

玉豆带状复合种植免耕精量播种覆秸一体机设计与试验

陈海涛^{1,2} 高伟¹ 王星¹ 张颖^{1,3} 侯守印^{1,3} 纪文义^{1,3}

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江东方学院机电工程学院, 哈尔滨 150066;

3. 黑龙江省主要农作物生产机械化材料化技术创新中心, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对玉豆带状复合种植机械化播种过程中田间秸秆量大、代用机具播种质量差、作业效率低等问题,设计一种在收获后原茬地条件下一次进地可同步完成“清秸防堵种床整理-玉米大豆精播施肥-秸秆均匀覆盖”一体机。按照玉豆带状复合种植农艺要求,设计了一体机结构;采用正交试验与离散元仿真相结合方法,对清秸覆秸装置结构进行了仿真分析和参数组合优化,当作业速度为 9.9 km/h、刀轴转速为 625 r/min、清秸总成螺旋线头数为 3、残茬抛撒控制板倾角为 90°时,清秸率为 91.03%、覆秸匀度为 87.05%,当量功耗为 9.79 kW;在机收经粉碎秸秆残留量 1.48 kg/m² 的玉米原茬地实施整机田间性能试验,结果表明:当作业速度为 7.2 km/h (保证试验样机排种器正常工作)、大豆粒距为 8 cm、玉米粒距为 10 cm、刀齿入土深度为 50 mm 时,机具通过性良好,大豆、玉米粒距合格指数分别为 79.50%、88.66%,重播指数分别为 4.03%、3.66%,漏播指数分别为 16.48%、7.68%,变异系数分别为 28.49%、21.31%,大豆、玉米播深合格率为 90%,施肥深度合格率为 80%,种肥水平间距合格率为 80%,覆秸匀度为 88.97%,播后田间无晾籽现象。

关键词: 玉豆带状复合种植; 玉豆精播一体机; 清秸覆秸; 正交试验; 离散元

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2025)04-0202-11

OSID:



Design and Experiment of Integrated Machine for No-till Precision Seeding and Straw Mulching for Corn and Soybean Strip Compound Planting

CHEN Haitao^{1,2} GAO Wei¹ WANG Xing¹ ZHANG Ying^{1,3} HOU Shouyin^{1,3} JI Wenyi^{1,3}

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. College of Mechanical and Electronic Engineering, East University of Heilongjiang, Harbin 150066, China

3. Heilongjiang Province Technology Innovation Center of Mechanization and Materialization of Major Crops Production, Harbin 150030, China)

Abstract: For corn and soybean strip compound planting mechanized sowing process in the field of large amount of straw, substitute equipment sowing quality was poor, low operating efficiency and other issues, the design of a post-harvest stubble land conditions at a time into the ground can be synchronized to complete the “clearing of straw anti-clogging seed bed finishing – corn and soybean sowing fertilizer – straw uniform cover” integrated machine. In accordance with the agronomic requirements of corn and soybean strip compound planting, the structure of the integrated machine was designed, and its working principle and corresponding technical parameters were given; according to the agronomic characteristics of corn and soybean strip compound planting, the lateral spacing of the straw clearing assembly in the straw clearing and mulching device was determined through theoretical calculations; by combining orthogonal experiment and discrete element simulation, simulation analysis and parameter combination optimization were carried out on the structure of straw clearing and mulching device, when the operating speed was 9.9 km/h, the rotational speed of cutter shaft was 625 r/min, the number of helix heads of the straw clearing assembly was 3, and the inclination angle of stubble spreading control plate was 90°, the straw clearing rate was 91.03%, the mulching uniformity was 87.05%, and the equivalent power consumption was 9.79 kW; adopting the single-factor experiment method, the whole machine field performance experiment was implemented in the corn stubble land with 1.48 kg/m² residue of crushed straw after machine harvesting, and the results showed that when the operation speed was 7.2 km/h (to ensure the normal work of the seed dispenser of the experimental prototype), the grain spacing of soybean was 8 cm,

收稿日期: 2024-02-11 修回日期: 2024-03-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000401)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-04)

作者简介: 陈海涛(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械装备及生物质材料研究,E-mail: htchen@neau.edu.cn

the grain spacing of corn was 10 cm, the depth of the knife teeth in the soil was 50 mm, the machine passed well, the qualified index of grain spacing of soybean and corn were 79.50% and 88.66%, the index of reseeded were 4.03% and 3.66%, the index of leakage of seeding were 16.48% and 7.68%, and the coefficient of variation were 28.49% and 21.31%, respectively, and the qualified rate of sowing depth of soybean and corn were 90%, the qualified rate of fertilizer depth were 80%, and the qualified rate of horizontal spacing of seed and fertilizer were 80%, the uniformity of straw covering was 88.97%, and there was no seed drying phenomenon in the field after sowing. The research results laid the foundation for the development of the integrated machine for precision sowing of corn and soybean strip compound planting and the popularization and application of technology of corn and soybean strip compound planting.

Key words: corn and soybean strip compound planting; integrated corn-soybean precision planter; clearing and mulching straw; orthogonal experiment; discrete element

0 引言

大豆玉米带状复合种植模式是在现有耕作面积基础上实现大豆和玉米间套复种的一种新种植模式^[1],其采用“选配品种、扩间增光、缩株保密”核心技术^[2],实现作物间协同共生,提高土地产出率,在玉米不减产前提下增收大豆^[3]。

目前,黄淮海、西北、西南等地区大力推广带状复合种植模式^[4],多数采用大豆和玉米传统播种机具,需至少两次进地作业,作业效率低、播种质量差,因此研究开发带状复合种植专用一体机势在必行^[5-6]。文献[7]研制了 2BF-“1+3+1”型玉米大豆带状间作播种机,采用大豆和玉米专用排种器,种子适应性得以提高,但施肥装置以玉米需肥量设计,排肥管与玉米施肥开沟器相连,施肥后易导致大豆减产^[8];杨昌敏等^[9]研制的大豆玉米复合种植施肥播种一体机,其施肥系统中加装搅拌机构实现肥料在肥箱内多方向搅拌,提高玉米下肥量,设计外槽轮式单粒排种装置,优化其结构参数,提高播种质量,但整机缺少大豆玉米株距分控调节装置,难以满足带状复合种植播种株距要求;薛荣^[10]研制的气吹式大豆玉米带状复合种植精量播种机,采用集成式气吹排种器结合空气放大器实现气流输种,单次排种 3 行大豆和 2 行玉米,有效提高行距调节范围,但播种传动系统按照玉米株距设计,难以调节大豆株距。综上所述,目前研制的带状复合种植专用一体机存在大豆玉米株距难以分控分调、肥料难以精量分施问题。同时,带状复合种植机械化播种过程中田间秸秆量大,为解决缠绕、拖堆堵塞问题,专用一体机正向着低能耗的免耕覆秸作业形式发展^[11-12]。

针对上述存在问题并结合一体机发展趋势,本文提出一种玉豆带状复合种植免耕精量播种覆秸一体机。通过理论分析及正交仿真试验设计清秸覆秸装置,实现带状复合种植播前种床整备及播后覆秸;依据农艺要求^[13]设计种肥传动系统、播种单体及施

肥装置,实现大豆玉米复式精播及肥料分施,以期为原茬地大豆玉米带状复合种植提供装备支持。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

玉豆带状复合种植免耕精量播种覆秸一体机总体结构如图 1 所示,主要由清秸覆秸装置、施肥装置、播种单体、种肥传动系统和地轮组成,一次进地完成清秸防堵种床整理、玉米大豆精播施肥、秸秆均匀覆盖等多项作业。

