

# 全秸硬茬地碎秸行间集覆小麦播种机设计与试验

罗伟文 顾峰玮 吴峰 徐弘博 陈有庆 胡志超

(农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

**摘要:** 针对我国稻麦轮作区常规稻茬麦机械化播种时存在田间稻秸量大、耗工耗时和播期延误等问题,提出了全量碎秸行间集覆、洁区种带宽幅播种的技术思路,设计了一种全秸硬茬地碎秸行间集覆小麦播种机,该机能一次性完成碎秸清秸、行间覆秸、种带施肥旋耕、播种镇压等工序,适宜在稻收后未作任何秸秆移出及耕整地处理的全秸硬茬地作业。对秸秆粉碎装置、碎秸导流装置和种带旋耕装置等关键部件进行了理论分析,确定了相关结构与参数;为在种带内高质、顺畅、满播小麦,设计了播种及镇压装置;以粉碎刀辊转速、径向距离和作业速度为试验影响因素,以清秸率和种带宽度变异系数为评价指标,设计了三水平三因素正交试验。结果表明,工作参数为粉碎刀辊转速 2 200 r/min、径向距离 20 mm、作业速度 0.8 m/s 和旋耕刀辊转速 300 r/min 时,对应田间试验的碎秸平均长度为 110 mm、平均碎秸合格率为 91.47%、平均种带清秸率为 92.58%、平均种带宽度变异系数为 10.91%、平均播深为 41 mm、平均播深合格率为 97.32%;长势跟踪及测产结果表明,与常规播种方式相比,未出现明显缺苗弱苗现象,两种播种方式的产量基本相同。

**关键词:** 稻麦轮作; 秸秆还田; 行间覆秸; 宽幅播种

**中图分类号:** S223.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2019)12-0042-11

## Design and Experiment of Wheat Planter with Straw Crushing and Inter-furrow Collecting-mulching under Full Amount of Straw and Root Stubble Cropland

LUO Weiwen GU Fengwei WU Feng XU Hongbo CHEN Youqing HU Zhichao

(Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** A large amount of untreated straw is left in the field after rice harvest, which greatly hinders mechanized sowing and subsequent growth of wheat. The traditional solution is to bury the smashed straw in the soil or cover the surface of soil through multiple operations, which not only results in low efficiency and high energy consumption, but also hinders wheat germination due to excessive straw in the vicinity of the wheat seeds. In order to solve these problems, a planter with straw smashing and strip laying was provided, which adopted the clean area planting technique under full amount of straw and root stubble cropland. The planter was mainly composed of frame, straw crushing device, straw guiding device, rotary tilling device, seeding device and pressing device. In a single pass, the planter could complete multiple operation processes, including straw-stubble smashing, seed-belt cleaning, inter-row stacking, seed-bed treatment, fertilization sowing, and soil covering and suppression. The key components such as straw crushing device, straw guiding device and rotary tilling device were theoretically analyzed to determine structures and parameters. In order to achieve high quality and smooth sowing of wheat in the seed belt, the sowing device and pressuring device were designed. Three-factor and three-level orthogonal performance test was implemented by setting smashing spindle speed, radial distance and working speed as the influence factors, with straw cleaned rate and variable coefficient of the strip width as the evaluation index. Test results showed that when the smashing spindle speed was 2 200 r/min, radial distance was 20 mm, working speed was 0.8 m/s, and rotary speed was 300 r/min, the average length of the straw was 110 mm, straw crushed rate was 91.47%, straw cleaned rate was 92.58%, variable coefficient of the strip width was 10.91%, average sowing depth was 41 mm, and seeding depth pass rate was 97.32%. Through tracking growth trend and measuring the yield, it was shown that there was no

收稿日期: 2019-08-08    修回日期: 2019-11-02

**基金项目:** 江苏省农业科技自由创新资金项目(CX(17)1002-03)

**作者简介:** 罗伟文(1994—),男,助理工程师,主要从事农业机械化及其自动化研究,E-mail: luoweiwense@163.com

**通信作者:** 胡志超(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事农作物收获及产后加工技术装备研究,E-mail: nfzhongzi@163.com

obvious shortage of seedlings and weak seedlings compared with the conventional seeding planter, and the yields of the two seeding planters were basically the same.

**Key words:** rice and wheat rotation; straw returning; row-spacing stacking; wide sowing

0 引言

传统稻秸还田播种小麦生产需机具多次下田作业,不仅耗工、费时,且随着水稻收获期不断推迟,无法在适播期完成稻茬麦播种<sup>[1-4]</sup>。在全秸硬茬地(稻收后未作任何秸秆移出及耕整地处理的田块)工况下,设备一次下田即可完成下茬小麦播种作业,是解决上述问题的有效方法<sup>[5-7]</sup>。

国内外研究者对秸茬还田播种技术进行了大量研究,成效显著。国外主要运用滑动式避茬开沟和圆盘切茬开沟等技术进行秸秆还田播种<sup>[8-11]</sup>。目前国内主要有均覆地表、入土混埋、覆埋分流、开沟深埋、侧边集秸等技术类型,适用于全量秸茬还田播种,如设计抛秸风机与散秸装置、导土分秸板等实现碎秸均匀覆盖地表,设计旋切后抛防堵装置、驱动式前后双灭茬轮等实现旋切混埋碎秸<sup>[12-21]</sup>。这类设备作业后,秸秆多为均匀覆盖地表、混埋入种床或集中堆放等形式,适用于秸秆覆盖情况下作业,但由于单位面积稻秸量远大于小麦、玉米等秸秆量,易导致种带内稻秸含量过大而影响出苗<sup>[22-26]</sup>。

本文针对轮作区稻秸还田量大、播期延误等影响稻茬麦生产的问题,结合全秸硬茬地洁区播种技术原理与稻茬麦宽幅播种农艺要求,提出碎秸行间集覆、洁区种带宽幅播种的技术模式,设计一种一次下田即可完成秸茬粉碎、碎秸行间集覆、种带浅旋、施肥播种、播后镇压的复式作业装备,以期对轮作区高质、顺畅、机播稻茬麦提供技术参考。

1 总体方案

1.1 设计思路

小麦宽幅播种可以提高植株群体调节能力,有助于晚播状态下的稳产<sup>[27-28]</sup>。因此,结合小麦宽幅播种农艺要求,提出以下设计思路:①采用播幅 240 mm、行距 300 mm 的宽幅播种方式,在稻茬麦常态性晚播状态下提高稳产可能性。②采用种耕分型方式进行播前秸秆处理,即全部碎秸集覆行间,创造洁区种带环境(种带无播种秸秆障碍)。③仅进行种带施肥与旋耕,不仅实现种床整理,且减少土壤扰动。④在多排开沟器结构基础上,选用芯铧式开沟器,不仅实现 240 mm 播幅内满播小麦,且能增强通过性。

