

保护性耕作技术与机具研究进展

何进¹ 李洪文¹ 陈海涛² 卢彩云¹ 王庆杰¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 保护性耕作技术主要包括免少耕播种、秸秆残茬管理及表土耕作技术等。在回顾分析国内外保护性耕作技术应用概况、技术模式和效应的基础上,重点阐述了秸秆残茬管理、表土耕作技术与机具、免少耕播种关键技术的工作原理、技术特点及发展动态。结合国内保护性耕作研究进展与应用需求,在分析归纳现阶段保护性耕作技术难点的基础上,从改进机具关键作业部件加工工艺与材料、加强基础理论与机具结构优化、提升机具智能化测控与信息化管理、实现农机与农艺结合和形成因地制宜保护性耕作技术体系等方面展望了未来研究方向。

关键词: 保护性耕作; 免少耕播种; 秸秆残茬管理; 表土耕作

中图分类号: S226.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)04-0001-19

Research Progress of Conservation Tillage Technology and Machine

HE Jin¹ LI Hongwen¹ CHEN Haitao² LU Caiyun¹ WANG Qingjie¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Conservation tillage technologies mainly contain no/minimum tillage seeding, crop residue management, subsoilling technology and topsoil tillage technology. Based on the analysis of global adoption, technical modes and application benefits of conservation tillage, this paper reviewed the working principle, technical characteristics and developing trends of conservation tillage in four key parts, including crop straw and residue management, topsoil tillage technologies and machines, no/minimum tillage seeding key technologies, and subsoiling technologies. Combined with the research progress and application requirements of conservation tillage in China, current technical difficulties were analyzed and generalized, and future research emphasis and development direction were provided as following aspects: improving processing craft and materials of machine's key components, strengthening basic theoretical research, optimizing machine structure, enhancing the intelligent measuring and controlling technologies and information management ability of machines, combination of agricultural machine with agronomy under conservation tillage, forming regional-suited technical pattern and system.

Key words: conservation tillage; no/minimum tillage seeding; straw and residue management; topsoil tillage

0 引言

保护性耕作与传统耕作的最大差别在于取消了铧式犁翻耕^[1],对农田实行免耕、少耕,用作物秸秆覆盖地表,减少风蚀、水蚀,是提高土壤肥力和抗旱能力的先进农业耕作技术^[2-4]。在免、少耕播种条

件下,地表有秸秆残茬覆盖,播种机通过困难,且免耕地表平整度相对较差,严重影响播种质量和出苗效果。因此,如何处理前茬作物根茬与秸秆、平整种床与除草、改善深松效果、提高播种质量,成为保护性耕作技术有效实施的重点和难点。

国内外针对保护性耕作技术的研究主要集中在

收稿日期: 2017-12-29 修回日期: 2018-03-01
基金项目: 现代农业产业技术体系建设项目(CARS-03)、教育部创新团队发展计划项目(IRT13039)和公益性行业(农业)科研专项资金项目(201503136)
作者简介: 何进(1979—),男,教授,主要从事保护性耕作研究,E-mail: hejin@cau.edu.cn
通信作者: 李洪文(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作研究,E-mail: lhwen@cau.edu.cn

残茬管理、土壤耕作及免少耕播种方面。其中,残茬管理主要是秸秆粉碎及根茬处理;土壤耕作主要涉及表土耕作和深松;免少耕播种主要围绕秸秆防堵展开研究^[5-7]。因此,本文在分析国内外保护性耕作概况的基础上,阐述归纳残茬管理、表土耕作、免少耕播种等主要技术与机具的研究进展及存在问题,分析各项技术原理、特点及典型机具,并展望保护性耕作技术的发展趋势,为我国保护耕作技术的进一步发展提供参考。

1 保护性耕作概况

1.1 保护性耕作应用面积

保护性耕作充分利用自然条件保护土壤、恢复地力,有效减少水土流失,提高生产效益、促进节本增效,实现农业的可持续发展。据联合国粮农组织(FAO)2015年统计^[4-5],全世界保护性耕作面积约为1.569 8亿hm²,占全球总耕作面积的10.9%。由图1可知,南美洲保护性耕作面积最大,约为6.64×10⁷hm²,占该地区种植面积的60%;其次是北美洲,保护性耕作面积为5.4×10⁷hm²,占北美洲种植面积的24%;大洋洲保护性耕作面积2.0×10⁷hm²,占大洋洲总种植面积的35.9%。相对而言,亚洲与非洲采用保护性耕作的比例较低,分别为3%与0.9%。

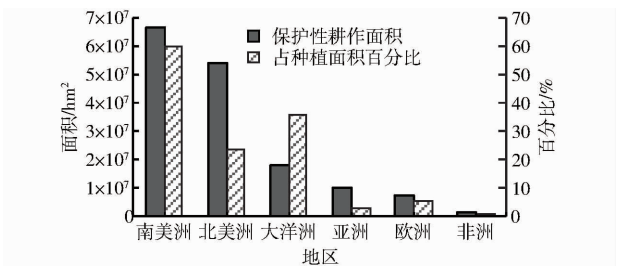


图1 全球保护性耕作应用情况

Fig.1 Global application of conservation tillage

加拿大、澳大利亚、巴西、阿根廷等国家借鉴美国发展保护性耕作的经验,结合本国实际情况加以应用,取得了良好的效益。由图2可知,美国(3.56×10^7 hm²)、巴西(3.18×10^7 hm²)、阿根廷(2.92×10^7 hm²)、加拿大(1.83×10^7 hm²)、澳大利亚(1.77×10^7 hm²)等国家的保护性耕作应用面积均大于 1.5×10^7 hm²,保护性耕作已成为这些国家的主流耕作技术。中国自20世纪50年代开始免少耕播种等相关技术研究,目前是亚洲保护性耕作应用面积最大的国家,超过 6.67×10^6 hm²。

1.2 保护性耕作技术模式现状

保护性耕作主要以土壤扰动最小化、秸秆残茬覆盖最大化、有效促进生物活性为原则^[8],在全球

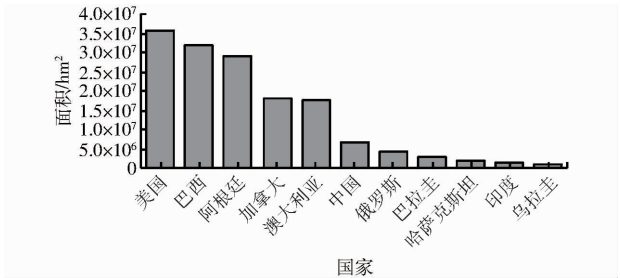


图2 保护性耕作面积较大的国家

Fig.2 Countries with larger adoption area of conservation tillage

不同地区针对不同的农业生态环境及作物形成了相适宜的技术模式,保护性耕作典型技术模式如表1所示。

20世纪80年代以后,保护性耕作技术模式基本成熟,推广应用面积不断扩大,目前已推广应用到70多个国家。其中,美国、加拿大、阿根廷、巴西、澳大利亚等国家在保护性耕作机具配套方面较为成熟。总结近年来世界保护性耕作技术发展趋势为:①依据不同地区农业生态环境和作物种植生产特点,因地制宜应用保护性耕作技术。②重视作物轮作。③重视非化学除草技术,如机械除草、生物除草等。④保护性耕作机具向智能化、大型化等方向发展。

1.3 保护性耕作实施效应

国内外研究表明,保护性耕作实施的效应主要体现在:

(1)减少风蚀

保护性耕作通过秸秆残茬覆盖,实现以下功效:不仅降低地表风速,而且作物根茬可以固土,加之免少耕可加大地表粗糙度,有效降低地表风速,减少扬尘和土粒运动;增加有效蓄水,增强表层土壤之间的吸附力;改善团粒结构,使可风蚀的小颗粒含量减少,从而可以有效减少农田扬尘^[29]。

(2)降低水蚀

①地表有秸秆残茬覆盖,降雨时雨滴的动能被秸秆吸收,再从秸秆上流到地面,不会产生激溅,细碎土粒不易堵塞土壤孔隙。②地表秸秆残茬覆盖,延迟径流发生时间,降低径流量。③保护性耕作对土壤扰动较小,作物须根腐烂后形成的孔道较多,有利于降雨过程中水分入渗。

(3)改良土壤

①改善土壤物理特性:根据黄土高原^[30]、华北^[31]和农牧交错区^[32]长期定位试验结果,保护性耕作分别降低了0~30cm层内的土壤容重2.2%、1.2%和2.8%;提高了大粒径(>2mm)水稳团粒数,降低了小粒径(<0.25mm)水稳团粒数。②改

表 1 保护性耕作典型技术模式

Tab.1 Typical technical pattern of conservation tillage

国家	技术模式	特点
美国 ^[9-11]	免耕	将作物直接种植在上茬作物收获后的苗床上
	条耕	中西部:通常是在秋后耕出一个大约 25 cm 宽、10 ~ 13 cm 深的条带区域,只在条带区域进行播种;东南部:在播种作业前或同时进行约为 30 cm 深度的松土作业
	垄作	在耕作时形成 8 ~ 12 cm 高的垄,在垄上直接播种
	覆盖耕作	在地表覆盖作物残茬、地膜或种植豆科作物的全幅宽耕作模式
巴西 ^[12-13]	免耕 + 轮作	采用行间种植或轮作覆盖作物(黑燕麦、豆类)来控制杂草及病虫害
阿根廷 ^[14-16]	免耕播种 + 套种或轮作	免耕配合化学除草,播种前利用圆盘耙等进行 15 ~ 18 cm 深度的种床整备,小麦、玉米、大豆、向日葵等作物轮作或套种
加拿大 ^[17]	免耕 + 轮作	将作物直接种植在上茬作物收获后的苗床上,并通过轮作方式减少杂草与病虫害
澳大利亚 ^[18-19]	固定道耕作	把行车带和作物生长带分开,机械作业时只行驶在固定的非耕作业道上,防止耕地不断被压实板结而影响作物生长
	残茬覆盖	减少旋耕和翻耕工序,保留残茬,同时秸秆地表覆盖
	免耕	除了种植和除草外,不进行土壤耕作,适时深松,保留大部分残茬
	留茬垄作少免耕 ^[20]	东北平原垄作区:垄宽一般在 70 ~ 100 cm,收获后留 30 cm 左右的残茬越冬;春播时在原垄顶错开前茬作物根茬进行免耕播种
中国 ^[2]	留茬覆盖少免耕 ^[21]	东北西部干旱风沙区:免耕播种,留高茬(30 cm)覆盖越冬;西北绿洲农业区:前茬作物收获时留茬覆盖或秸秆粉碎还田,次年根据地表情况进行免耕播种或带状旋耕播种;华北长城沿线:作物收获后留高茬越冬,第二年错行少免耕播种
	坡耕地免耕沟播 ^[22-23]	西北黄土高原区:免耕沟播机贴墒播种,作物收获后秸秆还田,并进行深松
	秸秆还田少免耕 ^[24]	黄淮海两茬平作区:小麦秸秆全量还田免耕播种玉米,玉米秸秆粉碎旋耕翻压后播小麦;南方湿润两/三熟区:水稻秸秆粉碎还田后直接播种或抛秧,可水旱轮作(稻麦、稻油)
印度 ^[25]	免耕/少耕	稻-麦体系采用全免耕,其他作物体系中少耕与免耕并存,辅助种床整理和激光平地
西班牙 ^[26]	覆盖 + 免耕	实行轮作制度,不扰动土壤,至少 30% 的地表由植被、作物残茬等覆盖
	少耕	种植前需要 2 或 3 次垂直耕作,至少 30% 的地表由作物残茬覆盖
奥地利 ^[27]	免耕 + 少量覆盖	免耕播种,作物覆盖量 25% 左右
南非 ^[28]	少耕	小型农场为降低土壤扰动及固土保墒而减少耕作