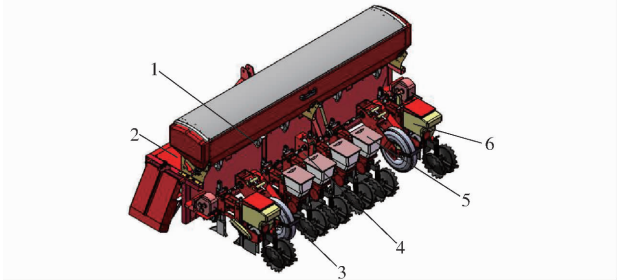


图 1 玉豆带状复合种植免耕精量播种覆秸一体机总体结构图

Fig.1 General structure diagram of integrated machine for no-till precision seeding and mulching of corn and soybean strip compound planting

1. 施肥装置 2. 清秸覆秸装置 3. 地轮 4. 种肥传动系统 5. 大豆播种单体 6. 玉米播种单体

1.2 工作原理

作业前,依据带状复合种植农艺要求,通过种肥传动系统和施肥装置调节大豆玉米播种株距和施肥量。作业时,拖拉机动力输出驱动清秸覆秸装置将种床内的根茬和秸秆侧抛至机具两侧;同时,经种肥传动系统传至播种单体和施肥装置的动力,以不同传动比驱动大豆玉米排种器和排肥器精量播种施肥,最后覆土镇压。

1.3 技术参数

玉豆带状复合种植免耕精量播种覆秸一体机主要技术参数如表 1 所示。

表 1 技术参数
Tab.1 Technical parameters

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	3 330×2 070×1 700
配套动力/kW	74~110
作业速度/(km·h ⁻¹)	≤8
作业行数	2(玉米)+4(大豆)
大豆带与玉米带间距/mm	600~700
大豆播种行距/mm	330~400
大豆株距/mm	50~105
玉米株距/mm	80~190
播种深度/mm	30~70
施肥深度/mm	80~150
种肥水平间距/mm	50~80
覆秸匀度/%	≥80

2 关键部件设计

2.1 清秸覆秸装置设计

清秸覆秸装置结构如图 2 所示,由机架、传动系统、清秸总成、残茬抛撒控制板和压秸板等组成。拖拉机动力的输出轴驱动装置将种带内秸秆残茬抛至机具两侧,回程时秸秆残茬抛回已播地表实现覆秸。

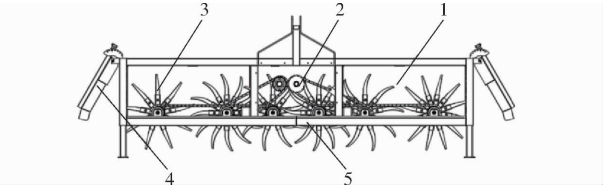


图 2 清秸覆秸装置结构图
Fig.2 Structure diagram of straw clearing and mulching device

1. 机架 2. 传动系统 3. 清秸总成 4. 残茬抛撒控制板 5. 压秸板

2.1.1 清秸总成设计

清秸覆秸装置主体由 6 个清秸总成构成,清秸总成上螺旋排布着若干清秸刀齿,左侧 3 个清秸总成刀齿旋向与右侧相反。两侧清秸总成除了清理玉米带残茬外,还兼具抛撒作用,故两侧清秸总成选用直刀齿,中间清秸总成选用弯刀齿。

免耕带状复合种植作业条件为原茬地,清秸总成螺旋线头数为 3,刀排间距为 90 mm,4 排清秸总成与 3 排清秸总成间刀齿交错排布,结构如图 3 所示^[14-15]。

带状复合种植模式与传统种植模式相比,通过缩短大豆播种行距和株距以保证大豆种植密度。为使大豆玉米播在净土上,同时保证整机通过性,依据带状复合种植模式对大豆播种行距和大豆带与玉米带间距的要求,以左侧 3 个清秸总成(清秸覆秸装置左右对称)为研究对象,对其横向布局进行设计,布局方式如图 4 所示。

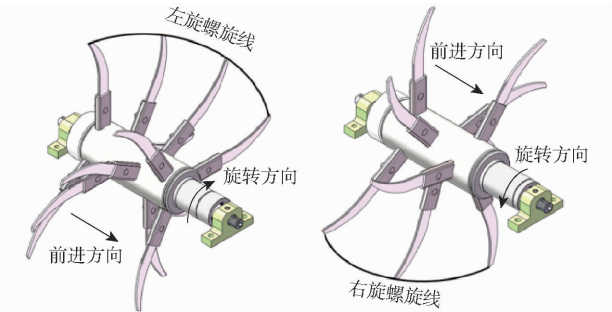


图 3 清秸总成结构示意图
Fig.3 Structure diagrams of straw clearing assembly

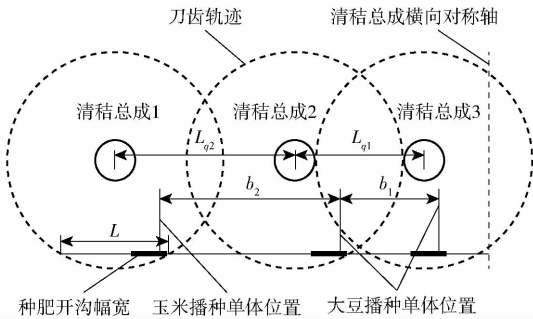


图 4 清秸总成布局方式
Fig.4 Layout of straw clear assemblies

为保证右侧大豆种肥开沟幅宽(种、肥开沟器水平间距与种、肥开沟宽度一半之和)位于种床内,应满足

$$\begin{cases} \frac{b_1 - d_1}{2} \geq \frac{L_{q1} - L}{2} \\ \frac{b_1}{2} + d_0 + \frac{d_2}{2} \leq L + \frac{L_{q1} - L}{2} \end{cases} \quad (1)$$

或

$$\begin{cases} \frac{b_1}{2} - \left(d_0 + \frac{d_2}{2} \right) \geq \frac{L_{q1} - L}{2} \\ \frac{b_1 + d_1}{2} \leq L + \frac{L_{q1} - L}{2} \end{cases} \quad (2)$$

式中 L_{q1} ——清秸总成 2 与清秸总成 3 间距,mm
 L ——清秸带宽,mm
 b_1 ——大豆播种行距,mm
 d_0 ——种肥开沟器最大水平间距,mm
 d_1 ——种开沟器开沟宽度,mm
 d_2 ——肥开沟器开沟宽度,mm

为保证中间大豆种肥开沟幅宽位于种床内,应满足

$$\begin{cases} \frac{3b_1 - d_1}{2} \geq L + \frac{3(L_{q1} - L)}{2} \\ \frac{3b_1}{2} + d_0 + \frac{d_2}{2} \leq 2L + \frac{3(L_{q1} - L)}{2} \end{cases} \quad (3)$$

或

$$\begin{cases} \frac{3b_1}{2} - \left(d_0 + \frac{d_2}{2} \right) \geq L + \frac{3(L_{q1} - L)}{2} \\ \frac{3b_1 + d_1}{2} \leq 2L + \frac{3(L_{q1} - L)}{2} \end{cases} \quad (4)$$

为保证左侧玉米种肥开沟幅宽位于种床内,应满足

$$\begin{cases} \frac{3b_1 - d_1}{2} + b_2 \geq L_{q2} + L + \frac{3(L_{q1} - L)}{2} \\ \frac{3b_1}{2} + b_2 + d_0 + \frac{d_2}{2} \leq 2L + L_{q2} + \frac{3(L_{q1} - L)}{2} \end{cases} \quad (5)$$

或

$$\begin{cases} \frac{3b_1}{2} + b_2 - \left(d_0 + \frac{d_2}{2}\right) \geq L_{q2} + L + \frac{3(L_{q1} - L)}{2} \\ \frac{3b_1}{2} + b_2 + \frac{d_1}{2} \leq 2L + L_{q2} + \frac{3(L_{q1} - L)}{2} \end{cases} \quad (6)$$