田间布局为幅宽 240 mm 的种带与幅宽 300 mm 的覆秸带(行间)交替布置,有助于保温保墒、封闭

行间杂草,作业效果如图 1 所示。

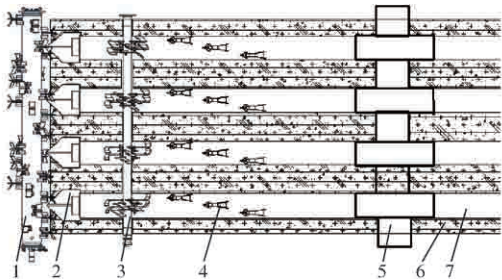


图 1 行间覆秸播种作业示意图

Fig. 1 Schematic of sowing operation mode of straw between rows

1. 碎秸刀辊 2. 碎秸导流装置 3. 旋耕刀辊 4. 开沟器 5. 地轮 6. 覆秸带 7. 洁区种带

1.2 整机结构

基于上述设计思路设计了全秸硬茬地碎秸行间集覆小麦播种机,整机结构如图 2 所示,主要包括秸秆粉碎装置、碎秸导流装置、施肥装置、种带旋耕装置、播种及镇压装置、传动系统和机架等,主要技术参数如表 1 所示。

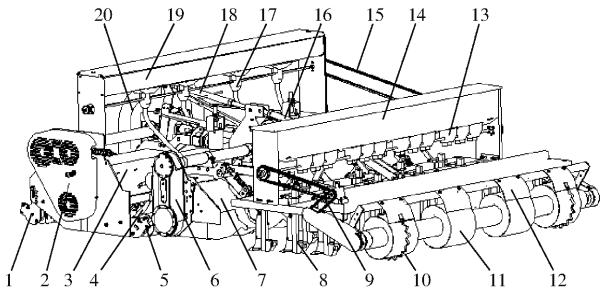


图 2 全秸硬茬地碎秸行间集覆小麦播种机结构简图

Fig. 2 Structural diagram of wheat planter with smashed straw covered with rows under full straw field

1. 压秸辊 2. 碎秸装置传动系统 3. 秸秆粉碎装置 4. 碎秸导流装置 5. 可调支撑辊 6. 旋耕装置传动系统 7. 旋耕装置 8. 开沟器 9. 排种器传动系统 10. 防滑钉 11. 镇压地轮 12. 刮土板 13. 排种器 14. 种箱 15. 排肥器传动系统 16. 后端悬挂拉杆 17. 排肥器 18. 中间悬挂拉杆 19. 肥箱 20. 牵引架

1.3 作业原理

全秸硬茬地碎秸行间集覆小麦播种机采用后三点悬挂式牵引,拖拉机以 720 r/min 额定转速输出动力,通过传动系统使秸秆粉碎刀辊、种带旋耕刀辊分别以一定转速作业。作业前,调节前端悬挂拉杆及压秸辊,使粉碎装置的甩刀尖靠近地面,调节支撑辊和中间悬挂拉杆,使种带旋耕装置旋耕深度能满足播麦前种床准备要求,调节后端悬挂拉杆及播种开沟器,使播麦深度符合农艺要求。

表 1 主要技术参数

Tab.1 Technical parameters of equipment

| 参数                            | 数值/形式             |
|-------------------------------|-------------------|
| 外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)        | 2 600×2 400×1 200 |
| 整机质量/kg                       | 1 500             |
| 配套动力/kW                       | ≥75               |
| 作业速度/(m·s <sup>-1</sup> )     | 0.6~0.8           |
| PTO 转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 720               |
| 粉碎刀辊转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 2 200             |
| 旋耕刀辊转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 300               |
| 作业幅宽/mm                       | 2 400             |
| 每条种带宽度/mm                     | 240               |
| 每条覆秸带宽度/mm                    | 300               |
| 种带行数                          | 4                 |
| 开沟器类型                         | 芯铧式开沟器            |
| 开沟器数量                         | 12                |

作业时,压秸辊将幅宽内的立秆稻秸压倒,便于后续捡拾粉碎;秸秆粉碎装置内甩刀反向旋转将幅宽内秸秆粉碎;粉碎后的秸秆向后喷射,与碎秸导流装置进行滑切耦合,在碎秸导流装置后方形成洁区种带,在两相邻碎秸导流装置间形成覆秸带;与此同时,位于碎秸导流装置正下方的施肥装置将肥料匀撒于洁区种带;种带旋耕装置在种带内进行正向浅旋,完成播前种床整理;随后播种装置于种带内顺畅播种并镇压,完成全秸硬茬地工况下的稻茬麦机播作业。

2 关键部件设计

2.1 秸秆粉碎装置

秸秆粉碎装置主要由压秸辊、护秸帘、刀轴、组合甩刀、定刀和型腔等组成,其结构如图 3 所示。不同类型的甩刀性能有所不同,本设计采用 2 把 L 型刀夹配 1 把直型刀组成组合甩刀,较普通单一形式的甩刀具有更好的捡拾粉碎效果,且具有较好的对称性,其结构如图 4 所示。参考类似 Y 型刀的安装密度为 23~40 片/m,组合甩刀相对于 Y 型甩刀增加了直刀,可适当减小安装密度,考虑到稻秸韧性较强,本机有效粉碎幅宽为 2.4 m,设计组合甩刀为 36 组。

刀尖线速度是关键运动参数,稻秸韧性较强,为达到较好的稻秸粉碎效果,刀尖线速度应大于 53 m/s<sup>[23]</sup>。根据经验公式,刀尖线速度与刀尖回转直径、粉碎刀辊转速的关系为

$$p_1 \geq 30(v_0 + v_m)/(\pi R_1)$$

(1)

式中  $p_1$ ——刀辊转速,r/min  
 $v_0$ ——甩刀尖线速度,m/s  
 $v_m$ ——作业前进速度,m/s  
 $R_1$ ——甩刀最大回转半径,m

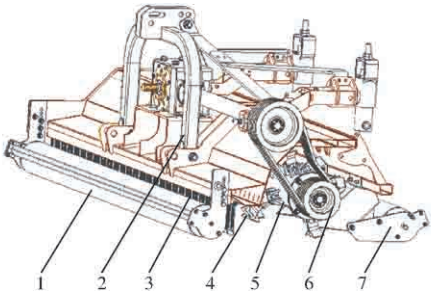


图 3 秸秆粉碎装置结构简图

Fig.3 Structural diagram of straw smashing device  
1. 压秸辊 2. 牵引架 3. 护秸帘 4. 组合甩刀 5. 刀轴 6. 传动系统 7. 可调支撑辊

