doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.10.001

# 东北黑土地玉米免少耕播种技术与机具研究进展

王庆杰[1,2]　曹鑫鹏[1,2]　王　超[1,2]　李洪文[1,2]　何　进[1,2]　卢彩云[1,2]
(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083)

**摘要**: 以秸秆覆盖还田和玉米免少耕播种为主要技术特征的保护性耕作技术是东北黑土地保护与利用的主要技术手段。本文综述了东北黑土区目前主要的玉米免少耕播种技术模式与配套机具,重点对比分析了秸秆覆盖还田条件下种床整备机具工作原理及其技术特点。在阐述现有玉米免少耕播种技术模式及配套装备存在主要问题的基础上,建议重点围绕种床整备、高速精量排种、智能电驱排种、播深智能控制、垄作免少耕播种、农机农艺融合等方面展开深入研究,以期为东北黑土地玉米免少耕播种技术与机具研究提供装备技术支撑。

**关键词**: 黑土地; 保护性耕作; 免少耕播种; 种床整备; 玉米
**中图分类号**: S223.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)10-0001-15　　**OSID**:

# Research Progress of No/Minimum Tillage Corn Seeding Technology and Machine in Northeast Black Land of China

WANG Qingjie[1,2]　CAO Xinpeng[1,2]　WANG Chao[1,2]　LI Hongwen[1,2]　HE Jin[1,2]　LU Caiyun[1,2]
(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Beijing Key Laboratory of Design and Optimization in Modern Agricultural Equipment*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

**Abstract**: The protection and utilization of black land in Northeast China had great significance to ensure national food and ecological security. Conservation tillage technology with straw mulching and no/minimum tillage corn seeding as the main technical features was the main technical means for the protection and utilization of black soil in Northeast China. The current no/minimum tillage technology model and supporting equipment of corn seeding in the northeast black soil regions of China were summarized, the seedbed treatment machine used before and during no/minimum tillage seeding of corn were listed, comparative analysis of the working principle and technical characteristics of the seedbed treatment machine under the condition of straw mulching was focused, and the techniques of stubble breaking and furrowing, precise sowing, covering and suppressing of seed in no/minimum tillage seeding of corn were briefly introduced. Based on the overview of main problems existing in the no/minimum tillage corn seeding technical modes and supporting equipment, it was expounded that intensive study should focus on the seedbed treatment, high-speed precision seed metering, intelligent electric drive seed metering, intelligent control of seeding depth, no/minimum tillage ridge seeding and integration of agricultural machinery and agronomy, and it was expected to provide equipment and technical support for the research of no/minimum tillage corn seeding technology and machine in black soil regions of Northeast China.

**Key words**: black land; conservation tillage; no/minimum tillage; seedbed treatment; corn

## 0　引言

东北黑土地是我国重要的商品粮基地,实施黑土地保护与利用是实施“藏粮于地、藏粮于技”的国家战略需求,对于保障国家粮食和生态安全具有十分重要的意义[1-2]。长期以来,由于黑土地的持续

收稿日期: 2021-08-13　修回日期: 2021-08-30
**基金项目**: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200600)
**作者简介**: 王庆杰(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作技术与装备研究,E-mail: wangqingjie@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技术与装备研究,E-mail: lhwen@cau.edu.cn

高强度利用,导致黑土层厚度变薄,土壤退化严重,阻碍了东北地区农业的可持续生产,威胁国家粮食生产安全[3-5]。2020 年农业农村部与财政部联合印发《东北黑土地保护性耕作行动计划(2020—2025 年)》将东北黑土地保护与利用列为国家级行动[6]。

东北黑土地保护性耕作是一种以农作物秸秆覆盖还田、玉米或大豆免少耕播种为主要内容的现代耕作技术,是实现黑土地保护与利用的重要技术手段[7-8],在东北四省区得到大面积推广与应用。东北四省区属于高纬度寒区,春季播种时地温低,传统种植方式以垄作种植为主,而秸秆覆盖还田条件下的玉米免少耕播种技术,秸秆覆盖地表易产生低温冷害[9-11],同时播前地表秸秆覆盖量大、根茬粗壮,秸秆处理困难,影响玉米免少耕播种机作业质量[12-14]。因此,如何在秸秆覆盖的未耕地进行高质量种床整备是提升玉米免少耕播种机作业质量的关键。目前科研工作者针对东北黑土地玉米免少耕播种技术的研究,主要集中于玉米秸秆还田条件下的播前种床整备以及免少耕播种同步种床整备技术与机具等两方面[15-16]。其中,播前种床整备主要是指在免少耕播种机进地作业前对覆盖秸秆及残留根茬的播种带进行处理,以期提高后续免少耕播种机的作业质量;播种同步种床整备主要是指在免少耕播种机单体安装配套的种床整备装置,在种床整备同时完成开沟、施肥、播种、覆土、镇压等多道联合作业工序。

本文在综述东北黑土地玉米免少耕播种关键技术及机具研究进展的基础上,重点分析现有玉米免少耕播种技术模式、秸秆覆盖条件下的种床整备技术及装备,讨论和展望玉米免少耕播种技术与机具的研究重点及发展趋势,以期为东北黑土地玉米免少耕播种技术与机具研究提供支撑。

## 1 黑土地玉米免少耕播种概况

### 1.1 应用面积

东北四省区的黑土地是我国最重要的粮食主产区,以占全国 14% 的耕地面积生产了占全国 25% 的粮食总产量,提供了占全国 33% 的调出商品粮,是保障我国粮食安全的“稳压器”和“压舱石”[17-18]。玉米免少耕播种可以在秸秆覆盖的未耕地直接完成播种施肥作业,能够培肥地力、节本增效。从“十一五”开始,科研工作者在东北四省区就围绕玉米免少耕播种技术与配套装备展开研究。根据不同区域、作物特点,集成创新多套玉米免少耕播种技术模式,成功研发系列配套的玉米免少耕播种装备,建立多个监测点和示范区,玉米免少耕播种技术得到大面积推广应用。根据全国农业机械化统计年报统计[19]显示,近 10 年来东北四省(区)机械化免耕播种技术平均推广应用面积超过 $2.47\times10^6$ hm$^2$,且持续增长。2020 年东北四省区 $1.6\times10^4$ 个农机服务组织,共投入 $4.1\times10^4$ 台免少耕播种机,开展免少耕播种作业 $3.07\times10^6$ hm$^2$。其中吉林省免少耕播种面积最大,为 $1.23\times10^6$ hm$^2$,占吉林省黑土地保护面积的 29.9%;其次是黑龙江省($8.24\times10^5$ hm$^2$),占黑龙江省黑土地保护面积的 8.4%;辽宁省与内蒙古自治区免少耕播种面积都约为 $5.06\times10^5$ hm$^2$,分别占本省(区)黑土地保护面积的 39.9% 与 36.1%。根据《东北黑土地保护性耕作行动计划(2020—2025 年)》,2025 年实施面积将达到 $9.33\times10^6$ hm$^2$,黑土地将得到有效保护和利用[6]。

### 1.2 技术模式

目前在东北黑土地结合不同区域、土壤特性、气候特点、种植习惯等集成了多种玉米免少耕技术模式,如表 1 所示。其中黑龙江大部及吉林北部低温冷凉区在春季播种时积温少、地温低、降水多,以秸秆覆盖还田玉米垄作免少耕播种模式为主;内蒙古农牧交错风沙干旱区为蓄水保墒、抑制风沙,以秸秆覆盖及高留茬还田免少耕播种模式为主;辽宁省大部及吉林中南部春季播种时水热条件充足,以秸秆覆盖还田玉米平作免少耕播种模式为主。

### 1.3 实施效应

秸秆覆盖还田条件下的玉米免少耕播种具有减少土壤侵蚀、改良土壤结构、提高土壤肥力、蓄水保墒、节本增效等优势。多年的试验表明,玉米免少耕播种仅对播种带进行秸秆处理或者少量耕作,与传统翻耕、旋耕起垄的作业方式相比,减少地表土壤扰动 50% 以上,能够明显改善耕层土壤结构与肥力[25],增强土壤蓄水保墒能力[26-27],减少黑土层风蚀、水蚀[28-30],对于雨养农业为主、干旱频发的东北黑土地至关重要[31-33],同时有助于解决秸秆焚烧带来的环境污染与资源浪费等问题。此外,采用机械化免少耕播种技术,可减少作业工序 2 ~ 3 次,降低机具燃油消耗和作业成本,可提高玉米产量 5% 以上[34-37],高质量的玉米免少耕播种技术有利于农业绿色可持续发展,是黑土地保护与利用的主要技术手段。

