

罗伟文,胡志超,顾峰玮,等. 免耕机播技术研发进展[J]. 江苏农业科学,2019,47(23):73-77.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.23.017

# 免耕机播技术研发进展

罗伟文,胡志超,顾峰玮,吴峰,徐弘博,姬广硕

(农业农村部南京农业机械化研究所,江苏南京 210014)

**摘要:**由于秸秆禁烧和秸秆饲料化、燃料化需求减少,而新的经济有效秸秆资源化利用模式还依然缺乏,我国每年田间农作物秸秆堆积量呈持续增加趋势,而免耕机播设备在秸秆量较大的田间作业时,普遍存在架种、晾种和作业部件挂结拥堵问题。为此,对国内外免耕机播技术研究与应用现状进行综述,阐明免耕机播的几种主要技术原理及特点,提出我国免耕机播技术的难点及发展方向,以为免耕机播技术研究提供借鉴和参考。

**关键词:**农业工程;保护性耕作;免耕机播;全量秸秆地

**中图分类号:**S345;S233.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2019)23-0073-05

保护性耕作起源于美国,是目前应用最广的一项先进旱作农业技术,已推广超过 80 个国家,可以达到减少作物秸秆焚烧、农机尾气排放以及增加耕地肥力、蓄水保墒的效果<sup>[1-4]</sup>。保护性耕作的核心为免耕机播技术,即在有一定量的地表秸秆和地下残茬的田间顺利进行少耕、免耕机播,因此秸秆覆盖量是影响免耕机播设备作业质量的一项重要因素<sup>[5]</sup>。我国每年产生的农作物秸秆量约 10 亿 t,占全球总量的近 20%,在全面禁止秸秆焚烧的情况下,田间秸秆未能被及时全部移出处理,导致田间秸秆堆积,且堆积量呈持续增加趋势<sup>[6]</sup>。利用免耕机播技术直接在未做任何处理的秸秆地进行播种,并用农作物秸秆及残茬覆盖播后地表,能有效解决我国田间秸秆大量堆积问题;但随着田间秸秆量的持续增加,传统免耕机播设备更易产生推草、挂草、晾种、架种等问题,因此对免耕机播技术提出了更高的要求<sup>[7-9]</sup>。

分析国内外免耕机播技术的研究进展,阐明国内外主要免耕机播技术原理,归纳各类型机具的主要特点,及时把握其发展动态,对推动我国免耕机播技术进步和升级,实现全量秸秆地保护性耕作,保护生态环境和促进我国农业可持续性发展具有重要意义。

## 1 国内外免耕机播技术应用现状

### 1.1 国外免耕机播技术应用现状

20 世纪 40 年代,美国率先实行保护性耕作制度,现阶段美国、加拿大、巴西、阿根廷、澳大利亚等国免耕机播面积较大<sup>[10]</sup>。这些国家在耕作过程中通常只使用少量化肥,秸秆覆盖率较低,实行种养一体化,将秸秆从田间移出,主要通过大功率拖拉机牵引高机架的联合作业免耕机播设备,一次性完

成破茬开沟、种肥同施、覆土镇压等多项作业,具有播种效率高特点<sup>[11]</sup>。

John Shearer 公司生产的 2 Bin 气力式免耕播种机,采用分开秸秆的原理进行清秸(图 1)。机具的锄铲式开沟器分置在多梁结构上,能同时完成破茬和开沟工作。工作时,底部土壤受到开沟器的挤压向两侧分开,形成种沟;同时,开沟器的悬臂设计和缓冲装置,能使其有效避开障碍物,当开沟器遇到障碍物时,缓冲装置压力增大,悬臂梁发生形变,带动开沟器发生偏转,从而避开障碍物,因此,该机具具有较好的通过性。该机具可同时对几种不同的作物进行播种,根据不同作物的播种深度需求,调节机具的液压系统,改变开沟器的入土角度和入土深度,从而一次性开出具有不同深度要求的种沟;将不同作物种子分别放置于不同种箱内,通过气力系统分别对不同种箱的种子进行二次分配,实现一次作业同时精确播种几种作物的目的<sup>[12-13]</sup>。