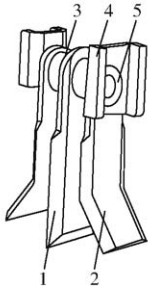


图 4 组合甩刀结构图

Fig.4 Structural diagram of combined sickle  
1. 直刀 2. L型刀 3. 套筒 4. 刀座 5. 轴销

机具正常作业速度为 0.6~0.8 m/s,通常粉碎刀辊转速范围为 1 800~2 400 r/min,综合考虑粉碎质量、功率消耗与机具振动等因素,设计甩刀最大回转半径为 265 mm,计算刀尖线速度选取 53 m/s,代入式(1),推算刀辊转速  $p_1 = 1\,945.83$  r/min,可满足稻秸粉碎及碎秸喷射要求,因此刀辊转速范围为 2 000~2 400 r/min。

2.2 碎秸导流装置

喷出型腔的碎秸流被碎秸导流装置挡隔滑切,在碎秸喷射与滑切耦合作用下,碎秸被分流到两相邻碎秸导流装置之间,形成规整的覆秸带,同时在碎秸导流装置正后方形成洁区种带。碎秸导流装置是创造无秸秆障碍种带、并将碎秸规整集覆于行间(覆秸带)的关键部件,主要包括斜面导流板、侧面定型板和安装板,其结构如图 5 所示。

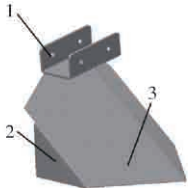


图 5 碎秸导流装置结构图

Fig.5 Structural diagram of smashed straw guide device  
1. 安装板 2. 定型板 3. 斜面导流板

为了确定碎秸导流装置的合理参数,任取一离散化碎秸颗粒为研究对象,分别建立以碎秸颗粒质

心为原点的两个坐标系,如图 6 所示。

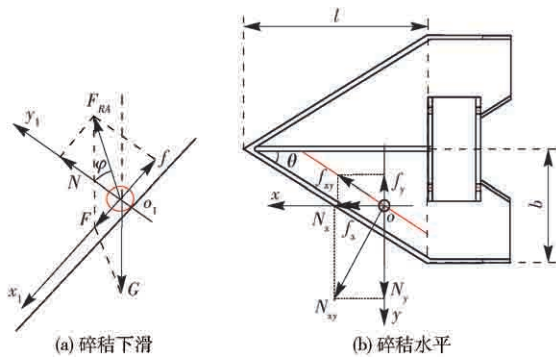


图 6 碎秸颗粒受力分析

Fig. 6 Force analysis diagram of crushed straw particles

忽略滑切耦合过程中的空气阻力,碎秸所受合力  $F$  为自身重力  $G$ 、垂直于斜面导流板的支持力  $N$  和平行于斜面导流板的摩擦力  $f$  的合力 ( $F_{RA}$  为  $N$  与  $f$  的合力),建立直角坐标系  $x_1o_1y_1$ ,如图 6a 所示,碎秸处于静止瞬间有平衡方程

$$\begin{cases} \frac{G \sqrt{\tan^2 \alpha \tan^2 \theta + \tan^2 \alpha}}{\sqrt{\tan^2 \alpha \tan^2 \theta + \tan^2 \alpha + \tan^2 \theta}} - f = 0 \\ \frac{G \tan \theta}{\sqrt{\tan^2 \alpha \tan^2 \theta + \tan^2 \alpha + \tan^2 \theta}} - N = 0 \\ f = \tan \varphi N \end{cases} \quad (2)$$

式中  $\theta$ ——碎秸导流装置水平分秸角, ( $^\circ$ )

$\alpha$ ——碎秸导流装置竖直分秸角, ( $^\circ$ )

$\varphi$ ——碎秸与斜面导流板之间的摩擦角, ( $^\circ$ )

碎秸在斜面导流板上堆积,会滞碍碎秸导流装置滑切耦合碎秸流,从而导致种带内碎秸数量增多,由式(2)可知,为有利于碎秸与碎秸导流装置接触后向下滑落,需满足  $x_1$  轴方向上的合力大于 0,即

$$\frac{\sqrt{\tan^2 \alpha \tan^2 \theta + \tan^2 \alpha}}{\tan \theta} > \tan \varphi \quad (3)$$

对覆秸过程中碎秸运动规律进行分析,可减少碎秸漏入种带,提高装置的清秸覆秸性能。以机具作业前进方向为  $x$  轴,覆秸方向为  $y$  轴,在水平面内建立直角坐标系  $xoy$ ,将滑切耦合过程中碎秸所受各力向水平面内投影并沿坐标轴方向分解 ( $N_{xy}$ 、 $f_{xy}$  分别为  $N$ 、 $f$  水平投影),如图 6b 所示,并建立碎秸瞬时运动微分方程

$$\begin{cases} N_{xy} (\sin \theta + \tan \varphi \cos \theta) = \frac{d^2 x}{dt^2} \\ N_{xy} (\cos \theta - \tan \varphi \sin \theta) = \frac{d^2 y}{dt^2} \\ N_{xy} = \frac{mg \tan \theta \sqrt{\tan^2 \alpha \tan^2 \theta + \tan^2 \alpha}}{\tan^2 \alpha \tan^2 \theta + \tan^2 \theta + \tan^2 \alpha} \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可知,碎秸在斜面导流板上的水平运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x = \frac{gt^2 \tan \theta \sqrt{\tan^2 \alpha \tan^2 \theta + \tan^2 \alpha} (\sin \theta + \tan \varphi \cos \theta)}{2 (\tan^2 \alpha \tan^2 \theta + \tan^2 \theta + \tan^2 \alpha)} \\ y = \frac{gt^2 \tan \theta \sqrt{\tan^2 \alpha \tan^2 \theta + \tan^2 \alpha} (\cos \theta - \tan \varphi \sin \theta)}{2 (\tan^2 \alpha \tan^2 \theta + \tan^2 \theta + \tan^2 \alpha)} \end{cases} \quad (5)$$

根据碎秸导流装置结构及在滑切耦合过程中碎秸的运动规律可知

$$\begin{cases} \theta = \arctan \frac{b}{l} \\ \alpha = \arctan \frac{h}{l} \\ \frac{\cos \theta - \tan \varphi \sin \theta}{\sin \theta + \tan \varphi \cos \theta} = \frac{b}{l} \end{cases} \quad (6)$$

式中  $l$ ——碎秸导流装置有效导秸长度, mm

$b$ ——碎秸导流装置单侧分秸宽度, mm

$h$ ——碎秸导流装置的高度, mm

由式(4)~(6)可知,碎秸导流装置的结构参数有效导秸长度  $l$ 、单侧分秸宽度  $b$  和高度  $h$  是影响碎秸流动的主要因素。不同品种与含水率稻秸的摩擦角有所不同,通过试验测得碎秸与斜面导流板的摩擦角范围为  $26.5^\circ < \varphi < 30.5^\circ$ ,结合式(3)~(6),得出正常滑切分流的水平分秸角  $\theta$ 、竖直分秸角  $\alpha$  分别为  $\theta < 29.7^\circ$ 、 $\alpha > 16.3^\circ$ 。