## 2 黑土地玉米免少耕播种关键技术与机具

玉米免少耕播种的核心技术是秸秆覆盖还田条件下的高质量种床整备,可分为播前种床整备技术与机具、带有种床整备功能的免少耕播种技术与机

**表 1　玉米免少耕播种典型技术模式**

**Tab. 1　Typical technical pattern of no/minimum tillage seeding of corn**

| 名称 | 技术模式 | 特点 |
|---|---|---|
| 秸秆覆盖还田免耕[20] | 前茬玉米收获后秸秆粉碎留茬全量/部分覆盖地表，秋季或者是来年春季通过秸秆归行机、灭茬机等对种床进行整备，对地表秸秆进行预处理，降低免耕播种机作业难度，春季采用清秸、破茬能力较强的免耕播种机进行免耕播种作业 | (1)蓄水保墒效果较好，但不利于春季地温回升，推迟播种时间，对免耕播种机性能要求较高<br>(2)种植模式：等行距、宽窄行、比空 |
| 秸秆覆盖还田少耕[21] | 前茬玉米收获后秸秆粉碎留茬全量/部分覆盖地表，秋季或者是来年春季通过条带耕作机、圆盘耙等对种床进行整备，春季通过免少耕播种机进行播种 | (1)有利于春季地温快速回升及低洼地种床散墒，播种质量较高，但仍需对种床进行耕作，增加土壤扰动<br>(2)种植模式：等行距、宽窄行 |
| 秸秆覆盖还田垄作免少耕[22-23] | 前茬玉米收获后秸秆粉碎留茬全量/部分均匀覆盖地表，秸秆大部分覆盖在垄沟，秋季或来年春季对垄台上秸秆、根茬进行浅灭茬或不进行处理，春季通过免耕播种机在垄台上或垄侧进行播种作业，苗期进行中耕培土修垄 | (1)适用于春季地温回升缓慢地区，垄上保温，垄下保墒，但需对原垄台进行修复，且配套原垄免少耕播种机<br>(2)种植模式：等行距、宽窄行 |
| 留茬覆盖还田免少耕[24] | 前茬玉米收获时留高根茬，留茬高度大于等于 30 cm，上部秸秆直接全量还田覆盖行间过冬，春季通过秸秆归行机、条带耕作等对种床进行整备后或直接通过免少耕播种机进行播种 | (1)适用于农牧交错的风沙干旱区，降低地表风速，但较长根茬影响免少耕播种作业质量<br>(2)种植模式：等行距、宽窄行 |

注：等行距种植(行距 55 ~ 65 cm)，来年错茬种植；宽窄行种植(窄行距 40 ~ 50 cm，宽行距 80 ~ 90 cm)，宽行、窄行来年交替种植、休闲；比空种植(二比空：种植两行空一行，通过归行机将秸秆收集到空苗带，常见的还有三比空、五比空等)。

具。东北黑土地全量秸秆覆盖还田下，地形复杂、秸秆量大、根茬粗壮，种床整备难度大，其作业性能直接关系到玉米免少耕播种质量，因此，重点围绕东北黑土地玉米免少耕播种的种床整备技术与机具展开综述，旨在为高质量玉米免少耕播种提供参考。

## 2.1　播前种床整备技术与机具

保护性耕作条件下的播前种床整备是指免少耕播种作业前，对种带秸秆、根茬等进行处理或对土壤尽可能少的耕作，与传统全面翻耕、旋耕作业相比，土壤扰动少、作业效率高、动力消耗低，有利于土壤的蓄水保墒和种带地温提升，能够显著提升后续播种质量。播前种床整备技术主要分为免耕种床整备与少耕种床整备。免耕种床整备主要包括秸秆归行等；少耕种床整备主要包括条带灭茬、条带耕作机、圆盘耙等。播前种床整备典型机具如表 2 所示。

秸秆归行主要依靠秸秆归行机完成，其通过搂草指盘来清理地表秸秆，作业过程中搂草指盘在地表及秸秆摩擦力的作用下被动旋转，将秸秆清理到非播种带，降低全量秸秆覆盖还田条件下的种床秸秆覆盖率。根据工作部件的安装位置可分为前置式与后置式两种[46]，前置式秸秆归行机一般与播前种床整备或免少耕播种作业机具配套作业，结构简单，功率消耗小，清秸效果显著。

条带灭茬的主要工作部件为灭茬装置，作业时灭茬装置在拖拉机动力输出轴的驱动作用下高速旋转。在土壤的支撑作用下将地表秸秆、根茬等切断、粉碎，同时耕作表层土壤，并将碎秆和表层土壤混埋。作业后可明显降低种床秸秆覆盖率，减少后续免少耕播种机开沟阻力，提高播种质量。

条带耕作又称“带状耕作”是指仅对播种种床进行耕作，耕作宽度不超过播种行距的 1/3[47]。条带耕作中主要使用的作业机具为条带耕作机，按照工作原理可以分为主动式与被动式两类[48]。主动式条带耕作机主要是在传统旋耕整地机的基础上，根据玉米播种行距等农艺要求，优化刀座排布，减少旋耕整地宽度，降低土壤扰动。被动式条带耕作机主要包括切茬圆盘、秸秆清理机构、深松铲、覆土镇压等装置，一次作业可完成种床秸秆清理及种带土壤耕整。

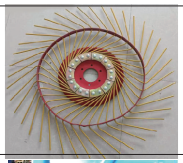
轻型圆盘耙作为非驱动式播前种床整备机具，能够较好实现秸秆全量覆盖条件下的高效种床整备。作业时，耙片与机具前进方向有一定的偏角，在拖拉机牵引下圆盘耙片滚切入土，通过刃口将地表秸秆、根茬及表土切碎的同时利用耙片凹面将切碎的秸秆与土壤在表层土壤混埋。作业后表土松碎，地表平整，同时能够实现对杂草、秸秆、土壤碎混，降低地表秸秆覆盖率。圆盘耙通常与弹齿耙、钉齿耙及碎土镇压辊等部件组合成联合整地机。

播前种床整备质量是保证免少耕播种作业顺利开展，提高播种作业质量的关键。东北黑土地玉米根茬粗壮，难以粉碎切断，条带耕作及条带灭茬机具具有土壤扰动量小，秸秆根茬处理效果及种床整备质量好的特点，目前在东北黑土地免少耕播种作业前应用及研究较为广泛。

条带耕作机研究主要以提高秸秆覆盖条件下的种床清理效果、破茬性能为主。为提高条带耕作机

表 2 播前种床整备典型机具

Tab. 2 Typical machines of seedbed treatment before sowing

| 型号 | 关键部件 | 总体结构 | 主要特点 |
|---|---|---|---|
| 9LJZQ - 2.00 型前置秸秆集条搂草机[38] |  |  | 采用被动式搂草指盘前置安装方式,适用于秸秆全量覆盖还田地块,可根据配套的机具更改搂草指盘安装位置及偏角,搂草指盘个数 4,直径 1 m,作业幅宽 2 m,播种带清理个数 4,作业速度 4 ~ 10 km/h |
| OEKOSEM 系列驱动式条带耕作机[39] |  |  | 采用浅松铲与旋耕刀配合完成种床条带耕作,可实现种床的旋耕与浅松,后部安装有碎土镇压辊,可与播种机、施肥机配套作业。条带耕作宽度 200 ~ 350 mm,条带耕作深度 7 ~ 15 cm |
| 浅压覆盖驱动式条带耕作机[40] |  |  | 采用旋耕刀将种床秸秆与土壤混埋,两侧限深镇压辊对清理到种床两侧秸秆进行镇压,后部液压驱动式镇压辊对条带旋耕后的种床进行镇压,可与秸秆集行搂草指盘、深松铲等配套联合作业。旋耕深度 50 ~ 100 mm,条带旋耕宽度 600 mm |
| 1GH - 4 型被动式条带耕作机[41] |  |  | 采用圆盘犁刀进行切土、碎土,各耕作部件独立仿形,通过拖拉机牵引完成播前种床整备工作,动力消耗小,作业效率高。条带耕作宽度 180 ~ 240 mm,适应行距 450 ~ 700 mm,入土深度 60 ~ 100 mm,作业速度 6 ~ 12 km/h |
| RM 系列灭茬机[42] |  |  | 采用 Y 形刀式与锤爪式灭茬刀组合进行玉米灭茬作业,可通过调节灭茬刀位置实现条带灭茬。作业速度 3 ~ 6 km/h,灭茬深度 30 ~ 120 mm,刀轴外径 620 mm,刀轴转速 1 714 r/min,皮带驱动,通过限深轮实现灭茬深度控制 |
| 1GH 系列垄上灭茬机[43] |  |  | 采用 L 形灭茬刀,单轴灭茬,可实现垄作区垄上灭茬,灭茬刀辊后安装有挡土板,保证灭茬后垄型。作业垄距可调,作业垄数 2、4、5 垄,灭茬刀轴转速 430 r/min,灭茬深度 30 ~ 120 mm |
| UFO 系列圆盘耙[44] |  |  | 采用缺口圆盘耙,圆盘耙与前进方向偏角为 20°与竖直方向偏角为 10°,各耙片独立仿形,前后两排耙片交错排列,具有良好的混茬和切土性能,圆盘耙片直径 610 mm,厚度 8 mm,作业速度 11 ~ 15 km/h,耙片入土深度 60 ~ 120 mm |
| 原茬地侧向清秸覆秸作业机[45] |  |  | 通过液压驱动侧向清秸刀和侧向清茬刀旋转,完成垄台上秸秆的侧向位移及根茬的粉碎输送,可实现垄台秸秆及根茬的清理。可采用前置或后置安装方式,整机质量 1 200 kg,作业幅宽 4 400 mm,清茬刀辊转速 500 r/min,作业时清茬刀最大入土深度 70 mm |