式中 L_{q2} ——清秸总成1与清秸总成2间距,mm
 b_2 ——玉米带与大豆带播种间距,mm

为保证清秸总成2与清秸总成3刀齿正常旋转作业,两总成间距应满足

$$L_{q1} \geq \frac{d_z}{2} + R \quad (7)$$

式中 d_z ——刀轴直径,mm
 R ——刀齿回转半径,mm

播种行距越小、种肥开沟幅宽越大时,开沟器越易发生堵塞;刀轴直径越小,秸秆越易缠绕刀轴;刀齿回转半径越小,机具通过性越差。综合考虑,取大豆播种最小行距330 mm、玉米带与大豆带播种最小间距600 mm、种肥开沟器最大水平间距80 mm、种开沟宽度45 mm、肥开沟宽度30 mm、刀齿回转半径360 mm、刀轴直径133 mm时,清秸总成间距为

$$\begin{cases} 426.5 \text{ mm} \leq L_{q1} \leq 437 \text{ mm} \\ L_{q2} = 600.0 \text{ mm} \quad (\text{左侧施肥}) \\ L_{q2} = 527.5 \text{ mm} \quad (\text{右侧施肥}) \end{cases} \quad (8)$$

由图4可知,两清秸总成间存在类三角形区域,定义该区域为“免清秸区”,即无需清秸区域。只需保证清秸作业后播种对应种床位置干净,播种作业不发生堵塞即可。尽可能保留大豆带与玉米带间残茬,降低功耗,有利于轻简化作业,故清秸总成1与清秸总成2间距取600 mm;为保证大豆行间良好通过性及相应清秸总成刀齿正常旋转作业,尽可能缩短大豆带对应清秸总成间距,故清秸总成2与清秸总成3间距取430 mm。

2.1.2 残茬抛撒控制板设计

机具回程作业时,残茬均匀覆盖已播地表,可蓄水保墒,防止土壤表面形成硬壳,提高出苗率^[16]。考虑部分地区农田为小地块^[17],为避免秸秆抛至其他农户田地中,需将残茬抛撒控制板放下,放下后仍能保证顺利清秸作业,不发生秸秆缠绕、拖堆堵塞问题。

考虑不同作业条件对覆秸宽度要求不同,横向覆秸状况应尽可能均匀,在装置两侧加装残茬抛撒

控制板(图5),主要由角度调节机构、转轴、支撑梁和薄钢板组成。角度调节机构每间隔15°设置一个卡槽,支撑梁上端限位销轴与卡槽配合,实现0°~90°内7挡倾角调节^[18]。

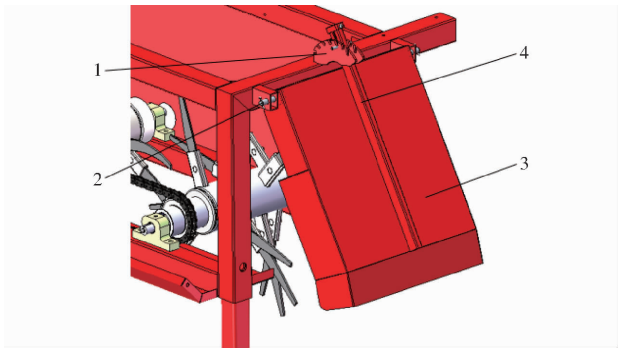


图5 残茬抛撒控制板结构图

Fig.5 Structure diagram of stubble spreading control board

1. 角度调节机构 2. 转轴 3. 薄钢板 4. 支撑梁

2.2 种肥传动系统设计

带状复合种植与传统种植方式相比,通过缩短播种株距保证种植密度,大豆玉米依据减量协同原则以不同施肥量同时施肥,大豆可通过根瘤固氮提高土壤氮素供应^[19],在满足玉米施氮量前提下减少大豆施氮量,玉米施加750~975 kg/hm²高氮缓控释肥,大豆施加225~300 kg/hm²低氮缓控释肥^[20]。

依据上述带状复合种植农艺要求设计种肥传动系统,传动系统关于机具两侧对称,图6为右侧种肥传动系统简图,由大豆变速箱、玉米变速箱、限深轮、播种单体、肥轴、大豆排肥器和玉米排肥器等组成。

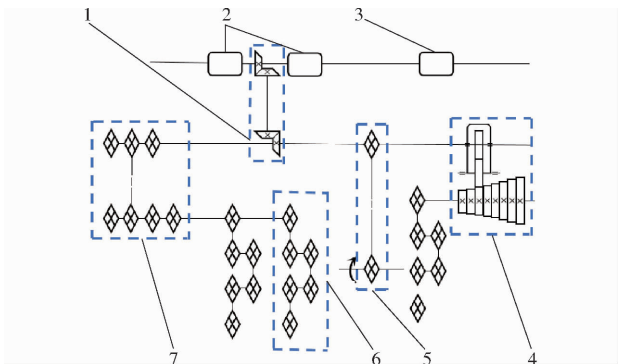


图6 右侧种肥传动系统简图

Fig.6 Sketch of rightside seed fertilizer drive system

1. 肥轴 2. 大豆排肥器 3. 玉米排肥器 4. 玉米变速箱 5. 限深轮 6. 播种单体 7. 大豆变速箱

大豆和玉米排种均为5级传动,排种传动比^[21]计算式为

$$i_z = \frac{\pi D_x (1 + \delta)}{n_z s_z} = \prod_{p=1}^5 i_p \quad (9)$$

式中 i_z ——排种传动比
 D_x ——限深轮直径,mm
 δ ——限深轮滑移率

n_z ——排种器每转排种数
 s_z ——播种株距,mm
 i_p ——第 p 级传动比

大豆变速箱选用链轮变速箱(12 种传动方案),玉米变速箱选用齿轮变速箱(8 种传动方案),限深轮直径 540 mm,限深轮滑移率 0.12,大豆排种器每转排种数 33,玉米排种器每转排种数 12,通过配置各级传动比,实现大豆株距 50 ~ 105 mm、玉米株距 80 ~ 190 mm 调节,如表 2 所示。

表 2 大豆和玉米株距
Tab.2 Soybean and corn spacing

大豆排种 传动方案	大豆排种 传动比	大豆株 距/mm	玉米排种 传动方案	玉米排种 传动比	玉米株 距/mm
1	0.55	105	1	0.83	191
2	0.65	89	2	0.99	160
3	0.75	78	3	1.15	138
4	0.85	68	4	1.32	120
5	0.65	89	5	1.48	107
6	0.77	75	6	1.65	96
7	0.89	65	7	1.81	87
8	1.01	57	8	1.98	80
9	0.76	76			
10	0.90	64			
11	1.04	55			
12	1.18	49			

大豆和玉米排肥器选用沟槽深度不同的外槽轮式排肥器,通过改变两排肥轮工作长度调节大豆和玉米施肥量,实现大豆和玉米肥料精量分施,排肥器每转排肥量为

$$q = \frac{\xi L_f [\mu Z_f S_f + \pi C_d (h_f^2 + d_f h_f)]}{1\,000}$$
 (10)

式中 q ——排肥器排肥量,g/r
 ξ ——复合肥料容重,g/L
 L_f ——排肥轮工作长度,cm
 μ ——肥料填充系数
 Z_f ——排肥轮齿数
 S_f ——单沟槽断面面积,cm²
 C_d ——肥料流动系数
 h_f ——排肥舌开度,cm
 d_f ——排肥轮直径,cm

排肥轮直径 $d_f = 6.8$ cm,大豆和玉米排肥轮齿数分别为 $Z_{fd} = 13$ 、 $Z_{fy} = 6$,排肥轮最大工作长度 $L_{fmax} = 6$ cm,肥料填充系数 $\mu = 0.7$,肥料流动系数 $C_d = 0.5$,排肥舌开度 $h_f = 1$ cm,大豆和玉米排肥轮单沟槽断面面积 $S_{fd} = 0.4$ cm²、 $S_{fy} = 4.1$ cm²,由式(10)计算得大豆和玉米排肥轮排肥量 q_d 、 q_y 分别为 0 ~ 68.7 g/r、0 ~ 127.3 g/r。