善土壤化学特性:在临汾、北京和武川,相对传统耕作,长期保护性耕作可分别提高农田土壤表层(0 ~ 10 cm) 21.7%、10.5% 和 23.1% 的有机质含量,51.5%、24.3% 和 23.8% 的全氮含量,以及 56.3%、48.5% 和 10.5% 的速度效磷含量^[32-33]。

(4) 提高土壤固碳能力

①实施保护性耕作的农田土壤,二氧化碳、甲烷等排放减少,土壤碳储量上升^[34]。②腐烂的作物秸秆、残茬可进一步培肥地力^[35],减少农田化肥使用量 10% ~ 20%。

(5) 提高作物产量和收益

保护性耕作可减少作业工序 2 ~ 3 道,降低作业成本 20% 左右,提高旱地作物产量 5% 以上,农民可增加收益 20% ~ 30%^[3,36]。

2 保护性耕作关键技术与机具现状

保护性耕作实施过程中,涉及到的主要机具有秸秆残茬管理、表土耕作、免少耕播种和深松机具。秸秆残茬管理是保护性耕作的基础,秸秆覆盖的好坏,直接关系到保护性耕作实施的成败;表土耕作是

杂草控制的关键技术之一;免少耕播种机在有秸秆覆盖的地表完成播种作业,故有效防堵是顺利实施免少耕播种的前提;深松是蓄纳降雨、打破犁底层等所采取的疏松土壤的措施。

2.1 秸秆残茬管理技术与机具

传统翻耕使土壤长期裸露,缺少秸秆残茬的覆盖或混合,降低土壤水分^[37],土壤风、水蚀严重,不利于农业生态环境保护^[38]。长期研究表明^[39],地面覆盖秸秆可以有效减少地表径流 60%、土壤水蚀 80% 左右,提高水分利用效率 15% ~ 17%^[38]、土壤蓄水量 14% ~ 15%^[40];增加土壤碳、磷和微生物含量^[41-43],改善土壤结构^[44]。此外,秸秆还田可防治沙尘暴,改善农田作物生长环境^[45],实现可持续农业生产。保护性耕作中,需要采用机械化技术对秸秆残茬进行管理,保证免少耕播种和秸秆还田作业质量。

秸秆残茬管理机具通常利用高速运动的秸秆粉碎刀或根茬粉碎刀,对秸秆或作物根茬进行多次高速打击、砍切、揉搓、撕裂后将秸秆或根茬粉碎成碎段和纤维状,一般还伴随着翻埋或抛撒还田作业,具

有作业质量好、处理秸秆量大、成本低、生产率高等特点^[46]。按照作业形式,秸秆残茬管理机具可分为两大类:①秸秆粉碎还田机具,主要包括秸秆粉碎机、与联合收获机配套的粉碎装置等。②根茬粉碎还田机,主要包括单轴式根茬粉碎机、秸秆粉碎与根茬粉碎联合作业机、双轴式根茬粉碎旋耕机等。

秸秆粉碎还田机具中,根据刀片粉碎秸秆的方式不同,可以分为旋转和砍切两种类型。旋转粉碎方式应用广泛,其工作原理是通过高速旋转的锤爪或甩刀,对秸秆进行多次高速锤击、切割和揉搓,将秸秆粉碎成丝瓢状^[47-48]。砍切类型的玉米秸秆还田机械,其工作原理为通过压辊将玉米秸秆沿机具前进方向压倒并与地面紧密接触,切刀在偏心轮盘的带动下做往复运动,将玉米秸秆切成段状。砍切粉碎提高了玉米秸秆切碎长度合格率,减少了后茬

小麦免耕播种机具被秸秆堵塞的情况^[49]。根茬粉碎还田机主要用于播种前的作物秸秆与根茬处理,作业对象为玉米、高粱、棉花等根茬粗壮硬实的作物^[50]。其工作原理为通过旋转的根茬粉碎刀切碎作物根茬并碎土,利用机罩的限制导向作用使得土壤进一步破碎,同时将碎茬和土壤搅拌混合还田^[51]。

秸秆粉碎还田机具与根茬粉碎还田机的核心部件是切碎刀片。刀片及其设计对秸秆与根茬的切碎质量、机具作业的功耗和使用寿命都有显著影响^[47]。目前应用较多的刀型有弯刀(Y形和L形)、直刀、锤爪^[52]和半喂入式粉碎圆盘刀等。表2列出了刀片的作业原理、特点及适用范围。

机械化秸秆残茬管理方式可在高效完成秸秆和根茬粉碎还田作业的同时节约成本。部分典型秸秆残茬管理机具如表3所示。

表 2 几种常用刀片作业原理、特点及适用范围

Tab. 2 Blade types together with their principle, description and applications

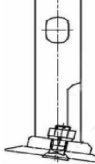
刀片类型	结构	原理	特点	适用范围
直刀 ^[53]		通常与定刀配套使用,成组使用且刃部锋利。对秸秆进行高速剪切和冲击,打击次数多,转动惯量较小	优点:粉碎效果好,消耗功率少,作业效率高 缺点:对秸秆残茬的捡拾、带动抛起效果较差	稻、麦类软质秸秆作物
Y刀 ^[54]		一般由两片刀片成组安装使用,刀片弯曲切割部分开有刃角,通过高速旋转形成击碎、切断作物秸秆和残茬的动能	优点:对秸秆残茬的捡拾、带动抛起效果较好,消耗功率少 缺点:刀片强度不高,使用寿命较短 ^[45]	硬茬作物(玉米、高粱等)
锤爪 ^[54]		通常由高强度和耐磨铸钢制成,粉碎刀质量大,作业时转动惯量较大,粉碎方式以冲击为主,并伴随剪切撕裂	优点:切碎质量高,刀片强度较高 缺点:消耗功率大	硬茬作物(玉米、棉花等)
L刀 ^[54]		刀片采用螺旋线排列,根茬粉碎刀刃分为单面双面两种形式。锋利刃口能有效切碎硬质根茬,并带动根茬混入土	优点:对根茬的捡拾、带动能力较好,翻埋混合入土性能好 缺点:结构强度较低	玉米、高粱、棉花等作物根茬
T刀 ^[55]		通过横向与纵向双重切割,以切割为主,击打为辅。T刀的3部分刀片固定在一起 ^[31]	优点:切割刃口较多,切碎效果好,瞬时转动惯量大 缺点:结构复杂,拆卸更换和安装等作业不便	硬质秸秆、残茬及小灌木等
V-L刀 ^[56]		在L形刀片上增加V形弯曲部分,刀片重心与刀柄位于同一平面上	优点:延长刀片的使用寿命、提高秸秆粉碎效果和作业效率 缺点:形状复杂,加工要求高	玉米
半喂入式圆盘刀		利用两个相对高速旋转轴上的交错圆盘刀片将收获后的秸秆粉碎	优点:对于刚收获的水稻秸秆有较好的粉碎效果 缺点:圆盘刀片加工技术要求较高	用于功率不大的半喂入式水稻小麦联合收获机配套的粉碎装置

表 3 秸秆残茬管理典型机具

Tab.3 Typical machines for crop straw residue management

型号	类型	总体结构	技术特点
4YZ 系列玉米联合收获机 ^[57]	秸秆粉碎还田装置 + 收获机		整机中部安装了粉碎装置。利用高速逆向旋转的粉碎刀对地上直立或铺放的秸秆从根部进行砍切,最后被气流抛送出去。系列机型工作幅宽 1.85 ~ 2.1 m,生产率为 0.3 ~ 0.9 hm ² /h
1JH 系列秸秆还田机 ^[58]	卧式秸秆粉碎还田机		可对直立或平铺的玉米、高粱等硬质秸秆和小麦、水稻等软质秸秆直接粉碎还田。该系列机具幅宽有 165、180、200、220 cm,作业速度 2 ~ 5 km/h,刀轴转速 2 100 ~ 2 422 r/min,工作效率 0.23 ~ 0.8 hm ² /h
4JH - 140 型秸秆粉碎还田机 ^[59]	立式秸秆粉碎还田机		与拖拉机三点悬挂,工作幅宽 1 400 mm,切碎长度合格率大于等于 85%,秸秆抛撒不均匀度小于等于 20%,配套动力 25 ~ 36 kW,结构质量 480 kg
EXR10 系列根茬粉碎还田机 ^[60]	根茬粉碎还田机		采用侧传动,刀轴上均匀布置根茬粉碎圆盘,每个圆盘安装 6 个 L 形根茬粉碎刀。作业幅宽 2 ~ 3 m,最大作业深度 12 cm,配套动力 66 ~ 140 kW,作业速度 1.5 km/h
1JG 系列秸秆和根茬切碎旋耕机 ^[61]	秸秆根茬切碎旋耕机		采用三点悬挂形式,可完成玉米、小麦、水稻等作物秸秆的切碎、根茬粉碎以及旋耕作业,配套动力 44 ~ 73.5 kW,作业幅宽 180 ~ 250 cm
1GQN - 180D 型双轴根茬粉碎旋耕机 ^[62]	双轴根茬粉碎旋耕机		整机碎土能力强,耕后地表平整,工效较高,对土壤适应范围较大。耕幅 1.8 m,配套动力 36.7 ~ 58.8 kW,机具速度 2.5 km/h,整机质量 646 kg
RM 610R 型根茬粉碎机 ^[63]	单轴式根茬粉碎机(灭茬机)		可折叠式根茬粉碎机,有 2 种刀片可供选择(锻造锤形刀片和 Y 型根茬粉碎通用刀片),安装在螺旋刀轴上(8 排),利用半旋转限深轮或尾端可拆卸的限深辊控制割茬高度。作业幅宽 6.1 m,整机质量 3 090 kg,配套动力 191 kW

作物秸秆残茬管理技术是保护性耕作技术重要的组成部分,秸秆粉碎还田机和根茬粉碎还田机是目前作物秸秆残茬管理使用的主要机具。国内外对于秸秆粉碎还田机和根茬粉碎还田机的刀具开展了一系列研究。在刀具的结构、参数的优化设计方面,通过对旋耕埋草机螺旋横刀的数学建模,得到横刀结构是影响高茬秸秆旋耕翻埋效果的主要因素^[64];利用 COSMOS 软件对还田机械旋耕刀弯折角进行优化设计^[65];通过 Pro/E 与 ANSYS 软件设计了一种阿基米德螺旋线型根茬粉碎刀^[66];建立玉米根茬切割过程的动力学模型及能耗模型,优化设计多级滑切刀^[67];通过对比试验,对旋耕-碎茬通用刀片结构参数进行了优化^[68];通过研究刀具刃口曲线与运动特征,为破茬刀具设计提供理论依据^[69];利用离散元法对比分析旋耕刀切土过程的力学特性,为秸秆覆盖量较大条件下的耕作机械优化设计提供技术

参考^[70];在研究秸秆-土壤-旋耕刀相互作用关系的基础上,利用三维离散元模型优化了旋耕刀刃口曲线^[71];通过建立板结土壤本构模型及土壤振动旋切过程的有限元数值模型,为振动旋耕机具作业参数选择提供技术依据^[72];在充分考虑粉碎效果的前提下,研制出一种 V - L 型秸秆粉碎还田刀片^[56]。在刀具能耗基础研究方面,通过建立旋耕刀动态和静态切土阻力数学模型,对刀片作业能耗展开分析^[73];优化旋耕刀作业参数,为旋耕机节能降耗提供数据参考^[74];此外,有学者对旋耕-碎茬通用刀片功率消耗影响因素^[75]及船式旋耕埋草机螺旋刀辊作业功耗进行了相关试验研究^[76];通过设计动定刀支撑滑切式秸秆粉碎装置,有效降低了机具作业功耗^[77]。通过一种刀片多头螺旋线对称排列法的相关试验,有效提高了刀具工作稳定性^[78];在相关基础研究和试验分析的基础上,研究了秸秆粉碎和还

