



曲经武,戴飞,史瑞杰,赵武云,马海军,马明义.西北旱区大豆玉米复合种植联合播种机的设计与试验[J].中国农业大学学报,2024,29(05):103-114.
QU Jingwu, DAI Fei, SHI Ruijie, ZHAO Wuyun, MA Haijun, MA Mingyi. Design and experiment of a combined planter for soybean and corn compound
planting in Northwest arid area[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(05): 103-114.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.05.10

西北旱区大豆玉米复合种植联合播种机的设计与试验

曲经武¹ 戴飞^{1*} 史瑞杰¹ 赵武云¹ 马海军² 马明义²

(1. 甘肃农业大学 机电工程学院, 兰州 730070;

2. 甘肃洮河拖拉机制造有限公司, 甘肃 定西 730500)

摘要 针对西北旱区大豆玉米复合种植机具短缺、机械化程度低等问题,设计西北旱区大豆玉米复合种植联合播种机。该机由旋耕装置、起垄装置、覆土装置、施肥装置、播种装置及机架等组成,能够实现旋耕、起垄、施肥、双幅覆膜覆土、镇压及播种等多个作业过程。对播种机关键部件进行设计与分析,利用离散元模型对覆土过程进行模拟仿真,分析覆土过程中膜边膜上覆土均匀性;采用DEM-MBD对大豆玉米播种装置耦合仿真,分析大豆玉米播种装置播种均匀性。仿真结果表明:1)土壤因跳跃和泼撒而落到垄面的颗粒数 $\leq 1.3\%$;2)播种装置对大豆和玉米种子挤压力 ≤ 10 N,土壤颗粒对鸭嘴的阻力 ≤ 50 N。田间试验结果表明:玉米播种装置播种合格率、漏播率和重播率分别为95.63%、1.65%和2.72%,大豆播种装置播种合格率、漏播率和重播率分别为91.24%、0%和8.76%,机组作业期间运行稳定,具有良好的作业效果,满足大豆玉米带状复合种植需求。

关键词 大豆玉米复合种植; 种植模式; 覆土装置; 播种装置; DEM-MBD耦合

中图分类号 S223.2+4

文章编号 1007-4333(2024)05-0103-12

文献标志码 A

Design and experiment of a combined planter for soybean and corn compound planting in Northwest arid area

QU Jingwu¹, DAI Fei^{1*}, SHI Ruijie¹, ZHAO Wuyun¹, MA Haijun², MA Mingyi²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. Gansu Tao River Tractor Manufacturing Co., Ltd., Dingxi 730500, China)

Abstract In response to the shortage of soybean and corn compound planting equipment and low mechanization level in the Northwest arid area, a soybean and corn compound planting combined seeder was designed. This machine is composed of one rotary tillage device, one ridging device, one soil covering device, one fertilization device, one frame, and one seeding device. It can achieve multiple operational processes such as rotary tillage, ridging, fertilization, double film mulching, compaction, and seeding. The key components of the seeder are designed and analyzed, the soil covering process using a discrete element model is simulated, and the uniformity of the soil covering on the membrane edge during the soil covering process is analyzed; The sowing performance of soybean and corn sowing devices was simulated using DEM-MBD coupling, and the uniformity of sowing of soybean and corn sowing devices are analyzed. The simulation results show that: 1) The number of soil particles falling onto the ridge surface due to jumping and scattering is $\leq 1.3\%$; 2) The seeding device exerts a squeezing force of ≤ 10 N on soybean and corn seeds, and the resistance of soil particles to duckbill is ≤ 50 N. The field test results showed that the qualified rate,

收稿日期: 2023-10-24

基金项目: 甘肃省技术创新引导计划科技专员专项(22CX8GA052); 甘肃农业大学伏羲青年英才培养计划项目(Gaufx-03Y01)

第一作者: 曲经武(ORCID: 0009-0009-3954-6717), 硕士研究生, E-mail: 2368658974@qq.com

通讯作者: 戴飞(ORCID: 0000-0002-6847-7003), 教授, 博士, 主要从事西北旱区膜土-机器-作物互作系统机理研究, E-mail: daifei@gsau.edu.cn

missed rate, and replant rate of the corn sowing device were 95.63%, 1.65%, and 2.72%, respectively, while the qualified rate, missed rate, and replant rate of the soybean sowing device were 91.24%, 0%, and 8.76%, respectively. In conclusion, the unit operates stably during the operation period and has good operational effects, which meet the requirements of soybean corn strip composite sowing.

Keywords soybean and corn compound planting; cropping pattern; soil covering device; seed metering device; DEM-MBD coupling

大豆和玉米是我国主要的粮食作物^[1-2]。近年来,我国大豆需求中有八成以上依靠于进口,为保障我国粮食安全,缓解进口压力,国家采取了一系列措施提高国内大豆产量,解决大豆和玉米供需矛盾^[3-4]。随着大豆玉米复合种植面积不断扩大^[5],现有的手扶式播种机存在机械化程度低和劳动成本高等问题,严重制约我国大豆玉米复合种植技术的推广^[6]。为更快完成适期大豆玉米复合种植,减少劳动力投入,需加大对大豆玉米复合种植联合播种机具的研究。

