子量聚乙烯材料,设计了仿生波纹形开沟器,其减黏降阻的效果高于普通开沟器。赵淑红等^[61-62]设计了仿旗鱼头部曲线型开沟器和滑推式开沟器,可明显降低工作阻力和对土壤的扰动,且具有良好的回土性能。顾耀权等^[63]发现滑切角是影响滑刀式开沟器作业性能的主要因素;为适应全秸秆覆盖后的播种条件,结合缺口圆盘开沟器和滑刀式开沟器的功能结构特点,设计了具有滑刀式缺口的圆盘开沟器,可提高开沟和破茬能力^[64]。JAMES 等^[65]设计了弯腿式开沟器,在高速免耕作业条件下降低阻力和土壤扰动,播种速度可达 16 km/h。通过控制系统调节液压仿形机构位置(图 8b),可保证播种深度一致^[66],使种子与土壤紧密接触。

仿形机构根据地表起伏开出一致的种沟,综合应用播深控制系统、液压技术和仿生技术等更好地使种子到达预定位置,同步降阻减黏,适应黏重板结土壤是油菜精量播种技术的重点发展方向。

3.2 厢面平整度控制技术

厢面平整度影响油菜种子发芽率及幼苗长势,尤其在长江流域土壤水分不能及时散发,易发生渍

害。厢面不平整对播种深度影响也较大,通过仿形平整拖板、耕深调节系统或激光平地机等技术提高厢面平整度,能更好地保证播种深度。

旋耕深度是影响厢面平整度的重要因素,主要通过拖拉机悬挂机构进行调节。鲁植雄等^[67]提出了基于模糊控制的电控液压悬挂系统耕深自动控制方法,减缓了力调节带来的耕深变化和位调节带来的发动机负荷波动。提高耕深稳定性同时采用仿形平整拖板可保证厢面平整度,现有的仿形平整拖板主要通过弹力强制使地表保持一致。激光平地技术应用于提高田面平整度,可防止拖拉机侧倾降低厢面平整度。

由于拖拉机打滑或深陷等原因,厢面平整度与土壤含水率、细碎度等密切联系,采用激光平地 and 耕深自动调节等技术来提高田面平整度和耕深稳定性是保证厢面平整的发展方向。

3.3 畦沟稳定性控制技术

为适应长江中下游油菜种植区水旱轮作、土壤黏重的种植条件和排灌水方便的要求,开好“三沟”(厢沟、腰沟、畦沟)是油菜避免渍害的保证。张青松等^[68-69]设计了开畦沟前犁装置,保证畦沟沟深和初步沟型,类铧式后犁收土,从而保证最终畦沟沟型(图 9a)。为适应较高含水率条件开畦沟作业,进一步设计了船型开沟器(图 9b)^[70],在土壤黏重板结、高含水率工况下可开出稳定畦沟。



(a) 铧式开沟器



(b) 船型开沟器

图 9 畦沟开沟器作业效果

Fig. 9 Ditching performance of different opener

2BF-6 型稻茬田油菜免耕联合直播机采用旋耕开沟机中间开畦沟^[14]。圆盘式开沟机也应用于开畦沟,康建明等^[71]优化了正弦指数曲线型开沟刀片,确定影响沟深稳定性系数的最优参数。现有开畦沟技术主要包含主动和被动开沟 2 种方式,主动开沟(如圆盘式开沟机)能开出适应油菜种植要求的畦沟,但功耗较高。被动式畦沟开沟器适应不同

含水率和秸秆量的作业要求,采用仿生技术和结构创新设计新型畦沟开沟器,畦沟沟型稳定、降阻减黏和降低功耗成为开畦沟装置的研究重点。

4 精量播种智能化技术

随着 3S、传感与检测、自动控制和信息处理等技术的发展,智能农机装备成为发展趋势,智能化的播种机也是发展方向之一。智能化精量播种机主要包括漏播检测与实时补种技术、自动导航技术和变量播种技术(图 10),采用漏播检测与实时补种技术可实时监测排种状态和反馈排种性能,及时在漏播时补种,避免漏播造成减产;自动导航技术利用 GPS 或北斗导航等完成对行,可提高行驶直线度和降低驾驶员劳动强度,有效利用耕地和进行路径规划;变量播种技术则是基于产量分布图,根据土壤肥力、播期、品种、种植要求等变量播种。智能化精量播种机集成自动导航、漏播检测和变量播种等技术,成为实时、实地播种的发展方向。

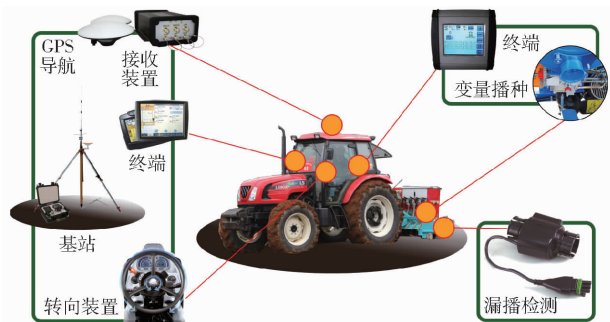


图 10 精量播种智能集成技术

Fig. 10 Integration technology of intelligent precision seeding

4.1 精量排种器漏播检测与实时补种技术

实时监测播种质量参数,尤其是漏播状态及时反馈,可避免后期补苗或补种。Precision Planting 和 John Deere 等公司通过在导种管内安装光电检测装置监测排种过程,可实时探测排种和反馈排种量及排种时间间隔(图 11a),通过精量排种器实时监测系统全程监控排种过程。光电检测方法难以实现较高排种速度的油菜等小粒径种子的检测,李明等^[72]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。丁幼春等^[73]提出了一种采用排种盘转速与排种脉冲同步检测、排种频率与时间间隔双重阈值约束的检测方法,有效解决了小粒径精量排种器重播条件下漏播的检测,并进一步实现多路精量排种器性能检测^[74]。为进一步提高油菜小粒径种子监测播种量的准确性,设计了油菜精量排种器种子流传感装置(图 11b),实现油菜种子流排种频率与排种总量实时监测^[75],并设计了螺管式补种器对漏播进行补种^[76]。通过采用排种频率法、排种脉冲