田机具刀辊的主要工作参数,明确了甩刀排列、刀辊高度及转速对粉碎效果的影响^[79]。

秸秆覆盖地表是保护性耕作的重要标志之一。在秸秆和根茬粉碎抛撒、粉碎翻埋还田技术方面,目前还存在秸秆粉碎长短不一、抛撒、翻埋均匀性较差等问题,学者以这些问题为切入点展开了相关研究。通过正反转旋耕作业对秸秆混埋效果的影响规律分析,为具体秸秆混埋模式的选择提供了参考^[80];为评价秸秆混埋效果,对旋耕作业时秸秆的掩埋率进行了相关分析^[81];为提高粉碎效果和改善抛撒均匀性,设计了一种可调节秸秆抛撒均匀度和幅宽的秸秆粉碎抛撒还田机^[82]、一种安装在联合收获机的后罩上的秸秆切碎机^[83]、Y-直型锯齿型秸秆粉碎还田装置^[84]等。

保护性耕作是一种尽量减少土壤扰动的环境友好型技术。在秸秆残茬管理机具的基础上发展复式或联合作业机型,可有效减少机具进地次数和土壤压实,提高机具利用率。国内在复式或联合作业机型方面也展开了相关研究,设计了一种集深松作业、破茬碎土、秸秆旋埋和地表平整等多功能于一体的深松旋埋联合耕整机^[85];研制了一种秸秆捡拾粉碎掩埋复式还田机^[86]。

2.2 表土耕作技术与机具

表土耕作是指在收获后至播种前用机械对地表下 10 cm 以内的表层土壤进行的作业,是少耕的一种形式^[87]。必要的表土处理对保护性耕作有如下意义:①平整地表。上茬作物收获后存在沟辙和垄沟,表土耕作能平整地表,有利于后续免少耕播种。②降低地表秸秆覆盖率。玉米秸秆粉碎条件下,耙一次地可降低秸秆覆盖率 15% ~ 24%^[88]。将表土和秸秆混合,能够防止冬季休闲时大风将粉碎后的秸秆刮走或集堆,可提高免少耕播种机的通过性。③灭除杂草。保护性耕作条件下采用全面浅松可使除草率达到 90% 以上^[3],减少农药使用量和生产成本。④降低表土容重,减小开沟阻力,提高表土地温,增加蓄水量。浅松作业能降低免少耕播种机 40% 左右的开沟阻力,减小秸秆根茬和土壤容重对播种质量的影响^[89]。免耕加上表土作业后,休闲期蓄水量明显增加,水分利用率提高 13.6%^[90]。

表土耕作主要包括耙地、浅松、垂直耕作等,在保护性耕作时常用到的机具为圆盘耙、弹齿耙和浅松机等。

圆盘耙在滚转前进时,利用自重和土壤反作用力入土,土壤沿耙片凹面升降和跌落,达到碎土、翻土和覆盖等效果^[91]。圆盘耙的关键部件即耙片,根据耙片形状可分为全缘和缺口圆盘,缺口耙片有较

强的切土、碎土和切断残茬的能力;按耙组的配置方式可分为对置式和偏置式两种,对置式圆盘耙侧向受力平衡,工作平稳,且耙组交错对置排列,作业后地面无沟埂;偏置式圆盘耙侧向力不易平衡,调整较困难,只宜单向转弯。

弹齿耙主要是通过振动的耙齿来疏松土壤,平整地表,同时防止秸秆缠绕,可用于播种前的地表处理,达到创造良好种床、提高播种质量等目的。弹齿耙工作时不会造成土壤翻转,基本上不减少地表的秸秆覆盖量。根据工作部件弹齿耙可分为凿式、锄铲式等。国外典型弹齿耙基本采用多梁结构,有利于秸秆通过,弹齿的振动通过入土后阻力不均匀性及弹簧部件实现。

浅松机则利用松土铲从地表下 5 ~ 8 cm 处通过,表层土壤和秸秆从浅松铲表面流过,并经过镇压,从而获得平整细碎的种床,实现平地、除草、碎土功能,同时浅松还能降低表土容重,提高表土温度,减少播种开沟器的阻力,改善播种质量^[3]。浅松处理时,由于并不将秸秆混入土中,地表秸秆量减少不明显。

垂直耕作是一种对土壤进行垂直剪切而不引起土壤水平扰动的耕作方式。垂直耕作中主要使用的关键部件为圆盘刀和圆盘耙,圆盘刀在滚动碎土的同时切碎秸秆残茬,并将秸秆与土壤混合,促进秸秆的腐烂分解,使得种床有更均匀的容积密度和孔隙度,有利于种子的发芽及出苗。细碎的秸秆也能减少堵塞,提高免少耕播种机的通过性。同时垂直耕作减少耕作次数,缩短耕作时间,缓解了土壤压实问题。在实际作业中,垂直耕作多采用“圆盘刀-圆盘耙”、“圆盘刀-深松铲-圆盘耙”等组合形式,以实现更好的土地耕整效果^[92]。上述表土耕作典型机具总体结构和主要参数特点如表 4 所示^[93-98]。

国外保护性耕作所用的表土耕作机具大多是深松铲、圆盘耙、弹齿耙以及镇压辊等组成的联合整地作业机,能一次性完成灭茬、深松、耙地等作业,Lemken、Great Plains、Kverneland 等企业的产品都能保证良好的作业质量。国外机具一般体积大,质量大,多采用牵引式,需要大功率拖拉机配套。国内农田地块较小,机具多为悬挂式的单一作业,当表土耕作机具在含水率较高或秸秆覆盖率较大的地表作业时,易产生土壤黏附、残茬缠绕、阻力大和地表平整度差等问题。针对保护性耕作中出现的这些难题,学者展开了相应研究:通过改变驱动方式或提高作业速度设计出新型圆盘耙^[99-100],相比被动圆盘耙片,其抛土量大、耕深稳定、不易堵塞且作业功耗较小;在结构上改进,设计了双翼、窄翼和下插式等新

表 4 表土耕作典型机具
Tab.4 Typical machines for topsoil tillage

型号	关键部件	总体结构	主要特点
2625 型圆盘耙 ^[93]			采用对置式结构,适用于秸秆覆盖的硬质土壤,可选择多种幅宽和耙片,前后液压调平,操作方便。配套动力 141.2 ~ 320.7 kW,作业幅宽 7.2 ~ 12.4m,作业深度最大 20.3 cm,耙片间隙 23、28 cm,耙片直径 61、66 cm
Rubin9/400KU 型灭茬缺口圆盘耙 ^[94]			采用偏置式结构,适用于荒地、秸秆地整地作业;两排缺口耙片配制梳理弹簧,保证土壤平整;螺旋弹簧装置在遇障时保护耙片。配套动力 10.3 ~ 14.7 kW,作业幅宽 4 m,耙片直径 62 cm,耙片数量 32 个,质量 2 885 kg
Turbo - Max 系列垂直灭茬圆盘耙 ^[95]			采用波纹圆盘刀,适用于垂直耕作。圆盘刀间距 95.25 mm,整机配备液压转移重量系统,以确保机器在整个宽度上产生均匀和恒定的下压力,可实现秸秆残茬的均匀粉碎及碎秆与土壤的均匀混合
Qualidisc400 型高速圆盘耙 ^[96]			采用偏置式结构,配置高硬度圆锥型耙片,压槽式耙片固定架使耙片不侧移、耙片入土角度不变,保证切割入土效果;组合弹齿耙能梳理土壤;液压调整作业深度。配套动力 9.6 ~ 17.6 kW,作业幅宽 4m,耙片直径 57.3 cm,耙片数量 32 个,机具质量 2 740 kg
CDM300 型弹齿耙 ^[97]			适用于壤土和粘土,通过压土辊控制作业深度。作业幅宽 3 m,弹齿数量 22 个,作业速度 5 ~ 14 km/h
8323FC 型弹齿耙 ^[98]			采用锄铲式弹齿,弹齿排列合理(齿间距小于 72 cm);加强的铰链和折叠系统,使折叠和展开变得更平滑、更可靠。配套动力为 88.3 ~ 128.7 kW,工作幅宽 7 m
9322PP 型浅松机 ^[98]			采用窄 V 形松土铲,晃动条件下耕深仍能保持一致,带刀镇压轮碎土、除草效果良好;材料经过硬化热处理,寿命长。配套动力 110.3 ~ 150.8 kW,工作幅宽 6.8 m,质量 3 700 kg

型浅松铲^[101-103],田间试验表明设计的机具能有效减少土壤扰动,提高地表平整度,降低牵引阻力;利用离散元和有限元等仿真方法,建立土壤和机器模型,预测耕作阻力、功耗等参数,从而研究机具结构和运动参数与作业质量的关系,为机具结构设计和参数确定提供参考^[104-106]。

2.3 免少耕播种关键技术与机具

免少耕播种机是在免耕或者少耕的地表实施播种作业,地表往往存在有一定程度的秸秆残茬覆盖,秸秆残茬覆盖量影响着免耕播种机作业环节的工作可靠性。有效防堵是实施免少耕播种的技术核心,按照防堵形式分为重力切茬防堵、动力驱动防堵和

秸秆流动防堵等形式。

2.3.1 重力切茬防堵技术与机具

免耕播种机重力切茬防堵技术主要以圆盘开沟器为核心部件,其防堵原理是开沟圆盘在机具自身重力作用下高速转动,滚动切割秸秆、根茬和土壤,实现顺畅播种、施肥。该技术的优点是工作部件沿地面滚动,具有良好的防堵性能,但由于圆盘开沟器需要较大的正压力,因而免耕播种机播种单体相对较重、种肥分施能力相对较差。

根据圆盘形状结构可分为缺口圆盘、波纹圆盘、平面圆盘、凹面圆盘、涡轮圆盘等,部分开沟圆盘的工作原理如图 3 所示。缺口圆盘由于外缘具有一定

的冲击作用,因此具有较强的切土、碎土和切断残茬的能力(图 3a),适用于黏重土壤。常见的缺口圆盘外缘有三角形、梯形或半圆形。

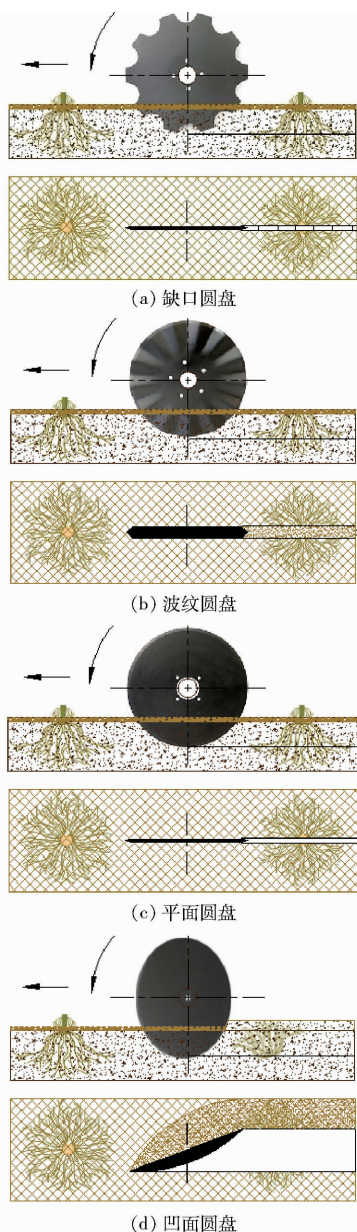


图 3 圆盘重力切茬防堵原理图

Fig. 3 Schematic diagram for gravitational stubble cutting and anti-blocking disc

波纹圆盘(微型波纹圆盘)依靠重力和弹簧附加力产生的切、挤作用在作业区形成较宽的松土带(图 3b),但所需的入土力增大,不适宜在黏重土壤条件下工作,作业时圆盘需加载 700 ~ 2 000 N 才能切断秸秆,切开地面达到一定的深度,要求机具有足够的重量。波纹圆盘刀的槽数越多、波纹越小,开沟宽度越小。