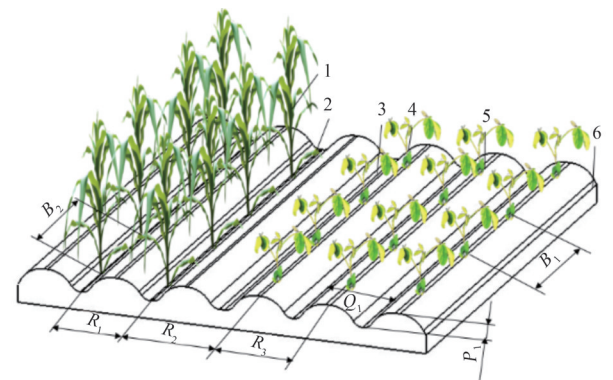
目前,大豆玉米复合种植技术在我国应用相对较少,针对大豆玉米复合种植模式的相关机具也相对少。韩丹丹等^[7]研制了大豆-玉米带状间作免耕精量播种机,采用分调分控系统和电驱式排肥系统,分别控制实现大豆玉米株距、播深、镇压力度、施肥量的可调可控,但穴距合格率小于90%;薛荣^[8]研制了气吹式大豆玉米带状复合种植精量播种机,采用高速风机产生正压,供给集成排种器的风嘴和输种管的空气放大器接气口。排种器上的型孔排种盘在旋转的过程中将单粒玉米、双粒大豆种子均匀排出,但存在播种质量差等作业要求;杨昌敏等^[9]研制了大豆玉米复合种植施肥播种一体机,设计的外槽轮排种器加装了限位装置,设计了防堵组件,实现辅助震动操作,但播种效果较差,穴粒数合格率低。西北地区大豆玉米复合种植主要以手推式、牵引式播种机分时段播种、单行播种,缺少大豆玉米复合播种机具。

本研究拟针对西北地区大豆玉米复合种植机具短缺,机械化程度低等问题,设计大豆玉米复合种植联合播种机,采用DEM-MBD模拟仿真对大豆玉米播种装置进行试验分析,以期为大豆玉米复合种植联合播种机的设计提供参考。

1 大豆玉米复合种植农艺要求

针对西北地区干旱少雨,昼夜温差大等特征^[10],为提高土地利用率,减少土壤水分流失,提高

大豆玉米种子发芽率,在设计过程中,选择幅宽为1 200 mm,厚度0.01 mm的双幅白色地膜重叠覆盖,在起垄农艺作业时,地膜重叠部分基本可以实现地膜边界相接而不叠加。地膜全膜覆盖种植,可以抑制杂草生长,更能提高土壤水肥利用率,保持土壤适宜的温度和湿度,减缓低温下降速度,利于肥料的腐熟与分解,提高土壤肥力^[11]。西北的主要种植模式是“2+3”模式^[12],即2行玉米3行大豆间作套种(图1)。



1. 玉米植株;2. 垄沟;3. 地膜重叠区;4. 大豆植株;5. 垄体;6. 地膜边界。

B_1 和 B_2 为大豆和玉米株距; R_1 、 R_2 和 R_3 分别为玉米行间距、大豆玉米行间距、大豆行间距; P_1 为垄高; Q_1 为垄宽。

1. Corn plants;2. Furrow;3. Overlapping area of plastic film;
4. Soybean plant;5. Ridge body;6. Geomembrane boundary.

B_1 and B_2 represent the plant spacing of soybeans and corn. R_1 , R_2 , and R_3 represent the spacing between maize rows, soybean maize rows, and soybean rows, respectively. P_1 represents ridge height. Q_1 is the ridge width.

图1 大豆玉米带状复合种植“2+3”模式图

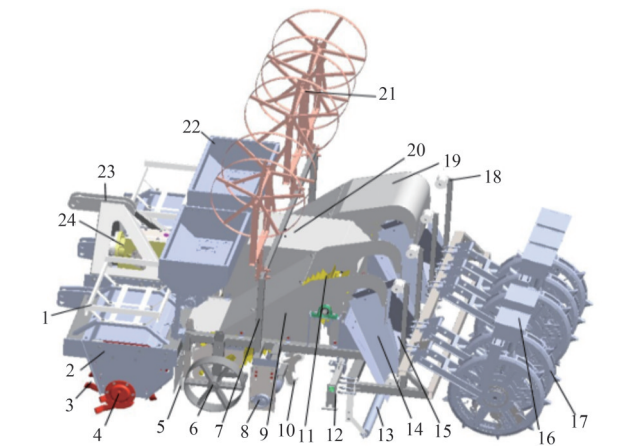
Fig. 1 Diagram of the "2+3" pattern for soybean and corn belt compound planting

2 整机结构与工作原理

2.1 整机结构

大豆玉米复合种植联合播种机由旋耕装置、起垄装置、提土装置、覆土装置、滴灌带铺设装置、地

膜铺设装置、镇压装置、施肥装置、机架及大豆和玉米播种装置等组成,整机结构见图2,技术参数见表1。



1. 水箱支架;2. 机架;3. 旋耕刀;4. 旋耕刀轴;5. 施肥铲;
6. 地轮;7. 滴灌带支撑架;8. 起垄装置;9. 提土链外壳;10. 滴灌带下导引轮;11. 提土链;12. 挂膜架;13. 展膜辊;14. 侧边溜土槽;15. 中间溜土槽;16. 种箱;17. 播种装置;18. 滴灌带上导引轮;19. 提土链防尘罩;20. 过桥传动箱;21. 滴灌带轮;22. 肥箱;23. 三点悬挂支架;24. 变速箱。

1. Water tank bracket; 2. Rack; 3. Rotary blade; 4. Rotary blade shaft; 5. Fertilizer shovel; 6. And wheel; 7. Drip irrigation belt support frame; 8. Ridging device; 9. Earth lifting chain shell; 10. Drip irrigation with lower guide wheel; 11. Soil lifting chain; 12. Film hanging rack; 13. Film spreading roller; 14. Side chute; 15. Middle soil chute; 16. Seed box; 17. Seeding device; 18. Drip irrigation with lower guide wheel; 19. Dust cover for soil lifting chain; 20. Bridge transmission box; 21. Drip irrigation pulley; 22. Fertilizer box; 23. Three point suspension bracket; 24. Transmission.