大豆和玉米共用一套施肥传动系统,每公顷排肥量计算式为

$$Q_d = \frac{8 \times 10^7 q_d i_f}{\pi D_x (1 + \delta) (6b_1 + 2b_2 + b_3)}$$
 (11)

$$Q_y = \frac{4 \times 10^7 q_y i_f}{\pi D_x (1 + \delta) (3b_1 + 2b_2 + b_3)}$$
 (12)

式中 Q_d ——大豆排肥量,kg/hm²
 Q_y ——玉米排肥量,kg/hm²
 i_f ——排肥传动比
 b_3 ——玉米播种行距,mm

取 $b_1 = 400$ mm, $b_2 = 650$ mm, $b_3 = 400$ mm, $i_f = 1.12$,代入式(11)、(12)得大豆施肥量为 0 ~ 790 kg/hm²、玉米施肥量为 0 ~ 1 035 kg/hm²,大豆玉米肥料精量分施,满足带状复合种植需肥量要求。

2.3 播种单体及施肥装置设计

播种单体作为大豆玉米播种关键部件,主要由仿形机构、播种开沟器、排种器、覆土镇压器和种箱等组成,结构如图 7 所示。仿形机构选用平行四杆仿形机构,遇到地表起伏时,开沟器在平面内平行移动,开沟器入土角保持不变,保证开沟深度一致性^[22];机械式排种器具有结构简单、操作简捷、成本低等优势^[23],大豆排种器选用窝眼轮式排种器,排种盘周向均布 33 个窝眼,玉米排种器选用从美国引进的指夹式排种器,周向均布 12 个指夹;播种开沟器选用滑靴式开沟器,开沟宽度 45 mm,开沟阻力小、入土能力强、便于维护^[24];覆土镇压器选用课题组研制的三向可调 V 型覆土镇压器,其作为播种单体仿形轮,保证播种深度一致性,其上播深调节旋柄可调节播种深度,宽度和角度调节螺杆可改变覆土宽度和覆土量^[25]。

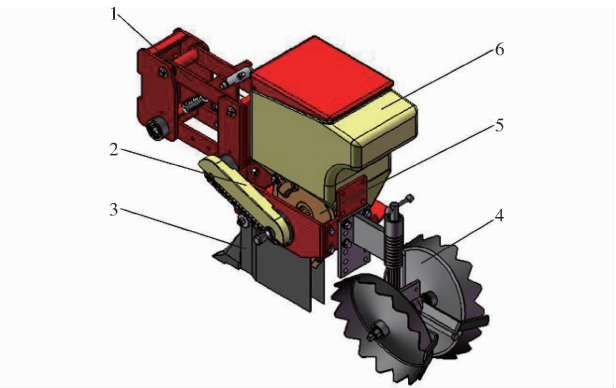


图 7 播种单体结构图

Fig.7 Structure diagram of seeding monolithic

1. 仿形机构 2. 排种器链传动 3. 播种开沟器 4. 覆土镇压器
5. 排种器 6. 种箱

施肥装置主要由肥箱、排肥器和施肥开沟器等组成。施肥开沟器选用锐角锄铲式开沟器,开沟宽度 30 mm,通过调节肥铲与铲裤连接位置调整开沟深度,

实现施肥深度 80 ~ 150 mm 可调,通过调节连接板与机架副梁连接位置,实现种侧 50 ~ 80 mm 开沟施肥;排肥器选用成本低、应用广泛的外槽轮式排肥器^[26]。

3 离散元仿真

3.1 仿真试验方案

为确定清秸覆秸装置较合理结构参数,以螺旋线头数、残茬抛撒控制板倾角、作业速度、刀轴转速为因素,清秸率、覆秸匀度、当量功耗为评价指标,应用 EDEM 软件进行四因素三水平正交仿真试验,考虑所有一阶交互作用,试验因素水平如表 3 所示。

表 3 仿真试验因素水平

Tab. 3 Simulation test factors and levels

水平	因素			
	螺旋线头数 X_1	残茬抛撒控制板倾角 $X_2/(^{\circ})$	作业速度 $X_3/(km \cdot h^{-1})$	刀轴转速 $X_4/(r \cdot min^{-1})$
1	3	0	5.4	350
2	4	45	9.9	625
3	5	90	14.4	900

为提高仿真效率,建立 5 000 mm × 2 500 mm × 150 mm 虚拟土槽,土槽上方随机铺设秸秆。清秸覆秸装置以中心面左右对称,以左侧 3 个清秸总成构成的清秸覆秸装置为研究对象,建立清秸覆秸装置-秸秆-土壤离散元仿真模型(图 8),相应物料参数与接触参数^[27]如表 4 所示。

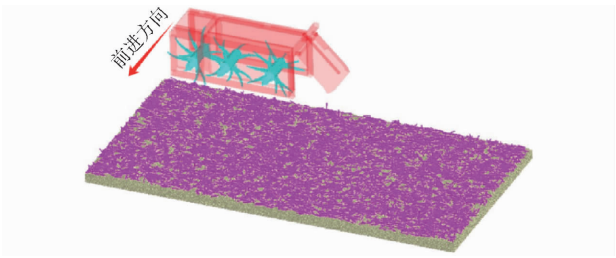


图 8 仿真模型

Fig. 8 Simulation model

3.2 评价指标测定方法

(1) 清秸率

清秸率 Y_1 为清秸带宽内清秸总成作业前后秸秆数量之比,应用 EDEM 软件 Grid Bin Group 功能提取试验前后 3 个清秸带宽内秸秆数量。

(2) 覆秸匀度

覆秸匀度为测区内覆秸作业后秸秆覆盖均匀程度,选取装置侧向宽 2.485 m、长 2 m 区域为覆秸匀度测定区,按面积 16 等分,选取其中 5 个代表性区域,提取试验后每份秸秆质量,覆秸匀度计算式为

$$Y_2 = \left(1 - \frac{1}{m} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (m_i - m)^2}{4}} \right) \times 100\% \quad (13)$$

表 4 物料参数和接触参数

Tab. 4 Material parameters and contact parameters

项目	参数	数值
65Mn 钢	泊松比	0.3
	密度/($kg \cdot m^{-3}$)	7 850
	剪切模量/Pa	7.9×10^{10}
秸秆	泊松比	0.4
	密度/($kg \cdot m^{-3}$)	241
	剪切模量/Pa	1.0×10^6
土壤	泊松比	0.38
	密度/($kg \cdot m^{-3}$)	1 850
	剪切模量/Pa	1.0×10^6
土壤-土壤	碰撞恢复系数	0.6
	静摩擦因数	0.6
	动摩擦因数	0.4
土壤-秸秆	碰撞恢复系数	0.18
	静摩擦因数	0.52
	动摩擦因数	0.32
土壤-65Mn 钢	碰撞恢复系数	0.6
	静摩擦因数	0.6
	动摩擦因数	0.05
秸秆-秸秆	碰撞恢复系数	0.23
	静摩擦因数	0.45
	动摩擦因数	0.25
秸秆-65Mn 钢	碰撞恢复系数	0.34
	静摩擦因数	0.32
	动摩擦因数	0.015

式中 Y_2 ——覆秸匀度,%
 m ——测定区秸秆平均质量,kg
 m_i ——第 i 个测定区秸秆质量,kg

(3) 当量功耗

当量功耗为每个清秸总成刀轴旋转扭矩及克服前进阻力产生的功率消耗之和,应用 Create Graph 功能提取试验后每个清秸总成扭矩及所受阻力数据,计算平均扭矩和平均阻力,当量功耗计算式为

$$Y_3 = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left(\frac{M_{qi}n}{9\,550} + \frac{F_{qi}v_m}{3\,600} \right) \quad (14)$$

式中 Y_3 ——当量功耗,kW
 n ——刀轴转速,r/min
 v_m ——清秸覆秸装置作业速度,km/h
 M_{qi} ——第 i 个清秸总成平均扭矩,N·m
 F_{qi} ——第 i 个清秸总成所受平均阻力,N

清秸率和覆秸匀度测定区如图 9 所示,黄色边框区域为清秸率测定区,黑色边框区域为覆秸匀度测定区。

3.3 仿真结果与分析

正交仿真试验结果如表 5 所示。通过 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行方差分析,如表 6 所示(交互项只列出影响显著项)。