种床清理效果,降低作业后中种床秸秆覆盖量,王雪松[49]设计一种清秸深松组合式条带耕作机,通过离散元方式对比不同结构圆盘刀与拨指轮作业效果,确定条带耕作机秸秆清理拨指轮结构参数;文献[50]设计一种秸秆归行浅压覆盖条带耕作机,通过在条带耕作机前方安装秸秆归行机,条带旋耕前降低种床秸秆覆盖量;王奇[51]设计一种条带耕作机幅宽自动控制星齿凹盘式条带清秸装置,通过压力传感器监测压力,通过电动推杆调节星齿凹面盘入土深度,提高条带耕作机清茬性能。为提高被动式条带耕作机破茬性能,梁宁[52]为提高传统缺口圆盘刀破茬能力,对缺口圆盘犁刀结构参数、作业参数进行重新设计与优化;庄健等[53]通过拟合和连接标准缺口圆盘开沟器和滑刀式开沟器刃口曲线,设计一种具有滑刀式缺口的滚动圆盘刀;林静等[54]以阿基米德螺线理论为基础,确定了刃口曲线为阿基米德螺线的螺线型缺口圆盘破茬刀的尺寸,设计了一种阿基米德螺线型缺口圆盘刀。为降低条带耕作机作业阻力,朱瑞祥等[55]设计一种偏角和倾角可调的圆盘犁刀试验台,明确圆盘犁刀对破茬率和工作阻力的影响因素,确定滚动圆盘犁刀最优作业参数;陆泽城[56]通过搭建圆盘犁刀切割玉米根茬特性测试装置,确定圆盘犁刀各因素对破茬率影响的主次顺序及最优组合。

条带灭茬机研究主要以灭茬刀结构、参数优化和降低作业功耗为主。在灭茬刀结构、参数优化设

计方面，利用 Abaqus 软件中建立的土壤 Drucker－Prager 本构模型对灭茬刀切割土壤过程进行运动学仿真，对 L 形灭茬刀进行滑切刃与折弯角参数优化[57]；利用 Pro/E 和 ANSYS 软件的双参数通道对灭茬刀进行多目标驱动优化，设计一种阿基米德螺线型灭茬刀[58－59]；通过研究玉米根茬“上部密集，底部疏松”的分布特点，建立非等长刀切碎模型，设计一种长短刀组合的灭茬刀；通过建立灭茬机组前进速度、刀轴转速和工作宽度与作业功率之间关系的优化数学模型，优化灭茬刀运动参数[60]；通过对比分析直刀、旋耕刀、月牙刀作业时的破茬性能，设计一种月牙形灭茬刀，并确定其最佳作业参数[61]。在灭茬刀减阻、降低能耗研究方面，通过改进优化反旋灭茬刀结构，设计一种反旋节能型灭茬刀[62]；仿生减阻是有效的减阻方式之一，通过对蝼蛄开掘爪趾上的切割部位几何轮廓进行数据拟合，设计一种 L 形仿生灭茬刀[63]；依据提取的蟋蟀上颚切齿叶轮廓，利用 Matlab 软件进行曲线拟合，设计一种仿蟋蟀切齿叶减阻灭茬刀[64]；基于对螳螂前足的形貌研究，设计一系列仿生齿形切茬刀片并对不同切茬刀片作业性能进行对比[65]。通过分析鼹鼠前足趾触土面几何结构，获取爪趾三维数据点云进行特性曲线量化分析，设计一种旋耕－灭茬仿生通用刀片[66－67]。

随着农业生产向产业化、集约化、规模化方向发展，黑土地玉米免少耕播前种床整备机具向着联合、大型、高效作业方向发展，联合作业机具一次作业完成灭茬、深松、条带旋耕、施肥、等工序作业。通过对灭茬刀、开沟器的设计与整合，设计一种秸秆深埋还田开沟灭茬机，保证灭茬效果的同时实现深开沟、碎土工作[68]；为评价黑土地玉米联合耕整地技术及作业机组综合效益，运用 Topsis 方法评价各作业环节及机组综合效益，实现对玉米留茬地耕整地机具选型的综合效益评价[69]；采用离散元的方法研究深松—旋耕作业次序对作业质量及功耗的影响[70]；通过对圆盘耙、深松铲、浅松铲、镇压辊的组合，提高联合作业播前种床整备机具作业效率，减少机具进地作业次数的同时减轻土壤压实，提高蓄水保墒能力[71－72]；除此之外开展灭茬—旋耕[73－74]、灭茬—深松[75]、深松—灭茬—旋耕[76]、松—耙[77]、耙—松—耙[78]联合播前种床整备机具的研究。

## 2.2　免少耕播种技术与机具

玉米免少耕播种技术是指在秸秆覆盖还田条件下进地一次完成种床整备、开沟、施肥、播种、覆土、镇压等多道作业工序[7]。其中种床整备是玉米免少耕播种的关键技术，按照动力源可分为主动式种床整备和被动式种床整备两种类型[79]，播种同步种床整备与播前种床整备技术相比，能够减少机具进地次数，降低土壤压实，节省作业油耗，提高作业效率。

### 2.2.1　主动式种床整备技术与装置

主动式种床整备装置通常安装于免少耕播种单体前方，一般依靠拖拉机后输出轴、电机或液压马达等形式提供动力，通过动力传输系统驱动种床整备装置将播种带上秸秆的切断、切碎，并清理到种床两侧，从而形成较为清洁的种床[80－81]。目前东北黑土地免少耕播种机主动式种床整备技术从原理上主要分为“旋混”、“砍推”、“侧抛”、“碎抛”、“拨甩”等几种主要形式。

“旋混”种床整备的工作原理是利用安装在播种单体前方的旋耕刀或灭茬刀对播种带进行条带浅旋，将播种带上的秸秆与根茬切断、切碎，与种床土壤混埋，以此创造清洁疏松的种床[82]。旋混式种床整备能够实现种床秸秆、根茬清理的同时疏松种床土壤，通过将秸秆与土壤混埋，减少地表秸秆覆盖量，加速秸秆腐烂。

“砍推”种床整备的工作原理是驱动具有一定偏角的梯形刀、直刀等对播种带上的秸秆及根茬进行砍切[83]，并利用刀具的侧推作用将砍切后的秸秆及根茬向种床两侧推送。砍推式种床整备能够疏松种床土壤，将播种带秸秆根茬粉碎后侧推至播种带两侧降低种床秸秆覆盖量，减少秸秆与土壤的混埋，提高播种质量。

“侧抛”种床整备的工作原理是通过驱动破茬刀、螺旋刀齿或直刀、灭茬刀等循环打击秸秆及根茬，将播种带上秸秆及根茬侧向抛洒输送至播种带间[84]。侧抛式种床整备刀齿仅作用于地表表层秸秆及根茬，对种床土壤扰动较小，有利于降低种床整备作业功耗。

“碎抛”种床整备的工作原理是秸秆粉碎刀具在动力驱动下高速旋转，将地表秸秆及根茬切断粉碎的同时将后抛，防止秸秆对开沟器的缠绕造成壅堵[85－86]。碎抛式种床整备机具作业过程中秸秆粉碎刀通常不入土，转速较高，对秸秆的后抛作用较强，一般在粉碎刀后方安装导草板，实现秸秆分流。

“拨甩”种床整备的工作原理是通过驱动压紧地表的弹齿、立刀等拨草装置旋转，将播种带上覆盖的秸秆拨甩到玉米行间[87]。拨甩式种床整备在全量秸秆覆盖条件下作业效果稳定，对地表秸秆的清理效果显著，但对播种带根茬的清理效果不显著，通常与圆盘式破茬开沟器配套作业，实现免耕播种。

目前针对东北黑土地主动式种床整备技术与装

置的研究主要以减少秸秆全量还田条件下免少耕播种带秸秆覆盖量为目标。李向军等[73]设计一种原茬地垄上组合式灭茬、苗带旋耕旋混式种床整备机具,灭茬刀首先对垄台上秸秆进行灭茬,旋耕刀随后将粉碎后秸秆根茬与播种带土壤进行混埋,粉碎秸秆根茬,降低秸秆覆盖量的同时疏松种床土壤;史岩鹏等[88]针对免少耕播种过程中种床草土混杂及干湿土混杂等问题,设计一种梯形刀盘与开沟器组合砍推式种床整备装置,梯形刀盘旋转过程中将秸秆与根茬切断并推向开沟器两侧,同时将表层干土向两侧抛出,实现种床草土分离与干湿土的分离;陈海涛等[89-90]设计一种 2BMFJ 系列玉米免耕播种机侧抛式种床整备装置,依靠高速旋转的刀齿将播种带上的秸秆清理的同时对根茬进行切削、侧抛于机具的一侧,防止秸秆与根茬残存播种带与播种带土壤混埋,同时可通过调节抛撒部件转速和抛撒调控装置角度实现对玉米根茬抛送距离的控制;黄玉祥等[91]提出驱动缺口圆盘碎茬和导草板被动导草联合作业的种床整备技术思路,设计了一种切茬导草组合式草土分离碎抛式种床整备装置,实现了根茬切割后抛和引导分流;曹鑫鹏等[92]通过参考摊晒机作业原理,设计一种主动旋转集行拨甩式种床整备装置,作业过程中清秸弹齿主动旋转、循环接地,将播种带上秸秆侧抛至播种机两侧,作业过程中清秸弹齿齿尖不入土,实现播种带秸秆清理的同时显著降低土壤扰动及作业功耗。东北黑土地部分典型玉米免少耕播种主动式种床整备相关机具如表 3 所示。