图2 大豆玉米复合种植联合播种机结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the structure of the soybean corn composite seeder

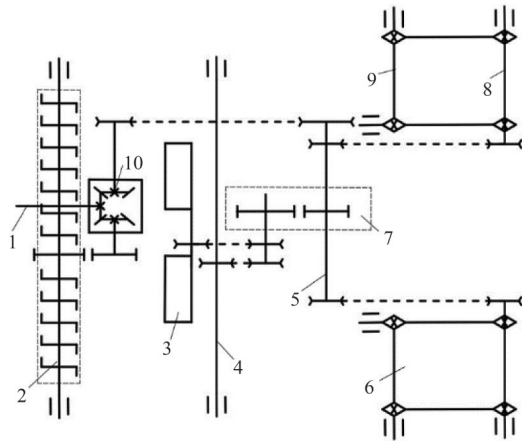
2.2 传动系统与工作原理

整机采用三点悬挂式与拖拉机相连接,拖拉机后动力输出轴与变速箱输入轴通过传动轴连接实现动力输入,变速箱输入轴带动锥齿轮向下传输动力,带动旋耕刀工作,向侧面传输动力带动,通过链传动带动过桥传动系统工作,过桥传动系统输出动力分别带动左右两侧提土链、肥箱轮轴及起垄装置运动,其传动系统原理见图3。

表1 大豆玉米复合种植联合播种机技术参数

Table 1 Technical parameters of soybean corn composite seeder

参数 Parameter	数值 Value
整机尺寸(长×宽×高)/(m×m×m) Dimensions(length×width×height)	3.2×3.05×2.11
配套动力/kW Auxiliary power	73.5~110.3
作业速度/(km/h) Operating speed	3.5~5
播种行数 Number of rows sown	大豆,3; 玉米,2
行距/mm Space	大豆,300; 玉米,400
大豆玉米行间距/mm Soybean corn row spacing	700
工作幅宽/m Working width	2.3
播种深度/mm Sowing depth	大豆:3~5; 玉米:4~6
旋耕深度/mm Rotary tillage depth	100~150
生产率/(hm ² /h) Productivity	0.75~1.62



1. 动力输入轴;2. 旋耕刀组;3. 肥箱;4. 起垄装置;5. 过桥传动轴;6. 提土链;7. 过桥传动箱;8. 提土链链轮轴;9. 提土链托链轮轴;10. 变速箱。

1. Power input shaft; 2. Rotary blade group; 3. Fertilizer box; 4. Ridging device; 5. Bridge transmission shaft; 6. Soil lifting chain; 7. Bridge transmission box; 8. Earth lifting chain wheel shaft; 9. Lifting chain supporting roller shaft; 10. Transmission.

图3 大豆玉米复合种植联合播种机传动系统

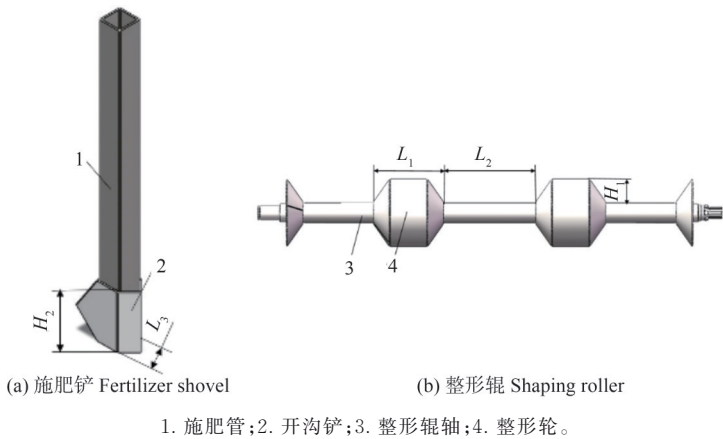
Fig. 3 Transmission system of soybean corn composite seeder

拖拉机前进过程中,旋耕刀旋耕翻土,提土链将旋耕后的土壤提升,由溜土槽抛下,覆盖在地膜上方,完成机具的旋耕覆土过程。施肥铲在旋耕后的土壤上开沟施肥、起垄装置将土壤开沟起垄、铺设滴灌带、挂膜架铺设地膜,展膜辊展平地膜,播种装置依靠自身重力及机具牵引力实现播种,完成整个作业过程。

3 关键部件设计

3.1 起垄装置

起垄装置是保证覆土效果的重要依托,主要包括施肥铲和整形辊 2 部分(图 4)。大豆玉米复合种植联合播种机工作时,旋耕刀组旋耕松土,施肥铲配合整形辊对疏松土壤开沟起垄。



1. 施肥管;2. 开沟铲;3. 整形辊轴;4. 整形轮。
 L_1 、 L_2 和 L_3 分别为整形辊开沟宽度、整形辊垄面宽度和施肥铲宽度; H_1 和 H_2 为铲尖高度和整形辊开沟高度。
1. Fertilization tube;2. Furrower;3. Shaping roller shaft;4. Shaping wheel.
 L_1 , L_2 , and L_3 represent the width of the shaping roller groove, the width of the shaping roller ridge surface, and the width of the fertilizer shovel, respectively; H_1 and H_2 are the shovel tip height and the groove opening height of the shaping roller.