为降低自然因素对作业后行间覆秸带的扰动,作业完成后通过可调支撑辊对成型覆秸带进行压实作业,通过田间实测,压实后覆秸带边缘外扩 30 ~ 50 mm,为保证洁区种带宽度满足 240 mm 的要求,设计导流装置宽度为 300 mm,即单侧分秸宽度  $b = 150$  mm;同时,增加碎秸导流装置高度,有利于减少碎秸喷入洁区种带,并加速碎秸分流滑动,因此选取罩壳后安装横梁与地面的垂直距离作为碎秸导流装置高度,即碎秸导流装置高度  $h = 250$  mm;结合式(2)~(6),得出有效导秸长度  $l$  范围为  $263 \text{ mm} < l < 424 \text{ mm}$ ,增大  $l$  的取值,可缓解碎秸导流装置向前推秸,但  $l$  取值过大会导致导流斜板上碎秸聚集及机具重心后移,综合考虑,设计有效导秸长度  $l = 270$  mm。

### 2.3 秸秆粉碎装置与碎秸导流装置组配

4 组碎秸导流装置安装于秸秆粉碎装置罩壳后的安装横梁上,沿幅宽方向等距分布,其数目与间距可根据实际农艺需求进行调整。由于田间地表起伏不平,为防止碎秸导流装置铲起土块而干扰碎秸流向,安装时碎秸导流装置需距离地表一定间隙。为获得利于碎秸集覆的离地间隙,结合单因素试验,本文设计碎秸导流装置离地间隙为 20 mm。

同时,为获得较好种秸分型质量,碎秸导流装置



的圆弧形导流刀线与甩刀回转面需一定的径向距离 $\tau$ 。任选碎秸导流装置一竖直面,对离散化碎秸颗粒进行运动过程分析,建立如图7所示坐标系 $XOY$ ,碎秸从粉碎室罩壳喷出后,以下抛运动的方式落向碎秸导流装置,并与装置进行滑切耦合。

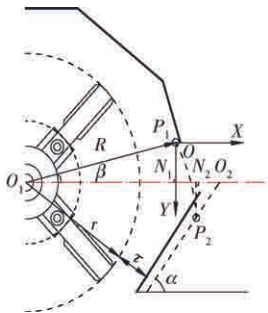


图7 碎秸下抛运动过程分析

Fig. 7 Trajectory analysis of throwing movement for smashed straw

结合文献[25],碎秸颗粒下抛运动过程中的水平位移为

$$X = \ln(1 + k(v_{ix} + v_m)t)/k \tag{7}$$

式中  $k$ ——空气阻力因子(描述碎秸下抛过程中所受空气阻力)

$v_{ix}$ ——碎秸下抛初速度,m/s

结合式(5),由装置结构及组配关系可得

$$Y = R\sin\beta + (r + \tau)\cos\alpha - \left[ R\cos\beta + \frac{\ln(1 + k(v_{ix} + v_m)t)}{k} \right] \tan\alpha \tag{8}$$

式中  $R$ ——喷出点 $P_1$ 到回转中心 $O_1$ 的距离,m  
 $\beta$ ——喷出点 $P_1$ 和回转中心 $O_1$ 的连线与水平线的夹角,(°)  
 $r$ ——甩刀最大回转半径,m

碎秸在碎秸导流装置上的落点位置直接影响种秸分型的质量,由式(8)可知,在秸秆粉碎装置与碎秸导流装置结构参数一定的条件下,落点位置主要受到径向距离和喷射速度的影响,而喷射速度主要由粉碎装置转速和作业速度决定,因此确定影响种秸分型性能的因素为粉碎装置转速、径向距离和作业速度。粉碎装置转速范围为2 000~2 400 r/min,机具作业速度范围为0.6~0.8 m/s,前期试验表明径向距离范围在10~30 mm。

2.4 种带旋耕装置

2.4.1 结构组成及工作原理

稻收后,存在田块不平、土壤沉积板结等问题,为保证良好种床环境,设计仅在洁区种带区域内旋耕作业的种带旋耕装置进行种带整理。种带旋耕装置与整机为组配式,主要包括机架、旋耕刀组、组隔板、传动系统、拖土板和刀轴,装置具体结构如图8所示。为减小旋耕过程中土壤扰动量并保证旋耕质

量达到稻茬麦播种要求,旋耕刀轴设计为正转,采用种带旋耕刀组结构,破除对应种带根茬并入土旋松土壤,增加土壤回流动性,以减少开沟器雍土,保证覆土质量;每组旋耕刀组外侧均布有组隔板,此结构的组隔板既能挡隔旋耕碎土被抛向覆秸带,又能紧贴覆秸带边缘滑行而不扰动破坏覆秸带垄型。

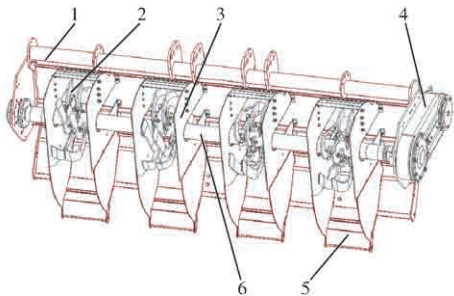


图8 碎秸导流装置结构图

Fig. 8 Structural diagram of smashed straw guide device

1. 机架 2. 旋耕刀 3. 组隔板 4. 传动系统 5. 拖板 6. 刀轴

旋耕作业深度可通过安装于粉碎装置后的可调支撑辊进行调节。农艺上要求稻茬麦播种深度为30~50 mm,因此设计旋耕深度为70~100 mm,参照GB/T 5669—2008《旋耕机械—刀和刀座》选择旋耕刀,旋耕刀最大回转半径为245 mm。旋耕装置共布置4组旋耕刀组,每组作业幅宽为240 mm,土壤耕作程度占整体作业幅宽的40%,在实现播种前床整理的同时,也符合少耕要求。

2.4.2 刀轴转速、切土节距设计

旋耕刀轴转速是关键运动参数,转速过小不能充分切碎土块,沟底不平整度也相对较大,转速过大则功率消耗大。当刀辊以角速度 $\omega$ 正向旋转,机具以速度 $v_m$ 前进时,旋耕刀尖运动轨迹为

$$\begin{cases} x = R_2(\cos(\omega t) + \omega t/\lambda) \\ y = -R_2\sin(\omega t) \\ \lambda = R_2\omega/v_m \end{cases} \tag{9}$$