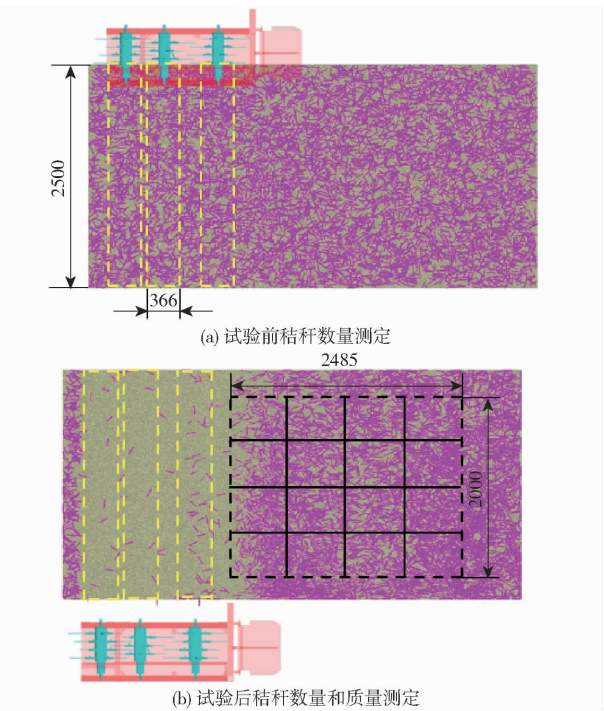


图 9 清秸率和覆秸匀度测定区

Fig.9 Straw clearing rate and mulch uniformity measurement area

表 5 仿真试验设计与结果

Tab.5 Design and results of simulation experiment							
序号	X_1	因素			评价指标		
		$X_2/$ ($^{\circ}$)	$X_3/$ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	$X_4/$ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	$Y_1/$ %	$Y_2/$ %	$Y_3/$ kW
1	3	0	5.4	350	87.93	75.49	2.87
2	3	0	9.9	625	91.73	77.06	10.78
3	3	0	14.4	900	92.68	75.93	24.15
4	3	45	5.4	625	92.54	85.30	6.80
5	3	45	9.9	900	93.56	85.59	17.12
6	3	45	14.4	350	72.37	74.92	3.85
7	3	90	5.4	900	95.60	93.27	12.95
8	3	90	9.9	350	84.67	83.96	3.69
9	3	90	14.4	625	89.29	83.71	11.68
10	4	0	14.4	625	89.36	73.58	15.38
11	4	0	5.4	900	95.71	85.73	16.90
12	4	0	9.9	350	85.62	73.37	4.05
13	4	45	14.4	900	92.75	81.91	25.12
14	4	45	5.4	350	89.17	81.47	2.88
15	4	45	9.9	625	91.87	81.69	11.05
16	4	90	14.4	350	79.85	78.75	4.99
17	4	90	5.4	625	94.31	90.90	7.77
18	4	90	9.9	900	94.78	91.15	22.61
19	5	0	9.9	900	95.19	81.14	23.39
20	5	0	14.4	350	82.29	71.21	6.21
21	5	0	5.4	625	94.65	80.45	8.50
22	5	45	9.9	350	86.84	78.11	5.23
23	5	45	14.4	625	89.56	78.09	17.01
24	5	45	5.4	900	96.01	89.44	17.09
25	5	90	9.9	625	92.14	87.36	12.05
26	5	90	14.4	900	94.45	88.99	27.25
27	5	90	5.4	350	90.44	88.55	3.10

表 6 方差分析

Tab.6 Analysis of variance						
评价指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
清秸率	模型	759.56	12	63.30	28.29	<0.000 1
	X_1	25.41	2	12.71	5.68	0.015 6 *
	X_2	8.45	2	4.22	1.89	0.187 9
	X_3	164.11	2	82.06	36.68	<0.000 1 **
	X_4	496.75	2	248.37	111.02	<0.000 1 **
	X_3X_4	64.84	4	16.21	7.25	0.002 2 **
	误差	31.32	14	2.24		
总和		790.88	26			
覆秸匀度	模型	957.97	8	119.75	179.97	<0.000 1
	X_1	3.69	2	1.85	2.78	0.089 0
	X_2	478.26	2	239.13	359.39	<0.000 1 **
	X_3	224.11	2	112.05	168.41	<0.000 1 **
	X_4	251.91	2	125.96	189.30	<0.000 1 **
	误差	11.98	18	0.67		
	总和	969.95	26			
当量功耗	模型	1 521.35	12	126.78	91.37	<0.000 1
	X_1	38.50	2	19.25	13.87	0.000 5 **
	X_2	2.77	2	1.38	1.00	0.393 9
	X_3	179.66	2	89.83	64.74	<0.000 1 **
	X_4	1 253.66	2	626.83	451.74	<0.000 1 **
	X_3X_4	46.76	4	11.69	8.43	0.001 1 **
	误差	19.43	14	1.39		
总和		1 540.77	26			

注：**表示极显著($P<0.01$),*表示显著($0.01\leq P<0.05$)。

由表 6 可知,作业速度、刀轴转速及二者交互作用对清秸率影响极显著,螺旋线头数对清秸率影响显著,主次顺序为刀轴转速、作业速度、作业速度与刀轴转速交互作用、螺旋线头数;残茬抛撒控制板倾角、作业速度、刀轴转速对覆秸匀度影响极显著,主次顺序为残茬抛撒控制板倾角、刀轴转速、作业速度;螺旋线头数、作业速度、刀轴转速、作业速度与刀轴转速交互作用对当量功耗影响极显著,主次顺序为刀轴转速、作业速度、螺旋线头数、作业速度与刀轴转速交互作用。各因素对评价指标影响规律如图 10 所示。

在保证机具不发生缠绕堵塞前提下,降低当量功耗,提高覆秸匀度。兼顾播种季节抢农时及经济性因素,提高作业效率,并减少螺旋线头数,减少刀齿总数,降低成本。依据此优化原则通过 Design-Expert 8.0.6 软件进行参数优化,结果如表 7 所示。

优化结果 2 较优化结果 1 清秸率提高 2.81 个百分点,覆秸匀度提高 3.89 个百分点,但当量功耗提高 151.92%;优化结果 3 较优化结果 1 清秸率降低 2.22 个百分点,覆秸匀度降低 3.47 个百分点,当量功耗提高 55.27%,但机具作业速度提高 83.33%。

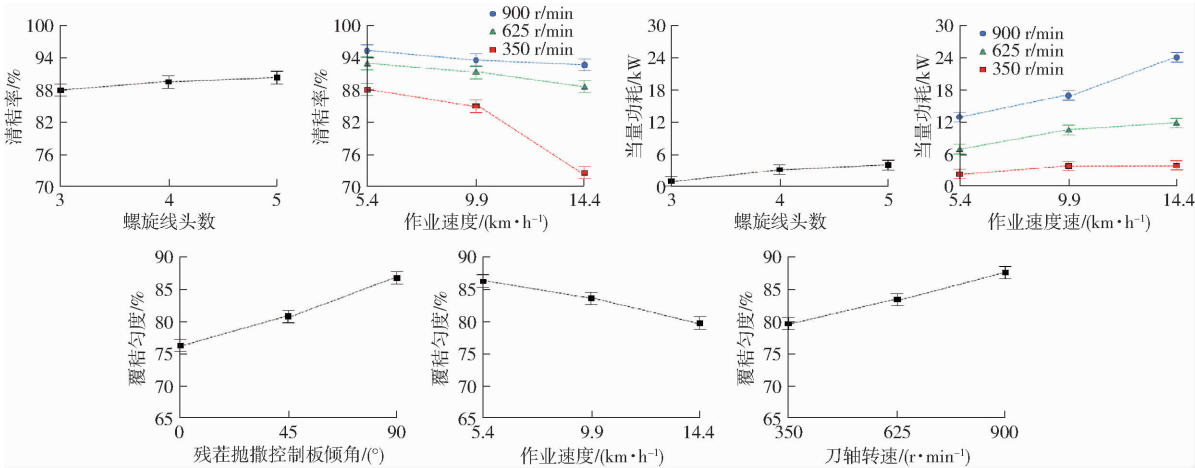


图 10 各因素对评价指标影响规律

Fig. 10 Patterns of effects of factors on evaluation indicators

表 7 优化结果
Tab.7 Optimization results

序号	因素				评价指标		
	X_1	$X_2 / (^\circ)$	$X_3 / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$X_4 / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$Y_1 / \%$	$Y_2 / \%$	Y_3 / kW
1	3	90	5.4	625	93.07	90.39	6.26
2	3	90	5.4	900	95.88	94.28	15.77
3	3	90	9.9	625	90.85	86.92	9.72