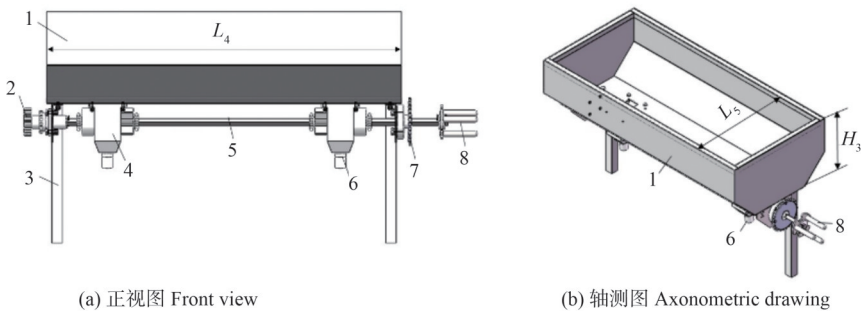
图 4 施肥铲和整形辊结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of fertilizer shovel and shaping roller structure

3.2 施肥装置

施肥装置是大豆玉米复合种植联合播种机重要组成部分,主要包括肥料箱、调节手柄、大槽轮

塑料排肥器、排肥轴、排肥轴联轴器、链轮等,施肥装置结构见图 5。



1. 肥料箱;2. 左调节手柄;3. 肥料箱支座;4. 大槽轮塑料排肥器;5. 排肥轴;6. 排肥器接口;7. 链轮;8. 排肥轴联轴器。
 L_4 、 L_5 和 H_3 分别为肥料箱的长、宽、高。
1. Fertilizer box;2. Left adjustment handle;3. Fertilizer box support;4. Large groove wheel plastic fertilizer discharger;5. Fertilizer discharge shaft;6. Fertilizer feeder interface;7. Sprocket;8. Fertilizer discharge shaft coupling.
 L_4 , L_5 , and H_3 represent the length, width, and height of the fertilizer box, respectively.

图 5 施肥装置结构

Fig. 5 Structure diagram of fertilization device

施肥装置工作时,由链轮带动排肥轴转动,大槽轮塑料排肥器随之工作,通过排肥轴联轴器带动右侧施肥装置同时工作。依据大豆玉米复合种植农艺要求,肥料箱容积为:

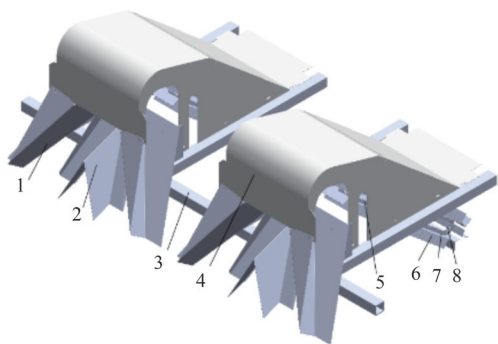
$$C = \frac{1.1L_1B_1Q_{\max}}{10000\lambda_1} \quad (1)$$

式中: C 为肥料箱容积, L ; B_1 为肥料箱作业幅宽,本研究取2 300 mm; L_1 为满足肥料箱中肥料的施肥距离,取1 000 m; λ_1 为肥料颗粒密度,取1.86 kg/L^[13]; $Q_{\max}$ 为单位面积最大施肥量,取378 kg/hm²^[14]。由式(1)计算得 $C=51.5$ L。

3.3 覆土装置

3.3.1 结构设计

覆土装置是大豆玉米复合种植联合播种机的重要装置,覆土均匀性和覆土量决定了播种机的播种质量和地膜抗风揭膜能力。当覆土量过大时,种床采光面积减少,严重影响膜下地表温度,制约农作物根系生长;覆土量过小时,则地膜的抗风揭膜能力降低,难以抵制大风揭膜等现象。覆土装置主要由提土链、提土链外壳、溜土槽组成。提土链由链条与提土板组成,将旋耕后的土壤提升到顶端,待到覆膜后,土壤沿提土板抛出,由溜土槽落下,提土链外壳阻挡提升后的土壤飞溅,覆土装置见图6。



1. 边溜土槽;2. 中间溜土槽;3. 机架;4. 溜土槽外壳;5. 溜土槽链轮轴;6. 提土板;7. 提土链;8. 溜土槽拖链轮轴。

1. Side chute; 2. Middle soil chute; 3. Rack; 4. Chute shell; 5. Chute chain wheel shaft; 6. Soil lifting board; 7. Soil lifting chain; 8. Chute drag chain wheel axle.