图1 John Shearer 公司生产的 2 Bin 免耕播种机

美国 John Deere 公司生产的 John Deere 1820 型气力式免耕播种机,是切断秸秆型免耕播种机的典型代表(图 2)。该类型免耕播种机较大的机身重力和液压系统产生的下压力同时作用于波纹圆盘破茬器,产生较大的可调开沟正压力,能对不同土质的土壤进行良好作业,播种行距为 19、25、38、50 cm 可调,破茬性能强;采用单组传动,每节机架能单独机械式控制播种深度,其挠性机架设计使该机与地表的仿形大大增强,机架与地面间隙为 73 cm,在高茬地高速作业时具有良好通过性,播种效率为 200~240 hm<sup>2</sup>/d;采用卫星定位系统取代划行器,能自动对行、纠偏,减少漏播、重播现象,与 1910 型种

收稿日期:2018-08-16

基金项目:中国农业科学院创新工程土下果实收获机械创新团队项目;江苏省农业科技自主创新资金[编号: CX(17)1002]。

作者简介:罗伟文(1994—),男,四川资阳人,硕士研究生,主要从事农业机械化研究。E-mail:1554617435@qq.com。

通信作者:胡志超,博士,研究员,博士生导师,主要从事农作物收获及产后加工技术装备研究。E-mail:zchu369@163.com。



图2 John Deer 1820 型气力式免耕播种机

肥车配合使用,能夜间播种、变量施肥播种,驾驶室装有电子监测系统,可观测各种作业数据<sup>[14]</sup>。

AMAZONE(阿玛松)公司生产的 DMC 免耕播种机,采用粉碎秸秆原理进行清秸,该机型配置动力驱动耙、盘式犁刀、楔环滚轮,可进行灭茬性免耕播种,也可与其他主动性土壤耕作工具组配进行传统播种(图3)。工作原理为动力耙疏松重质坚实土壤,并保证一定的作业深度,耙齿间有较大间隙,秸秆与土壤混合物可无阻挡通过耙齿间隙和齿载体上方,从而实现与土壤混合,随后控制型盘式犁刀在压实的条带中刻划出一条犁沟,种子被精确播撒至犁沟底部,楔环型橡皮滚轮将种子下方土壤压拢,并使 1/3 土壤被压实,2/3 土壤保持疏松,为种子发芽提供良好的种床环境(图4)<sup>[15-16]</sup>。



图3 阿玛松 DMC 免耕播种机

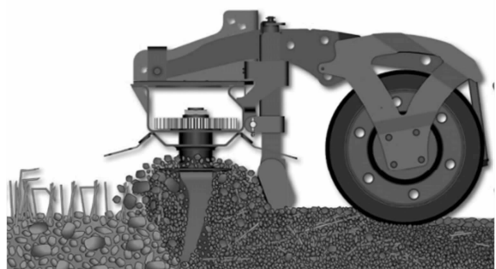


图4 DMC 免耕播种机作业示意

## 1.2 国内免耕机播技术应用现状

我国免耕机播技术发展比国外晚,20 世纪 60 年代开始试验保护性耕作;1999 年,农业部正式成立保护性耕作研究中心,全国性开展免耕机播技术研究,在引进国外先进技术的基础上,我国在免耕机播技术方面展开了较多研究;2016 年,我国实行保护性耕地轮作休耕制度试点,进一步刺激免耕机播技术的发展<sup>[17]</sup>。

中国农业大学设计的 2BQM-6D 型多梁高地隙免耕覆盖播种机,采用分开秸秆原理,能够有效地进行免耕作业,在

秸秆覆盖量较低的条件下,机具通过系数可达 0.9(图5)。该机整机质量为 900 kg,配套动力为 40 kW,生产效率为 0.93 ~ 1.20 hm<sup>2</sup>/h,采用凿铲式开沟器将秸秆分开,开沟器上加装平行四杆仿形机构,对地面具有良好的仿形作用,能够在地势不平坦地区顺利完成施肥播种作业,且可保证深度一致;其凿铲式开沟器前后分错布置在离地间隙较高的多梁结构上,有利于增强秸秆的流动性,入土性能较好,但对土壤的破坏比较严重,不利于田间土壤保水保墒<sup>[18]</sup>。



图5 2BQM-6D 型免耕播种机

中机美诺生产的 6119 型免耕播种机采用切断秸秆的清秸方式进行清秸,配套动力为 60 kW,整机质量在 2 000 kg 左右,作业幅宽为 2.8 m(图6)。工作时,波纹圆盘依靠重力和附加弹簧压力产生挤切作用,形成较宽的松土带,具有较强破茬能力,通过调节破茬器后的双圆盘开沟器可满足不同的播深要求;采用零压橡胶空心镇压轮进行覆土镇压作业,在保证良好覆土镇压效果的同时不易黏土;另外,调节排种器,可以使其适用于小麦、豆类、菜籽等作物播种,最大播种效率为 2.87 hm<sup>2</sup>/h<sup>[19]</sup>。