图 11 实时漏播检测技术

Fig. 11 Technology of real-time loss sowing detection

1. 导种管 2. 光电检测装置 3. 排种器实时监测系统 4. 油菜精量直播机 5. 拖拉机 6. 监测显示终端 7. 导种管 8. 种子流传感装置 9. 种子袋

同步和碰撞信号等方法可检测油菜漏播状态,由于油菜籽粒径小、流动性好,提高实时检测漏播状态准确度和降低补种响应时间需进一步研究。

4.2 油菜播种作业自动驾驶技术

油菜机械化播种作业自动驾驶可最大限度利用田块资源,保证对行准确度和行驶直线度为中期智能化油菜管理监控和后期机械化收获提供标准化的作业环境。该技术主要包括农机位置定位、导航路径跟踪控制和定位数据整合等关键技术。自动驾驶技术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,实时对种植机械进行自动驾驶控制,实现预定位置播种操作,同时采集作业信息与定位数据进行融合形成油菜种植数据库。

KAIVOSOJA 等^[77]开发了 GNSS 错误模拟器提高拖拉机导航和定位精度,罗锡文等^[78]在东方红 X - 804 拖拉机上开发了基于 RTK - DGPS 的自动驾驶控制系统,提出了跨行地头转向控制方法。黎永健等^[79]设计的基于 RTK - DGPS 定位和双闭环转向控制相结合的自动驾驶系统提高了拖拉机自动转向系统性能。导航路径规划及路径跟踪控制方法是导航系统的核心,通常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。XIONG 等^[80]建立了拖拉机动态模型,提高了较高含水率条件下的追踪功能。ZHANG 等^[81]设计了最优分数阶比例微分控制器用于控制

拖拉机路径跟踪,可使得闭环系统降低绝对误差和降低作物破坏。ERKAN 等^[82]使用分布式非线性预测控制方法解决拖拉机轨迹追踪问题,可提高控制精度和对环境干扰的鲁棒性。张智刚等^[83]提出了基于协方差函数的加窗估计算法,用于在线估计电子罗盘和微机械陀螺的测量方差,可有效估测农机的航向角度。王鹤等^[84]建立自动导航车轮转角测量误差补偿模型。

在油菜精量联合直播机导航问题中,播种环境多受土壤坚实度、土壤含水率以及植被覆盖率等因素影响,张闻宇等^[85 - 86]设计了自适应变论域模糊控制器实现拖拉机液压转向,并提出了 SVR 逆向模型的拖拉机导航纯追踪控制方法,能够有效修正油菜播种作业时对复杂的地表特征行驶的影响,适用于油菜精量联合直播机自动对行作业(图 12)。针对播种机导航作业过程中的对行播种起始位姿调整和套行作业自动转弯问题,设计了双切圆寻线模型控制方法,该方法可有效降低播种机人工操作配合自动驾驶作业的操作难度^[87]。同时设计的自动导航摩擦轮式转向驱动系统能有效控制拖拉机转向,拆装便捷,提高了播种机导航系统的实用性^[88]。自动驾驶技术已逐步应用于规模化的农业生产,但针对油菜播种过程智能化作业的实用性、适应性、可靠性仍需要进一步研究。

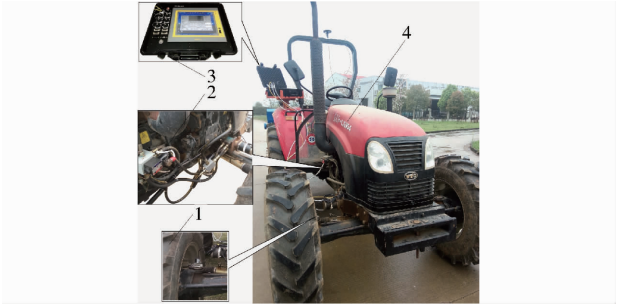


图 12 自动驾驶系统

Fig. 12 Automatic navigation system

1. 角度传感器 2. 电控转向执行机构 3. 导航控制终端 4. 拖拉机

4.3 变量播种技术

变量播种是按需播种的关键环节,可最大限度利用资源和节省种子。变量播种技术以决策分析系统为核心,通过液压、电动等技术实现。前进速度、产量分布图、播期和品种等参数反馈给智能控制系统,控制系统控制液压、电动元件驱动精量排种器转动,可实时调节排种量实现变量播种。

Amazone 公司研制的气送式集排系统供种装置采用液压驱动变量播种(图 13),可通过控制终端实时调节排种器转速。MICHIHISA^[89]设计了变量播



图 13 液压驱动排种系统

Fig. 13 Hydraulic drive seed-metering system

1. 液压驱动器 2. 控制终端

种与施肥控制系统,它基于处方图利用电动机驱动控制排种、排肥转速,并与 TTK-GPS 导航技术配合实现变量播种、施肥。变量播种技术依赖于自动控制、导航技术、决策分析、液压和电控等多种技术,这些技术应用于农机装备在我国尚处于发展阶段,应加快研究进程以适应农业现代化发展需要。