平面圆盘与播种机前进方向平行时,圆盘的作用只是切开根茬、切断杂草和秸秆、在土壤表面切出一道缝,后续安装开沟器开沟(图 3c)。平面圆盘与

播种机前进方向有一定夹角时,则可直接进行播种、施肥。

凹面圆盘类似于圆盘耙,与前进方向有一定的夹角,工作时,可利用圆盘的角度及滚动,将秸秆、根茬和表土抛离原位(图 3d),实现破茬开沟。

国外在重力切茬防堵方面研究较早,多集中在圆盘开沟器的结构设计与作业参数优化等方面。如 FALLAHI 等^[6]通过圆盘开沟播种试验得出平面圆盘的开沟播种深度最为稳定、均匀;HUIJSMANS 等^[7]针对双圆盘开沟器开沟参数与牵引力之间的作用关系开展试验研究,得出在开沟深度为 5 cm 条件下所需牵引力最小;AHMAD 等^[107]研究了双圆盘开沟器破茬性能,进行了不同开沟深度与作业速度条件下开沟破茬试验,得出双圆盘开沟器在直径为 450 mm 时具有最优的破茬率(88.6%)。国外大型农机企业 John Deere、Great Plains、Horsch 等在进行开沟圆盘设计时,综合考虑免耕播种机的整体结构与功能、农艺要求和土壤特性等因素,目前开发形成的系列重力切茬防堵免耕播种机,可快速调节播种单体圆盘下压力、开沟深度等,保证开沟切茬效果。

近年来,国内学者在重力切茬开沟防堵的性能参数及作业效果等方面开展了大量研究,并通过对不同结构类型条件下圆盘的作业性能,优化圆盘切茬刀性能参数。如朱瑞祥等^[108]构建了不同类型圆盘刀(普通圆盘刀、大波纹圆盘刀和缺口圆盘刀等)与破茬率和作业阻力间的数学模型,研究结果表明:大波纹型圆盘刀在前进速度为 5 km/h、偏角为 5°和倾角为 2°时作业效果最优;利用有限元仿真及田间试验得出缺口圆盘刀在全秸秆覆盖于地表时具有较好的入土和破茬性能;赵旭等^[109]以倾斜波纹圆盘为研究对象,试验得出配重是影响切茬深度的主要因素,当配重大于 800 N 时,播种机前进速度对切茬深度的影响比对牵引阻力的影响显著;林静等^[110]设计了一种阿基米德螺旋线型缺口圆盘破茬刀,并对其性能参数进行了优化。部分典型的重力切茬防堵免耕播种机如表 5 所示。

2.3.2 动力驱动防堵技术与机具

免耕播种机动力驱动防堵技术主要适用于秸秆覆盖量大、抢种抢收的一年两熟地区,其工作原理是利用拖拉机的动力输出轴提供动力,驱动防堵装置对秸秆残茬进行粉碎、抛撒等作业实现防堵。

目前对驱动防堵部件的研究从原理上主要分为“条耕”、“粉碎”、“切茬”和“拨抛”等几种形式,其防堵原理如图 4 所示。“条耕”式防堵的工作原理是在播种机开沟器前方安装旋耕刀,对播种行进行条带浅耕,粉碎、破除秸秆和根茬,整备种床,保证播

表 5 重力切茬防堵免耕播种机典型机具

型号	圆盘类型	总体结构	技术特点
DIRETTA 系列免耕条播机 ^[111]			播种单元采用两排前后交错布置。采用缺口圆盘(直径 475 mm、厚度 6 mm),作业时圆盘受到的下压力为 2~2.3 kN,能有效切断秸秆残茬。圆盘两侧限深轮为锥形结构,可通过改变限深轮大小调整缺口圆盘的作业深度。机具工作宽度 3~4 m,机具质量 3 900 kg,配套动力 88.3~110.3 kW,作业效率 3~4 hm ² /h
3P1006NT 型免耕播种机 ^[112]			采用三圆盘开沟播种。开沟器为双圆盘,前部装有波纹圆盘破茬开沟(直径 43.2 cm),可选用 12、24 槽波浪形圆盘,24 槽凹槽形圆盘,50 槽旋涡形圆盘。作业时波纹圆盘受到 2 kN 的下压力破茬开沟,其后的双圆盘开沟器在 408~816 N 的压力作用下开沟播种。机具行距为 19.05 cm,播种行数为 15 行,幅宽为 3.05 m,质量 2 476 kg,配套动力 73.5 kW
1590 系列免耕条播机 ^[113]			开沟器为平面圆盘(直径 46 cm,刃口角度 20°),与前进方向的夹角为 7°,采用单体仿形压簧式。压簧可给每个开沟器提供 740~1 810 N 的压力使其入土或切断残茬。幅宽 3.05~6.1 m,机具质量 2 917~5 969 kg
CIRRUS 6002SUPER 型免耕播种机 ^[114]			机具前部安装前后两组直径 460 mm 斜置凹面圆盘,用于疏松和平整土壤;后部采用 320 mm 或 400 mm 的圆盘开沟器,正压力 350 N 或 500 N,播种行距 12.5 cm 或 16.6 cm。整机作业宽度 6 m,运输宽度 3 m,机具质量 7 200~8 000 kg,配套动力 161.8 kW
2BMZF 系列免耕播种机 ^[115]			采用双圆盘开沟,前部装有缺口圆盘破茬,正压力为 400~900 N;后部采用带拔茬分草装置的圆盘开沟器。系列机具作业行数有 2、3、4、5、6 行等,配套动力 22.1~99.3 kW

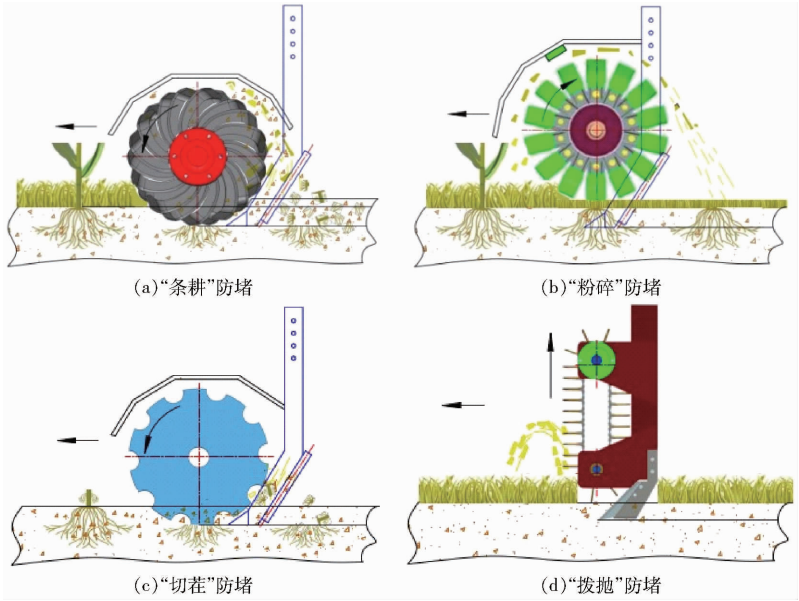


图 4 动力驱动防堵原理图

Fig. 4 Schematic diagram for powered anti-blocking technology

种质量(图 4a),目前应用比较广泛的是条带旋耕模式。

“粉碎”防堵的工作原理是利用安装在开沟器前方(或两侧)高速旋转的粉碎刀将播种行的秸秆粉碎,并利用粉碎刀的动能带动碎秆沿导草板抛向开沟器后方(图 4b),从而实现防堵。在“粉碎”防

堵过程中,粉碎刀不接触土壤,不会对土壤产生扰动,且高速旋转的粉碎刀对播种行的秸秆有很强的粉碎性能和后抛能力,因此防堵性好。

“切茬”防堵的工作原理是切茬圆盘在动力驱动下主动旋转,只需较小正压力就可将覆盖于地表的秸秆和根茬切断,疏松地表土壤,开出种沟;同时,圆盘可将切断的秸秆推向种行两侧,形成清洁播种带防止秸秆堵塞。

“拨抛”防堵的工作原理是拖拉机动力输出轴驱动秸秆粉碎、(侧)抛撒装置或者拨指(拨指不入土),将残茬和秸秆抛向开沟器后方或播种机两侧,形成清洁播种带防止秸秆堵塞。

国外针对动力驱动防堵技术开展了较多研究,且主要集中于南亚及东南亚地区的国家。例如 SHARMA^[116]研制了一种动力圆盘耙双圆盘免耕播种机,将圆盘耙施加动力切断秸秆,利用双圆盘开沟器将切断的秸秆分向种行两侧,进行开沟播种,在秸秆量小且韧性低的区域防堵效果较好;针对水稻秸秆量大及韧性强等特点, SIDHU 等^[117]提出一种动力捡拾和粉碎抛撒装置,将开沟器前方的水稻秸秆捡拾并且在粉碎室内切断,使地表暂时处于无秸秆状态,然后开沟器进行种肥播施作业,最后秸秆抛撒装置将之前粉碎的秸秆均匀抛撒于地表,覆盖种行。

国内动力驱动防堵方面的研究较多,尤其是针对秸秆覆盖量大造成的播种机严重堵塞问题。如陈海涛等^[118]设计了一种免耕播种机清秸装置,主要由清秸装置及清秸覆秸控制机构等组成,机组前进时螺旋刀齿循环打击秸秆和根茬,将地面的秸秆和播种带上的秸秆根茬侧向清除、运输并抛撒至机组侧向(无需刻意粉碎秸秆),完成防堵和种床整备作业过程,可通过调节清秸覆秸控制板的长度和角度,实现对已播地秸秆覆盖均匀度和覆盖宽度的控制;高娜娜等^[119]基于流体力学边界层理论设计了一种驱动滚筒式主动防堵机构,实现了播种带上秸秆的拨开与分流,可解决开沟部件被秸秆缠绕的问题;赵佳乐等^[120]设计了一种有支撑滚切式防堵装置,动力驱动主动切割刀片绕刀轴旋转,被动刀片则随机具滚动前进,利用两者形成的速度差对玉米秸秆和根茬进行有支撑切割粉碎;李建群^[121]设计的玉米秸秆顺行铺放小麦免耕播种联合作业机,可实现清理玉米行间秸秆、保留玉米根茬的功能,在玉米行间进行后续免耕播种作业,该作业方式可有效解决玉米秸秆直立覆盖条件下根茬较难处理的问题。部分典型的动力驱动防堵免耕播种机如表6所示^[122-128]。

2.3.3 秸秆流动防堵技术与机具

相对重力切茬防堵和动力驱动防堵技术,秸秆

流动防堵技术主要适用于秸秆覆盖量较小的地区。免耕播种机作业时,地表秸秆的流动性加强,一定程度上能够减少秸秆堵塞现象。常见的增强秸秆流动性的方式有:播种机多排开沟器布置以及开沟器前(侧)部增设防堵装置等。

多排开沟器布置:堵塞取决于相邻土壤耕作部件间形成的最小空间瞬时允许通过的秸秆最大量。空间、秸秆量和秸秆长度均影响堵塞。因此,加大开沟器间距使秸秆有足够的通过空间,是防止堵塞的有效措施。当开沟器间距足够大时,即使开沟器铲柄上有部分秸秆缠绕,也会在机具前进过程中受到一侧较大牵引阻力而脱落,不会造成堵塞。免耕播种机相邻开沟器之间的空隙,取决于水平方向上同一排开沟器相邻两个部件之间的距离。当把开沟器安装在同一排时,开沟器间距为 L (L 大小取决于行距);当采用多排布置开沟器时,如图5所示,同一排上开沟器间距为 nL (n 为开沟器排数),增加了两个开沟部件间距,从而有效减少了秸秆的堵塞。目前国外大型免耕播种机一般设有2~6排开沟器,安装在同排相邻开沟器的间距可达1m左右;国内由于受到种植模式和拖拉机悬挂能力的限制,多采用双排结构形式。

开沟器前(侧)部增设防堵装置:在采用多排开沟器结构的基础上,可在开沟器前(侧)部增配耙齿及拨草轮等秸秆流动防堵装置,以期最大程度地提高免耕播种机通过性能,改善破茬开沟效果,实现高速精准播种。如 NELSON 等^[129]分别采用回转式和往复式耙齿装置对播种带上秸秆进行清理,对比分析得知回转式耙齿的效果优于往复式,可将种带上71%的秸秆拨开; FALLAHI 等^[6]通过田间试验研究发现,拨草轮齿与平面圆盘犁的组合在免耕播种作业中防堵效果优势明显,且能够节本降耗。