图6 覆土装置轴测图

Fig.6 Axonometric drawing of soil covering device

膜上覆土量计算公式^[15]为:

$$\begin{cases} Q_1 = \gamma l_1 B_1 H_1 \\ Q_2 = \gamma l_2 B_2 H_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: Q_1 为膜上覆土量,kg; Q_2 为膜边覆土量,kg; γ 为土壤容重,本研究取1 300 kg/m³; l_1 和 l_2 为单位覆土长度,取1 000 mm; B_1 为膜上覆土宽度,取40 mm, B_2 为膜边覆土宽度,取30 m; H_1 为膜上覆土厚度,取20 m, H_2 为膜边覆土厚度,取30 mm。由式(2)计算分别得: $Q_1=1.56$ kg, $Q_2=0.78$ kg。

膜上覆土总量 Q 为:

$$Q = 4Q_1 + 4Q_2 \quad (3)$$

由式(3)计算得 $Q=9.36$ kg。

3.3.2 仿真数据

为验证覆土装置覆土均匀性,采用离散元方法模拟土壤颗粒的覆土过程,覆土土壤颗粒选取直径为4 mm的球形颗粒,覆土过程中模型相关材料接触参数见表2^[16-17]。

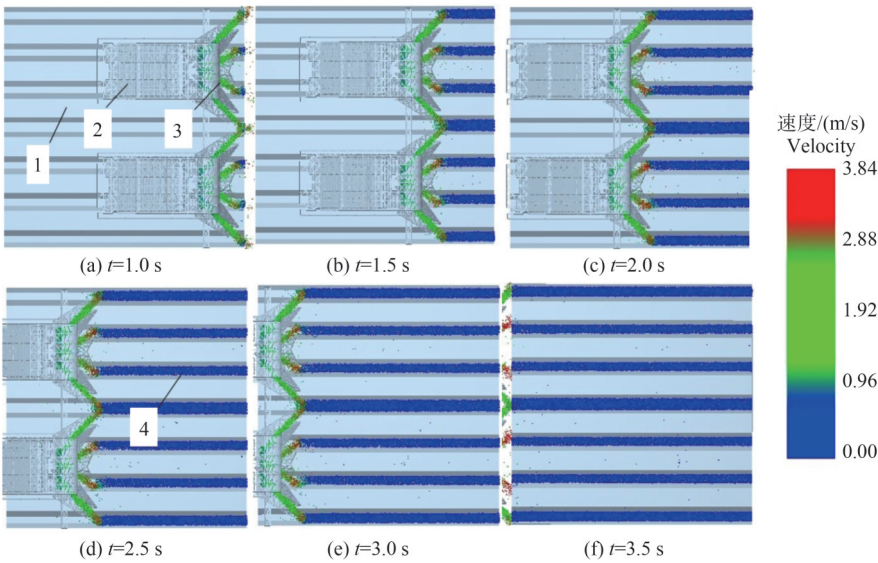
表2 覆土过程中模型相关材料接触参数

Table 2 Contact parameters of model related materials during soil covering process

材料 Material	参数 Parameter	数值 Price
土壤颗粒 Soil particles	泊松比	0.4
	剪切模量/MPa	100
	密度/(kg/m ³)	1 364
覆土装置 Soil covering device	泊松比	0.28
	剪切模量/MPa	3 500
	密度/(kg/m ³)	7 850
土壤-土壤 Soil-Soil	碰撞恢复系数	0.21
	静摩擦因数	0.68
	动摩擦因数	0.27
土壤-覆土装置 Soil- Soil covering device	碰撞恢复系数	0.54
	静摩擦因数	0.68
	动摩擦因数	0.27

3.3.3 仿真分析

对地膜覆土过程进行仿真模拟,结果见图7。设置仿真时间步长为 1×10^{-5} s,仿真共进行4 s,机组前进速度为1 m/s,提土链转速150 r/min,颗粒工厂为500 mm×300 mm的2个长方形平面,颗粒工厂共生成50 000个土壤颗粒。当仿真时间 $t=0$ s时,颗粒工厂开始生成土壤颗粒并向下掉落; $t=0.6$ s时,机具开始向前移动; $t=1$ s时,土壤颗粒开始掉落到土壤上,伴随机组不断前进,土壤颗粒均匀落到垄沟内,由于惯性和重力作用,少量土壤颗粒出现了泼撒和跳跃现象,撒落到垄面上,使得覆土效果受到一定影响。



t 为离散元仿真时间,图8同。 t is the discrete element simulation time. Fig. 8 is same.
1. 起垄后的土壤;2. 提土链;3. 溜土槽;4. 土壤颗粒。
1. The soil after ridge formation;2. Soil lifting chain;3. Soil chute;4. Soil particles.

图7 覆土装置覆土过程模拟结果

Fig. 7 Simulation results of the soil covering process of the soil covering device