5 油菜精量播种技术难点分析与发展趋势

加拿大和欧洲等发达国家和地区的油菜机械化水平较高,该区域主要采用旱作一年一熟种植制度,土地幅员辽阔,多采用免耕精量播种或条播方式。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^[90],国外的大型农业机械难以推广应用。因此,研制适合中国油菜种植区国情的精量联合直播机,突破油菜播种过程中排种、开畦沟和厢面平整等关键环节尤为重要,同时与农业信息、导航等技术配合成为农业现代化的重要组成部分。

5.1 油菜精量播种技术难点与问题

(1)中国冬油菜种植区域多样、作业工况复杂。长江流域油菜种植区除江汉平原、黄淮海平原地区规模化种植外,绝大多数为分散种植,经营规模小^[91],不利于农业机械作业。前茬大多为水稻,联合收获机收获后留茬高度和秸秆量较高,土壤黏重板结,同时油菜最佳播期 9 月中旬—10 月中旬降雨较多,土壤含水率较高,增加了油菜机械化播种的难度。

(2)多熟制区域油菜精量播种的种床播深稳定性和通过性要求高。目前油菜精量播种的土壤工作部件作业性能的稳定性和适应性较差。油菜为忌水作物,保证厢面平整和畦沟沟型的稳定以提供良好的种床,其播种深度控制技术是保证成苗率高的关键;同时,由于水旱轮作造成土壤黏重、含水率差异大(15%~45%),土壤工作部件直接与土壤接触,需要适应不同含水率尤其是高含水率并具备防缠草防黏附性能。目前,开畦沟、种沟和厢面平整装置亟需深化研究,以满足农业生产的实际需要。

(3)油菜精量播种标准化与规模化生产的农机农艺技术融合需要进一步强化。我国各地油菜种植自然条件差异大,油菜播种期和收获期差异大,尤其在气候类型、油菜品种、栽培制度和栽培技术等方面呈现多样化,这给油菜机械化播种带来很大难度。目前研究涉及种植密度和播期等方面^[92-95],与机械化播种结合的研究鲜见报道。

5.2 油菜精量播种发展趋势

(1)发展油菜种植环节的规模化经营,实现高效率精量播种。随着农村劳动力缺失及农业现代化发展进程需要,我国土地经营方式已经向适度规模经营转变。通过试点示范,为规模化经营农户或合作社提供高速、宽幅、高效精量播种机,引导农户开展规模化种植油菜,通过节本增效创收。因此,以正负气压组合式排种器、气力滚筒式集排器和气送式集排器等为核心的油菜精量排种器将成为精量播种技术的重要支撑。

(2)研发油菜播种作业的新型降附减阻技术,提高播种作业的通过性和适应性。鉴于长江流域油菜种植区种植模式和作业工况,发展降阻减黏防堵技术有利于降低功耗和提高土壤工作部件适应性。通过对土壤工作部件表面改性和表面改形等方法^[96],减小土壤工作部件与土壤间的接触应力,有效解决土壤工作部件粘附问题^[97],降低作业功耗^[98]。

(3)油菜产业发展的多学科结合,解决农机农艺与农业信息化技术融合。优选适应机械化生产的油菜良种,油菜机械化收获对油菜植株株型、分枝和成熟均匀度等有一定要求^[99],机械化播种种植密度应与之相适应。同时,应规范各区域油菜栽培模式及轮作模式种植要求,如标准化播种行距^[100]、前茬留茬高度^[101]和秸秆还田方式^[102-103]等内容,有利于标准化油菜精量直播机械装备参数和提高播种质量,进而提高成苗率。随着农业信息技术和“互联网+”等的快速发展,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综合应用于作物长势监测和播种机械装备控制方式、播量检测、系统决策和变量播种执行等环节^[104],有效提高资源利用率和工作效率。实现农机、农艺和农业信息技术的深度融合,能有效提高播种机械的智能化水平,提高出苗的均匀性和成苗率,获得理想的作物群体结构。

6 结束语

油菜精量播种技术包含精量排种技术、种床整理技术和智能化技术等方面,精量排种技术提供均匀一致的种子流,是实现精量播种的基础和核心;种

床整理技术保证种沟和畦沟沟深一致,并提高厢面平整度,进而实现播种深度一致和排灌水便捷,提高成苗率和免受渍害;自动导航、漏播检测和变量播种等智能技术将播种机械化向智能化方向推进,降低人工劳动强度和提高资源利用率,是农业现代化的关键环节。

随着规模化生产经营方式转变,油菜精量播种机械将成为主流发展趋势。现阶段我国油菜精量播

种技术根据农户实际需求,根据种植区域、种植制度和经营规模研发配套的精量播种机械。适应高速、宽幅、高效和精量的气力式精量排种技术、播深一致性调控技术和降阻减黏防堵的耕整地技术是我国油菜精量播种技术的研究重点。加强农机、农艺和信息技术的深度融合,提高油菜播种机械装备的智能化水平是提高播种质量、降低生产成本和劳动强度的必然选择。