**表 3 主动式种床整备机具**

**Tab. 3 Typical machines of active seedbed treatment**

| 型号 | 类型 | 总体结构 | 主要特点 |
|---|---|---|---|
| 2BFGY-4 型少耕施肥播种机[93] | 旋混式 |  | 采用条带旋耕种床整备装置,施肥开沟器前方安装有旋耕刀,通过旋耕刀与施肥开沟器的配合将秸秆、根茬粉碎混埋,疏松播种带土壤。作业行数 4 行,作业行距 500~650 mm,播种深度 30~50 mm,配套动力大于等于 51.5 kW,耕作深度 120~160 mm,作业效率 0.5~1 $hm^2$/h |
| 2BMG-4 型少耕播种机[94] | 砍推式 |  | 采用切刀/甩刀协同支撑切割及秸秆移位技术,通过旋耕刀与甩刀的配合对秸秆进行粉碎侧抛混埋,旋耕刀辊转速 3 挡可调,适应不同前进速度下动力输出轴转速。作业行数 4 行,作业行距 400~800 mm,工作幅宽 2 200 mm,配套动力 58.8~73.5 kW |
| 2BMQF 系列免耕施肥播种机[95] | 砍推式 |  | 采用圆盘锯齿刀式种床整备装置,通过高速旋转的锯齿刀将秸秆及根茬进行砍断,同时向播种带两侧进行抛送,在完成秸秆根茬粉碎抛洒的同时将秸秆、根茬清理到非播种带,减少秸秆与播种带土壤的混埋。作业行数 2~5 行,作业行距 600~650 mm,作业速度 2~5 km/h,刀轴转速 280~320 r/min,耕作深度 80~120 mm |
| 2BMQF-6 型免耕覆秸精量播种机[96] | 侧抛式 |  | 采用前置侧切刀对秸秆进行两侧双向抛撒,侧切刀高速旋转秸秆向一侧抛离播种带,多组侧切刀配合实现秸秆的侧向输送。清秸刀齿入土深度 20~30 mm,作业行数 6 行,作业行距 350~500 mm,作业速度 4~6 km/h |
| 2BYMCBZ 系列免耕施肥播种机[97] | 侧抛式 |  | 开沟器前方安装有侧向旋切的旋耕刀,中间行安装有侧抛式灭茬弯刀,将播种带秸秆及根茬侧向抛出播种带,同时为提高通过性在开沟器前方安装有导草辊式被动分秸装置。采用悬挂方式作业,作业行数 3~4 行,作业行距 350~650 mm,作业速度 3~6 km/h |
| 2BMYFC-4 型免耕精量播种机[98] | 碎抛式 |  | 采用秸秆粉碎条带灭茬种床整备装置,拖拉机动力输出轴驱动灭茬直刀高速旋转,将播种带上的秸秆及根茬粉碎后抛,有效解决开沟器缠绕壅堵问题。采用悬挂方式作业,作业行数 4 行,机具质量 600 kg,作业行距 50~70 mm,配套动力大于等于 51.5 kW,作业速度 5~7 km/h |
| 2BYFSF-4 型玉米免耕施肥精播机[99] | 碎抛式 |  | 采用通轴式秸秆粉碎防缠绕种床整备机构,通过拖拉机动力输出轴驱动梯形刀片与深施肥开沟器配合将地表秸秆及根茬粉碎后抛,防止秸秆根茬缠绕开沟器造成堵塞。作业行距 450~686 mm,作业行数 4 行,配套动力 29.4~58.8 kW |

**2.2.2** 被动式种床整备技术与装置

被动式种床整备装置通常利用地表或秸秆的摩擦力进行转动，将秸秆切开或直接清理到种床两侧，从而形成较为清洁的种床。被动式种床整备土壤扰动及机具振动小，动力消耗低，作业效率高，在秸秆部分还田条件下应用较多。按原理主要分为“切拨”、“切推”、“切翻”、“分秸”等几种形式。

“切拨”种床整备的工作原理是利用圆盘刀对秸秆根茬进行切断后通过拨草轮、清茬盘等将播种带上的秸秆根茬拨离到播种带两侧，形成一定宽度的清洁种带。切拨式种床整备可实现长秸秆的切断并拨离种床，同时利用圆盘刀对种床表层硬土进行切碎。

“切推”种床整备的工作原理是利用单个或多个缺口圆盘对播种带秸秆进行侧向推送，作业过程中缺口圆盘与前进方向具有一定的夹角，圆盘外缘一般加工有刃口，可将秸秆切断同时将秸秆和表层土壤推向一侧。切推式种床整备在完成秸秆清理的同时可将表层干土进行清理，但种带清理宽度较窄。

“切翻”种床整备的工作原理是通过具有凹面的圆盘、齿盘等将地表秸秆和表土切开切断的同时进行翻扣，实现播种带秸秆的清理及整备。切翻式种床整备完成种床秸秆清理的同时将干硬表土翻扣到秸秆上，防止清理到播种带两侧的秸秆又被风吹回播种带。

“分秸”种床整备的工作原理是在通过安装分草栅板、导草辊、侧滑板等装置，对播种带上的秸秆进行被动分秸导流，防止秸秆在开沟器前壅堵，提高机具的通过性。分秸式种床整备装置在秸秆粉碎还田条件下作业效果较好，但依靠秸秆流动防堵的形式作业稳定性较低，通常安装于少耕播种机开沟器前方，具有辅助防堵的功能。

被动式种床整备技术具有结构简单、易实现高速作业等优点，国内科研工作者围绕被动式种床整备技术及装置展开了系列研究。林静等[100]设计一种阿基米德螺线型破茬开沟切推式种床整备装置，锯齿圆盘刀滚动旋转切开玉米秸秆及根茬，左右两侧星型清茬刀将残茬及秸秆侧推至两侧垄沟，实现种床整备；曹鑫鹏等[101]设计一种侧置切刀与拨茬齿盘组合切翻式种床整备装置，拨茬凹面齿盘自侧置切刀切出土壤位置入土，将地表秸秆及干硬土壤抛送到被清理秸秆上，防止秸秆回垄；王庆杰等[102]设计一种凹形圆盘切翻式种床整备装置，利用对称安装于垄台两侧的凹面圆盘将平面圆盘切断后的秸秆残茬侧翻至垄沟，形成清洁的 W 形种床。为提高 2BMZF 型免耕播种机平面爪切拨式种床整备装置作业性能，贾洪雷等[103]改用凹面轮盘结构增大对秸秆的侧抛速度，并采用清茬盘交错排列的方式减少漏清区，设计一种凹面爪式种床整备装置；王奇等[104]通过分析秸秆颗粒在凹面盘上的运动规律改进清茬盘齿形及结构，采用 EDEM 离散元的方法确定星齿凹面清秸盘最优参数组合，并通过拉力传感器和电动推杆协同作业完成清秸作业幅宽的自动控制；刘正平等[105]将平面爪与分草栅条组合，提高平面爪切拨式种床整备装置的分草效果；李名伟等[106]在原有平面爪切拨式种床整备装置的基础上增加气压传动系统和压力传感器，实时监测调整不同秸秆覆盖或地表起伏时的切拨式种床整备装置下压力。东北黑土地部分典型玉米免少耕播种被动式种床整备相关机具如表 4 所示。

**2.2.3** 其他技术与装置

破茬开沟性能直接影响种沟、种床形状和施肥播种作业质量[110-111]。目前在东北黑土地应用较多的开沟装置主要是圆盘式和尖角锄铲式两种类型，其作业阻力及土壤扰动量小[112]。免耕播种作业时，在种床整备后的播种带通常通过圆盘式开沟器进行二次开沟，以保证开沟作业质量。目前玉米免少耕播种破茬开沟技术的研究主要以提高破茬开沟装置入土性能，减小种床土壤扰动量及作业阻力，保证开沟深度一致性为目标[113-114]。

玉米精量排种技术是玉米免少耕播种的重要保证，目前在东北黑土地应用的玉米精量排种器主要有指夹式和气力式两种类型，其中指夹式排种器应用最为广泛。免少耕播种地表不平整度及土壤紧实度较高，田间播种作业过程中排种器振动明显，影响排种器排种性能。因此目前主要围绕免耕播种振动条件下排种器排种性能开展研究，王奇等[115]以 ZBMZ-2 型指夹式玉米免耕精密播种机为研究对象，以田间试验采集振动信号振动主要频率和振动加速度为排种器振动参数，进行台架试验，分析振动载荷对排种器工作性能和玉米籽粒落种轨迹的影响规律；黄小珊等[116]对 2BM-2 型免耕播种机在秸秆覆盖条件下作业时排种器的振动特性进行测试，并对振动信号进行时域和频域分析，通过搭建排种振动试验台测试不同频率与振幅条件下排种器合格指数；刘月琴[117]为提高气吸式免耕播种机在免耕地排种性能，开展免耕播种对排种性能的影响，利用离散元的方式对排种器内种群的运动和受力情况进行分析，优化排种器工作参数。

覆土镇压是玉米免少耕播种的重要环节，保证种子上覆土量适宜和覆土厚度均匀，使玉米种子与种沟周围湿土紧密接触，能够起到提墒、保墒和供墒

表 4 被动式种床整备机具

Tab. 4 Typical diagram of inactive seedbed treatment

| 型号 | 类型 | 总体结构 | 主要特点 |
|---|---|---|---|
| 2BMZF－4 型免耕播种机[107] | 切拨式 |  | 开沟器前方安装有切拨式种床整备装置,利用侧深施肥切茬圆盘切断秸秆及根茬,拨草轮在地表及秸秆摩擦力下被动旋转、侧向抛茬,可通过调节拨草轮与播种单体相对高度调节拨草轮齿尖入土深度。采用牵引方式作业,作业行数 4 行,机具质量 2 000 kg,作业行距 400～650 mm,作业速度 6～8 km/h,配套动力 40～55 kW,作业效率 1.0～2.2 $hm^2$/h |
| 2BYFSF－4C 型免耕施肥播种机[108] | 分秸式 |  | 开沟器前方安装有滚筒式导草辊,可防止秸秆杂草缠绕开沟器造成堵塞。采用悬挂方式作业,结构轻便,作业灵活。作业行数 4 行,机具质量 410 kg,作业行距 500～650 mm,播种深度 30～50 mm,配套动力 22.1～55.8 kW,作业效率 0.4～0.6 $hm^2$/h |
| 2BMF－4 型免耕播种机[109] | 分秸式 |  | 通过分草板对开沟器前方的秸秆进行导流,清理播种带上被粉碎的秸秆根茬。采用悬挂/牵引方式作业,作业行数 4 行,机具质量 1 200 kg,作业行距 550～650 mm,作业速度 6～8 km/h,播种深度 30～80 mm,配套动力 29.4～40.4 kW,作业效率 1.7～2.6 $hm^2$/h |
| 2BMZF－5 型垄作免耕播种机 | 切翻式 |  | 通过平面圆盘将秸秆及根茬切断,利用对称安装于垄台两侧的凹面圆盘将平面圆盘切断后的秸秆残茬侧翻至垄沟,形成清洁的 W 形种床。采用悬挂式作业方式,作业行数 5 行,作业行距 560～700 mm,作业速度 4～7 km/h,播种深度 40～60 mm |