近些年,研究人员在上述研究基础上结合理论分析及建立模型进行了秸秆流动防堵装置的结构设计与试验分析,提出了分草圆盘、导草辊、拨草轮齿和驱动滚筒等新型装置。如赵武云等^[130]设计的免耕播种机弹齿式防堵装置,利用弹齿的非线性变形对开沟器前方的秸秆产生短时间压制,避免了开沟器缠草。TORBERT 等^[131]设计了一种前置式秸秆防堵装置,播种机作业时,利用两根聚乙烯软管推动播种带上的秸秆,其后方的拨草轮齿将秸秆拨离种带,分草后切茬刀碎茬。田间试验表明该装置具有良好的防堵性能。贾洪雷等^[132]针对行间互作和宽窄行交替休闲2种保护性耕作模式,设计了组合刀片式的秸秆防堵装置,试验得出在作业速度为2.1m/s、耕作深度为35mm、刀片回旋半径为185mm时,秸

表 6 动力驱动防堵免耕播种机典型机具
Tab.6 Typical powered anti-blocking no tillage seeders

型号/厂家	驱动防堵类型	总体结构	技术特点
2BXS-16 型免耕施肥播种机 ^[122]	条耕式		可对开沟器前部的地表进行条带(全面)旋耕破茬,较好适应地表不平的情况。小麦播种行数 16 行、施肥行数 8 行。作业幅宽 3.25 m,机具质量 1 030 kg,配套动力 66.2~88.3 kW,作业效率 0.9~1.6 hm ² /h
2BFM-18 型免耕施肥播种机 ^[123]	条耕式		采用旋耕直刀式,减少了旋耕刀破茬时动土量大的弊端。采用窄形箭铲式开沟器,入土性能好。小麦播种行数 18 行、行距 25 cm;玉米播种行数 5 行、行距 40 cm。作业幅宽 2 m,机具质量 790 kg,配套动力 62.5~73.5 kW,作业效率 0.2~0.6 hm ² /h
2BMYF-18(6) 型免耕施肥播种机 ^[124]	条耕式		每个开沟器对应一组旋耕刀,旋耕刀对播种行上的根茬、秸秆进行破茬粉碎。小麦播种行数 18 行、行距 20 cm;玉米播种行数 6 行、行距 45~75 cm。作业幅宽 3.6 m,机具质量 1 480 kg,配套动力 73.5 kW 以上
Happy Seeder 免耕播种机 ^[125]	粉碎式		前部安装带状粉碎防堵装置,粉碎甩刀片由 2 把弯刀和 1 把直刀组成,直刀粉碎横杆、弯刀粉碎直立的根茬。机具行距 22.5 cm、播种行数 10 行,幅宽为 2.23 m
2BDPM-12 型免耕播种机 ^[126]	切茬式		斜置圆盘刀安装在机具前部,变速箱中间传动驱动圆盘刀旋转,圆盘刀直径为 403 mm,机具作业时对土壤扰动小。小麦播种行数 12 行、行距 18 cm;玉米播种行数 6 行、行距 54.5 cm,作业效率 0.43~0.86 hm ² /h
2BMQF-6/12 型免耕施肥播种机 ^[127]	切茬式		采用带状锯齿式防堵装置,通过调节可实现小麦行距 120 mm 与 240 mm 的宽窄行、玉米 590 mm 等行距以及大豆 360 mm 等行、210 mm 与 510 mm 宽窄行。整机质量 860 kg,作业幅宽 1.94 m,配套动力 58.8~73.5 kW,作业效率 0.40~0.67 hm ² /h
2BMFJ 系列免耕精量播种机 ^[118]	粉碎式+ 拨抛式		采用对辊侧旋式的清秸装置,对种沟两边的秸秆和根茬循环打击,将其运输并抛撒至清秸装置侧向,完成防堵和种床整备工作。清秸装置刀轴间距 400 mm,刀盘间距 90 mm,刀齿回转半径 375 mm、入土深度 30 mm。作业行数 4 行、6 行等,配套动力 51.5~81 kW
The Combo+ Happy Seeder ^[128]	粉碎式+ 拨抛式		前部安装条带粉碎防堵装置,粉碎刀片是以直刀形式,刀轴上共有 18 把直刀,工作时高速旋转的直刀将秸秆粉碎并且抛向播种机后方,工作幅宽 1 800 mm,工作效率 0.26~0.30 hm ² /h

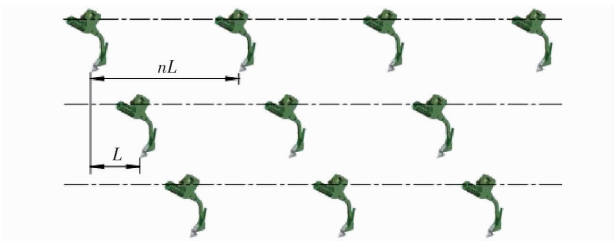


图 5 多排开沟防堵原理图
Fig.5 Schematic diagram for multi-row opening and anti-blocking technology

秆切断率为 90.9%,单把刀片功耗为 8.15 W;LI

等^[133]设计了一种带防堵机构的玉米免耕精量播种机,通过地轮驱动开沟器上方的滚筒来清除播种带上的秸秆,实现防堵功能。目前,Case、Great Plains、德邦大为等企业生产的免耕播种机都配有秸秆除茬器。同时,国内外学者在防堵装置设计的基础上,结合新型材料和加工工艺研究,进一步提高了防堵装置作业性能。部分典型的秸秆流动防堵免耕播种机如表 7 所示。

2.4 深松技术与机具

保护性耕作技术采用免、少耕虽然可以减少土

表 7 秸秆流动防堵免耕播种机典型机具
Tab. 7 Typical straw-flowing and anti-blocking no tillage seeders

型号/厂家	类型	总体结构	技术特点
Eco XL 系列免耕条播机 ^[134]	6 排开沟器		采用 3 横梁排列,每个横梁安装 1 排播种单元、每个播种单元交错安装 2 个开沟器和 1 个镇压辊,共组成 6 排开沟器结构。播种行距可设置 12.7、25.4、50.8 cm。作业幅宽有 10、12、13.5 m,配套动力 220.6~297.9 kW,作业效率 10 hm ² /h
SD-1504 型免耕条播机 ^[135]	4 排开沟器		采用 4 横梁排列,每个横梁安装 1 排开沟器和 1 个镇压辊,共组成 4 排开沟器结构。播种行距为 18 cm,作业幅宽 6 m,质量 5660 kg
2 Bin 免耕施肥播种机 ^[136]	4 排开沟器		共有 4 排横梁,开沟器与种肥箱安装在同一机架上,种子和肥料通过同一开沟器落入土壤中。播种行数为 20 行,工作幅宽 3.6 m,播种行距 18 cm,配套动力 40.5~51.5 kW
NTA-2007 型免耕气力条播机 ^[137]	2 排开沟器 + 三圆盘切茬		共有 2 排横梁,播种开沟单元前后交错排列,采用三圆盘结构,即一个波纹圆盘和一个双圆盘开沟器;作业幅宽 6.1 m,运输宽度 3 m,播种深度 0~3.5 cm,质量 10 200~15 800 kg
2B-9 型小麦播种机 ^[138]	分草圆盘		前部对称布置 6 个凹面圆盘,作业时,分草圆盘将机具前方的秸秆导流到机具两侧,降低堵塞。机具幅宽 1.42 m,播种行数 9 行,行距 17 cm,配套动力 8.8~22.1 kW,作业效率 0.33~0.53 hm ² /h
2BYSF-3 型勾轮玉米播种机 ^[139]	导草辊		种肥开沟器前部均有与地面垂直安装的导草辊,能够减少秸秆与开沟器的接触。播种玉米 3 行,行距 53~68.3 cm,施肥深度 6~8 cm,播种深度 3~5 cm。机具质量 200 kg,配套动力 11~18.4 kW
2605 型气吸式免耕精密播种机 ^[140]	拔草轮齿		采用双圆盘开沟,圆盘开沟器前部安装有拔草轮齿,可将秸秆拨向开沟器两侧。工作幅宽 2 m,播种行数 6 行、行距 55~70 cm,机具质量 1 762 kg,配套动力 73.5~88.3 kW,作业效率 2.13~2.40 hm ² /h

壤耕作,但种、管、收等环节的拖拉机和农机具的田间作业会对农田土壤产生压实现象。此外,土壤紧实度随着土壤自然状态下的沉降会有一定程度的增加,作物根系对水分和养分的吸收能力因土壤相关参数及物理特性的变化而有所改变,最终影响农作物的产量^[141]。深松作业在不翻转土壤、不打破原有土壤耕层结构的前提下,利用深松铲疏松种床土壤,打破坚硬的犁底层有利于蓄水保墒,加深耕作层有助于根系深扎,是旱地农业的保护性耕作技术之一。

保护性耕作条件下深松技术与机具的研究需要综合考虑:①深松铲易被覆盖在地表的秸秆和杂草缠绕,造成堵塞,影响作业质量;目前减少深松铲缠绕的方法有在深松前部增加圆盘切茬刀或者改善深松铲柄的滑切性能^[142]。②保护性耕作采用免少耕,存在土壤紧实度和容重相对较大的问题,使得深

松作业阻力增加。常见的深松减阻方法有仿生减阻法、振动减阻法等^[143]。③深松机具的深度监测系统需完善。④深松环节的碎土特性、土壤机械动力学等仍应作为研究的重点。

目前,国内已成功开发出一批具有自主知识产权且适合国情的秸秆还田、表土耕作以及免少耕播种等机具,为保护性耕作技术的推广应用提供了装备保障。但还存在一些不足:①免耕播种机在大量秸秆覆盖条件下的播种质量有待提高。与国外大型免耕播种机相比,国内播种机具在作业速度、播种质量、防堵部件加工工艺与材料等方面仍需加强研究。②秸秆还田机具作业质量有待提高。抛撒及覆盖均匀性尚不能实现较佳控制;棉花、香蕉等经济作物的秸秆还田技术与机具研究需逐步加强;秸秆还田正负效应及配套机具优化集成等也应作为研究重点。③表土耕作机具的相关基础理论较为薄弱,机具结

构、运动参数与作业质量的关系有待于进一步研究。

3 展望

在结合多年保护性耕作研究基础上,提出未来研究的重点,以充分发挥保护性耕作技术优势,弥补当前技术与装备不足,实现各作业环节高效可靠。

3.1 机具关键部件加工工艺与材料改进

在实施全程保护性耕作过程中,涉及多个作业环节。在免少耕播种条件下,机械化秸秆处理、深松、表土耕作工况复杂多变、随机性强。作业过程中,现有的防堵部件、秸秆粉碎部件(如粉碎刀、圆盘等)、表土耕作部件、深松铲等与秸秆、根茬、土壤相互摩擦易产生磨损;刀轴、弹齿等部件则承受较大的动态激励和冲击载荷易变形。为此,需借鉴各种处理工艺,改善和提高秸秆处理、深松、表土耕作等机具的作业性能:①在加工工艺方面,借鉴装备制造领域先进工艺技术,如气体保护焊、自动电弧焊、耐磨材料堆焊、表面涂层以及热处理等,充分保证关键部件具备较佳作业性能。②在材料方面,应充分发挥多学科交叉研究优势,研制适用于保护性耕作机具的耐蚀耐磨、减摩、耐冲击和耐疲劳新型材料。突出加工工艺改进和新兴材料应用,是提升保护性耕作机具关键部件作业性能、实现精量播种作业、深松机具节能降耗和提高表土耕作机具适应性的关键。