参 考 文 献

- 1 农业部南京农业机械化研究所. 2016年中国农业机械化年鉴[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2016.
- 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/OL]. 农业工程学报,2017,33(6):246-256. http://www.tcsae.org/nygcxb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170632&flag=1. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2017.06.032.
- XIN Guixin, YANG Chaoxian, SHAO Jing'an, et al. Optimization and demonstration of land consolidation technical system in mountainous and hilly region based on farmland transfer[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(6): 246-256. (in Chinese)
- 3 陈志. 油菜收获机械化技术进展[J]. 农业机械,2008(15):41-44.
- 4 曹秀英. 油菜离心式集排器排种技术与仿真分析[D]. 武汉:华中农业大学,2015.
- CAO Xiuying. Research and simulation analysis of centrifugal metering device for rapeseed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- 5 吴明亮,官春云,汤楚宙,等. 2BYF-6型油菜免耕直播联合播种机田间试验研究[J]. 农业工程学报,2007,23(11):172-175.
- WU Mingliang, GUAN Chunyun, TANG Chuzhou, et al. Experimental research on 2BYF-6 type no-tillage rape combine seeder in paddy stubble field[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 172-175. (in Chinese)
- 6 吴明亮,官春云,罗海峰,等. 2BYD-6型油菜浅耕直播施肥联合播种机设计与试验[J]. 农业工程学报,2010,26(11):136-140.
- WU Mingliang, GUAN Chunyun, LUO Haifeng, et al. Design and experiments of 2BYD-6 shallow tilling and fertilizing seeder for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 136-140. (in Chinese)
- 7 华中农业大学. 一种与手扶拖拉机配套的油麦兼用型直播机:中国,201110317476.4[P]. 2013-04-24.
- 8 华中农业大学. 油菜精量免耕直播机:中国,201610134557.3[P]. 2016-06-15.
- 9 华中农业大学. 离心式小粒径种子精量播种机:中国,201620371154.6[P]. 2016-12-07.
- 10 张宇文. 机械式多功能精密排种器的设计[J]. 农业机械学报,2005,36(3):51-53,50.
- ZHANG Yuwen. Research and design for making a new type of mechanized and multiple functions of precision seed-drilled appliance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(3): 51-53, 50. (in Chinese)
- 11 张宇文,张文超,李冬肖. 中心传动强推式精密排种器设计[J]. 农业机械学报,2010,41(2):78-81,121.
- ZHANG Yuwen, ZHANG Wenchao, LI Dongxiao. Design for precision metering device with center transmission[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 78-81, 121. (in Chinese)
- 12 袁文胜,吴崇友,金诚谦. 异形孔窝眼轮式油菜排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2009,40(5):72-75.
- YUAN Wensheng, WU Chongyou, JIN Chengqian. Design and experiment on seed-metering device with special cells for cole seed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 72-75. (in Chinese)
- 13 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 Chuzhou, LUO Haifeng, WU Mingliang, et al. Design and test on seed metering device with variable capacity model-hole roller[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 114-119. (in Chinese)
- 14 吴明亮,官春云,汤楚宙,等. 2BF-6型稻茬田油菜免耕联合播种机的研究[J]. 农业工程学报,2005,21(3):103-106.
- WU Mingliang, GUAN Chunyun, TANG Chuzhou, et al. 2BF-6 type no-tillage combine seeder for rape in stubble field[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(3):103-106. (in Chinese)
- 15 李林. 气吸式排种器理论及试验的初步研究[J]. 农业机械学报,1979,10(3):56-63.
- LI Lin. A preliminary study on the theory and experimentation of the suction-type metering device for precision drill[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1979, 10(3): 56-63. (in Chinese)
- 16 刘文忠,赵满全,王文明,等. 气吸式排种装置排种性能理论分析与试验[J]. 农业工程学报,2010,26(9):133-138.
- LIU Wenzhong, ZHAO Manquan, WANG Wenming, et al. Theoretical analysis and experiments of metering performance of the pneumatic seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 133-138. (in Chinese)
- 17 李耀明,赵湛,陈进,等. 气吸振动式排种器吸种性能数值模拟与试验[J]. 农业机械学报,2008,39(10):95-99,104.
- LI Yaoming, ZHAO Zhan, CHEN Jin, et al. Numerical simulation and experiment on the seeds pickup performance of precision air-suction seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 95-99, 104. (in Chinese)
- 18 陈进,李耀明,王希强,等. 气吸式排种器吸孔气流场的有限元分析[J]. 农业机械学报,2007,38(9):59-62.
- CHEN Jin, LI Yaoming, WANG Xiqiang, et al. Finite element analysis for the sucking nozzle air field of air-suction seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(9): 59-62. (in Chinese)
- 19 龚智强,陈进,李耀明,等. 吸盘式精密排种装置吸种过程气流场中种子受力研究[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(6):78-83. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140615&journal_id=jcsam. DOI:

- 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.015.
GONG Zhiqiang, CHEN Jin, LI Yaoming, et al. Seed force in airflow field of vacuum tray precision seeder device during suction process of seeds[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 78–83. (in Chinese)
- 20 KARAYEL D, BARUT Z B, OZMERZI A. Mathematical modelling of vacuum pressure on a precision seeder[J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(4): 437–444.
- 21 ARZU Y, ADNAN D. Optimization of the seed spacing uniformity performance of a vacuum-type precision seeder using response surface methodology[J]. Biosystems Engineering, 2007, 97: 347–356.
- 22 ARZU Y, ADNAN D. Measurement of seed spacing uniformity performance of a precision metering unit as function of the number of holes on vacuum plate[J]. Measurement, 2014, 56: 128–135.
- 23 吴福通. 正负气压组合式油菜籽精量直播排种器的研究[D]. 武汉:华中农业大学,2007.
WU Futong. Research on positive andnegative pressure combination precision metering device for rape seed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- 24 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.
- 25 杨松,廖宜涛,廖庆喜. 2BFQ-6 型油菜精量联合直播机气力式排种系统试验研究[J]. 农业工程学报,2012,28(17):57–62.
YANG Song, LIAO Yitao, LIAO Qingxi. Experimental study on pneumatic seed-metering system of 2BFQ-6 precision planter for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(17): 57–62. (in Chinese)
- 26 舒彩霞,韦跃杰,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/OL]. 农业工程学报,2016, 32(10):26–33. http://www.tcsae.org/nygxb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161004&flag=1. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.10.004.
SHU Caixia, WEI Yuepei, LIAO Yitao, et al. Influence of air blower parameters of pneumatic seed-metering system for rapeseed on negative pressure characteristics and air blower selection[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(10): 26–33. (in Chinese)
- 27 余佳佳. 气力式油菜精量排种器结构解析与排种过程仿真研究[D]. 武汉:华中农业大学,2013.
YU Jiajia. Study on structural analysis and metering process simulation of pneumatic precision metering device for rapeseed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 28 YU J J, LIAO Y T, CONG J L, et al. Simulation analysis and match experiment on negative and positive pressures of pneumatic precision metering device for rapeseed[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2014, 7(3): 1–12.
- 29 丛锦玲,余佳佳,曹秀英,等. 油菜小麦兼用型气力式精量排种器[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(1):46–52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140108&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.008.
CONG Jinling, YU Jiajia, CAO Xiuying, et al. Design of dual-purpose pneumatic precision metering device for rape and wheat [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 46–52. (in Chinese)
- 30 丛锦玲,廖庆喜,曹秀英,等. 油菜小麦兼用排种盘的排种器充种性能[J/OL]. 农业工程学报,2014,30(8):30–39. http://www.tcsae.org/nygxb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140804&flag=1. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2014.08.004.
CONG Jinling, LIAO Qingxi, CAO Xiuying, et al. Seed filling performance of dual-purpose seed plate in metering device for both rapeseed & wheat seed[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(8): 30–39. (in Chinese)
- 31 廖庆喜,张宁,张朋玲,等. 一器多行离心式油菜排种器[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(2):48–51,95. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120210&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.010.
LIAO Qingxi, ZHANG Ning, ZHANG Pengling, et al. Centrifugal metering device for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 48–51, 95. (in Chinese)
- 32 廖庆喜,张朋玲,廖宜涛. 基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(2):109–114. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140219&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.019.
LIAO Qingxi, ZHANG Pengling, LIAO Yitao, et al. Numerical simulation on seeding performance of centrifugal rapeseed metering device based on EDEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 109–114. (in Chinese)
- 33 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/OL]. 农业机械学报,2014,45(增刊):40–46. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2014s107&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.007.
CAO Xiuying, LIAO Qingxi, CONG Jinling, et al. Design and experiment on metering holestructure of centrifugal precision metering device for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 40–46. (in Chinese)
- 34 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/OL]. 农业机械学报,2015,46(9):77–84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150911&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.011.
CAO Xiuying, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment on valve-branch distributor ofcentrifugal precision metering device for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 77–84. (in Chinese)
- 35 李明,刘晓辉,廖宜涛,等. 气力滚筒式油菜精量集排器[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(12):68–73. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131212&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.012.
LI Ming, LIU Xiaohui, LIAO Yitao, et al. Pneumatic cylinder-type centralized precision metering device for rapeseed[J/OL].

- Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 68–73. (in Chinese)
- 36 LI Ming, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Analysis on seeding process of pneumatic cylinder-type centralized rapeseed precision metering device[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 17–27.
- 37 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/OL]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 9–17. http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150702&flag=1. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2015.07.002.
- LI Zhaodong, LEI Xiaolong, CAO Xiuying, et al. Design and experiment of pneumatic-typed precision centralized metering device for rapeseed[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(7): 9–17. (in Chinese)
- 38 李兆东,李姗姗,曹秀英,等. 油菜精量气压式集排器排种性能试验[J/OL]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 17–25. http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151804&flag=1. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.004.
- LI Zhaodong, LI Shanshan, CAO Xiuying, et al. Seeding performance experiment of pneumatic-typed precision centralized metering device[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(18): 17–25. (in Chinese)
- 39 ED precision air seeder [EB/OL]. <http://www.amazone.net/1262.asp>.
- 40 Air seeding [EB/OL]. http://www.deere.com.au/en_AU/products/equipment/planting_and_seeding/air_seeding.
- 41 Magnum [EB/OL]. <https://www.caseih.com/china/zh-cn/products/Tractors/Magnum>.
- 42 Avant front tank seed drill [EB/OL]. <http://www.amazone.net/252.asp>.
- 43 气力式精量播种机 Solitair 12K [EB/OL]. <http://www.lemken.cn/Proinfo.aspx?id=148##Menu=ChildMenu4>.
- 44 DOWNS H W, TAYLOR K. Evaluation of pneumatic granular herbicide applicators for seeding small grains in Oklahoma[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1986, 2(2): 58–63.
- 45 KUMAR V J F, Durairaj C D. Influence of head geometry on the distributive performance of air-assisted seed drills[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2000, 75(1): 81–95.
- 46 李中华,王德成,刘贵林,等. 正压式气流排种器排种效果试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 89–93.
- LI Zhonghua, WANG Decheng, LIU Guilin, et al. Experimental study on sowing seeds by air-stream metering mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(1): 89–93. (in Chinese)
- 47 李中华,王德成,刘贵林,等. 气流分配式排种器 CFD 模拟与改进[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 64–68.
- LI Zhonghua, WANG Decheng, LIU Guilin, et al. CFD Simulation and improvement of air stream distributive metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 64–68. (in Chinese)
- 48 常金丽,张晓辉. 2BQ-10 型气流一阶集排式排种系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 136–141.
- CHANG Jinli, ZHANG Xiaohui. Design and test of one-step centralized type pneumatic seeding system[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 136–141. (in Chinese)
- 49 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/OL]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 10–18. http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20152002&flag=1. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.20.002.
- 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/OL]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 10–18. (in Chinese)
- 50 雷小龙,廖宜涛,李兆东,等. 种层厚度对油麦兼用气送式集排器供种装置充种性能的影响[J/OL]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 11–19. http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160602&flag=1. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.06.002.
- LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Effects of seed layer thickness on seed filling performance of seed feeding device for rapeseed and wheat[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 11–19. (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/OL]. 农业工程学报, 2016, 32(18): 26–34. http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161804&flag=1. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.18.004.
- 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/OL]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(18): 26–34. (in Chinese)
- 52 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.
- 53 雷小龙,廖宜涛,张闻宇,等. 油麦兼用气送式集排器输种管道气固两相流仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 57–68. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170307&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.007.
- LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Wenyu, et al. Simulation and experiment of gas-solid flow in seed conveying tube for rapeseed and wheat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 57–68. (in Chinese)
- 54 GESCH R W, DOSE H L, FORCELLA F, et al. Camelina growth and yield response to sowing depth and rate in the northern Corn Belt USA [J]. Industrial Crops and Products, 2017, 95: 416–421.
- 55 INSA Kühling, DMITRY Redozubov, GABRIELE Broll, et al. Impact of tillage, seeding rate and seeding depth on soil moisture and dryland spring wheat yield in Western Siberia [J]. Soil & Tillage Research, 2017, 170: 43–52.
- 56 MARISOL T B, BURTON L J. Switchgrass establishment as affected by seeding depth and soil type [J]. Industrial Crops and Products, 2013, 41: 289–293.
- 57 左春桢,张守勤,马成林,等. 圆盘开沟器减粘降阻的试验研究[J]. 农业机械学报, 1997, 28(增刊): 37–40.
- ZUO Chunzheng, ZHANG Shouqin, MA Chenglin, et al. The study on the adhesion-decreasing and resistance-reducing of disc opener[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1997, 28(Supp.): 37–40. (in Chinese)

- 58 姚宗路,高焕文,王晓燕,等.小麦免耕播种机开沟器对作物生长的试验研究[J].农业工程学报,2007,23(7):117-121.
YAO Zonglu, GAO Huanwen, WANG Xiaoyan, et al. Effect of three furrow openers for no-till wheat seeder on crop growth performance [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(7): 117-121. (in Chinese)
- 59 赵淑红,蒋恩臣,闫以勋,等.小麦播种机开沟器双向平行四杆仿形机构的设计及运动仿真[J/OL].农业工程学报,2013,29(14):26-32. http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20131404&flag=1. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2013.14.004.
ZHAO Shuhong, JIANG Enchen, YAN Yixun, et al. Design and motion simulation of opener with bidirectional parallelogram linkage profiling mechanism on wheat seeder[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(14): 26-32. (in Chinese)
- 60 马云海,马圣胜,贾洪雷,等.仿生波纹形开沟器减黏降阻性能测试与分析[J/OL].农业工程学报,2014,30(5):36-41.
http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140505&flag=1. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2014.05.005.
MA Yunhai, MA Shengsheng, JIA Honglei, et al. Measurement and analysis on reducing adhesion and resistance of bionic ripple opener[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5): 36-41. (in Chinese)
- 61 赵淑红,刘宏俊,谭贺文,等.仿旗鱼头部曲线型开沟器设计与性能试验[J/OL].农业工程学报,2017,33(5):32-39.
http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170505&flag=1. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2017.05.005.
ZHAO Shuhong, LIU Hongjun, TAN Hewen, et al. Design and performance experiment of opener based on bionic sailfish head curve[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(5): 32-39. (in Chinese)
- 62 赵淑红,刘宏俊,张先民,等.滑推式开沟器设计与作业性能优化试验[J/OL].农业工程学报,2016,32(19):26-34.
http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161904&flag=1. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.19.004.
ZHAO Shuhong, LIU Hongjun, ZHANG Xianmin, et al. Design and optimization experiment of working performance of sliding push opener[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(19): 26-34. (in Chinese)
- 63 顾耀权,贾洪雷,郭慧,等.滑刀式开沟器设计与试验[J/OL].农业机械学报,2013,44(2):38-42. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130208&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.008.
GU Yaoquan, JIA Honglei, GUO Hui, et al. Design and experiment of sliding knife furrow opener[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 38-42. (in Chinese)
- 64 庄健,贾洪雷,马云海,等.具有滑刀式缺口的圆盘开沟器设计与试验[J].农业机械学报,2013,44(增刊1):83-88.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s116&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.016.
ZHUANG Jian, JIA Honglei, MA Yunhai, et al. Design and experiment of sliding-knife-type disc opener[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.1): 83-88. (in Chinese)
- 65 JAMES B B, JACK M A D, JOHN M F. Minimising soil disturbance and reaction forces for high speed sowing using bentleg furrow openers[J]. Biosystems Engineering, 2016, 151:53-64.
- 66 MARLOWE E C B, TAKASHI K, HIROSHI O, et al. Seeding depth regulation controlled by independent furrow openers for zero tillage systems: part 2: control system of independent furrow openers[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2013, 6(1): 13-19.
- 67 鲁植雄,郭兵,高强.拖拉机耕深模糊自动控制方法与试验研究[J/OL].农业工程学报,2013,29(23):23-29. http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20132304&flag=1. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2013.23.004.
LU Zhixiong, GUO Bing, GAO Qiang. Study on auto-control method and experiment for tractor depth based on fuzzy control[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(23): 23-29. (in Chinese)
- 68 张青松,汲文峰,廖宜涛,等.油菜直播机铧式开畦沟前犁曲面分析与阻力特性试验[J/OL].农业机械学报,2014,45(2):130-135. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140222&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.022.
ZHANG Qingsong, JI Wenfeng, LIAO Yitao, et al. Surface analysis and resistance characteristics experiment on ditch plow ahead of direct rapeseed seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 130-135. (in Chinese)
- 69 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/OL].农业机械学报,2015,46(1):53-59. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150108&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.008.
ZHANG Qingsong, LIAO Qingxi, JI Wenfeng, et al. Surface optimization and experiment on ditch plow of direct rapeseed seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 53-59. (in Chinese)
- 70 华中农业大学.播种时同步开畦沟用船形畦沟成型装置:中国,201620830962.4[P].2017-01-25.
- 71 康建明,李树君,杨学军,等.正弦指数曲线型开沟刀片结构参数优化[J/OL].农业机械学报,2016,47(11):91-99,17.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161112&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.012.
KANG Jianming, LI Shujun, YANG Xuejun, et al. Structure parameters optimization of sine exponential curve type ditching blade[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 91-99,17. (in Chinese)
- 72 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(增刊1):27-31.
LI Ming, DING Youchun, LIAO Qingxi. Loss sowing detection in field of pneumatic precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp.1): 27-31. (in Chinese)