图6 中机美诺 6119 型免耕播种机

农业部南京农业机械化研究所研发的 2BHQM-4 型全量秸秆覆盖地免耕播种机,采用粉碎清秸、破茬浅旋、洁区播种、均匀抛撒的技术思路,创造了全量秸秆覆盖地免耕播种新途径,整体技术处于国际领先水平,连续 3 年被列为农业部主推技术(图7)<sup>[8]</sup>。工作原理为秸秆粉碎刀轴上的 Y 型甩刀反转浅旋,将秸秆拾起、粉碎,粉碎后的秸秆被抛送到后方横向输送器中,横向输送器推送碎秸到其端部的离心风机中,高速旋转的离心风机将碎秸沿着风机输送管道抛出,碎秸跨越种箱、肥箱,在碎秸未落下的空挡形成无秸秆障碍的播种区,完成破茬破土、苗床整理、施肥播种作业,最后跨越种肥箱的碎秸均匀覆盖在播种后的种带上<sup>[20]</sup>。该机通过碎秸均匀抛撒与分流调控技术将碎秸分为 2 部分,一部分与土壤混合增加土壤肥力,另一部分均匀抛洒在播后种带上,代替地膜;其秸秆拾输自动监控和防堵滞技术,能有效解决秸秆卡滞与机

具侧边挂草问题。该机相关产品在苏、辽、豫、冀、鲁、皖、黑、鄂、津等地被推广应用,且取得了良好生态效益、社会效益与经济效益,表明该技术能在完全未经处理的残茬和秸秆覆盖田上进行良好作业。该机配套动力为 75 kW,机具作业后碎秸长度为 115 mm 左右,碎秸田间覆盖均匀,播种合格率高<sup>[21]</sup>。



图7 2BHQM-4 型全量秸秆覆盖地免耕播种机

另外,针对秸秆量大、韧性强的稻茬田全量秸秆地,农业农村部南京农业机械化研究所对该机型进行改进,创制出一种秸秆粉碎行间集覆免耕播种机,其结构见图 8,该设备可一次下田即完成秸秆粉碎、种带清秸、行间覆秸、施肥播种、覆土镇压作业,可在整体粉碎作业幅宽内秸秆的同时,利用碎秸喷射与导流器的滑切耦合作用,将碎秸有序规整铺设于播种带之间的覆秸带上,形成无秸秆障碍的播种带,既可为全量秸秆地实现清秸功能,又可同时实现秸秆覆盖地表,保温保墒、封闭杂草。该机作业集成度高,组配精简、能耗低,可有效解决一年两熟地区秸秆覆盖量过大导致的播种机通过困难、埋混在种床内的秸秆吸水较多,秸秆覆盖地表后会降低地温等问题<sup>[22]</sup>。

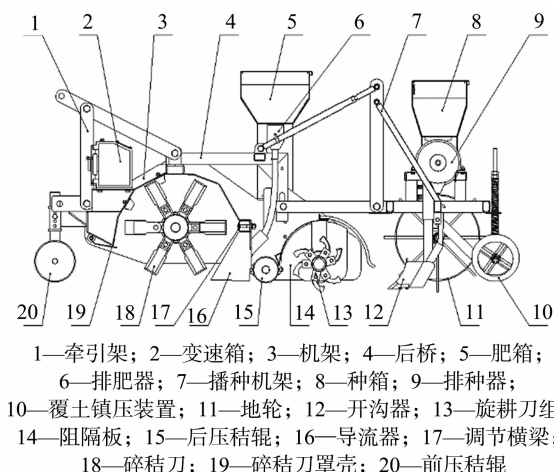


图8 秸秆粉碎行间集覆免耕播种机结构

## 2 免耕机播技术主要类型及特点

免耕机播易产生机架主梁推草、机具入土部件挂草、种子播在秸秆上造成架种、秸秆阻挡覆土造成晾种等问题,因此对秸秆的有效处理是进行免耕机播的最关键技术<sup>[23]</sup>。按照处理后秸秆长度的不同,免耕机播技术主要有分开、切断、粉碎