3.2 加强基础理论与机具结构优化

国内虽然在保护性耕作技术与装置研发方面展开了相关研究,但是基础研究有待于进一步系统完善,包括保护性耕作对土壤性状、节水培肥、作物生育、环境效应等影响机制都需要进一步研究。以免耕播种机和机械化秸秆处理机具为例,仍需探究机械-秸秆-土壤相互作用机理、多工况条件下秸秆运动规律与本构特征、抛撒轨迹等系统理论;以深松机具和表土作业机具为例,应进一步研究耕作过程中的碎土机理以及深松作业与作物产量之间的关系、表土耕作部件作业能耗和燃油量的大小与深松作业增产效益之间的交互关系。目前,保护性耕作机具相关产品的标准化、系列化、通用化程度相对较低,机具的适应性有待提高。因此,针对国内不同区域土壤特性、作物种类、种植模式以及技术需求的差异,进一步完善免少耕播种、秸秆机械化处理、深松及表土耕作相关基础理论,优化改进机具关键部件与结构,集成先进技术,提高保护性耕作机具的适应性和可靠性。在加强基础理论研究的基础上,逐步研制与区域多样性相适应的核心部件与机具仍将是进一步研究的重点。

3.3 提升机具智能化测控与信息化管理

智能化和信息化的装备是先进农业技术推广应用的载体和桥梁。在免耕播种以及播前秸秆机械化管理、深松和表土耕作过程中,利用机电液控制、互联网+、机器视觉、计算机模拟仿真等技术,对播种、堵塞、秸秆粉碎、碎秆抛撒、深松和表土耕作等关键作业环节进行实时监测、及时预警和可靠控制,是提高秸秆处理和免耕播种的可控性、稳定性和精确性、实现智能化测控和信息化管理的有效途径。同时,利用卫星导航、图像处理等技术实现高效避免耕播种,保证播种质量,利用深度自动控制与测试技术实现深松与表土耕作深度的实时检测与控制。另外,在实现保护性耕作智能测控、提升信息化管理水平方面,多种技术相互结合将会更加普遍。

3.4 保护性耕作模式下农机与农艺融合

农艺要求的复杂多变、种植习惯及生产条件的多样性,决定了保护性耕作技术模式的复杂与多样。保护性耕作技术模式的选择应以保护生态、经济有利、技术可行、应用者能接受和统筹兼顾为原则。如免少耕播种秸秆防堵主要是通过各种类型机具处理多工况条件下的秸秆,解决播种作业环节的堵塞问题,当前仍有一些技术问题亟待解决,如适宜的覆盖量和残茬长度、种床特性(碎秆与土壤的接触方式等)对作物生长的影响规律等。免少耕播种秸秆处理受气候特点、地理条件、土壤类型、种植制度等的多样化影响较大,同时与保护性耕作技术需求密切相关。因此,必须结合不同地区的种植农艺要求,紧密结合种床整备、秸秆处理等现实需求,进一步加强免耕播种、秸秆处理部件与机具的设计优化与改进,深松及表土作业与其他作业模式相结合,探讨与各典型农业区保护性耕作相匹配的技术模式,发展具有区域特点的免少耕播种秸秆处理机械化技术。综上所述,进一步推进保护性耕作模式下农机与农艺协调发展、相互适应,是提高免少耕播种质量和发挥保护性耕作技术综合效益的基础。

3.5 形成因地制宜保护性耕作技术体系

国内耕作制度多样化,不同地区农业生态环境和作物种植生产特点复杂多变,需结合地域条件因地制宜确立适合区域特色的保护性耕作技术体系,以有针对性地促进各地区保护性耕作的推广与应用,充分发挥保护性耕作技术的保水、保土、保肥、抗旱增产、节本增效、改善生态的优势。保护性耕作技术体系需要突出技术集成和示范样板引导,以推进保护性耕作技术与机械化协调发展,推进单项技术与综合技术组装配套,最大限度发挥保护性耕作生态效益和社会效益等多重效益。建立适于不同区域

特色的技术标准和技术规范,有利于促进高水平保护性耕作技术体系的形成。另外,与保护性耕作相配套的关键技术有待于形成,例如形成与免少耕特点相配套的栽培技术体系,可以充分发挥免少耕技术的优点。同时,保护性耕作技术体系的推广需要政府部门的大力推动、技术部门和推广机构的有效支撑,以建立健全保护性耕作技术推广体系。

4 结束语

以免少耕播种、秸秆残茬管理、表土耕作及深松作业等为核心的保护性耕作技术,在提高粮食产量的同时,能够节约用水、降低生产成本;发展农业生

产的同时,能够保护生态环境,建设农业生态文明;立足当前农产品有效供给的同时,能够培肥地力,实现农业可持续发展。

提升保护性耕作配套机具的原始创新能力、集成创新能力和引进消化吸收再创新能力,是保护性耕作技术发展的支撑。加强保护性耕作技术基础研究,提高自主创新能力和技术储备水平是保护性耕作发展的保障。推进保护性耕作模式下农机农艺农信深度融合,重点探索与各地区种植农艺相结合的保护性耕作技术模式,逐步形成科学合理的保护性耕作技术体系,是实现保护性耕作生产高效、节本增效的必然选择。

参 考 文 献

- 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, 42(12): 2702–2708.
GAO Wangsheng. Development trends and basic principles of conservation tillage[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(12): 2702–2708. (in Chinese)
- BAKER J, SEXTON E, RITCHIE R, et al. No-tillage seeding in conservation agriculture[M]. Trowbridge: Cromwell Press, 2007.
- 农业部农业机械化推广司. 中国保护性耕作[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- KASSAM A, FRIEDRICH T, DERPSCH R, et al. Overview of the worldwide spread of conservation agriculture[J]. Field Actions Science Reports, 2015, 8: 1–11.
- CA adoption worldwide[EB/OL]. <http://www.fao.org/ag/ca/6c.html>.
- FALLAH S, RAPUFAT M H. Row-crop planter attachments in a conservation tillage system: a comparative study[J]. Soil & Tillage Research, 2008, 98(1): 27–34.
- 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.
- PALM C, BLANCO-CANQUI H, DECLERCK F, et al. Conservation agriculture and ecosystem services: an overview[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 187: 87–105.
- 保护性耕作工程建设规划(2009—2015年)[EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/gk/zcfg/nybgz/200908/t20090828_1340481.htm.
- MITCHELL J P, SHRESTHA A, MATHESIUS K, et al. Cover cropping and no-tillage improve soil health in an arid irrigated cropping system in California's San Joaquin Valley, USA[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 165(1): 325–335.
- MITCHELL J, CARTER L, MUNK D, et al. Conservation tillage systems for cotton advance in the San Joaquin Valley[J]. California Agriculture, 2012, 66(3): 108–115.
- Tillage Type Definitions[EB/OL]. <http://www.ctic.purdue.edu/media/pdf/TillageDefinitions.pdf>.
- FREITAS P L D, LANDERS J N. The transformation of agriculture in Brazil through development and adoption of zero tillage conservation agriculture[J]. International Soil & Water Conservation Research, 2014, 2(1): 35–46.
- VARELA M F, SCIANCA C M, TABOADA M A, et al. Cover crop effects on soybean residue decomposition and P release in no-tillage systems of Argentina[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 143: 59–66.
- ALVAREZ R, STEINBACH H S. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 104(1): 1–15.
- DÍAZ-ZORITA M, DUARTE G A, GROVE J H. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina[J]. Soil and Tillage Research, 2002, 65(1): 1–18.
- AWADA L, LINDWALL C W, SONNTAG B. The development and adoption of conservation tillage systems on the Canadian Prairies[J]. International Soil & Water Conservation Research, 2014, 2(1): 47–65.
- TULLBERG J N, YULE D F, McGarry D. Controlled traffic farming—from research to adoption in Australia[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 97(2): 272–281.
- DANG Y P, BALZER A, CRAWFORD M, et al. Strategic tillage in conservation agricultural systems of north-eastern Australia: why, where, when and how? [J]. Environmental Science & Pollution Research International, 2017, 25(2): 1–16.
- 林静, 刘艳芬, 李宝筏, 等. 东北地区垄作免耕覆盖模式对土壤理化特性的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 58–64.
LIN Jing, LIU Yanfen, LI Baofa, et al. Effect of ridge-till and no-till mulching modes in Northeast China on soil physicochemical properties[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(23): 58–64. (in Chinese)
- 汤秋香, 谢瑞芝, 章建新, 等. 典型生态区保护性耕作主体模式及影响农户采用的因子分析[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2): 469–477.

- TANG Qiuxiang, XIE Ruizhi, ZHANG Jianxin, et al. Analysis of conservation tillage pattern and the factors influencing farmers adoption in typical ecological region in China[J]. *Scientia Agricultural Sinica*, 2009, 42(2): 469–477. (in Chinese)
- 22 闫小丽, 薛少平, 朱瑞祥. 陕北长城沿线风沙区留茬固土保护性耕作技术模式研究[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2009, 37(2): 100–104.
- YAN Xiaoli, XUE Shaoping, ZHU Ruixiang. Conservative tillage for soil conservation with stubble in sandstorm area along the Great Wall in North Shaanxi Province of China[J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2009, 37(2): 100–104. (in Chinese)
- 23 冯聚凯, 崔彦宏, 甄瑞, 等. 华北平原一年两熟区保护性耕作技术研究进展[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(6): 177–181.
- FENG Jukai, CUI Yanhong, ZHEN Rui, et al. Review on conservation tillage of double cropping system in North China Plain [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(6): 177–181. (in Chinese)
- 24 汪一凡. 我国南方湿润地区保护性耕作研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2015.
- 25 BHAN S, BEHERA U K. Conservation agriculture in India-problems, prospects and policy issues[J]. *International Soil & Water Conservation Research*, 2014, 2(4): 1–12.
- 26 GONZALEZ-SANCHEZ E J, VEROZ-GONZALEZ O, BLANCO-ROLDAN G L, et al. A renewed view of conservation agriculture and its evolution over the last decade in Spain[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 146: 204–212.
- 27 HÖSL R, STRAUSS P. Conservation tillage practices in the alpine forelands of Austria—are they effective? [J]. *Catena*, 2016, 137(1): 44–51.
- 28 ANDERSSON J A, DSOUZA S. From adoption claims to understanding farmers and contexts: a literature review of conservation agriculture (CA) adoption among smallholder farmers in southern Africa[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2014, 187(4): 116–132.
- 29 YOUNG D L, SCHILLINGER W F. Wheat farmers adopt the undercutter fallow method to reduce wind erosion and sustain profitability[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 124(4): 240–244.
- 30 WANG Q J, BAI Y H, GAO H W, et al. Soil chemical properties and microbial biomass after 16 years of no-tillage farming on the Loess Plateau China[J]. *Geoderma*, 2008, 144: 502–508.
- 31 ZHANG X R, LI H W, HE J, et al. Influence of conservation tillage practices on soil properties and crop yields for maize and wheat cultivation in Beijing[J]. *China, Australian Journal of Soil Research*, 2009, 47: 362–371.
- 32 HE J, KUHN N J, ZHANG X M, et al. Effects of 10 years of conservation tillage on soil properties and productivity in the farming-pastoral ecotone of Inner Mongolia China[J]. *Soil Use and Management*, 2009, 25: 201–209.
- 33 HE Jin, LI Hongwen, WANG Qingjie, et al. The adoption of conservation tillage in China[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2010, 1195: 96–106.
- 34 胡立峰, 李洪文, 高焕文. 保护性耕作对温室效应的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(5): 308–312.
- HU Lifeng, LI Hongwen, GAO Huanwen. Influence of conservation tillage on greenhouse effect[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(5): 308–312. (in Chinese)
- 35 李安宁, 范学民, 吴传云, 等. 保护性耕作现状及发展趋势[J]. *农业机械学报*, 2006, 37(10): 177–180.
- LI Anning, FAN Xuemin, WU Chuanyun, et al. Situation and development trends of conservation tillage in the world[J]. *Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(10): 177–180. (in Chinese)
- 36 PITTELKOW C M, LIANG X, LINQUIST B A, et al. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture[J]. *Nature*, 2015, 517(7534): 365.
- 37 杨陆强, 高彦玉, 朱加繁, 等. 保护性耕作技术与配套机具[J]. *农机化研究*, 2018, 40(4): 263–268.
- YANG Luqiang, GAO Yanyu, ZHU Jiafan, et al. Conservation tillage technology and related equipment [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2018, 40(4): 263–268. (in Chinese)
- 38 张永斌. 陕西旱地保护性耕作技术模式研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- ZHANG Yongbin. Study of conservation tillage technology model in Shaanxi [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese)
- 39 陕西省农业机械管理局, 西北农林科技大学. 保护性耕作技术[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2006.
- 40 NYAKUDYA I W, STROOSNIJDER L. Conservation tillage of rain-fed maize in semi-arid Zimbabwe: a review[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 145(1): 184–197.
- 41 WEST T O, POST W M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(6): 1930–1946.
- 42 ZAMUNER E C, PICINE L I, ECHEVERRIA H E. Comparison of phosphorus fertilization diagnostic methods for wheat under no-tillage[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 89(1): 70–77.
- 43 朱强根, 朱安宁, 张佳宝, 等. 保护性耕作下土壤动物群落及其与土壤肥力的关系[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(2): 70–74.
- ZHU Qianggen, ZHU Anning, ZHANG Jiabao, et al. Relation of agricultural soil fauna and soil fertility under conservation tillage systems[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(2): 70–74. (in Chinese)
- 44 许艳, 张仁陟, 张冰桥, 等. 保护性耕作对黄土高原旱地土壤总磷及组分的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(4): 254–260.
- XU Yan, ZHANG Renzhi, ZHANG Bingqiao, et al. Effects of conservation tillage on soil total phosphorus and phosphorus fractions of dry land in the Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(4): 254–260. (in Chinese)
- 45 鲁向晖, 隋艳艳, 王飞, 等. 保护性耕作技术对农田环境的影响研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(3): 66–72.