- 73 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/OL]. 农业工程学报,2014,30(24):11-21. http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20142402&flag=1. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2014.24.002.
DING Youchun, WANG Xueling, LIAO Qingxi. Method of real-time loss sowing detection for rapeseed precision metering device based on time changed window[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(24): 11-21. (in Chinese)
- 74 DING Youchun, WANG Xueling, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of performance testing system of multi-channel seed-metering device based on time intervals[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 11-18.
- 75 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/OL]. 农业工程学报,2017,33(9):29-36. http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170904&flag=1. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2017.09.004.
DING Youchun, YANG Junqiang, ZHU Kai, et al. Design and experiment on seed flow sensing device for rapeseed precision metering device[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 29-36. (in Chinese)
- 76 丁幼春,王雪玲,廖庆喜,等. 油菜籽漏播螺旋式补种器设计与试验[J/OL]. 农业工程学报,2015,31(22):16-24. http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20152203&flag=1. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2015.22.003.
DING Youchun, WANG Xueling, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment on spiral-tube reseeding device for loss sowing of rapeseed[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(22): 16-24. (in Chinese)
- 77 KAIVOSOJA J, LINKOLEHTO R. GNSS error simulator for farm machinery navigation development[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 119: 166-177.
- 78 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 Xiwen, ZHANG Zhigang, ZHAO Zuoxi, et al. Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X-804 tractor[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 139-145. (in Chinese)
- 79 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/OL]. 农业机械学报,2017,48(2):11-19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170202&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.002.
LI Yongjian, ZHAO Zuoxi, HUANG Peikui, et al. Automatic navigation system of tractor based on DGPS and double closed-loop steering control[J/OL]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 11-19. (in Chinese)
- 80 XIONG Zhehan, HAK Jin Kim, JOON Yong Kim, 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.
- 81 ZHANG Meina, LIN Xiangze, YIN Wenqing. An improved tuning method of fractional order proportional differentiation (FOPD) controller for the path tracking control of tractors[J]. Biosystems Engineering, 2013, 116:478-486.
- 82 ERKAN Kayacan, ERDAL Kayacan, HERMAN Ramon, et al. Distributed nonlinear model predictive control of an autonomous tractor-trailer system[J]. Mechatronics, 2014, 24: 926-933.
- 83 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 Zhigang, LUO Xiwen. Adaptive weighted fusion algorithm for orientation evaluation of agricultural machinery[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(5):110-114. (in Chinese)
- 84 王鹤,胡静涛,高雷. 农业机械自动导航车轮转角测量误差补偿模型[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(8):33-37. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140806&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.006.
WANG He, HU Jingtao, GAO Lei. Compensation model for measurement error of wheel turning angle in agricultural vehicle guidance[J/OL]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 33-37. (in Chinese)
- 85 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/OL]. 农业机械学报,2015,46(3):43-50. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150307&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.007.
ZHANG Wenyu, DING Youchun, LIAO Qingxi, et al. Variable universe fuzzy controller for tractor hydraulic steering[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 43-50. (in Chinese)
- 86 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/OL]. 农业机械学报,2016,47(1):29-36. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160105&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.005.
ZHANG Wenyu, DING Youchun, WANG Xueling, et al. Pure pursuit control method based on SVR inverse-model for tractor navigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 29-36. (in Chinese)
- 87 张闻宇,丁幼春,李兆东,等. 基于双切圆寻线模型的农机导航控制方法[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(10):1-10. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161001&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.001.
ZHANG Wenyu, DING Youchun, LI Zhaodong, et al. Dual circle tangential line-tracking model based tractor navigation control method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 1-10. (in Chinese)
- 88 张闻宇,丁幼春,王磊,等. 农机组自动导航摩擦轮式转向驱动系统设计[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(6):32-40. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170604&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.004.
ZHANG Wenyu, DING Youchun, WANG Lei, et al. Automatic steering control system of friction drive for agricultural machinery[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 32-40. (in Chinese)
- 89 MICHIIHISA IIDA. 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.
- 90 周广生,左青松,廖庆喜,等. 我国油菜机械化生产现状、存在问题及对策[J]. 湖北农业科学,2013,52(9):2153-2157.