的作用[118－119]。覆土镇压作业性能直接影响玉米种子分布均匀性、出苗及生长[120],对播种质量具有重要影响。目前,东北黑土地玉米免少耕播种机普遍使用具有覆土镇压功能的 V 形双斜橡胶覆土镇压轮,虽然相关技术较为成熟,但覆土镇压一致性仍有提升空间。

## 3 讨论与展望

秸秆覆盖还田条件下的高质量玉米免少耕播种是黑土地保护性耕作大规模推广应用的重要保障,经过科研工作者多年攻关,东北黑土地的玉米免少耕播种技术与装备经过了创新、引进消化吸收再创新的发展历程,成功研发多种装备与技术模式,目前技术与装备水平已基本过关,基本能够满足当前农业发展需求,但部分关键技术与部件仍存在短板,原垄免少耕播种与高效智能化机具等仍有较大提升空间。建议未来玉米免少耕播种技术与装备可以围绕以下几个方面展开重点研究。

### 3.1 免少耕播种机核心技术

#### 3.1.1 种床整备技术

种床整备可分为主动式种床整备和被动式种床整备两种类型。主动式种床整备以带状少耕为主,属于玉米少耕播种。安装有主动式种床整备部件的玉米少耕播种单体能够在玉米秸秆全量覆盖条件下完成带状种床整备、开沟、施肥、播种、覆土镇压等联合工序。亦可根据需要,在秋季或春季先进行种床整备,然后使用精量播种机完成开沟、施肥、播种、覆土镇压等工序。装有主动式种床整备部件的玉米少耕播种单体所构造的种床松软、清洁,但种沟相对较深、动土量相对较大、种带内碎秆易与土壤混埋造成晾籽和散墒等问题。未来仍需开展高性能种床整备关键技术与部件研究,高效清理种带秸秆、减少土壤扰动,提高少耕播种机可靠性及作业效率。

被动式种床整备主要以圆盘切刀为主,属于玉米免耕播种,主要依靠机具自身重力,利用圆盘刀滚切作用,切开种带内的秸秆、根茬,然后利用拨草轮等将切开的秸秆、根茬等清理到种带两侧,但构造的种床较窄、较硬,部分碎秆覆盖种带地表,影响地温回升和玉米苗期生长;在全量秸秆覆盖条件下,存在秸秆切不透堵塞机具、施肥及播种开沟器入土深度浅,晾籽严重等问题。同时,受金属材料、加工工艺等影响,圆盘切刀质量和作业性能有待提高。因此,未来应重点研究高性能被动式种床整备技术,突破圆盘切刀材料与加工工艺限制,提升其耐磨、减阻、抗冲击和耐疲劳等性能,解决核心部件的“卡脖子”问题。

#### 3.1.2 高速精量排种技术

排种器是免少耕播种机的核心部件之一,其排种性能直接影响免少耕播种质量。目前东北黑土区应用的玉米免少耕播种机多采用指夹式排种器,能够实现单粒、中高速播种,性能基本满足当前作业要求。但同样由于受材料、加工工艺的影响,国产指夹

式排种器的可靠性、耐用性等有待提升，现有机具主要依赖进口，因此，机械式排种器应重点突破排种器核心零件的材料及加工工艺。

气力式排种器具有单粒率高、损伤小、可靠性好、高速作业及种子适应性强等优点，目前在国外应用广泛。随着我国农业规模化、集约化发展的加速，对高速、高效大中型免少耕播种机的需求也越来越旺盛，气力排种将成为主要排种方式，但目前由于我国对气力排种的基础理论研究不足，排种器设计还以模仿设计为主，缺乏创新，排种作业性能仍有待较大提升空间，未来应加强高速气力排种器相关基础理论研究，重点突破电控高速精量排种技术。

### 3.2　免少耕播种质量智能控制技术

#### 3.2.1　精准电控驱动排种排肥技术

玉米免少耕播种机在未耕且有大量秸秆覆盖和根茬残留的地表进行播种，现有主要依靠地轮驱动施肥、排种的方式，因为地轮打滑等问题，造成种肥漏播漏施、播种粒距一致性差等问题。电控驱动技术具有简化机具结构，适应能力强等优点，可满足变量播种、施肥需求，实现精量作业。因此，电控驱动排种、排肥技术已逐步成为目前玉米免少耕高速精量播种技术研究的重点。

#### 3.2.2　播种深度精准控制技术

播种深度与开沟深度、落种位置、覆土厚度、镇压力等参数密切相关，目前这些参数主要是通过机械的方式进行调节。受土壤类型、含水率、土壤紧实度、地表环境等作业环境复杂多变的限制，机械调节方式的适应性和可靠性都相对较差。根据智能化、精准化作业的需求，未来玉米免少耕播种机将从种床整备质量、开沟深度、排种精度、落种位置、覆土镇压等方面实现播种深度全过程精准智能控制。

### 3.3　高性能原垄免少耕播种技术

玉米原垄免少耕播种技术将保护性耕作和传统垄作相结合，具有提高种带地温，改善土壤结构，培肥地力，减少土壤侵蚀等优势，主要适合于东北高寒地区。但由于传统玉米垄台尺寸、播种机自身结构等原因，原垄免少耕播种存在播种单体易掉垄，无法在窄垄台上持续作业等难题，虽然经过多年科研攻关，但目前整体处于能用但不好用水平，因此，亟需围绕垄台修复、垄台清理、原垄免少耕播种等技术与配套机具展开深入研究，解决东北高寒地区保护性耕作技术推广应用的难题。

### 3.4　农机与农艺技术深度融合

#### 3.4.1　与玉米种植技术深度融合

经过多年科研攻关，集成创新了多种玉米免少耕种植方式，其中秸秆覆盖还田方式主要有全量覆盖、部分覆盖、留茬覆盖等，按种植方式主要有均匀行、宽窄行、二比空、四比空平作模式以及宽窄行、均匀行垄作模式等多种种植模式，能够满足不同用户的需求，但目前存在同一区域、相邻地块种植模式多样，机具无法满足不同种植需求的问题，因此，根据区域土壤类型、气候特点、种植规模，结合机具性能，优化保护性耕作装备整体配置方案，研究制定区域性主推技术模式和技术标准。

#### 3.4.2　与植保技术深度融合

秸秆覆盖还田条件下玉米免少耕播种与传统播种方式相比，在玉米整个生长期，玉米行间、株间的地表均覆盖有大量秸秆、残茬，形成秸秆、纤维与土壤耦合层，玉米生长环境发生较大改变，虽然目前科研工作者已经针对农药种类、施药时间及配套机具等展开了大量研究，也取得了一些重要成果，但新环境下如何有效精准控制杂草和病虫害及配套的精准施药装备将是需要深入研究，重点建立病虫草害预警技术及轻简化绿色综合防控体系。

#### 3.4.3　与水肥管理技术深度融合

长期采用秸秆覆盖还田、免少耕播种的土壤环境将得到明显改善，土壤肥力持续提高，各肥力元素比例也发生变化，土壤结构不断改善，蓄水保墒能力明显增强。因此，针对不同区域特性、土壤类型、种植模式等差异，结合秸秆覆盖条件下玉米免少耕播种技术特点，进一步加强保护性耕作条件下的水肥管理技术研究，重点突破合理耕层最佳还田量、还田方式和肥料配施机械化、智能化技术。

## 4　结束语

以秸秆覆盖还田、免少耕播种为主要特征的保护性耕作是实现黑土地保护与利用的主要技术手段，玉米免少耕播种、保苗质量直接决定了该项技术能否在黑土地得到大面积推广应用。近 20 年来，围绕东北地区保护性耕作技术与装备，特别是在玉米免少耕播种技术与机具研究方面，取得了多项研究成果，研发的相关装备基本能够为《东北黑土地保护性耕作行动计划（2020—2025）》实施提供技术支撑。但目前玉米免少耕播种机整体水平还不高，农机农艺融合不够，离高质量、高标准、高效率、智能化的生产目标还有较大差距。因此，应该尽快完善相关标准体系及操作规程，加强基础应用研究，开展高性能免耕播种机核心部件研发攻关，补上短板，强化智能化技术应用，为东北黑土地保护与利用提供更有效的装备技术保障。

## 参 考 文 献


[1] 辛景树, 汪景宽, 薛彦东. 东北黑土区耕地质量评价[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.

[2] 刘猛. 东北黑土区土地开垦历史过程研究[J]. 中国科技信息, 2010(2):77 - 78.