图 11 田间性能试验

Fig. 11 Field performance test

综合考虑,确定优化参数组合为:螺旋线头数 3、残茬抛撒控制板倾角 90°、作业速度 9.9 km/h、刀轴转速 625 r/min。

在机收后玉米原茬地上进行优化参数组合的仿真模型验证。试验地秸秆残留量 1.57 kg/m²,留茬平均高度 40 cm,5 cm 土壤质量含水率 20.78%,土壤坚实度 0.98 MPa,10 cm 土壤质量含水率 21.36%,土壤坚实度 1.39 MPa。验证结果为清秸率 91.03%、覆秸匀度 87.05%、当量功耗 9.79 kW,各指标与优化结果相吻合,证明了仿真结果可靠性。

4 田间性能试验

4.1 试验条件

试验于 2023 年 5 月 21—22 日在东北农业大学向阳试验基地实施,在机收经粉碎秸秆残留量为 1.48 kg/m²的玉米原茬地进行试验,试验现场如图 11 所示。试验地长 50 m,宽为 8 个机具作业往复,深度 5 cm 土壤质量含水率 21.34%,土壤坚实度 0.92 MPa,深度 10 cm 土壤质量含水率 21.91%,土壤坚实度 1.35 MPa。试验设备及仪器包括:玉豆带状复合种植免耕精量播种覆秸一体机、东方红 1204 型拖拉机、电热鼓风干燥箱、PV6.08 型贯穿阻力仪、取土环、激光测距仪、卷尺和数码相机等。大豆品种选用黑农 84,玉米品种选用天龙 9 号。

4.2 试验方法

采用单因素试验方法,以机具作业速度为因素,以机具通过性、播种均匀性、播种深度、施肥深度、种肥水平间距、覆秸匀度和晾籽率为评价指标,按照 NY/T 1768—2009《免耕播种机质量评价技术规范》、GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》、NY/T 500—2015《秸秆粉碎还田机作业质量》和 T/CAMA 21—2019《全秸硬茬地洁区播种机》等标准,进行整机田间性能试验。在前 4 个作业往复测定机具通过性,后 4 个作业往复测定其余评价指标。按照离散元仿真优化结果设定参数,其中兼顾试验样机机械式排种器作业速度特性,作业速度按 5.4、7.2 km/h 进行试验,具体试验方法如下:

(1) 机具通过性

设定清秸刀齿入土深度 50 mm。将试验地按长度两等分,机具以不同作业速度通过试验地,各因素水平重复 4 次试验。记录重度堵塞、中度堵塞、轻微堵塞和无堵塞状况,规定出现一次轻微堵塞或无堵塞状况为合格。

(2) 播种均匀性

设定大豆粒距 80 mm、玉米粒距 100 mm。播后在中间 30 m 稳定作业区测定 250 粒种子粒距,每组

重复 3 次,计算粒距合格指数、重播指数、漏播指数及变异系数。

(3)播种深度、施肥深度和种肥水平间距

设定大豆理论播种深度 4 cm,玉米理论播种深度 5 cm,理论施肥深度 10 cm,种侧 5 cm 施肥。播后每个作业往复每种作物随机选取 5 个测定点,人工扒开覆盖土壤,测定大豆播种深度、玉米播种深度、施肥深度、种肥水平间距。规定大豆播深 3~5 cm、玉米播深 4~6 cm、施肥深度 9~11 cm、种肥水平间距 4~6 cm 为合格。

(4)覆秸匀度

应用五点法在播后中间稳定播种区中每行随机选取 5 个测定区域(1 m×1 m),测定区域内秸秆质量并计算覆秸匀度。

(5)晾籽率

播后在中间稳定播种区随机选取 3 个测定区域,每个测定区域长为 5 m,宽为作业幅宽。采用观测法记录测区内暴露在秸秆或地表上方的大豆和玉米种子数量,晾籽率计算式为

$$\rho = \frac{n_l}{n_b} \times 100\%$$

式中 ρ——晾籽率, %

n_l——测区内晾籽数

n_b——测区内播种总数

4.3 试验结果及分析

4.3.1 机具通过性

在刀齿入土深度 50 mm 条件下,作业速度为 5.4 km/h 和 7.2 km/h 时,均未出现轻微堵塞、中度堵塞、重度堵塞情况,即无堵塞情况发生,说明清秸覆秸装置清秸效果显著,机具通过性良好,作业稳定。

4.3.2 播种均匀性

大豆和玉米播种均匀性测定结果如表 8 所示。作业速度越大时,大豆、玉米粒距合格指数越小,重播指数越小,漏播指数越大,变异系数越大;整体上玉米粒距合格指数比大豆高,重播指数、漏播指数、变异系数均比大豆低。当作业速度 7.2 km/h、大豆粒距 8 cm、玉米粒距 10 cm 时,大豆、玉米粒距合格指数分别为 79.50%、88.66%,重播指数分别为 4.03%、3.66%,漏播指数分别为 16.48%、7.68%,变异系数分别为 28.49%、21.31%,大豆和玉米播种各性能指标均达到国家标准优等品水平。

4.3.3 播种深度、施肥深度和种肥水平间距

播种深度、施肥深度和种肥水平间距测定结果如表 9 所示。大豆播种深度、玉米播种深度及施肥深度合格率在不同作业速度下相同,种肥水平间距

表 8 大豆和玉米播种均匀性测定结果

Tab.8 Measurement results of soybean and corn

		sowing uniformity				%
作物	作业速度/ (km·h ⁻¹)	性能指标				变异系数
		合格指数	重播指数	漏播指数	变异系数	
大豆	5.4	85.46	7.12	7.42	24.43	
		84.89	6.40	8.71	21.86	
		83.06	6.96	9.98	20.67	
	平均值	84.47	6.83	8.70	22.32	
	7.2	79.45	3.63	16.92	28.63	
		80.22	3.51	16.27	27.73	
		78.82	4.94	16.24	29.11	
	平均值	79.50	4.03	16.48	28.49	
玉米	5.4	91.07	4.34	4.59	17.52	
		91.36	3.92	4.72	18.25	
		90.79	4.18	5.03	19.45	
	平均值	91.07	4.15	4.78	18.41	
	7.2	88.22	3.39	8.39	20.36	
		88.61	3.71	7.68	21.05	
		89.14	3.88	6.98	22.53	
	平均值	88.66	3.66	7.68	21.31	

表 9 播种深度、施肥深度和种肥水平间距测定结果

Tab.9 Determination of sowing depth, fertilizer depth and spacing between seed and fertilizer levels