为更直观的观察覆土均匀性,对膜边覆土、膜上覆土及膜间覆土进行对比分析,对每个垄沟进行网格划分,统计覆土颗粒数量及速度,结果见图8。膜

间需要覆盖两侧地膜膜边,覆土量最多,膜边覆土量相对较多,双侧膜边覆土,以防西北地区大风揭膜现象,膜上覆土量最少,起到稳固地膜的作用。

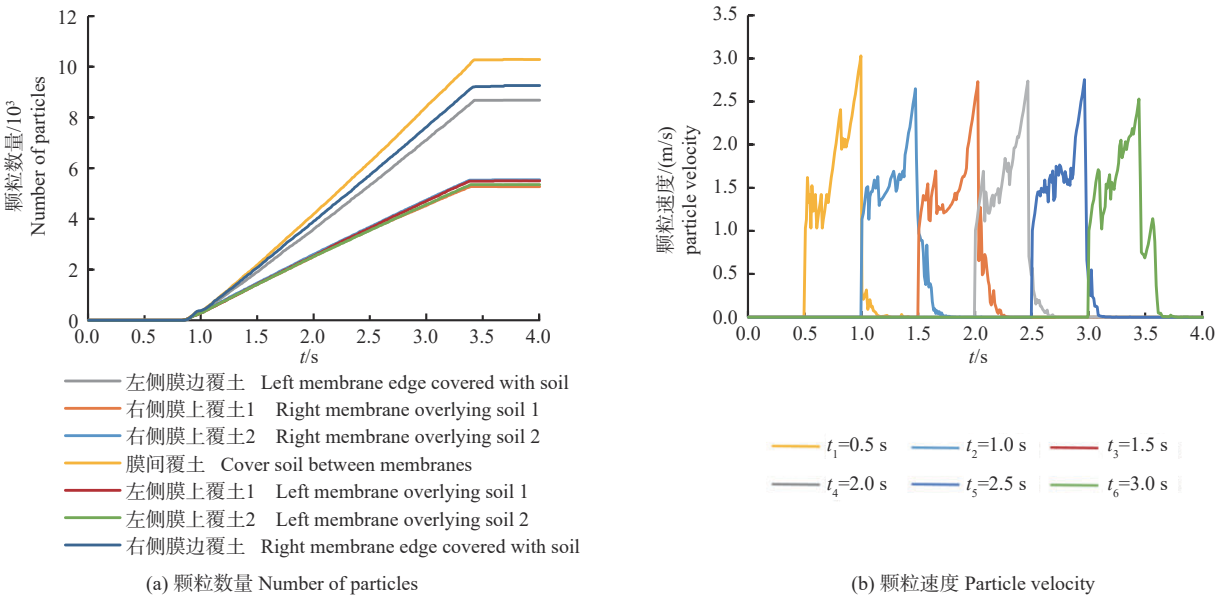


图8 离散元仿真过程中覆土颗粒数量及速度变化

Fig. 8 Diagram of changes in soil particles and velocity during discrete element simulation

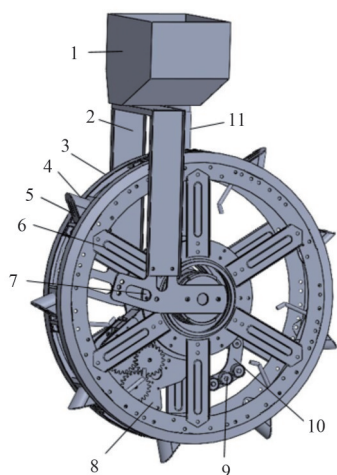
3.4 播种装置

3.4.1 播种装置结构

播种装置主要由种箱、动盘、动盘辐条、动鸭

嘴、静鸭嘴、排种盒、中轴、动盘法兰、排种轮、毛刷轮等部分组成(图9)。

播种装置工作过程中,大豆和玉米分别由种箱落



1. 种箱;2. 种箱固定板;3. 动盘;4. 动鸭嘴;5. 定鸭嘴;6. 动盘辐条;7. 动盘法兰;8. 排种盒;9. 拨轮;10. 摆盘;11. 导种软管。

1. Seed box;2. Seed box fixing plate;3. Driven plate;4. Move the duck's beak;5. Seed box fixing plate;6. Moving disc spoke;7. Moving disc flange;8. Planter plate;9. Thumbwheel;10. Plating;11. Seed guide hose.

图9 播种装置轴侧图

Fig. 9 Structure diagram of hole sowing tray

入由排种轮、毛刷轮组成的排种盒中,排种轮工作过程中,工作时,随着排种轮转动,种子在自身重力、种群作用力等作用下进入型孔,清种毛刷与排种轮转动方

向相同,即毛刷旋转方向与排种轮旋转方向相同,将多余的种子排出型孔,使型孔中始终保留1粒种子(大豆保留2粒),当型孔移动到排种口上方区域,种子在自身重力和离心力的作用下从型孔内脱离,从排种口排出,掉入鸭嘴,鸭嘴拨杆与拨轮接触,鸭嘴张开,完成播种。为防止种子在窝眼内卡种而造成漏播,在播种装置内安装有推种片,将窝眼内的种子及时排出。

播种装置排种轮转速为:

$$n = \frac{v}{\pi d} \times \frac{Q}{P} \quad (4)$$

式中: n 为排种轮转速,r/min; v 为播种装置线速度,即机具前进速度,本研究中取1 m/s, d 为播种装置直径,取 $d=730$ mm; Q 为排种轮窝眼数量,取8个; P 为播种装置鸭嘴数量,取9个。由式(4)计算得 $n=23.26$ r/min。

3.4.2 仿真数据

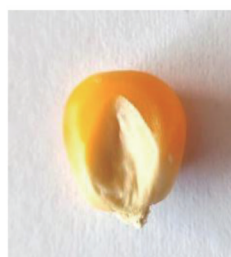
试验材料选取玉米品种为‘金穗3号’,大豆品种为‘中黄30’,所选种子颗粒饱满、无损伤。采用四分法选取100粒测其百粒质量,采用游标卡尺测量大豆和玉米的几何尺寸。大豆长、宽、高平均值分别为6.96、6.34、5.25 mm,玉米长、宽、高平均值分别为10.94、7.48、5.04 mm。大豆和玉米籽粒实物图及离散元模型见图10。