[3] 康日峰, 任意, 吴会军, 等. 26 年来东北黑土区土壤养分演变特征[J]. 中国农业科学, 2016,49(11):2113 - 2125.
KANG Rifeng, REN Yi, WU Huijun, et al. Changes in the ntrients and frtility of back soil over 26 years in Northeast China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016,49(11):2113 - 2125. (in Chinese)

[4] 鞠正山. 重视黑土资源保护,强化黑土退化防治[J]. 国土资源情报, 2016(2):22 - 25.
JU Zhengshan. Attention to the protection of black soil, strengthen black soil degradation prevention and remediation[J]. Land and Resources Information, 2016(2):22 - 25. (in Chinese)

[5] 段兴武, 赵振, 刘刚. 东北典型黑土区土壤理化性质的变化特征[J]. 土壤通报, 2012,43(3):529 - 534.
DUAN Xingwu, ZHAO Zhen, LIU Gang. The variations of soil physico-chemical properties since the second national soil survey in the northeast typical black soil regions[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012,43(3):529 - 534. (in Chinese)

[6] 中华人民共和国农业农村部. 东北黑土地保护性耕作行动计划(2020—2025 年)[EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/nybgb/2020/202004/202005/t20200507_6343266.htm.

[7] 高焕文, 李问盈. 保护性耕作技术与机具[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

[8] 王延好, 张肇鲲. 保护性耕作在加拿大的研究及现状[J]. 新疆农机化, 2004(6):18 - 19.

[9] 宗英飞, 杨学强, 纪瑞鹏, 等. 播种期温度变化对玉米出苗速率的影响[J]. 中国农学通报, 2013,29(9):70 - 74.
ZONG Yingfei, YANG Xueqiang, JI Ruipeng, et al. Influence of temperature changes on the seedling emergence rate of maize in sowing date[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013,29(9):70 - 74. (in Chinese)

[10] 马树庆, 王琪, 于海, 等. 东北地区玉米出苗速度与水热条件的关系及出苗期气象评估[J]. 生态学杂志, 2013, 32(8):2049 - 2055.
MA Shuqing, WANG Qi, YU Hai, et al. Maize emergence speed and its relationships with water and heat conditions in Northeast China and meteorological assessment of the maize emergence period[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(8): 2049 - 2055. (in Chinese)

[11] 杨德光, 孙玉珺, IRFAN Ali Raza, 等. 低温胁迫对玉米发芽及幼苗生理特性的影响[J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(5):1 - 8, 44.
YANG Deguang, SUN Yujun, IRFAN Ali Raza, et al. Effect of low temperature stress on germination and physiological of maize seedling[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018,49(5):1 - 8, 44. (in Chinese)

[12] 包文育. 东北垄作免耕播种机关键部件研究与整机设计[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2009.
BAO Wenyu. Study on key parts and holistic device of the no-till planter of the ridge cropping system in Northeast area of China[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2009. (in Chinese)

[13] 林静, 赵德芳, 胡艳清, 等. 基于免耕播种的玉米根茬物理机械特性分析[J]. 农机化研究, 2012,34(3):162 - 166.
LIN Jing, ZHAO Defang, HU Yanqing, et al. Analysis on physical and mechanical characteristics of corn residue for no-till planter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012,34(3):162 - 166. (in Chinese)

[14] 黄东岩, 朱龙图, 贾洪雷, 等. 基于压电薄膜的免耕播种机播种深度控制系统[J/OL]. 农业机械学报, 2015,46(4): 1 - 8.
HUANG Dongyan, ZHU Longtu, JIA Honglei, et al. Automatic control system of seeding depth based on piezoelectric film for no-till planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(4):1 - 8. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150401&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.001. (in Chinese)

[15] 王文君. 玉米优质种床构建关键技术及行间耕播机研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
WANG Wenjun. Research on key technologies of constructing high-quality maize seedbed and its inter-row till-planter[D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)

[16] 侯守印, 陈海涛, 邹震, 等. 原茬地种床整备侧向滑切清秸刀齿设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019,50(6): 41 - 51,217.
HOU Shouyin, CHEN Haitao, ZOU Zhen, et al. Design and test of side-direction straw-cleaning blade for seedbed treatment of original stubble planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(6):41 - 51,217. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190605&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.005. (in Chinese)

[17] 中华人民共和国农业农村部. 东北黑土地保护规划纲要(2017—2030 年)[EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/nybgb/2017/dqq/201801/t20180103_6133926.htm.

[18] 中国科学院. 东北黑土地白皮书(2020)[R/OL]. (2021 - 07 - 09). https://mp.weixin.qq.com/s/WN7bQLCVt4lBtTiwjdYcBg.

[19] 农业农村部农机化管理司. 全国农业机械化统计年报[R]. 2010 ~ 2020.

[20] 慕彩有. 秸秆覆盖免耕播种技术推广与应用[J]. 农机使用与维修, 2021(1):139 - 140.

[21] 李凯. 辽宁省铁岭县机械化耕作模式的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
LI Kai. Study on mechanized cultivation mode in Tieling county of Liaoning Province[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016. (in Chinese)

[22] 董文赫, 苗全, 李秀芬. 免耕播种机在东北地区适应性研究[J]. 农机科技推广, 2011(1):43.

[23] LIN Jing, LIU Yanfen, LI Baofa. 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.
[24] 解宏图, 李社潮. 秸秆覆盖免(少)耕保护性耕作技术模式[J]. 农机市场, 2020(4):25 - 26.
[25] 王丽学,姜熙,李勇,等. 保护性耕作对农田土壤水蚀及土壤紧实度的影响[J]. 灌溉排水学报,2014,33(2):83 - 85.
WANG Lixue, JIANG Xi, LI Yong, et al. Effects of conservation tillage on soil water erosion and soil compaction degree[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2014,33(2):83 - 85. (in Chinese)
[26] 刘继龙, 李佳文, 周延, 等. 秸秆覆盖与耕作方式对土壤水分特性的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2019,50(7):333 - 339.
LIU Jilong, LI Jiawen, ZHOU Yan, et al. Effects of straw mulching and tillage on soil water characteristics[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(7):333 - 339. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190736&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.036. (in Chinese)
[27] 刘文政,李问盈,郑侃,等. 我国保护性耕作技术研究现状及展望[J]. 农机化研究, 2017,39(7):256 - 261,268.
LIU Wenzheng, LI Wenying, ZHENG Kan, et al. The current research status of conservation tillage technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017,39(7):256 - 261,268. (in Chinese)
[28] 赵永来, 陈智, 孙悦超, 等. 作物残茬覆盖农田地表土壤抗风蚀效应试验[J]. 农业机械学报, 2011,42(6):38 - 42,37.
ZHAO Yonglai, CHEN Zhi, SUN Yuechao, et al. Testing on anti-wind erosion effect of soil for crop stubble coverage farmlands[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(6):38 - 42,37. (in Chinese)
[29] 李发鹏, 李景玉, 徐宗学. 东北黑土区土壤退化及水土流失研究现状[J]. 水土保持研究, 2006(3):50 - 54.
LI Fapeng, LI Jingyu, XU Zongxue. The status quo of black soil degradation and water and soil loss in Northeast China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006(3):50 - 54. (in Chinese)
[30] 臧英, 高焕文, 周建忠. 保护性耕作对农田土壤风蚀影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2003,19(2):56 - 60.
ZANG Ying, GAO Huanwen, ZHOU Jianzhong. Experimental study on soil erosion by wind under conservation tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2003,19(2):56 - 60. (in Chinese)
[31] 尹小刚. 气候变化背景下东北玉米生产的干旱风险与适应对策[D]. 北京:中国农业大学, 2015.
YIN Xiaogang. Drought risks and adaptation measures of maize production in Northeast China under climate change[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
[32] 董秋婷, 李茂松, 刘江, 等. 近 50 年东北地区春玉米干旱的时空演变特征[J]. 自然灾害学报, 2011,20(4):52 - 59.
DONG Qiuting, LI Maosong, LIU Jiang, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of drought of spring maize in Northeast China in recent 50 years[J]. Journal of Natural Disasters, 2011,20(4):52 - 59. (in Chinese)
[33] 马树庆, 王琪, 陈凤涛, 等. 春旱背景下春玉米苗情对产量的影响及减产评估模式[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 1): 171 - 179.
MA Shuqing, WANG Qi, CHEN Fengtao, et al. Impact of spring maize seeding growth on yield and assessment models of production cut under background of spring drought[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp. 1): 171 - 179. (in Chinese)
[34] PITTELKOW C M, ANG X, NQUIST B A, et al. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture[J]. Nature, 2015,517(7534):365.
[35] 谭佳琪. 东北典型黑土区耕地资源变化及其对粮食生产的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
TAN Jiaqi. Changes of cultivated land resources and its impact on grain production in typical back soil areas of Northeast China[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017. (in Chinese)
[36] 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)
[37] 杨维鸽. 典型黑土区土壤侵蚀对土壤质量和玉米产量的影响研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2016.
YANG Weige. Investigating the impacts of soil erosion on soil quality and corn yield in the typical black soil region[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
[38] 于猛, 王利斌, 初小兵, 等. 长春市玉米秸秆归行种植技术试验应用效果分析[J]. 农业开发与装备, 2019(7):142 - 143.
[39] OEKOSEM 系列驱动式条带耕作机[EB/OL]. https://www.baertschi.com/oekosem-8r375/.
[40] 解宏图, 杜海旺, 王影, 等. 玉米秸秆集行全量覆盖还田苗带条耕保护性耕作技术模式[J]. 农业工程, 2020,10(3): 24 - 26.
[41] 1GH - 4 型条带耕作机[EB/OL]. http://www.jlkdnj.com/news/54.html.
[42] RM 系列灭茬机[EB/OL]. http://www.kuhncentresuisse.ch/internet/webcn.nsf/0/C66735C502B8AD47C1257B48002FD67D? OpenDocument&p = 8.6.1.
[43] 1GH 系列垄上灭茬机[EB/OL]. https://www.nongjitong.com/product/dahuobaolai_1gh_the_stubble_cleaner.html.
[44] UFO 系列圆盘耙[EB/OL]. https://www.nongjitong.com/product/maschio_ufo_harrow.html.
[45] 侯守印, 陈海涛, 邹震, 等. 玉米原茬地侧向清茬刀设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020,36(2):59 - 69.
HOU Shouyin, CHEN Haitao, ZOU Zhen, et al. Design and test of lateral stubble cleaning blade for corn stubble field[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(2):59 - 69. (in Chinese)
[46] 于猛, 初小兵, 吴振宇, 等. 长春地区玉米秸秆归行技术及配套机具[J]. 农业与技术, 2019,39(19):53 - 55.
[47] 李社潮. 美国的条带耕作与条耕机[J]. 农业机械, 2018(6):35 - 36.
[48] 赵宏波, 何进, 郑智旗, 等. 少免耕播种机条带型行间侧抛清秸防堵装置研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020,51(12):