式中  $R_2$ ——旋耕刀回转半径,m  
 $\lambda$ ——旋耕速比

则旋耕刀尖端速度为

$$v_3 = \sqrt{v_m^2 + (R_2\omega)^2 - 2v_mR_2\omega(R_2 - H)} \tag{10}$$

式中  $v_3$ ——旋耕刀尖端线速度,m/s  
 $H$ ——旋耕深度,m

种带旋耕装置进行破茬浅旋所需最小切削速度为5 m/s,结合刀轴回转半径和旋土深度,由式(10)可知, $\omega \geq 23.5$  rad/s。

稻茬田直接播种小麦需要较高的旋耕碎土质量,切土节距在60~90 mm时,可满足普遍稻秸田(含水率20%~35%)的播麦碎土质量要求<sup>[14]</sup>。通常,切土节距计算公式为

$$s = \frac{60\,000v_m}{p_2z}$$

(11)

式中  $s$ ——切土节距,mm  
 $p_2$ ——旋耕刀轴转速,r/min  
 $z$ ——同一切割小区旋耕刀数量

机具作业速度为 0.6~0.8 m/s,结合文献[27],设计旋耕刀轴转速为 300 r/min,同一切割小区的旋耕刀数量  $z=2$ ,则切土节距为 60~80 mm, $\omega=31.4$  rad/s,旋耕整地质量符合稻茬麦播种农艺要求。

2.4.3 旋耕刀排列

旋耕刀在刀轴上的合理排列,可提高旋耕作业质量、均匀刀轴受力等。本设计在刀轴上对称布置 4 个旋耕区段,分别对应 4 条种带,每个旋耕区段左右旋耕刀各 4 把,旋耕刀在刀轴上安装排列展开如图 9 所示。

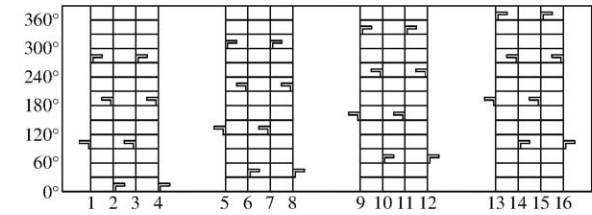


图 9 旋耕刀轴上刀片布置示意图

Fig.9 Diagram of arrangement of rotary blades

2.5 播种及镇压装置

2.5.1 播种开沟器

播种开沟器是直接影响小麦播种质量的关键部件,传统稻茬麦播种时有大量稻秸混入种床,因此常采用有切茬功能的开沟器,该类型开沟器因功能需求而有较复杂构造,且在土壤含水率较高时作业易雍土。本机播种前已完成种床整理,种带无播种秸秆障碍且土壤回流性好,因此另选结构简单的芯铧式开沟器进行配套。同时,由芯铧式开沟器的结构可知,在土壤湿度较大的稻茬田输种管底端易被土壤堵塞,参照文献[12],在输种管下方增设导种挡土板,可实现在匀撒麦种的同时阻止土壤进入输种管,具体结构如图 10 所示。

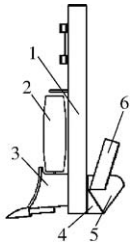


图 10 开沟器结构简图

Fig.10 Structural diagram of opener

1. 铧柄 2. 滑草辊 3. 芯铧 4. 导种挡土板 5. 翼板 6. 输种管

2.5.2 播种开沟器排列方式

本农艺要求 240 mm 种带宽度内满播小麦,2 个

播种开沟器难以达到此要求,因此每条种带上设计 3 个开沟器,每个开沟器播种幅宽 80 mm。同一种带内 3 个开沟器的不同排列方式对作业顺畅性有重要影响,常规品字排列(方式 A)可有效减小机具长度,但由于开沟器 2 和开沟器 3 易挂秸,且二者间距过小,导致两开沟器间极易挂秸壅土。因此在常规排列的基础上设计 3 种不同的开沟器排列方式,如图 11 所示,分别为方式 B、方式 C 和方式 D。

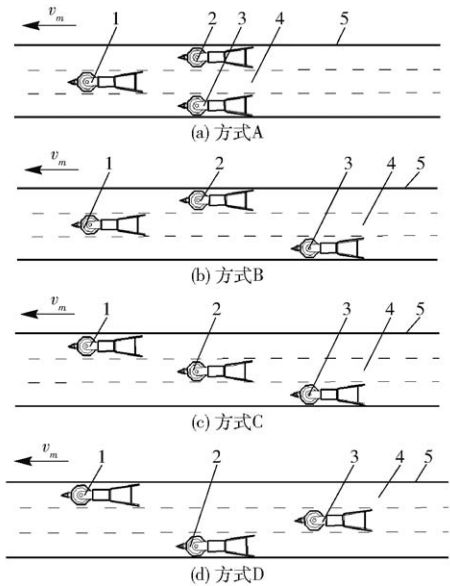


图 11 开沟器不同排列方式示意图

Fig.11 Schematics of arrangements for openers

1. 开沟器 1 2. 开沟器 2 3. 开沟器 3 4. 洁区种带 5. 覆秸带边缘

为获得最佳开沟器排列方式,于 2018 年 9 月在江苏省农业科学院稻麦轮作基地进行上述开沟器排列方式的田间作业顺畅性(挂秸及壅土次数)对比试验。试验地为高留茬收获后的水稻全秸硬茬地,田间秸秆量约 1.5 kg/m<sup>2</sup>,含水率为 38%,土壤性质为含水率约 25% 的壤土。试验时由常发 1204 型拖拉机牵引本课题组研制的全秸硬茬地碎秸行间集覆小麦播种机,试验工作参数为:粉碎刀辊转速 2 200 r/min、作业速度 0.8 m/s、旋耕刀辊转速 300 r/min,进行 5 组重复试验,每组试验长度 100 m,观测其挂秸、壅土次数。

试验结果如表 2 所示,开沟器排列方式 B、方式 C 和方式 D 的挂秸及壅土总次数分别为 5、2、3 次。

表 2 田间作业顺畅性对比试验结果

Tab.2 Contrastive experiment results of operational performance

| 项目   | 排列方式 |   |   |
|------|------|---|---|
|      | B    | C | D |
| 挂秸次数 | 2    | 2 | 1 |
| 壅土次数 | 3    | 0 | 2 |
| 总次数  | 5    | 2 | 3 |

分析原因可知:以方式 B 排列开沟器进行作业时,全部碎土从开沟器 2 和开沟器 3 间通道流出,但两者间距较小,且两开沟器都有挂秸现象,秸土混合造成壅土严重;以方式 C 排列开沟器进行作业时,碎土分流较均匀,因此未见壅土问题,但由于开沟器 3 所在通道的土量增大,因此存在挂秸现象;以方式 D 排列开沟器进行作业时,开沟器 1 和开沟器 2 未见挂秸现象,但由于开沟器 2 和开沟器 3 间存在间距较小、土量大的问题,因此存在壅土问题。