秸秆 3 种形式。

### 2.1 分开秸秆型

分开秸秆型免耕播种机通过多梁机架安装多个开沟器或在开沟器前端增设清秸防堵装置,使播种条带上的秸秆绕流或被扫拨开<sup>[24]</sup>。开沟器分置于多道梁上,多梁机架可加大相邻开沟器的间距,当秸秆缠绕在开沟器上时,会在机具前进过程中由于受力不均而脱落。其特点是结构简单,制造成本低,入土容易,但机具纵向距离长,播种过程中容易挂草,适用于秸秆量不大且休闲期长的地区。常见的开沟器形式有锄铲式、凿铲式、尖角式等;常见的前端分流装置有分草圆盘、耙齿、拨草轮、拨草弹齿等。近年来,研究人员在此理论上作了相关研究,王庆杰等设计了一种楔刀型开沟器,能减少对表层土壤的扰动<sup>[25]</sup>;姚宗路对尖角开沟器进行了阻力试验分析,得出有较小的入土角、入土隙角和锋利前刀的开沟器,前进阻力较低的结论<sup>[26]</sup>;陈海涛等设计了一种免耕播种机清秸装置,在机具前进过程中,螺旋刀齿将田间秸秆和地下根茬粉碎、清除并抛向机具的侧边<sup>[27]</sup>。

### 2.2 切断秸秆型

在切断秸秆型播种机机具自身和加力装置对破茬圆盘产生较大的正压力下,破茬圆盘对秸秆、根茬和土壤进行切割,实现苗床整理。其特点是防堵性和通过性好,但种肥分施能力差,且圆盘破茬器入土角为钝角,需要较大正压力,才能保证破茬器的切断性能,因此整机质量较大,需大功率拖拉机牵引作业。根据破茬圆盘形状的不同,常用的圆盘破茬器有缺口圆盘、波纹圆盘、平面圆盘、凹面圆盘、涡轮圆盘等。我国该类型机具与国外基本相似,但我国多为中小功率拖拉机,因此相应的机具质量比国外小,该类型的免耕播种机性能不如国外。国内外对圆盘破茬器有较多研究,Fallahi 等研究了圆盘破茬器工作性能的稳定性和作业质量的均匀性<sup>[28]</sup>;Huijsmans 等进行了土壤对圆盘破茬器的阻尼问题研究<sup>[29]</sup>;施森宝等在我国提出的圆盘切茬、分草板分茬免耕播种技术模式,具有结构简单、成本低等优点<sup>[30]</sup>;张云文研制了一种带动力的圆盘式破茬器,该破茬器秸秆切断效果好,但在较小空间内设置多组传动部件,影响通过性,且圆盘破茬器易磨损<sup>[31]</sup>;朱瑞祥等对不同类型被动式圆盘破茬器的作业性能进行分析,建立了不同破茬器的破茬率与作业阻力间的数学模型,得出波纹圆盘在前进速度为 5 km/h、偏角为 5°、倾角为 2°时作业效果最好的结论<sup>[32]</sup>。

### 2.3 粉碎秸秆型

粉碎秸秆型免耕播种机通过拖拉机动力输出轴带动粉碎刀高速旋转将秸秆拾起、粉碎,并将碎秸与土壤混合或沿着导草装置定向抛撒,从而实现清秸功能。其特点是粉碎效果好,清秸能力强,但造价高,刀片磨损快,动力消耗大,作业噪声大,主要适用于我国秸秆量大、抢农时的一年两熟、三熟等地区。其刀端线速度一般为 37 ~ 56 m/s,根据刀片形状的不同,常用的粉碎刀有直刀、Y 型刀、锤爪等,其中直刀的粉碎效果最好,动力消耗小,但秸秆拾拾效果差,通常与定刀配套使用;Y 型刀拾拾效果好,但刀片强度不高,使用寿命短;锤爪打击粉碎效果好,刀片强度高,但动力消耗大。我国在粉碎秸秆防堵方面的研究较多,农业农村部南京农业机械化研究所提出“反旋粉碎、拾起输送、均匀抛洒”的技术思路,能有效解决