24 – 34.
ZHAO Hongbo, HE Jin, ZHENG Zhiqi, et al. Strip tillage inter-row residue side-throwing device of no/minimum-till seeder for anti-blocking and seedbed-cleaning[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12):24 – 34. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20201203&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.12.003. (in Chinese)
[49] 王雪松. 清秸深松组合式条带耕作机的设计与试验[D]. 北京: 中国农业大学, 2021.
WANG Xuesong. Design and experiment of combined strip cultivator with straw cleaner and subsoiler[D]. Beijing: China Agricultural University, 2021. (in Chinese)
[50] 中国科学院东北地理与农业生态研究所. 一种用于秸秆全量还田的玉米秸秆浅压覆盖带旋耕作方法: 201911050503.9[P]. 2020 – 03 – 27.
[51] 王奇. 行间清秸耕整关键技术及条带耕整机研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
WANG Qi. Research on key technologies of inter-row clean-tillage and its strip-till machine[D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)
[52] 梁宁. 免耕播种机缺口圆盘刀设计与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
LIANG Ning. Design and numerical simulation of gap cutting coulter for no-till planter[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)
[53] 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/OL]. 农业机械学报,2013,44(增刊1): 83 – 88.
ZHUANG Jian, JIA Honglei, MA Yunhai, et al. Design and experiment of sliding-knife-type disc opener[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(Supp.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. (in Chinese)
[54] 林静, 李博, 李宝筏, 等. 阿基米德螺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): 118 – 124.
LIN Jing, LI Bo, LI Baofa, et al. Parameter optimization and experiment on archimedes spiral type of gap cutting disc[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 118 – 124. http://www.j-csam.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. (in Chinese)
[55] 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)
[56] 陆泽城. 圆盘破茬刀切割玉米根茬运动特性测试装置的设计与试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
LU Zecheng. Research and design on soil disk corn stubble cutting characteristics testing device[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016. (in Chinese)
[57] 郭丽君, 毕世英, 刘爱萍. 垄上灭茬刀优化设计与试验[J]. 农机化研究, 2020, 42(10):51 – 58.
GUO Lijun, BI Shiying, LIU Aiping. Optimum design and test of stubble cutter on ridge[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020,42(10):51 – 58. (in Chinese)
[58] 刘九庆, 牛明, 商友云, 等. 玉米根茬粉碎还田刀具系统设计及浅析——基于阿基米德螺旋线[J]. 农机化研究, 2013, 35(6):85 – 89.
LIU Jiuqing, NIU Ming, SHANG Youyun, et al. The design and brief analysis of the system of corn stubble smashing cutters[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(6):85 – 89. (in Chinese)
[59] 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)
[60] 魏天路, 刘明亮. 灭茬机运动参数优化设计[J]. 农机化研究, 2008,30(9):97 – 99.
WEI Tianlu, LIU Mingliang. Parameter optimal design of stubble cleaner[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008,30(9):97 – 99. (in Chinese)
[61] 倪长安, 苗全生, 刘玉, 等. 玉米根茬破碎还田装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2008,39(7):68 – 71.
NI Changan, MIAO Quansheng, LIU Yu, et al. Design and experiment of a new maize field rootstalk chopper[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(7):68 – 71. (in Chinese)
[62] 李威亚. 反转灭茬机节能型刀具及前置切茬器选型设计研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2015.
LI Weiya. Study on the stubble breaker type selection design of inverse stubble cleaner energy saving and pre cutting tool[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2015. (in Chinese)
[63] 文立阁. 灭茬刀辊仿生减阻研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
WEN Lige. Study on bionic and resistance-reduction of stubble crushing blade roller[D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
[64] 蒋锐, 陈阳, 于成信, 等. 仿蟋蟀切齿叶减阻灭茬刀片设计与试验[J]. 工程设计学报, 2018,25(4):409 – 419.
JIANG Rui, CHEN Yang, YU Chengxin, et al. Design and experiment of cricket's incisor lobe inspired stubble cutting blade with drag reduction[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2018,25(4):409 – 419. (in Chinese)
[65] 李默. 基于螳螂前足结构特征的仿生切茬刀片设计[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
LI Mo. Design of bionic stubble-cutting blade based on the structural characteristic of praying mantis (*mantis religiosa* Linnaeus)'s[D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)

[66] 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)
[67] 汲文峰，佟金，贾洪雷，等. 鼹鼠爪趾几何结构量化特征分析[J]. 农业机械学报，2010,41(4):193－198.
JI Wenfeng, TONG Jin, JIA Honglei, et al. Quantitative characteristic features of geometric structures of claws of mole rat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(4):193－198. (in Chinese)
[68] 王瑞丽，杨鹏，RABIU Falalu Jahun，等. 秸秆深埋还田开沟灭茬机设计与试验[J]. 农业工程学报，2017,33(5):40－47.
WANG Ruili, YANG Peng, RABIU Falalu Jahun, et al. Design and experiment of combine machine for deep furrowing, stubble chopping, returning and burying of chopped straw[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(5):40－47. (in Chinese)
[69] 乔金友，孙健，张雪珍，等. 一年一熟地区玉米茬地耕整地机组综合效益评价[J]. 东北农业大学学报，2018,49(8):91－98.
QIAO Jinyou, SUN Jian, ZHANG Xuezhen, et al. Comprehensive benefit evaluation of tillage machinery units on fileds covered with maize straw and stubble in areas of one harvest a year[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018,49(8):91－98. (in Chinese)
[70] 郑侃，何进，李洪文，等. 作业次序对深松旋耕联合作业机作业质量及功耗的影响[J]. 农业工程学报，2017,33(21):52－60.
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Influence of working order on working quality and power consumption of subsoiling and rotary tillage combined machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(21):52－60. (in Chinese)
[71] 张晓青. 1DF－7760 型复式少耕联合整地机的结构特点与使用[J]. 农业机械，2012(13):111－112.
[72] 许剑平，徐涛，毛俐. 1DF－7760 型复式少耕整地机的设计[J]. 农机化研究，2011，33(4):93－95,99.
XU Jianping, XU Tao, MAO Li. The design of 1DF－7760 multiple-small-tillage equipment[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011,33(4):93－95,99. (in Chinese)
[73] 李向军，李连豪. 组合式灭茬、苗带旋耕整地机设计与试验[J]. 中国农机化学报，2020,41(8):13－19.
LI Xiangjun, LI Lianhao. Design and experiments of combined stubble and seedling belt rotary cultivation[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020,41(8):13－19. (in Chinese)
[74] JIA H L, MA C L, LI G Y, et al. Combined rototilling-stubble-breaking-planting machine[J]. Soil and Tillage Research, 2007,96(1－2):73－82.
[75] 赵艳忠，王运兴，刘海涛，等. 带状深松灭茬机灭茬部件设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2018,49(3):94－103.
HAO Yanzhong, WANG Yunxing, LIU Haitao, et al. Design and test of stubble-breaking components on strip subsoiling and stubble-breaking machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(3):94－103. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180311&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.011 (in Chinese)
[76] 林静，张桐嘉，陈彬，等. 深松灭茬旋耕起垄联合作业机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2019,50(2):28－39.
LIN Jing, ZHANG Tongjia, CHEN Bin, et al. Design and test of subsoiling rotary rilling and rilling combined operating machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(2):28－39. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190204&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.004. (in Chinese)
[77] SUBSOILER 系列深松机[EB/OL]. https://www.nongjitong.com/product/besson_subsoiler_deep_loosening_machine.html.
[78] SGX 系列精量苗带整地机[EB/OL]. http://m.newholland-china.cn/1a8c148a3da24c3d82362b4404f235f4.
[79] 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)
[80] 王奇，唐汉，周文琪，等. 幅宽自动控制清秸防堵装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2021,52(3):25－35.
WANG Qi, TANG Han, ZHOU Wenqi, et al. Design and experiment of automatic width control row cleaners[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(3):25－35. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20210303&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.003. (in Chinese)
[81] 牛萌萌，方会敏，康建明，等. 免耕播种机防堵技术研究进展[J]. 农机化研究，2021，43(6):8－13.
NIU Mengmeng, FANG Huimin, KANG Jianming, et al. Research on combination forecasting model of agricultural machinery total power based on density operator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(6):8－13. (in Chinese)
[82] 梁彦超，杨金常，杜瑞成，等. 1GJH－230 型组合式秸秆粉碎灭茬混土还田机设计与试验[J]. 中国农机化学报，2019，40(9):1－5.
LIANG Yanchao, YANG Jinchang, DU Ruicheng, et al. Design and test of 1GJH－230 type combined straw and stubble crushing and returning machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(9):1－5. (in Chinese)
[83] 刘俊孝，王浩，王庆杰，等. 玉米少免耕播种机种带灭茬清理装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2018,49(增刊):132－140.
LIU Junxiao, WANG Hao, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of strip cleaning device of no and minimum-tillage corn planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(Supp.):132－140. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2018s018&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.