开沟器发生壅土会大幅降低播种质量,而轻微的挂秸对播种影响较小,综合考虑方式 C 的田间作业顺畅性明显优于方式 B 和方式 D,因此以方式 C 排列本播种装置的开沟器,播种及镇压装置结构简图如图 12 所示。

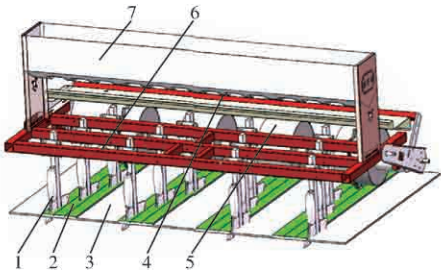


图 12 播种及镇压装置结构简图

Fig. 12 Schematic of planter

1. 开沟器 2. 苗带 3. 覆秸带 4. 排种器 5. 镇压轮 6. 机架  
7. 种箱

2.5.3 镇压装置

由于稻茬麦播种深度较浅,为利于小麦着床充实及种床保墒,播种完成后需对种带进行镇压。播种完成后幅宽内种带与覆秸带交替布置,种带镇压时需避免对覆秸带上碎秸造成扰动,因此设计为间段式镇压轮,即每条种带对应 1 个镇压轮进行镇压作业,其外半径为 260 mm,宽度为 240 mm,覆秸带对应的安装轴半径为 80 mm,两高度差 180 mm。镇压装置在进行镇压作业的同时为排肥、排种装置提供动力,为减少镇压轮滑移,在镇压轮上对称布置防滑钉。镇压装置主要由镇压轮、安装轴、刮土板和传动系统组成,结构简图如图 13 所示。

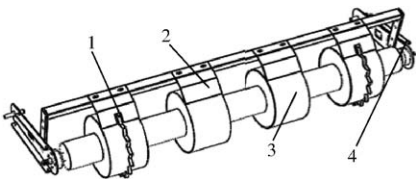


图 13 镇压装置结构简图

Fig. 13 Structural diagram of ground wheel

1. 防滑钉 2. 刮土板 3. 镇压轮 4. 传动系统

3 试验

3.1 试验条件与指标

3.1.1 试验条件

2018 年 10 月在江苏省农业科学院宿迁稻麦轮作种植基地进行田间试验,试验土壤条件为含水率 35% 的壤土,前茬水稻品种为南粳 9108,试验前采用半喂入收获机进行收获,实测收获后平均留茬高度大于 400 mm,草谷总质量均值 2.4 kg/m,草谷比均值 1.5,每公顷稻秸量均值为 14 400 kg,试验用拖拉机采用常发 1204 型轮式拖拉机。

3.1.2 试验指标及测试方法

实现种秸分型、洁区播种的关键在于种带清秸和碎秸条铺的质量,同时播种质量是反映整机作业性能的重要评价指标,因此试验主要评价种带清秸及碎秸条铺作业效果和播种质量。由于目前尚无专门的全秸硬茬地碎秸行间条铺式小麦宽幅播种相关标准,测试参照国家标准 GB/T 24675.6—2009《保护性耕作机械 秸秆粉碎还田机》、农业行业标准 NY/T 500—2002《秸秆还田机作业质量》和 GB/T 9478—2005《谷物条播机试验方法》中的方法及规范,测试内容主要包括碎秸合格率、种带清秸率、种带宽度变异系数、播种深度。

(1)碎秸合格率测试方法为:机具平稳作业后,按对角线等间距法,在幅宽内的 5 条覆秸带随机取 10 点,各点测试面积为 200 mm × 200 mm,分别收集各测试小区内粉碎长度不合格的碎秸并称量,计算公式为

$$C_1 = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} \left( 1 - \frac{C_i}{C} \right) \times 100\% \tag{12}$$

- 式中  $C_1$ ——碎秸合格率,%  
 $C_i$ ——第  $i$  个覆秸带测试区内长度不合格碎秸质量,g  
 $C$ ——作业前测试小区碎秸总质量,g

(2)种带清秸率测试方法为:以相同方法在 4 条种带上取 10 个面积为 200 mm × 200 mm 的测试小区,分别收集各测试小区内全部秸秆并称量,计算公式为

$$C_2 = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} \left( 1 - \frac{C_j}{C} \right) \times 100\% \tag{13}$$

- 式中  $C_2$ ——种带清秸率,%  
 $C_j$ ——第  $j$  条种带测试小区内碎秸质量,g

(3)种带宽度变异系数指洁区种带宽度与本宽幅播种农艺模式要求播幅的离散程度。种带宽度变异系数测试方法为:在各条种带上取 10 个试验点,测量各点的洁区宽度,各洁区种带宽度一致性标准

差  $S$  和变异系数  $\varepsilon$  的计算公式为

$$\begin{cases} S = \sqrt{\frac{1}{mn-1} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (D_{ij} - \bar{D})^2} \\ \varepsilon = \frac{S}{\bar{D}} \times 100\% \end{cases} \quad (14)$$

式中  $n$ ——每条种带上测试点数量,为保证准确性,取  $n=10$   
 $m$ ——测试种带行数,按农业技术测定要求,整机种带行数小于 6 行,需全部测定,  
 $m=4$   
 $D_{ij}$ ——第  $j$  条种带第  $i$  个测试点种带宽度测定值,mm  
 $\bar{D}$ ——幅宽平均值,为 240 mm

(4)播种深度合格率测试方法为:在 4 条种带内随机按对角线等间距选取 10 个试验点,覆土完成后,分别测量各试验点种子上的覆土厚度,播种深度合格率计算式为

$$\eta = \frac{x_c}{N_c} \times 100\% \quad (15)$$

式中  $\eta$ ——播种深度合格率,%  
 $x_c$ ——满足播种深度要求的测试点数  
 $N_c$ ——总测试点数

3.2 性能试验

3.2.1 试验设计与方法

为获取最佳种秸分型作业质量,在整机试验前设计性能试验,以获取相关参数的最佳组合。以粉碎刀辊转速、径向距离和作业速度为影响因素,选用  $L_9(3^4)$  正交表,设计三因素三水平正交试验,各因素水平如表 3 所示,具体方案如表 4 所示。

表 3 试验因素与水平

Tab.3 Factors and levels of experiment

| 水平 | 因素                                   |               |                                    |
|----|--------------------------------------|---------------|------------------------------------|
|    | 粉碎刀辊转速                               | 径向距离          | 作业速度                               |
|    | $A/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ | $B/\text{mm}$ | $C/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ |
| 1  | 2 000                                | 10            | 0.6                                |
| 2  | 2 200                                | 20            | 0.7                                |
| 3  | 2 400                                | 30            | 0.8                                |