(a) 大豆实物图
(a) Physical image of soybean



(b) 大豆模型
(b) Soybean modeling



(c) 玉米实物图
(c) Physical image of corn



(d) 玉米模型
(d) Corn modeling

图10 大豆和玉米籽粒实物图及离散元模型

Fig. 10 Physical images and discrete element models of soybean and corn grains

利用DEM-MBD对播种装置进行耦合仿真分析,仿真过程采用Hertz-Mindlin无滑移接触模型,参考相关研究^[18-22],确定相关参数见表3。

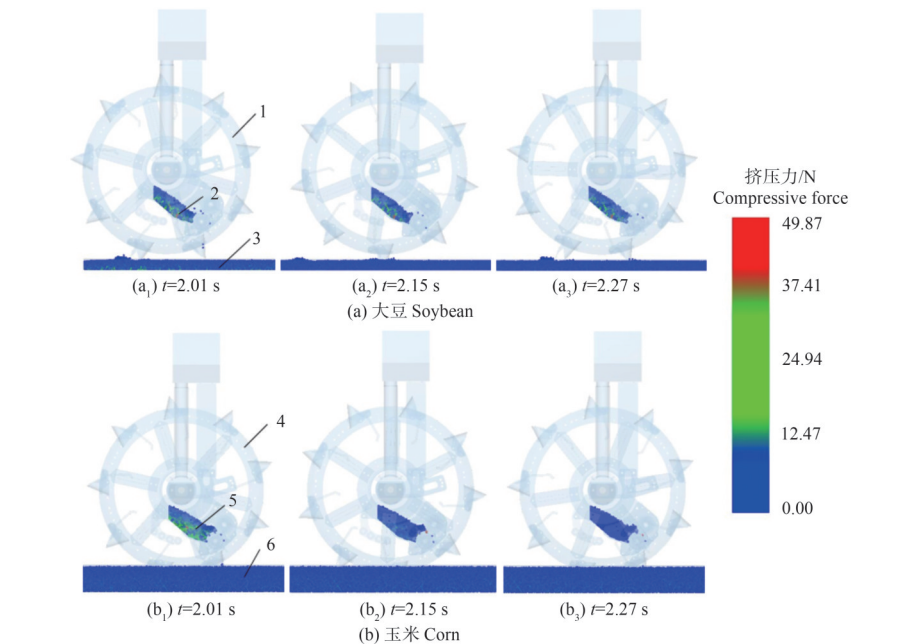
3.4.3 仿真分析

利用DEM-MBD耦合仿真实现大豆和玉米播种过程。仿真过程中,当 $t=0$ s时,颗粒工厂开始生成大豆和玉米颗粒各1 000粒。 $t=0.32$ s时,播种

装置开始旋转,排种轮充种,减少仿真过程中出现空穴的情况; $t=1.6$ s时,播种装置开始向前移动; $t=2.01$ s时,鸭嘴出土,下一鸭嘴即将入土; $t=2.15$ s时,鸭嘴完全入土,动鸭嘴与波轮接触打开鸭嘴,种子落下; $t=2.27$ s时,鸭嘴出土并准备闭合,完成1次播种过程。仿真试验大豆和玉米播种过程见图11。

表3 EDEM中物料属性及接触参数
Table 3 Material properties and contact parameters in EDEM

材料 Material	参数 Parameter	数值 Price	材料 Material	参数 Parameter	数值 Price
大豆籽粒 Soybean seeds	泊松比	0.23	大豆-外壳 Soybean-Housing	碰撞恢复系数	0.47
	剪切模量/MPa	63		静摩擦因数	0.49
	密度/(kg/m ³)	1 290		动摩擦因数	0.15
玉米籽粒 Corn seeds	泊松比	0.375	大豆-土壤 Soybean-Soil	碰撞恢复系数	0.072
	剪切模量/MPa	217		静摩擦因数	0.57
	密度/(kg/m ³)	1 250		动摩擦因数	0.155
外壳 Housing	泊松比	0.28	玉米-玉米 Corn-Corn	碰撞恢复系数	0.6
	剪切模量/MPa	3 500		静摩擦因数	0.5
	密度/(kg/m ³)	7 850		动摩擦因数	0.01
毛刷 Brush	泊松比	0.4	玉米-毛刷 Corn-Brush	碰撞恢复系数	0.45
	剪切模量/MPa	100		静摩擦因数	0.5
	密度/(kg/m ³)	1 150		动摩擦因数	0.01
土壤 Soil	泊松比	0.39	玉米-外壳 Corn-Housing	碰撞恢复系数	0.6
	剪切模量/MPa	100		静摩擦因数	0.3
	密度/(kg/m ³)	1 450		动摩擦因数	0.01
大豆-大豆 Soybean-Soybean	碰撞恢复系数	0.3	玉米-土壤 Corn-Soil	碰撞恢复系数	0.068
	静摩擦因数	0.39		静摩擦因数	0.57
	动摩擦因数	0.17		动摩擦因数	0.155
大豆-毛刷 Soybean-Brush	碰撞恢复系数	0.45	外壳-土壤 Housing-Soil	碰撞恢复系数	0.54
	静摩擦因数	0.5		静摩擦因数	0.68
	动摩擦因数	0.01		动摩擦因数	0.27