作业速度/ (km·h ⁻¹)	序号	大豆播	玉米播	施肥	种肥水
		种深度/ cm	种深度/ cm	深度/ cm	平间距/ cm
5.4	1	3.6	4.4	9.6	5.2
	2	3.5	4.8	10.2	4.8
	3	4.3	5.0	9.7	4.6
	4	4.7	5.4	10.4	3.2
	5	4.4	4.9	11.2	4.9
	6	4.2	6.5	9.7	5.5
	7	4.3	4.8	9.2	5.0
	8	3.4	4.7	9.6	5.2
	9	5.1	5.0	13.2	5.8
	10	4.5	5.5	10.1	5.3
	平均值	4.2	5.1	10.3	5.0
7.2	标准差	0.5	0.6	1.2	0.7
	变异系数/%	13.0	11.5	11.7	14.0
	合格率/%	90.0	90.0	80.0	90.0
	1	5.2	4.9	9.7	6.2
	2	3.2	6.1	10.1	3.2
	3	3.5	5.2	9.7	4.5
7.2	4	4.5	4.8	10.5	5.2
	5	4.0	5.1	11.1	4.2
	6	3.5	4.8	11.3	4.9
	7	4.2	5.3	9.7	5.5
	8	4.4	5.1	10.6	5.3
	9	4.8	5.3	10.7	5.5
	10	3.8	4.4	10.7	4.4
	平均值	4.1	5.1	10.4	4.9
	标准差	0.6	0.4	0.6	0.8
	变异系数/%	15.4	8.8	5.8	16.3
	合格率/%	90.0	90.0	80.0	80.0

合格率随作业速度增加而降低。作业速度 7.2 km/h 时,大豆播深合格率 90%,玉米播深合格率 90%,施肥深度合格率 80%,种肥水平间距合格率 80%,播深合格率达到国家标准一等品水平($\geq 85\%$),播种单体作业稳定,仿形机构对地表起伏适应力强,播深一致性较好,施肥位置满足带状复合种植农艺要求,种子养分得以供应。

4.3.4 覆秸匀度

覆秸匀度测定结果如表 10 所示。覆秸匀度随作业速度增加而降低。作业速度 7.2 km/h 时,覆秸匀度 88.97%,满足行业标准。清秸覆秸装置侧向覆秸效果显著,雨后水分打在秸秆上并渗入土壤中滋润种子,为大豆和玉米出苗提供优质条件。

表 10 覆秸匀度测定结果

Tab.10 Measurement results of straw mulching
uniformity

作业速度/(km·h ⁻¹)	项目	覆秸匀度/%
5.4	1	90.32
	2	90.19
	3	90.42
	平均值	90.31
7.2	1	89.05
	2	88.84
	3	88.02
	平均值	88.97

4.3.5 晾籽率

播后观测区域内晾籽情况,地表和秸秆上方未发现晾籽,说明清秸覆秸装置对秸秆残茬清理效果

显著,为开沟播种提供优质种床条件,有效避免种子落在秸秆上;开沟器开沟宽度小,回土效果好;覆土镇压器覆土能力强、镇压效果好,土壤稳定覆盖至已播种子上方,有效避免种子落在地表上。

5 结论

(1)设计了一种玉豆带状复合种植免耕精量播种覆秸一体机,在原茬地条件下,一次进地可同步完成清秸防堵种床整备、玉豆精量播种施肥、秸秆均匀覆盖等多项作业。

(2)建立了清秸覆秸装置-秸秆-土壤离散元仿真模型,得到清秸覆秸装置优化参数组合为螺旋线头数 3、残茬抛撒控制板倾角 90°、作业速度 9.9 km/h、刀轴转速 625 r/min。田间试验验证优化后的清秸覆秸装置清秸率为 91.03%、覆秸匀度为 87.05%、当量功耗为 9.79 kW。

(3)田间性能试验结果表明,在机收经粉碎秸秆残留量为 1.48 kg/m² 玉米原茬地条件下,当作业速度 7.2 km/h、大豆粒距 8 cm、玉米粒距 10 cm、刀齿入土深度 50 mm 时,机具通过性良好,大豆、玉米粒距合格指数分别为 79.50%、88.66%,重播指数分别为 4.03%、3.66%,漏播指数分别为 16.48%、7.68%,变异系数分别为 28.49%、21.31%,大豆、玉米播深合格率 90%,施肥深度合格率 80%,种肥水平间距合格率 80%,覆秸匀度 88.97%,播后田间无晾籽现象。各项指标满足大豆玉米带状复合种植农艺要求。

参 考 文 献

[1] 刘燕,陈彬,于庆旭,等. 大豆玉米带状复合种植机械化技术与装备研究进展[J]. 中国农机化学报,2023,44(1):39-47.
LIU Yan, CHEN Bin, YU Qingxu, et al. Research progress on mechanized technology and equipment for soybean and corn strip compound planting[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2023,44(1):39-47. (in Chinese)

[2] 杨钰莹,司伟. 大豆玉米带状复合种植:技术模式、成本收益与补贴政策[J]. 农业经济问题,2023(1):49-63.
YANG Yuying, SI Wei. Soybean-corn strip cropping: technology models, cost-benefits and subsidy policies[J]. Issues in Agricultural Economy,2023(1):49-63. (in Chinese)

[3] 任定林,刘涛,夏守浩,等. 玉米大豆兼用腔盘组合孔式排种盘设计与充种性能试验[J]. 农业机械学报,2024,55(2):73-89.
REN Dinglin, LIU Tao, XIA Shouhao, et al. Design and seed filling performance experiment of combined hole-type seed tray with cavity disk for corn and soybean[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(2):73-89. (in Chinese)

[4] 崔文芳,秦德志,陈静,等. 玉米大豆不同间作系统光合特性与产量边际效应[J]. 农业机械学报,2023,54(8):309-319.
CUI Wenfang, QIN Dezhi, CHEN Jing, et al. Photosynthetic characteristics and yield marginal effects of different intercropping systems of corn and soybean[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(8):309-319. (in Chinese)

[5] 郝月振. 周口市玉米大豆带状复合种植技术推广研究[D]. 郑州:河南农业大学,2023.
HAO Yuezhen. Research on the promotion of corn-soybean strip compound planting technology in Zhoukou City [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University,2023. (in Chinese)

[6] 孙景彬,刘志杰,杨福增,等. 丘陵山地农业装备与坡地作业关键技术研究综述[J]. 农业机械学报,2023,54(5):1-18.
SUN Jingbin, LIU Zhijie, YANG Fuzeng, et al. A review of key technology research on agricultural equipment and slope operations in hilly mountainous areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(5):1-18.

(in Chinese)