- LU Xianghui, SUI Yanyan, WANG Fei, et al. The conservation tillage technique and it's influences on farmland environment [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(3): 66–72. (in Chinese)
- 46 郑侃,陈婉芝,杨宏伟,等. 秸秆还田机械化技术研究现状和展望[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(9): 9–13.
ZHENG Kan, CHEN Wanzhi, YANG Hongwei, et al. Current situation and prospect of straw returning mechanized technology [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44(9): 9–13. (in Chinese)
- 47 付雪高,李明,卢敬铭,等. 秸秆粉碎还田机甩刀的研究进展[J]. *中国农机化学报*, 2011(1): 83–87.
FU Xuegao, LI Ming, LU Jingming, et al. Research on the cutter of straw crushing machine to field[J]. *Chinese Agricultural Mechanization*, 2011(1): 83–87. (in Chinese)
- 48 JOHNSON J M F, ACOSTAMARTINEZ V, CAMBARDELLA C A, et al. Crop and soil responses to using corn stover as a bioenergy feedstock: observations from the northern US corn belt[J]. *Agriculture*, 2013, 3(1): 72–89.
- 49 王庆杰,刘正道,李洪文,等. 砍切式玉米秸秆还田机的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(2): 10–17.
WANG Qingjie, LIU Zhengdao, LI Hongwen, et al. Design and experiment of chopping-type maize straw returning machine[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(2): 10–17. (in Chinese)
- 50 文立阁,李建桥,崔占荣. 我国灭茬机具及其刀具的发展现状[J]. *农机化研究*, 2006, 28(5): 10–13.
WEN Lige, LI Jianqiao, CUI Zhanrong. Development present situation of stubble chopper and blade used in China[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2006, 28(5): 10–13. (in Chinese)
- 51 朱良,兰心敏. 秸秆(根茬)粉碎还田机使用、维护与选购指南[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- 52 LIU H, JIANG G M, ZHUANG H Y, et al. Distribution, utilization structure and potential of biomass resources in rural China: with special references of crop residues[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12(5): 1402–1408.
- 53 Straight blade[EB/OL]. <http://www.rasspe.de/english/Grain-harvest/Straw-Chopper-Knives/>.
- 54 Multi-purpose fixed straw-chopper[EB/OL]. <http://www.celli.it/en/products/mulchers/scorpiof/>.
- 55 徐春华,介战. T型板刀式秸秆还田机刀辊设计[J]. *拖拉机与农用运输车*, 2014(5): 50–51.
XU Chunhua, JIE Zhan. Design of T type plate knife roller of straw returning machine[J]. *Tractor & Farm Transporter*, 2014(5): 50–51. (in Chinese)
- 56 贾洪雷,姜鑫铭,郭明卓,等. V-L型秸秆粉碎还田刀片设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(1): 28–33.
JIA Honglei, JIANG Xinming, GUO Mingzhuo, et al. Design and experiment of V-L shaped smashed strawblade [J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(1): 28–33. (in Chinese)
- 57 玉米收获机 4YZ-4B[EB/OL]. <http://am.lovol.com.cn/yumiji/cc044yz4b.htm>.
- 58 东方红 1JH 秸秆机[EB/OL]. http://www.yituo.com.cn/cpzx/jjcp/jgj/201706/t20170620_156686.html.
- 59 4JH-140 秸秆粉碎还田机[EB/OL]. http://nongji360.com/company/shop2/product_2861_18626.shtml.
- 60 松山株式会社 EXR10 系列灭茬机[EB/OL]. <http://www.niplo.co.jp/products/cat-1/product-01.php?c=b030&id=105>.
- 61 1JG 系列秸秆切碎灭茬旋耕机[EB/OL]. http://www.nongjx.com/st57873/product_693382.html.
- 62 1GQN-180D 型双轴灭茬旋耕机[EB/OL]. <http://www.09635.com/trade/116127.aspx>.
- 63 库恩. RM610[EB/OL]. [http://www.kuhn.cn/internet/webcn.nsf/0/C66735C502B8AD47C1257B48002FD67D? Open](http://www.kuhn.cn/internet/webcn.nsf/0/C66735C502B8AD47C1257B48002FD67D?Open).
- 64 张居敏,周勇,夏俊芳,等. 旋耕埋草机螺旋横刀的数学建模与参数分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(1): 18–25.
ZHANG Jumin, ZHOU Yong, XIA Junfang, et al. Mathematical modeling and analysis of helical blade for stubble burying rotary tiller[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(1): 18–25. (in Chinese)
- 65 盖超,董玉平. 基于 COSMOS 的还田机械旋耕刀弯折角优化[J]. *农机化研究*, 2011, 33(3): 30–33.
GAI Chao, DONG Yuping. Optimization of bending angle of rotary machine rotary tilling blade based on COSMOS[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2011, 33(3): 30–33. (in Chinese)
- 66 刘九庆,牛明,商友云,等. 基于 ANSYS 的灭茬刀多目标驱动优化设计[J]. *沈阳工业大学学报*, 2014, 36(2): 182–187.
LIU Jiuqing, NIU Ming, SHANG Youyun, et al. Multi-goal driven optimization design of stubble-smashing cutter based on ANSYS[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2014, 36(2): 182–187. (in Chinese)
- 67 权龙哲,佟金,曾百功,等. 玉米根茬铲切刀具的滑切刃曲线优化设计[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(12): 13–17.
QUAN Longzhe, TONG Jin, ZENG Baigong, et al. Optimization design of sliding cutting edge curve of corn rootstalk cutting tool [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(12): 13–17. (in Chinese)
- 68 贾洪雷,汲文峰,韩伟峰,等. 旋耕-碎茬通用刀片结构参数优化试验[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(7): 45–50.
JIA Honglei, JI Wenfeng, HAN Weifeng, et al. Optimization experiment of structure parameters of rototilling and stubble breaking universal blade[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(7): 45–50. (in Chinese)
- 69 丁慧玲,党凤魁,师清翔,等. 玉米根茬破碎刀具刃口曲线参数与运动参数的关系[J]. *河南科技大学学报:自然科学版*, 2010, 31(4): 75–78.
DING Huiling, DANG Fengkui, SHI Qingxiang, et al. Relationship between parameters of curved cutting-edge and motion parameters of blade used for maize rootstalk breaking[J]. *Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2010, 31(4): 75–78. (in Chinese)
- 70 方会敏,姬长英,张庆怡,等. 基于离散元法的旋耕刀受力分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(21): 54–59.
FANG Huimin, JI Changying, ZHANG Qingyi, et al. Force analysis of rotary blade based on distinct element method[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(21): 54–59. (in Chinese)

- 71 方会敏,姬长英,AHMED Ali Tagar,等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(1): 60-67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160109&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.009.
FANG Huimin, JI Changying, AHMED Ali Tagar, et al. Simulation analysis of straw movement in straw-soil-rotary blade system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 60-67. (in Chinese)
- 72 蒋建东,高洁,赵颖娣,等. 土壤旋切振动减阻的有限元分析[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(1): 58-62. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120112&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.012.
JIANG Jiandong, GAO Jie, ZHAO Yingdi, et al. Finite element simulation and analysis on soil rotary tillage with external vibration excitation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 58-62. (in Chinese)
- 73 ASL J H, SINGH S. Optimization and evaluation of rotary tiller blades: computer solution of mathematical relations[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 106(1): 1-7.
- 74 熊平原,杨洲,孙志全,等. 旋耕刀三向工作阻力试验及作业参数优化[J]. 农业工程学报,2017,33(19): 51-58.
XIONG Pingyuan, YANG Zhou, SUN Zhiquan, et al. Experiment on three-axis working resistances of rotary blade and working parameters optimization[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(19): 51-58. (in Chinese)
- 75 汲文峰,贾洪雷,佟金,等. 通用刀片功率消耗影响因素分析与田间试验[J]. 农业机械学报,2010,41(2): 35-41.
JI Wenfeng, JIA Honglei, TONG Jin, et al. Analysis of influencing factors on power consumption and field test of universal blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 35-41. (in Chinese)
- 76 王志山,夏俊芳,许绮川,等. 船式旋耕埋草机螺旋刀辊作业功耗试验[J]. 农业机械学报,2010,41(12): 44-47.
WANG Zhishan, XIA Junfang, XU Qichuan, et al. Power consumption experiment of rotary tillage and stubble mulch knife roller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 44-47. (in Chinese)
- 77 郑智旗,何进,李洪文,等. 定动刀支撑滑切式秸秆粉碎装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊): 108-116. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016017&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.017.
ZHENG Zhiqi, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of straw-chopping device with chopping and fixed knife supported slide cutting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 108-116. (in Chinese)
- 78 贾洪雷,黄东岩,刘晓亮,等. 耕作刀片在刀辊上的多头螺旋线对称排列法[J]. 农业工程学报,2011,27(4): 111-116.
JIA Honglei, HUANG Dongyan, LIU Xiaoliang, et al. Symmetrical multi-spiral arrangement of tillage blades on rotor[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 111-116. (in Chinese)
- 79 张佳喜,王学农,陈发,等. 秸秆粉碎还田、回收机刀辊工作参数的研究[J]. 新疆农业科学,2008,45(增刊2): 139-144.
ZHANG Jiaxi, WANG Xuenong, CHEN Fa, et al. Study on the knife roller working parameters of the field straw chopper and harvester[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2008, 45(Supp.2): 139-144. (in Chinese)
- 80 陈青春,石勇,丁启朔,等. 正反旋转旋耕作业的秸秆混埋效果比较[J]. 农业工程学报,2015,31(9): 13-18.
CHEN Qingchun, SHI Yong, DING Qishuo, et al. Comparison of straw incorporation effect with down-cut and up-cut rotary tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 13-18. (in Chinese)
- 81 SIRISAK C, TANYA N, WANWISA J. The performance of rotary power tiller using prototype rotary blades in dry-land field[J]. Maejo International Journal of Science and Technology, 2008, 2(Special Issue): 17-26.
- 82 章志强,何进,李洪文,等. 可调节式秸秆粉碎抛撒还田机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(9): 76-87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170910&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.010.
ZHANG Zhiqiang, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment on straw chopper cum spreader with adjustable spreading device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 76-87. (in Chinese)
- 83 DEAN M. Straw chopper and spreader for a combine harvester with improved fin design: U.S., 2008188275[P]. 2007-02-06.
- 84 邱新伟,王俊发,李亚芹,等. Y-直型锯齿型秸秆粉碎还田装置的设计[J]. 现代化农业,2015(6): 53-55.
QIU Xinwei, WANG Junfa, LI Yaqin, et al. Design of Y-straight serrated straw crushing and returning plant[J]. Modernizing Agriculture, 2015(6): 53-55. (in Chinese)
- 85 周华,张居敏,祝英豪,等. 秸秆还田深松旋埋联合耕整机设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(22): 17-26.
ZHOU Hua, ZHANG Jumin, ZHU Yinghao, et al. Design and experiment of combined tillage machine for subsoiling and rotary burying of straw incorporated into soil[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(22): 17-26. (in Chinese)
- 86 郑智旗,何进,王庆杰,等. 秸秆捡拾粉碎掩埋复式还田机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(7): 87-96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170711&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.011.
ZHENG Zhiqi, HE Jin, WANG Qingjie, et al. Design and experiment on straw pickup-chopping and ditch-burying integrated machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 87-96. (in Chinese)
- 87 李问盈,李洪文,陈实. 保护性耕作技术[M]. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,2009.
- 88 高焕文. 保护性耕作技术与机具[M]. 北京:化学工业出版社,2004.