推草挂草和架种晾种问题;胡红等提出,仅粉碎种肥床上秸秆的带状旋耕粉碎技术能顺利在稻茬田进行小麦播种<sup>[33]</sup>;赵佳乐设计了一种有支撑的滚动式粉碎秸秆装置,能有效提高秸秆粉碎水平并节约能耗<sup>[34]</sup>;李永磊等设计了一种双辊秸秆粉碎装置,采用前辊正转碎秸清茬,后辊反转碎土混秸,能有效提高秸秆与土壤的混合程度<sup>[35]</sup>。

国外免耕播种技术发展较早,种植模式成熟,已研发出各类型的免耕播种机及配套机具,其农业人口比例小,农场面积大,以大规模的成片种植方式为主;同时国外工业发达,农业机械化水平先进,免耕播种机具性能优良,可靠性高;随着传感器、微电子和计算机等技术的迅速发展,其免耕播种机具正朝着集成化、自动化、智能化和人性化方向发展。我国保护性耕作技术发展较晚,经过几十年的试验、示范和推广,筛选出了一批适合我国农业生产情况的技术模式,形成了东北、西北、华北、南方地区 4 个保护性耕作区。由于我国不同地区农业生产条件存在很大差异,秸秆产量差异较大,对免耕播种机具多样性和适应性要求较高,以采用中小功率的拖拉机牵引轻型免耕播种机作业为主要作业形式。目前,在我国免耕机播设备中,中低端、仿制、小型机具偏多,高端、自主研发、大型机具偏少;5 000 元以下的低端机具约占市场总销量的 65%,5 000~20 000 元的中端机具约占市场总销量的 30%,20 000 元以上的高端机具约占市场总销量的 5%<sup>[36]</sup>。

### 3 免耕机播技术存在的问题

#### 3.1 机具适应性差

传统免耕机播设备在田间秸秆量少时可流畅作业,但随着田间秸秆量的增加,不能适应全量秸秆地作业,作业时易雍草推草、架种晾种;同时,我国幅域辽阔,一年一熟、多熟种植情况并存,目前的免耕机播设备在一年一熟地区作业性较好,但不能适应一年多熟地区作业,在一年一熟地区,作物收获后有一定时间进行秸秆自然降解,免耕机播设备较成熟,作业较顺畅,推广面积较大,但在一年多熟地区,由于作物秸秆自然降解时间短,秸秆总量大、流动性差,机具在全量秸秆地作业时易堵塞,配套机具类型少,推广面积小<sup>[37]</sup>;我国作物种类多,不同区域种植模式差别大,免耕机播设备无法适应不同的种植环境,如玉米播种机不能通过灵活组配对小麦进行免耕条播,大部分免耕机播设备为专机专用,对不同种植模式、不同作物的适应性差,机具利用率低。

#### 3.2 机具可靠性差

在秸秆覆盖量大的田间作业时,由于工况复杂,传统的免耕机播设备作业效率低,可靠性不高。如分开秸秆型免耕播种机成本较低,但对秸秆覆盖量适应性很差,只适应于秸秆量少且腐烂度高或经过粉碎的农田,且易出现挂草雍草现象;切断秸秆型免耕播种机需很大的机具重量,且不能很好地切断秸秆,切草效果差,在全量秸秆地连续作业仍然会发生堵塞现象;粉碎秸秆型免耕播种机转速高,功率消耗大,刀片磨损快,振动噪声大。目前,我国免耕机播设备主要是中低端机具,对机电液一体化自动控制技术应用较少,如在粉碎抛撒、播种覆土等关键作业环节无法做到实时监测、变量调控作业,因此在节约能耗,机具稳定性、可靠性等方面无法保证。同时,由于材料选用、加工工艺等因素,通常存在机具故障率高、使用寿

命短等缺陷,如开沟灭茬装置由于与根茬、土壤相互摩擦容易磨损;灭茬刀磨损过快;刀轴、弹齿容易因受到冲击载荷而变形;机架焊接强度不够易拉散。

### 4 我国免耕机播技术发展对策

#### 4.1 结合农艺,开发符合我国国情的机具

我国免耕机播技术经过几十年发展,形成了较为完整的机械装备体系,在典型保护性耕作农业区取得较大成效,但目前仅在一年一熟地区对小麦、玉米进行免耕机播的技术较成熟,适合我国其他种植区域的免耕机播技术亟待开发和完善,如针对一年两熟地区夏玉米、黄淮海地区夏花生、南方稻茬田等的免耕机播技术有待完善。我国不同地区地理环境、气候条件、农作制度存在很大差异,因此,必须结合种植区域的农艺特色,推广与当地典型作业模式相配套的免耕机播作业技术模式,对秸秆处理、种床整理等装置进行改进与优化设计,充分进行适应性试验,研制出符合区域种植要求的免耕机播设备<sup>[4]</sup>。在田间秸秆量日益增加、种植模式不断改进的情况下,我国在免耕机播设备的自主创新方面还应加强,农机与农艺还有待进一步融合,促进农机、农艺相互适应,协调发展,大力自主创新,研发符合区域特色的免耕机播技术,是提高全量秸秆地免耕机播产量和土壤肥力的有效方法<sup>[7]</sup>。