issn. 1000-1298. 2018. S0. 018. (in Chinese)
[84] 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.
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. 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. (in Chinese)
[85] 聂姝娴. 免耕播种机防堵技术研究现状与发展趋势[J]. 农业开发与装备, 2017(5):46.
[86] 施印炎, 罗伟文, 胡志超, 等. 全量秸秆粉碎条铺与种带分型清秸装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(4):58 - 67.
SHI Yinyan, LUO Weiwen, HU Zhichao, et al. Design and test of equipment for straw crushing with strip-laying and seed-belt classification with cleaning under full straw mulching[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4):58 - 67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190407&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.007. (in Chinese)
[87] 史乃煜, 陈海涛, 王星, 等. 弹齿式清秸装置防止残茬回带机构设计与试验优化[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(4):84 - 91.
SHI Naiyu, CHEN Haitao, WANG Xing, et al. Design and experiment optimization of prevent bring back stubble mechanism of spring-tooth type cleaning device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4):84 - 91. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190410&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.010. (in Chinese)
[88] 史岩鹏, 翟长远, 朱瑞祥, 等. 梯形组合刀盘设计及作业性能试验[J]. 农机化研究, 2015, 37(12):182 - 187.
SHI Yanpeng, ZHAI Changyuan, ZHU Ruixiang, et al. Design and operating performance of a trapezoidal combination cutterhead[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(12):182 - 187. (in Chinese)
[89] 陈海涛, 李昂, 史乃煜, 等. 玉米秸秆残茬侧向抛出动力学模型建立与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018,49(5):76 - 83.
CHEN Haitao, LI Ang, SHI Naiyu, et al. Kinetics modeling and experiment of lateral throwing of corn straws[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5):76 - 83. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180509&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.009. (in Chinese)
[90] 王汉羊, 陈海涛, 纪文义. 2BMFJ - 3 型麦茬地免耕精播机防堵装置[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(4):64 - 70.
WANG Hanyang, CHEN Haitao, JI Wenyi. Anti-blocking mechanism of type 2BMFJ - 3 no-till precision planter for wheat stubble fields[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4):64 - 70. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20130412&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.04.012. (in Chinese)
[91] 黄玉祥, 高鹏洋, 张庆凯, 等. 免耕播种机切茬导草组合式草土分离装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(5):67 - 78.
HUANG Yuxiang, GAO Pengyang, ZHANG Qingkai, et al. Design and experiment of grass-soil separation device with combination of stubble cutting and grass guiding used for no-till planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5):67 - 78. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20200507&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.007. (in Chinese)
[92] 曹鑫鹏, 王庆杰, 李洪文, 等. 主动旋转集行式清秸装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(6):26 - 34.
CAO Xinpeng, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Design and experiment of active rotating collective straw-cleaner[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(6):26 - 34. (in Chinese)
[93] 2BFGY - 4 少耕施肥播种机[EB/OL]. https://detail.1688.com/offer/585537374668.html.
[94] 2BMG - 4 少耕播种机[EB/OL]. http://www.nongjitong.com/dealer/3645/442584.html.
[95] 2BMQF 系列免耕施肥播种机[EB/OL]. https://www.nongjitong.com/product/33800.html.
[96] 2BMQF - 6 免耕覆秸精量播种机[EB/OL]. http://www.dhbl.net/product/49.html.
[97] 2BYMCBZ 系列免耕施肥播种机[EB/OL]. http://www.jdzj.com/p40/2017 - 5 - 8/18765466.html.
[98] 2BMYFC - 4 免耕精量播种机[EB/OL]. http://www.nongjitong.com/product/dahuabaolai_2bmyfc_seeder.html.
[99] 2BYFSF - 4C 免耕施肥播种机[EB/OL]. http://www.nongji1688.com/com/lpxsf/jxsell/itemid - 5436231.html.
[100] 林静,钱巍,牛金亮. 玉米垄作免耕播种机新型切拨防堵装置的设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报, 2015, 46(6):691 - 698.
LIN Jing, QIAN Wei, NIU Jinliang. Design and experiment of stubble-cutting and anti-blocking mechanism for ridge-till and no-till planter[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2015, 46(6):691 - 698. (in Chinese)
[101] 曹鑫鹏, 王庆杰, 李洪文, 等. 玉米免耕播种机侧置切刀与拨茬齿盘组合清茬装置研究[J/OL]. 农业机械学报, 2021, 52(3):36 - 44.
CAO Xinpeng, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Combined row cleaners research with side cutter and stubble clean disk of corn no-till seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3):36 - 44. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20210304&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.004. (in Chinese)
[102] 王庆杰, 李洪文, 何进, 等. 凹形圆盘式玉米垄作免耕播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2011,27(7):117 - 122.

WANG Qingjie, LI Hongwen, HE Jin, et al. Design and experiment on concave disc type maize ridge-till and no-till planter [J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(7):117 - 122. (in Chinese)

[103] 贾洪雷, 刘行, 佘海波, 等. 免耕播种机凹面爪式清茬机构仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 68 - 77.
JIA Honglei, LIU Hang, YU Haibo, et al. Simulation and experiment on stubble clearance mechanism with concave claw-type for no-tillage planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 68 - 77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20181108&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.008. (in Chinese)

[104] 王奇, 贾洪雷, 朱龙图, 等. 免耕播种机星齿凹面盘式清秸防堵装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 68 - 77.
WANG Qi, JIA Honglei, ZHU Longtu, et al. Design and experiment of star-toothed concave disk row cleaners for no-till planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 68 - 77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190208&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.008. (in Chinese)

[105] 刘正平, 田梦, 杨淞旭, 等. 从动型旋转齿盘分草装置的设计[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(1): 120 - 124.
LIU Zhengping, TIAN Meng, YANG Songxu, et al. Design of a grass separation equipment with driven rotating tooth disk [J]. Journal of South China Agricultural University, 2018, 39(1):120 - 124. (in Chinese)

[106] 李名伟, 周婧, 白云龙, 等. 免耕播种机自适应拨茬系统设计与试验[J]. 农机化研究, 2020, 42(5):77 - 82.
LI Mingwei, ZHOU Jing, BAI Yunlong, et al. Analysis on physical and mechanical characteristics of corn residue for no-till planter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(5):77 - 82. (in Chinese)

[107] 2BMZF - 4 型免耕播种机[EB/OL]. http://www.jlkdnj.com/productMechanies/15.html.

[108] 2BYFSF - 4C 免耕施肥播种机[EB/OL]. http://www.nonghaha.com/productinfo/205000.html.

[109] 2BMF - 4 免耕播种机[EB/OL]. https://www.nongjitong.com/product/hbnonghaha_2bmf - 4_seeder.html.

[110] 贾洪雷, 陈忠亮, 马成林, 等. 北方旱作农业区耕作体系关键技术[J]. 农业机械学报, 2008, 39(11):59 - 63.
JIA Honglei, CHEN Zhongliang, MA Chenglin, et al. Key technologies for the tillage system in area of dry farming of Northern China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(11):59 - 63. (in Chinese)

[111] 禹栋栋. 免耕播种机双圆盘开沟器结构参数对作业性能影响研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
YU Dongdong. The study structural parameters of double disc opener of no-tillage on operating performance[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[112] 贾洪雷, 郭明卓, 郭春江, 等. 免耕播种机动态仿生破茬装置设计与参数试验优化[J/OL]. 农业机械学报, 2018,49(10):103 - 114.
JIA Honglei, GUO Mingzhuo, GUO Chunjiang, et al. Design of dynamic bionic stubble cutting device and optimization test of parameters[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(10):103 - 114. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20181012&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.012. (in Chinese)

[113] 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)

[114] 蒋金琳, 龚丽农, 王东伟, 等. 免耕播种机双刀盘有支撑切茬破茬装置的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012,28(21):17 - 22.
JIANG Jinlin, GONG Linong, WANG Dongwei, et al. Development and experiment for driving double coulters anti-blockage device of no-till planter[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(21):17 - 22. (in Chinese)

[115] 王奇, 朱龙图, 李名伟, 等. 指夹式玉米免耕精密播种机振动特性及对排种性能的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9):9 - 18.
WANG Qi, ZHU Longtu, LI Mingwei, et al. Vibration characteristics of corn no-tillage finger-type precision planter and its effect on seeding performance[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9):9 - 18. (in Chinese)

[116] 黄小珊, 王增辉, 姜鑫铭, 等. 指夹式排种器振动模拟与试验分析[J]. 农机化研究, 2019, 41(4):149 - 153.
HUANG Xiaoshan, WANG Zenghui, JIANG Xinming, et al. Analysis on physical and mechanical characteristics of corn residue for no-till planter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(4):149 - 153. (in Chinese)

[117] 刘月琴. 气吸式免耕播种机振动特性及其对排种性能的影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
LIU Yueqin. Study on vibration characteristics of air suction no-tillage planter and its effect on seed metering performance [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[118] 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)

[119] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.

[120] 贾洪雷, 郭慧, 郭明卓, 等. 行间耕播机弹性可覆土镇压轮性能有限元仿真分析及试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21):9 - 16.
JIA Honglei, GUO Hui, GUO Mingzhuo, et al. Finite element analysis of performance on elastic press wheel of row sowing plow machine for covering with soil and its experiment[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21):9 - 16. (in Chinese)