- 89 龚振平,杨悦乾. 作物秸秆还田技术与机具[M]. 北京: 中国农业出版社,2012:338-339.
- 90 杜兵,李问盈,邓健,等. 保护性耕作表土作业的田间试验研究[J]. 中国农业大学学报,2000,6(4): 65-67.
DU Bing, LI Wenying, DENG Jian, et al. Research on surface tillage in conservation tillage[J]. Journal of China Agricultural University, 2000,6(4): 65-67. (in Chinese)
- 91 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社,2003.
- 92 SMITH D R, WARNEMUENDE-PAPPAS E A. Vertical tillage impacts on water quality derived from rainfall simulations[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 153(12): 155-160.
- 93 John Deere 2625[EB/OL]. <http://item.nongji360.com/54736>.
- 94 LEMKENRubin9/400KU[EB/OL]. <http://www.lemken.cn/Proinfo.aspx?id=136>.
- 95 Turbo-Max Vertical Tillage[EB/OL]. <https://www.greatplainsag.com/en/products/418/turbo-maxC2%AE>.
- 96 Kvernelandqualidisc[EB/OL]. https://www.kverneland.cn/node_80887/node_80962/node_80963/Qualidisc.
- 97 KUHN. Integratedseedbedcultivators[EB/OL]. <http://www.zemspoltabor.cz/priloha/cd%20a%20cdm%20prospekt.pdf>.
- 98 Great Plains. Tillage System[EB/OL]. https://www.greatplainsmfg.cn/sites/default/files/1030-Tillage.Catalog_CN.pdf, 2018-01-17.
- 99 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 Guowei, SHU Caixia, LIU Xiaopeng, et al. Design and simulation of hydraulic driven disc harrow[J]. Journal of South China Agricultural University, 2017, 38(5): 117-124. (in Chinese)
- 100 许剑平. 1BZD-630型高速对置圆盘耙的设计[J]. 农业科技与装备,2012(8): 30-32.
XU Jianping. Design of 1BZD-630 type high-speed relative disc harrow[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2012(8): 30-32. (in Chinese)
- 101 张宏. 下插式土壤浅松机的研究与关键部件的有限元分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学,2012.
ZHANG Hong. The research and fea on key parts of down embeded surfacetillage[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese)
- 102 孔德军,王世学,高焕文,等. 1QJ-120型浅松机的研究设计[J]. 农机化研究,2004,26(2): 126-130.
KONG Dejun, WANG Shixue, GAO Huanwen, et al. Study and design of 1QJ-120 type surface cultivator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2004,26(2): 126-130. (in Chinese)
- 103 朱克亮. 浅松机关键部件的试验研究及其测力系统的开发[D]. 北京: 中国农业大学,2001.
ZHU Keliang. Study on the key parts of shallow-tiller and its force-testing system based on virtual instruments[D]. Beijing: China Agricultural University, 2001. (in Chinese)
- 104 KORNÉL T, ISTVÁN J J, ABDUL M M. Modelling soil-sweep interaction with discrete element method[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 134(1): 223-231.
- 105 MUSTAFA U, JOHN M F, CHRIS S. Three-dimensional discrete element modelling(DEM) of tillage: accounting for soil cohesion and adhesion[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 298-306.
- 106 LI M, CHEN D, ZHANG S, et al. Biomimeite design of a stubble-cutting disc using finite element analysis[J]. Journal of Bionic Engineering, 2013, 10: 118-127.
- 107 AHMAD F, DING W, DING Q, et al. Forces and straw cutting performance of double disc furrow opener in no-till paddy soil [J]. Plos One, 2015, 10(3): e0119648.
- 108 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.
ZHU Ruixiang, LI Chengxin, CHENG Yang, et al. Working performance of passive disc coulter[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(18): 47-54. (in Chinese)
- 109 赵旭,张祖立,唐萍,等. 被动式倾斜波纹圆盘破茬刀工作性能试验[J]. 农业机械学报,2011,42(1): 64-67.
ZHAO Xu, ZHANG Zuli, TANG Ping, et al. Behavior of passive stubble-cutting disc with oblique ripples[J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 64-67. (in Chinese)
- 110 林静,李博,李宝筏,等. 阿基米德螺旋线型缺口圆盘破茬刀参数优化与试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(6): 119-124. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140619&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.019.
LIN Jing, LI Bo, LI Baofa, et al. Parameter optimization and experiment on archimedes spiral type of gap cutting disc[J/OL]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 119-124. (in Chinese)
- 111 Maschio Diretta[EB/OL]. <http://www.fao.org/ag/ca/6c.html>.
- 112 Great Plains 3P1006NT[EB/OL]. <https://www.greatplainsint.com/en-gb/products/770/3p1006nt>.
- 113 John Deere 1590 NI-Till Drill[EB/OL]. <https://www.deere.com/en/seeding-equipment/1590-no-till-drill/>.
- 114 Amazone Cirrus trailed sowing combination[EB/OL]. <http://www.amazone.net/3420.asp>.
- 115 吉林康达 2BMZF-6 免耕指夹精量施肥播种机[EB/OL]. <http://www.bchuayuan.com/cn/product/JL-KD-2BMZF-6-Tillage-Planter.html>.
- 116 SHARMA V K. Design, development and performance evaluation of a multi-toolbar no-till seed drill for surface managed loose straw conditions after combining[D]. Pantnagar:G B Pant University of Agriculture and Technology, 2014.
- 117 SIDHU H S, MANPREET-SINGH, HUMPHREYS E, et al. The happy seeder enables direct drilling of wheat into rice stubble [J]. Animal Production Science, 2007, 47(7): 844-854.

- 118 陈海涛,查韶辉,顿国强,等. 2BMFJ 系列免耕精量播种机清秸装置优化与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(7): 96 - 102. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160714&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.014.
CHEN Haitao, ZHA Shaohui, DUN Guoqiang, et al. Optimization and experiment of cleaning device of 2BMFJ type no-till precision planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 96 - 102. (in Chinese)
- 119 高娜娜,张东兴,杨丽,等. 玉米免耕播种机滚筒式防堵机构的设计与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(12): 31 - 37.
GAO Nana, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Design and experiment of drum-type anti-blocking mechanism of no-till planter for maize[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(12): 31 - 37. (in Chinese)
- 120 赵佳乐,贾洪雷,郭明卓,等. 免耕播种机有支撑滚切式防堵装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2014,30(10): 18 - 28.
ZHAO Jiale, JIA Honglei, GUO Mingzhuo, et al. Design and experiment of supported roll-cutting anti-blocking mechanism with for no-till planter[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(10): 18 - 28. (in Chinese)
- 121 李建群. 玉米秸秆顺行铺放小麦免耕播种联合作业机研究[D]. 北京: 中国农业大学,2017.
LI Jianqun. Study on corn stubble row-following placement and wheat no-till seeding combined machine[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- 122 豪丰 2BXS-16 免耕施肥播种机[EB/OL]. http://www.hnhfjt.com/pro_content.php?classid=4109&infoid=384.
- 123 山西河东雄风 2BFM 免耕施肥播种机[EB/OL]. http://hedongxiong.feng.cn/ProductsShow.asp?d_id=159.
- 124 大华宝来免耕施肥播种机[EB/OL]. http://www.dhbl.net/products_detail/productId=48.html.
- 125 Kamboj Happy Seeder[EB/OL]. <http://kambojrd.com/happyseeder.html>.
- 126 2BDPM-12 型动力驱动圆盘式小麦玉米两用免耕播种机[EB/OL]. http://www.mainongji.com/nongji/zhongzhi/bozhong/mainongji_18345.html.
- 127 鑫乐兴隆免耕施肥播种机 2BMQF-6/12 系列[EB/OL]. <http://www.lyxinle.com/news/61.html>.
- 128 Happy-seeder[EB/OL]. https://www.researchgate.net/figure/229428984_fig7_Fig-28-Happy-seeder.
- 129 NELSON W S, SHINNERS K J. Performance of rake mechanisms for cheating residue free seed bands[J]. American Society of Agricultural Engineers, 1988, 32(4): 1131 - 1137.
- 130 赵武云,张锋伟,吴劲锋,等. 免耕播种机弹齿式防堵装置[J]. 农业机械学报,2007,38(3): 188 - 190.
ZHAO Wuyun, ZHANG Fengwei, WU Jinfeng, et al. Briefreport on research works of eight papers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(3): 188 - 190. (in Chinese)
- 131 TORBERT H A, INGRAM J T, PRIOR S A. Planter aid for heavy residue conservation tillage systems[J]. Agronomy Journal, 2007, 99(2): 478 - 480.
- 132 贾洪雷,赵佳乐,姜鑫铭,等. 行间免耕播种机防堵装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(18): 16 - 25.
JIA Honglei, ZHAO Jiale, JIANG Xinming, et al. Design and experiment of anti-blocking mechanism for inter-row no-tillage seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(18): 16 - 25. (in Chinese)
- 133 LI Y, RUI Z, LIU Q, et al. Row cleaner and depth control unit improving sowing performance of maize no-till precision planter [J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(17):18 - 23.
- 134 Dale Drills Eco XL[EB/OL]. <http://johnshearer.com.au/product/2-bin-4-6-row-direct-drills/>.
- 135 SOLA SD-1504[EB/OL]. <http://solagruppo.com/en/pr/pneumatic-seed-drills/sd-1504-SD.1504-6>.
- 136 John Deere 2 Bin Direct Drills[EB/OL]. <https://www.deere.com/en/seeding-equipment/1590-no-till-drill/>.
- 137 Drill Catalog[EB/OL]. https://www.greatplainsmfg.cn/sites/default/files/DrillCatalog_CN.pdf.
- 138 德农 2B-9 小麦播种机[EB/OL]. <https://www.nongjitong.com/product/40917.html>.
- 139 农哈哈 2BYSF-3 勾轮玉米播种机[EB/OL]. <http://www.nonghaha.com/bozhong/content/?1.html>.
- 140 DEBONT(德邦大为)2605 气吸式免耕精密播种机[EB/OL]. https://www.nongjitong.com/product/debont_2bm-6_planter.html.
- 141 EVANSS D, LINDSTROM M J, VOORHEES W B, et al. Effect of subsoiling and subsequent tillage on soil bulk density, soil moisture, and corn yield [J]. Soil and Tillage Research, 2014, 137(1/2): 43 - 49.
- 142 LI B, CHEN Y, CHEN J. Modeling of soil-claw interaction using the discrete element method (DEM)[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 158(1): 177 - 185.
- 143 郑侃,何进,李洪文,等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(9): 62 - 72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160910&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.010.
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Research on polyline soil breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 62 - 72. (in Chinese)