#### 4.2 优化机具,提升机具自动化、智能化水平

优化机具关键部件,集成装备制造领域先进技术,如耐磨材料堆焊、材料表层处理、材料热处理等先进技术,有助于提高机具质量。传统机械技术在某些功能实现方面存在一定局限性,如机械式自动限深技术存在仿形能力差,精度不高,响应迟滞等问题<sup>[38]</sup>;农业装备的自动化和智能化应用是农机技术先进性的体现,在免耕机播过程中,运用检测传感器、机电液一体化自动控制、无线通信等技术,对自动限深、机具堵塞、施肥播种等关键作业环节进行实时监测、预警和调控,是机具进行精确变量作业、节能减排以及提高机具作业性能稳定性、可靠性的有效途径<sup>[39]</sup>。另外,结合车载智能终端设备、云服务平台和图像处理、卫星导航等技术,利用农业大数据,提升农业信息利用的智能化水平,是提高机具作业质量的重要发展方向<sup>[40]</sup>。

#### 4.3 加强全量秸秆地免耕机播技术研发

由于全面禁止秸秆焚烧和以农户为主的秸秆饲料化、燃料化传统主体需求锐减,且新的经济有效的秸秆资源化利用产业化模式还依然缺乏,农作物收获后秸秆不做任何收集移出处理的全量秸秆地已成为我国耕种新常态。目前我国免耕机播设备主要针对秸秆量较少的田块作业,无法适应全量秸秆地的复杂工况。加强全量秸秆地机播技术研发,实现下茬作物在全量秸秆地高质顺畅免耕机播,既是抢农时、节约成本、提高复种指数的有效方法,又是耕地提质保育、秸秆禁烧、保护生态的重要基础<sup>[41]</sup>。

### 5 结束语

我国在吸收国外先进技术经验的基础上,自主创新研发出一系列有我国区域特色的免耕播种机具,但秸秆全面禁烧后,对免耕播种技术提出了更高的要求,尤其是在免耕播种机对秸秆处理方面的研究应予以加强。免耕播种技术是保护性

耕作关键技术, 关乎我国生态环境和农业的可持续性发展<sup>[42-43]</sup>, 提升免耕播种技术的创新研发力, 促进免耕播种技术与种植区域农艺的融合, 是实现可靠、高效免耕播种的必然选择。