仅选取上述指标的种带清秸率和种带宽度变异系数为反映种秸分型作业质量的评价指标,测试方法如 3.1 节所述,性能试验如图 14 所示。根据综合评价法,两指标权重各占 50%,综合得分  $Y$  计算式为

$$Y = C_2 \times 100 \times 50\% + (1 - \varepsilon) \times 100 \times 50\% \quad (16)$$

3.2.2 试验结果分析

试验结果如表 4 所示,并对试验结果进行极差分析。

由表 4 知,因素  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的极差分别为 2.15、

表 4 试验设计方案及响应值

Tab.4 Experiment design and response values

| 序号    | $A/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ | $B/\text{mm}$ | $C/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | 种带              | 种带宽度                     | 综合得分  |
|-------|--------------------------------------|---------------|------------------------------------|-----------------|--------------------------|-------|
|       |                                      |               |                                    | 清秸率<br>$C_2/\%$ | 变异系数<br>$\varepsilon/\%$ |       |
| 1     | 2 000                                | 10            | 0.6                                | 88.42           | 13.61                    | 87.40 |
| 2     | 2 000                                | 30            | 0.7                                | 86.36           | 14.86                    | 85.75 |
| 3     | 2 000                                | 20            | 0.8                                | 89.17           | 11.24                    | 88.97 |
| 4     | 2 200                                | 20            | 0.6                                | 92.91           | 10.85                    | 91.03 |
| 5     | 2 200                                | 10            | 0.7                                | 90.74           | 13.23                    | 88.76 |
| 6     | 2 200                                | 30            | 0.8                                | 90.03           | 12.47                    | 88.78 |
| 7     | 2 400                                | 30            | 0.6                                | 85.95           | 11.93                    | 87.01 |
| 8     | 2 400                                | 20            | 0.7                                | 88.13           | 10.58                    | 88.78 |
| 9     | 2 400                                | 10            | 0.8                                | 93.16           | 12.15                    | 90.50 |
| $k_1$ | 87.37                                | 88.89         | 88.48                              |                 |                          |       |
| $k_2$ | 89.52                                | 89.59         | 87.76                              |                 |                          |       |
| $k_3$ | 88.76                                | 88.36         | 89.42                              |                 |                          |       |
| $R$   | 2.15                                 | 1.23          | 1.66                               |                 |                          |       |



图 14 性能试验

Fig.14 Performance test

1.23、1.66,各因素影响显著性由大到小为  $A$ 、 $C$ 、 $B$ ,根据极差分析,选取较优因素组合为  $A_2B_2C_3$ 。

对因素组合  $A_2B_2C_3$  进行验证试验,重复试验 3 次,取均值。试验结果为种带清秸率 92.97%,种带宽度变异系数 10.55%,综合得分 91.21。综上所述,选取最佳因素组合为  $A_2B_2C_3$ ,即粉碎刀辊转速 2 200 r/min、径向距离 20 mm、作业速度 0.8 m/s。

3.3 田间试验

为验证评价整机作业性能,在性能试验的基础上,加挂后续种带旋耕装置、播种及镇压装置,并匹配种带旋耕正常作业所需转速,即工作参数设为径向距离 20 mm、粉碎刀辊转速 2 200 r/min、作业速度 0.8 m/s、旋耕刀辊转速 300 r/min,进行田间试验。

田间试验结果表明,在作业幅宽内稻秸被全部粉碎,并规整集覆于两相邻碎秸导流装置间的覆秸带,种带内基本无长秸秆,未见开沟器挂秸或雍土等问题,机具通过性良好,作业稳定,田间试验效果如图 15 所示。根据 3.1 节所述试验方法测得全秸硬茬地碎秸行间集覆式小麦播种机田间试验结果如表 5 所示,作业后,碎秸长度均值为 110 mm,碎秸合格率均值为 91.47%,种带清秸率均值为 92.58%,种带宽度变异系数均值为 10.91%,播种深度均值为



41 mm,播种深度合格率均值为 97.32%,符合该宽幅播种农艺模式的相关要求,能够满足全秸硬茬地工况下种带清秸、行间集秸的种秸分型要求和高质顺畅宽幅播麦需求。



图 15 田间播种机试验

Fig. 15 Field planter test

表 5 主要性能指标测试结果

Tab.5 Experiment results of main performance indicators

| 序号 | 碎秸    | 种带    | 种带宽度  | 播种深度  |
|----|-------|-------|-------|-------|
|    | 合格率   | 清秸率   | 变异系数  | 合格率   |
| 1  | 92.46 | 91.77 | 11.16 | 96.85 |
| 2  | 91.57 | 93.42 | 10.19 | 97.44 |
| 3  | 90.38 | 92.56 | 11.38 | 97.67 |
| 均值 | 91.47 | 92.58 | 10.91 | 97.32 |

3.4 田间长势及产量对比

在江苏省徐州市睢宁县佳禾种业公司开展实地播种,并运用本研​​究所述作业模式与当地常规播种方式开展机播对比试验,在相同田间管理条件下,进行长势跟踪及实地测产,平均播种量均为 210 kg/hm<sup>2</sup>,麦种千粒质量为 49.9 g。

长期跟踪表明,随着小麦植株的生长,覆秸带逐步被覆盖,与常规播种方式的小麦长势相比,未出现明显缺苗弱苗现象,不同时期小麦长势情况如图 16 所示。江苏省农业科学院专家测产的结果为,本研

究所述播种示范田与常规机播示范田的基本苗数分别为 364.45、364.02 万株/hm<sup>2</sup>,产量分别为 7 080、6 871 kg/hm<sup>2</sup>,考虑实际每公顷苗数差异,两播种方式的产量基本相同,表明本研​​究所述播种方式满足稻茬麦生产农艺要求。



图 16 田间播种试验

Fig. 16 Field sowing test

4 结论

(1)基于种秸分型和洁区宽幅的播种思路,设计了一种全秸硬茬地碎秸行间集覆小麦播种机,设备可一次下田即完成种带清秸、碎秸行间集覆的种秸分型作业和种带整理、施肥播种、播后镇压等后续作业;较常规机播作业,下田次数少,省耗省时。

(2)通过理论分析确定了关键部件相关参数,通过田间作业顺畅性试验确定了多排播种开沟器的排列方式,通过性能试验确定最佳参数组合为粉碎刀辊转速 2 200 r/min、径向距离 20 mm、作业速度 0.8 m/s。

(3)田间试验结果表明,全秸硬茬地碎秸行间集覆小麦播种机作业后的碎秸平均长度 110 mm,平均碎秸合格率 91.47%,平均种带清秸率 92.58%,平均种带宽度变异系数 10.91%,播种深度均值 41 mm,平均播种深度合格率 97.32%,符合稻茬麦生产农艺要求。

参 考 文 献

[1] 房焕,李奕,周虎,等. 稻麦轮作区秸秆还田对水稻土结构的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 297–302. FANG Huan, LI Yi, ZHOU Hu, et al. Effects of straw incorporation on paddy soil structure in rice-wheat rotation system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 297–302. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180434&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180434&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.034. (in Chinese)

[2] OLAF E, UMAR F, MALIK R K, et al. On-farm impacts of zero tillage wheat in South Asia's rice-wheat systems[J]. Field Crops Research, 2008, 105(3): 240–252.