- [7] 任领,张黎骅,丁国辉,等. 2BF-5 型玉米-大豆带状间作精量播种机设计与试验[J]. 河南农业大学学报,2019,53(2): 207-212,226.
REN Ling, ZHANG Lihua, DING Guohui, et al. Design and experiment of 2BF-5 corn-soybean strip intercropping precision planter[J]. Journal of Henan Agricultural University,2019,53(2):207-212,226. (in Chinese)
- [8] 武晓莉,贺龙云,姚晶晶,等. 施氮量对新增耕地肥料利用及大豆产量的影响[J]. 水土保持研究,2016,23(2):106-110,116.
WU Xiaoli, HE Longyun, YAO Jingjing, et al. Effect of nitrogen application on fertilizer use and soybean yield in additional cropland[J]. Research of Soil and Water Conservation,2016,23(2):106-110,116. (in Chinese)
- [9] 杨昌敏,赵帮泰,程方平,等. 大豆玉米复合种植施肥播种一体机研究[J]. 南方农机,2022,53(19):5-7.
YANG Changmin, ZHAO Bangtai, CHENG Fangping, et al. Research on soybean and corn compound planting fertilizer application and seeding integrated machine[J]. China Southern Agricultural Machinery,2022,53(19):5-7. (in Chinese)
- [10] 薛荣. 大豆玉米带状复合种植精量播种机的设计研究[J]. 农业开发与装备,2023(7):139-142.
XUE Rong. Research on the design of precision planter for soybean and corn strip compound planting[J]. Agricultural Development & Equipments,2023(7):139-142. (in Chinese)
- [11] 吴维雄,罗锡文,杨文钰,等. 小麦-玉米-大豆带状复合种植机械化研究进展[J]. 农业工程学报,2015,31(增刊1): 1-7.
WU Weixiong, LUO Xiwen, YANG Wenyu, et al. Research progress on mechanization of wheat-corn-soybean strip compound planting[J]. Transactions of the CSAE,2015, 31(Supp.1): 1-7. (in Chinese)
- [12] 齐彦栋,金诚谦,刘岗微,等. 大豆玉米带状复合种植全程机械化关键技术与装备[J]. 中国农机化学报,2023,44(1): 14-24.
QI Yandong, JIN Chengqian, LIU Gangwei, et al. Key techniques and equipments of the whole-process mechanization for soybean and corn strip compound planting system[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2023,44(1):14-24. (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国农业农村部. 玉米-大豆带状复合种植技术规程:NY/T 2632—2021[S]. 北京:中国农业出版社,2021.
- [14] 顿国强,陈海涛,李昂,等. 刀齿排布旋向对免耕覆秸精播机清秸单体性能的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(12): 48-56.
DUN Guoqiang, CHEN Haitao, LI Ang, et al. Effect of rotation direction of knife teeth configuration on clearing straw unit performance for no-tillage and straw mulching precision seeder[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(12):48-56. (in Chinese)
- [15] 陈海涛,魏志鹏,苏文海,等. 前置式大垄原茬地种床整备装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(10):51-60,73.
CHEN Haitao, WEI Zhipeng, SU Wenhai, et al. Design and experiment of cleaning and anti-blocking of front-mounted seed bed preparation device for grand ridge with raw stubble[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(10):51-60,73. (in Chinese)
- [16] 付国占,李潮海,王俊忠,等. 残茬覆盖与耕作方式对土壤性状及夏玉米水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2005,21(1):52-56.
FU Guozhan, LI Chaohai, WANG Junzhong, et al. Effects of stubble mulch and tillage managements on soil physical properties and water use efficiency of summer maize[J]. Transactions of the CSAE,2005,21(1):52-56. (in Chinese)
- [17] 杨立权,王万章,张红梅,等. 切流-横轴流玉米脱粒系统改进设计及架架试验[J]. 农业工程学报,2018,34(1):35-43.
YANG Liquan, WANG Wanzhang, ZHANG Hongmei, et al. Improved design and bench test based on tangential flow-transverse axial flow maize threshing system[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(1):35-43. (in Chinese)
- [18] 王汉羊. 2BMFJ-3 型麦茬地免耕覆秸大豆精密播种机的研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2013.
WANG Hanyang. Study on 2BMFJ-3 type no-till soybean precision planter with straw-covering in wheat stubble fields[D]. Harbin:Northeast Agricultural University,2013. (in Chinese)
- [19] YANG J Y, DRURY C F, YANG X M, et al. Estimating biological N₂ fixation in Canadian agricultural land using legume yields[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment,2010,137(1/2):192-201.
- [20] 杜勇芝,汪宏伟. 大豆玉米带状复合种植技术分析[J]. 南方农机,2022,53(14):93-95,123.
DU Yongzhi, WANG Hongwei. Analysis of soybean and corn strip compound planting technology[J]. China Southern Agricultural Machinery,2022,53(14):93-95,123. (in Chinese)
- [21] 刘艳芬,林静,李宝筏. 轻量化玉米垄作免耕播种机设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(11):60-69.
LIU Yanfen, LIN Jing, LI Baofa. Design and experiment on lightweight maize ridge planting no-tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(11):60-69. (in Chinese)
- [22] 吴硕. 2BT-4 型荞麦燕麦精量播种机的设计研究[D]. 太原:山西农业大学,2022.
WU Shuo. Research on the design of 2BT-4 buckwheat and oat precision seeder[D]. Taiyuan:Shanxi Agricultural University,2022. (in Chinese)

[12] 苏微, 赵庆辉, 赖庆辉, 等. 辅助充种带气吸式蚕豆精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 144 – 155.
SU Wei, ZHAO Qinghui, LAI Qinghui, et al. Design and experiment of air-suction broad bean seed metering device with flat belt auxiliary seed-filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 144 – 155. (in Chinese)

[13] ABDOLAHZARE Z, MEHDIZADEH S A. Nonlinear mathematical modeling of seed spacing uniformity of a pneumatic planter using genetic programming and image processing[J]. Neural Computing and Applications, 2018, 29(2): 363 – 375.

[14] GAO Xiaojun, XIE Guanfu, LI Jiang, et al. Design and validation of a centrifugal variable-diameter pneumatic high-speed precision seed metering device for maize[J]. Biosystems Engineering, 2023, 227: 161 – 181.

[15] 丁力, 杨丽, 武德浩, 等. 基于 DEM – CFD 耦合的玉米气吸式排种器仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 48 – 57.
DING Li, YANG Li, WU Dehao, et al. Simulation and experiment of corn air suction seed metering device based on DEM – CFD coupling method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 48 – 57. (in Chinese)

[16] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.

[17] 李骅, 马云龙, 於海明, 等. 群组吸孔气吸式芹菜排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 87 – 95.
LI Hua, MA Yunlong, YU Haiming, et al. Design and experiment of group air-suction type celery seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 87 – 95. (in Chinese)

[18] WANG Lijun, ZHANG Shuai, GAO Yunpeng, et al. Investigation of maize grains penetrating holes on a novel screen based on CFD – DEM simulation[J]. Powder Technology, 2023, 419: 118332.

[19] 陈永, 高晓勋, 金鑫, 等. 油莎豆排种离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 58 – 69.
CHEN Yong, GAO Xiaoxun, JIN Xin, et al. Calibration and analysis of seeding parameters of *Cyperus esculentus* seeds based on discrete element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 58 – 69. (in Chinese)

[20] FENG Xin, GONG Zhenping, WANG Lijun, et al. Behavior of maize particle penetrating a sieve hole based on the particle centroid in an air-screen cleaning unit[J]. Powder Technology, 2021, 385: 501 – 516.

[21] 丁力, 杨丽, 张东兴, 等. 气吸式玉米排种器吸附姿态对投种性能的影响分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 40 – 50.
DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Effect of seed adsorption posture of corn air-suction metering device on seed feeding performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 40 – 50. (in Chinese)

[22] 杨薇, 方宪法, 李建东, 等. 种腔自净型气吸式玉米小区精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 64 – 73.
YANG Wei, FANG Xianfa, LI Jiandong, et al. Design and experiment of air-suction precision seed meter with self-clearing seed chamber for corn plot test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 64 – 73. (in Chinese)

[23] 周仁义, 气吸式大豆高速精密排种器设计与试验[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
ZHOU Renyi. Design and experiment of air suction soybean high speed and precision seed metering device[D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese)

[24] 葛宜元, 梁秋艳, 王桂莲. 试验设计方法与 Design-Expert 软件应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2015.

(上接第 212 页)

[23] XU J, SUN S L, HE Z K, et al. Design and optimisation of seed-metering plate of air-suction vegetable seed-metering device based on DEM – CFD[J]. Biosystems Engineering, 2023, 230: 277 – 300.

[24] 牛媛媛, 徐铭辰, 陈海涛, 等. 2BMFJ – 6 型麦茬地大豆免耕覆秸播种机适应性研究[J]. 大豆科学, 2015, 34(3): 497 – 502.
NIU Yuanyuan, XU Mingchen, CHEN Haitao, et al. Study on the adaptability of 2BMFJ – 6 type no-till soybean precision planter with straw-covering in wheat stubble fields[J]. Soybean Science, 2015, 34(3): 497 – 502. (in Chinese)

[25] 徐源. 三向可调式 V 型覆土镇压器设计及其防粘技术研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
XU Yuan. Three-directional adjustable V-type soil-covered roller design and research on anti-sticky technology[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[26] 孙雪松. 马铃薯播种机螺旋推进式排肥器的研究与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
SUN Xuesong. Research and experiment on screw-propelled fertilizer discharger for potato planter[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese)

[27] 王伟伟. 麦秸覆盖地玉米免耕播种机秸秆壅堵机理与防堵技术研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019.
WANG Weiwei. Study on blocking mechanism and anti-blocking technology of maize no-tillage used wheat straw returned field [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019. (in Chinese)