#### 参考文献:

- [1] 高焕文, 李洪文, 姚宗路. 我国轻型免耕播种机研究[J]. 农业机械学报, 2008, 39(4): 78-82.
- [2] 杨文钰, 王兰英. 作物秸秆还田的现状与展望[J]. 四川农业大学学报, 1999, 17(2): 211-216.
- [3] 杜长征. 我国秸秆还田机械化的发展现状与思考[J]. 农机化研究, 2009(7): 234-236.
- [4] 高焕文, 李问盈, 李洪文. 中国特色保护性耕作技术[J]. 农业工程学报, 2003, 19(3): 1-4.
- [5] 廖庆喜, 高焕文, 舒彩霞. 免耕播种机防堵技术研究现状与发展趋势[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 108-112.
- [6] 顾峰玮, 胡志超, 陈有庆, 等. “洁区播种”思路下麦茬全秸秆覆盖地花生免耕播种机研制[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 15-23.
- [7] 常志州, 陈新华, 杨四军, 等. 稻麦秸秆直接还田技术发展现状及展望[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(4): 909-914.
- [8] 胡志超. 全秸秆覆盖地机械化免耕播种技术研发取得重大突破[J]. 基层农技推广, 2015, 3(4): 40.
- [9] 张 燕. 江苏省秸秆还田机械发展战略研究[J]. 农机化研究, 2012(12): 240-243.
- [10] 李 兵, 李洪文. 国内外小麦免耕播种机的研究现状与发展方向[J]. 中国农机化, 2006(1): 46-49.
- [11] 张守德. 2BQM-6 型免耕播种机结构设计及开沟器的有限元分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015.
- [12] 廖庆喜. 免耕播种机防堵与排种装置试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2003.
- [13] 冯 川. 秸秆覆盖地少耕播种机的设计与研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2017.
- [14] 臧 宇. 基于 John Deere 7200 型免耕播种机变量施肥技术的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2016.
- [15] 齐 鹏. 免耕播种机破茬防堵装置设计与试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- [16] 白晓虎. 免耕播种机关键部件及其参数化设计方法研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012.
- [17] 高旺盛. 论保护性耕作技术的基本原理与发展趋势[J]. 中国农业科学, 2007, 40(12): 2702-2708.
- [18] 何 进, 郑智旗, 王庆杰. 固定垄保护性耕作机具的研究现状[J]. 农机化研究, 2014(9): 6-10.
- [19] 李海建, 李洪文, 李问盈, 等. 分体式小麦免耕播种机的设计[J]. 农机化研究, 2007(11): 94-98.
- [20] 林德志, 胡志超, 于昭洋, 等. 免耕播种机秸秆处理装置研究现状与发展[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(11): 13-16.
- [21] 陈有庆, 吴 峰, 顾峰玮, 等. 麦茬全秸秆覆盖地花生免耕播种机试验研究[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(2): 132-135.
- [22] 吴明亮. 稻茬田免耕播种机播种技术及机具实验研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2004.
- [23] 刘福来, 刘国平, 陈治文, 等. 保护性耕作技术及其机械的现状与发展趋势[J]. 农机化研究, 2009(7): 47-49.
- [24] 何 进, 李洪文, 陈海涛, 等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 1-19.
- [25] 王庆杰, 姚宗路, 高焕文, 等. 楔刀型免耕开沟器设计与试验[J]. 机械工程学报, 2008, 44(9): 177-182.
- [26] 姚宗路. 小麦对行免耕播种机的改进研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [27] 陈海涛, 侯 磊, 侯守印, 等. 大垄玉米原茬地免耕播种机防堵装置设计与优化试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 1-9.
- [28] Fallahi S, Raoufat M H. Row-crop planter attachments in a conservation tillage system: a comparative study[J]. Soil and Tillage Research, 2008, 98(1): 27-34.
- [29] Huijsmans J F M, Hendriks J G L, Vermeulen G D. Draught requirement of trailing-foot and shallow injection equipment for applying slurry to grassland[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1998, 71(4): 347-356.
- [30] 施森宝, 胡鸿烈, 丁加明. 秸秆覆盖免耕法[J]. 农业工程学报, 1990, 6(3): 31-36.
- [31] 张云文. 驱动圆盘切茬器的试验研究[J]. 中国农业大学学报, 1999, 4(6): 38-40.
- [32] 朱瑞祥, 李成鑫, 程 阳, 等. 被动式圆盘刀作业性能优化试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 47-54.
- [33] 胡 红, 李洪文, 李传友, 等. 稻茬田小麦宽幅精量少耕播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4): 24-32.
- [34] 赵佳乐. 留茬行间交替耕作模式配套播种机关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [35] 李永磊, 宋建农, 康小军, 等. 双辊秸秆还田旋耕机试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 45-49.
- [36] 邱 添, 胡志超, 吴惠昌, 等. 国内外免耕播种机研究现状及展望[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(4): 7-11.
- [37] 高焕文, 何 明, 蒋金琳, 等. 保护性耕作机械化种植模式与播量试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(8): 42-45, 70.
- [38] 朱龙图. 免耕播种机播种深度自动控制系统研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2017.
- [39] 王 祺. 播种机播种质量监测系统研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2005.
- [40] 张晓亮, 时 磊, 王 娜, 等. 基于传感和信息采集的免耕智能播种机设计[J]. 农机化研究, 2016(5): 160-164.
- [41] 张斯梅, 杨四军, 顾克军, 等. 少免耕与秸秆机械全量原位还田对稻茬小麦出苗及产量的影响[J]. 农学报, 2015, 5(5): 81-84.
- [42] 董 智, 邓林军, 董 俊, 等. 免耕对玉米光合特性日变化及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(18): 71-74.
- [43] 蒋云峰, 钱瑞雪, 王祥贺, 等. 免耕玉米秸秆覆盖对大型土壤动物功能类群的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(17): 250-253.