[3] ZENG Z W, CHEN Y. Performance evaluation of fluted coulters and rippled discs for vertical tillage[J]. Soil & Tillage Research, 2018, 108(6): 93–99.

[4] BALWINDER S H, HUMPHREYS E, EBERBACH P L, et al. Growth, yield and water productivity of zero till wheat as affected by rice straw mulch and irrigation schedule[J]. Field Crops Research, 2011, 121(2): 209–225.

[5] 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, 2018, 49(4): 58–67. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20190407&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190407&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.007. (in Chinese)

[6] 刘正平,何瑞银. 江苏稻麦轮作区机械化生产模式分析[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(7): 112–116. LIU Zhengping, HE Ruiyin. Analysis on mechanized production mode of rice and wheat rotation area in Jiangsu Province[J].

- Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(7): 112 – 116. (in Chinese)
- [7] 曹卫华, 杨敏丽. 江苏稻麦两熟区机械化生产模式的效率分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊): 89 – 101.  
CAO Lihua, YANG Minli. Efficiency of mechanical production mode in paddy rice-wheat double cropping area of Jiangsu Province[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp.): 89 – 101. (in Chinese)
- [8] 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): 119 – 128.
- [9] TORBERT H A, INGRAM J T, PRIOR S A. High residue conservation tillage system for cotton production: a farmer's perspective[J]. Agrophysical Journal, 2015, 2(1): 1 – 14.
- [10] ALAN J F, JOHN A S. Crop and cattle production responses to tillage and cover crop management in an integrated crop-livestock system in the southeastern USA[J]. European Journal of Agronomy, 2014, 57(7): 62 – 70.
- [11] MATIN M A, DESBIOLLES M A, FIELKE J M. Strip-tillage using rotating straight blades: effect of cutting-edge geometry on furrow parameters[J]. Soil & Tillage Research, 2016, 155(8): 271 – 279.
- [12] 顾峰玮, 胡志超, 陈有庆, 等. “洁区播种”思路下麦茬全秸秆覆盖地花生免耕播种机研制[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 15 – 23.  
GU Fengwei, HU Zhichao, CHEN Youqing, et al. Development and experiment of peanut no-till planter under full wheat straw mulching based on “clean area planting”[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20): 15 – 23. (in Chinese)
- [13] 吴峰, 徐弘博, 顾峰玮, 等. 秸秆粉碎后抛式多功能免耕播种机秸秆输送装置改进[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 18 – 26.  
WU Feng, XU Hongbo, GU Fengwei, et al. Improvement of straw transport device for straw-smashing back-throwing type multi-function no-tillage planter[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 18 – 26. (in Chinese)
- [14] 牛琪, 王庆杰, 陈黎卿, 等. 秸秆后覆盖小麦播种机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 52 – 59.  
NIU Qi, WANG Qingjie, CHEN Liqing, et al. Design and experiment on straw post-covering wheat planter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 52 – 59. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20171107&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171107&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.007. (in Chinese)
- [15] 赵宏波, 何进, 李洪文, 等. 条带式旋切后抛防堵装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 65 – 75.  
ZHAO Hongbo, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of strip rotary-cut-throw anti-blocking implement[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 65 – 75. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180508&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180508&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.008. (in Chinese)
- [16] 朱惠斌, 李洪文, 何进, 等. 稻茬地双轴驱动防堵式小麦免耕播种机[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 39 – 44.  
ZHU Huibin, LI Hongwen, HE Jin, et al. No-till wheat seeder with two-axel drive anti-blocking in rice stubble field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 39 – 44. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180508&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180508&flag=1&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.008. (in Chinese)
- [17] 徐弘博, 胡志超, 吴峰, 等. 全量稻秸还田小麦播种机秸秆分流还田装置设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 19 – 28.  
XU Hongbo, HU Zhichao, WU Feng, et al. Design of straw distributed retention device of wheat planter under full rice straw retention[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 19 – 28. (in Chinese)
- [18] 田阳, 林静, 李宝筏, 等. 气力式 1JH-2 型秸秆深埋还田机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 10 – 18.  
TIAN Yang, LIN Jing, LI Baofa, et al. Design and test of pneumatic 1JH-2 style straw deep burying and returning machine [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(14): 10 – 18. (in Chinese)
- [19] 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?file\\_no=20160714&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160714&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.014. (in Chinese)
- [20] 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)
- [21] 陈海涛, 侯磊, 侯守印, 等. 大垄玉米原茬地免耕播种机防堵装置设计与优化试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 59 – 67.  
CHEN Haitao, HOU Lei, HOU Shouyin, et al. Design and optimization experiment of anti-blocking mechanism of no-tillage planter for grand ridge[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 59 – 67. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180807&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180807&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.007. (in Chinese)

[22] 胡志超. 全秸秆覆盖地机械化免耕播种技术研发取得重大突破[J]. 基层农技推广, 2015(4): 40.

[23] 何进, 李洪文, 陈海涛, 等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 1-19.  
HE Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 1-19. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180401&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180401&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.001. (in Chinese)

[24] 罗伟文, 胡志超, 吴峰, 等. 全秸硬茬地小麦播种机碎秸导流装置参数设计与优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 1-10.  
LUO Weiwen, HU Zhichao, WU Feng, et al. Design and optimization for smashed straw guide device of wheat clean area planter under full straw field[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(18): 1-10. (in Chinese)

[25] 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.  
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. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170910&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170910&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.010. (in Chinese)

[26] 郑亭, 樊高琼, 王秀芳, 等. 耕作方式、播深及覆土对机播套作小麦麦苗素质的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 164-168.  
ZHENG Ting, FAN Gaoqiong, WANG Xiufang, et al. Effect of tillage managements, sowing depth and soil-covering on the seedlings quality of mechanical[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 164-168. (in Chinese)

[27] 胡红, 李洪文, 李传友, 等. 稻茬田小麦宽幅精量少耕播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4): 24-32.  
HU Hong, LI Hongwen, LI Chuanyou, et al. Design and experiment of broad width and precision minimal tillage wheat planter in rice stubble field[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(4): 24-32. (in Chinese)

[28] 石玉华, 初金鹏, 尹立俊, 等. 宽幅播种提高不同播期小麦产量与氮素利用率[J]. 农业工程学报, 2018, 34(17): 127-133.  
SHI Yuhua, CHU Jinpeng, YIN Lijun, et al. Wide-range sowing improving yield and nitrogen use efficiency of wheat sown at different dates[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(17): 127-133. (in Chinese)