- ZHOU Guangsheng, ZUO Qingsong, LIAO Qingxi, et al. Mechanical production status, existing problems and strategy discussion of rapeseed in China[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013, 52(9): 2153–2157. (in Chinese)
- 91 吴崇友, 王积军, 廖庆喜, 等. 油菜生产现状与问题分析[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(1): 124–131.
- WU Chongyou, WANG Jijun, LIAO Qingxi, et al. Current status and problems of rapeseed production[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(1): 124–131. (in Chinese)
- 92 王翠翠, 陈爱武, 王积军, 等. 湖北双季稻区免耕直播油菜生长及产量形成[J]. 作物学报, 2011, 37(4): 694–702.
- WANG Cuicui, CHEN Aiwu, WANG Jijun, et al. Growth and yield formation of no-tillage direct-seeding rapeseed in Hubei double cropping rice area[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(4): 694–702. (in Chinese)
- 93 苏伟, 鲁剑巍, 周广生, 等. 免耕及直播密度对油菜生长、养分吸收和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(7): 1519–1526.
- SU Wei, LU Jianwei, ZHOU Guangsheng, et al. Effects of no-tillage and direct sowing density on growth, nutrient uptake and yield of rapeseed (*Brassica napus* L.) [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(7): 1519–1526. (in Chinese)
- 94 王珊, 李银水, 余常兵, 等. 密度和氮肥用量对油菜产量及氮肥利用率的影响[J]. 中国油料作物学报, 2013, 35(2): 179–184.
- ZHU Shan, LI Yinshui, YU Changbing, et al. Effects of planting density and nitrogen application rate on rapeseed yield and nitrogen efficiency[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2013, 35(2): 179–184. (in Chinese)
- 95 KUAI Jie, SUN Yingying, ZUO Qingsong, et al. The yield of mechanically harvested rapeseed (*Brassica napus* L.) can be increased by optimum plant density and row spacing[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 18835.
- 96 马云海, 马圣胜, 贾洪雷, 等. 仿生波纹形开沟器减黏降阻性能测试与分析[J/OL]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 36–41. http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140505&flag=1. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2014.05.005.
- MA Yunhai, MA Shengsheng, JIA Honglei, et al. Measurement and analysis on reducing adhesion and resistance of bionic ripple opener[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5): 36–41. (in Chinese)
- 97 佟金, 张清珠, 常原, 等. 仿生镇压辊减粘降阻的有限元分析与试验验证[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 85–92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140714&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.014.
- TONG Jin, ZHANG Qingzhu, CHANG Yuan, et al. Finite element analysis and experimental verification of bionic press roller in reducing adhesion and resistance[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 85–92. (in Chinese)
- 98 汲文峰, 贾洪雷, 佟金. 旋耕-碎茬仿生刀片田间作业性能的试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 24–30.
- JI Wenfeng, JIA Honglei, TONG Jin. Experiment on working performance of bionic blade for soil-rototilling and stubble-breaking[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(12): 24–30. (in Chinese)
- 99 罗海峰, 汤楚宙, 官春云, 等. 适应机械化收获的田间油菜植株特性研究[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊1): 61–66.
- LUO Haifeng, TANG Chuzhou, GUAN Chunyun, et al. Plant characteristic research on field rape based on mechanized harvesting adaptability[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Suppl. 1): 61–66. (in Chinese)
- 100 蒯婕, 孙盈盈, 左青松, 等. 机械收获模式下直播冬油菜密度与行距的优化[J]. 作物学报, 2016, 42(6): 898–908.
- KUAI Jie, SUN Yingying, ZUO Qingsong, et al. Optimization of plant density and row spacing for mechanical harvest in winter rapeseed (*Brassica napus* L.) [J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(6): 898–908. (in Chinese)
- 101 郑伟, 肖国滨, 肖小军, 等. 稻茬高度对谷林套播油菜生长发育及产量形成的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(4): 648–656.
- ZHENG Wei, XIAO Guobin, XIAO Xiaojun, et al. Effects of rice stubble height on growth, development, and yield components of interplanted rapeseed in rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(4): 648–656. (in Chinese)
- 102 李继福, 薛欣欣, 李小坤, 等. 水稻-油菜轮作模式下秸秆还田替代钾肥的效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2): 317–325.
- LI Jifu, XUE Xinxin, LI Xiaokun, et al. Substituting effect of crop residues for potassium fertilizer in rice-rapeseed rotation system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(2): 317–325. (in Chinese)
- 103 武际, 郭熙盛, 王允青, 等. 不同水稻栽培模式和秸秆还田方式下的油菜、小麦秸秆腐解特征[J]. 中国农业科学, 2011, 44(16): 3351–3360.
- WU Ji, GUO Xisheng, WANG Yunqing, et al. Decomposition characteristics of rapeseed and wheat straws under different rice cultivations and straw mulching models[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(16): 3351–3360. (in Chinese)
- 104 董胜, 袁朝辉, 谷超, 等. 基于多学科技术融合的智能农机控制平台研究综述[J/OL]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 1–11. http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170801&flag=1. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2017.08.001.
- DONG Sheng, YUAN Zhaohui, GU Chao, et al. Research on intelligent agricultural machinery control platform based on multi-discipline technology integration[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(8): 1–11. (in Chinese)