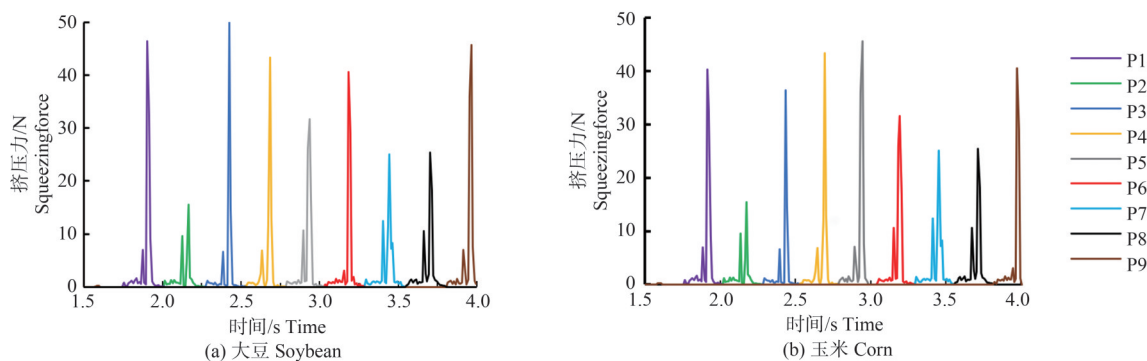
1. 大豆播种装置; 2. 大豆颗粒; 3. 垄体; 4. 玉米播种装置; 5. 玉米颗粒; 6. 垄沟。
1. Soybean seeder; 2. Soybean granules; 3. Ridge body; 4. Corn planter; 5. Corn granules; 6. Furrow.

图11 仿真试验大豆和玉米播种过程

Fig. 11 Simulation experiment on soybean and corn sowing process

大豆和玉米播种过程中,土壤对动鸭嘴的阻力见图12,动鸭嘴所受阻力 <50 N,不影响动鸭嘴的开闭。当某一鸭嘴即将入土时,上一鸭嘴出土,此时入土鸭嘴拨开土壤,当鸭嘴完全贯入土壤,大豆

鸭嘴入土深度为30 mm,玉米鸭嘴入土深度为40 mm,随着机具的前进,动鸭嘴与拨轮碰撞并打开,种子从鸭嘴落下,随后关闭鸭嘴完成整个排种过程。



P1, P2, ..., P9 为播种装置的9个鸭嘴。

P1, P2, ..., and P9 are the 9 duckbills of the seeding device.

图12 大豆和玉米播种装置鸭嘴所受挤压力

Fig. 12 Changes in Squeezing Pressure on the Duck Mouth of a Corn Planter and Soybean Corn Planter

为确保播种穴距合格率及播深合格率,大豆玉米播种通常采用“零速投种”的播种方式。在 EDEM 软件中采用 Manual Selection 对大豆和玉米种子进行标记,种子在播种过程中的速度

变化见图13。种子下落过程相对平稳,种子与土壤接触后,存在反弹(速度 <0.05 m/s)和滑动运动,在0.05 s内趋于稳定,对播种效果影响极小。

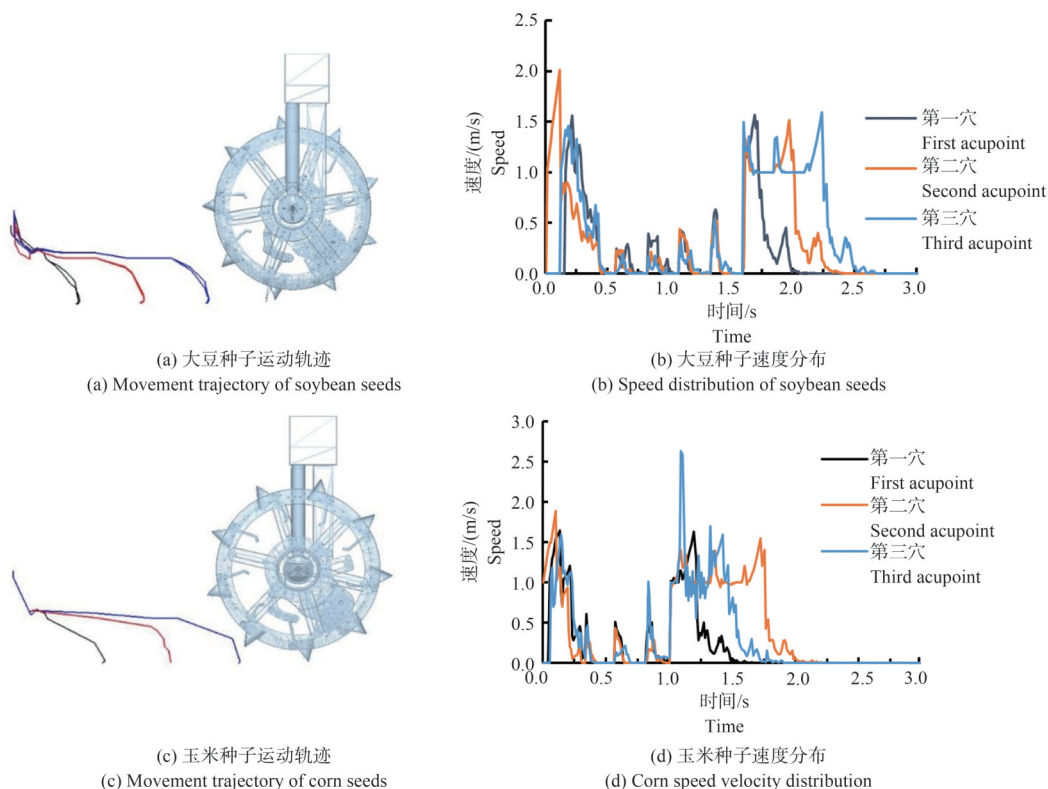


图13 大豆和玉米种子运动轨迹及速度

Fig. 13 Movement trajectory and speed of soybean and corn seeds

4 田间试验

4.1 试验材料

大豆玉米复合种植联合播种机的作业性能试验于2023年4月20—25日在甘肃洮河拖拉机制造有限公司进行,试验场地地势平坦,面积为5.1 km²。所种大豆品种为‘中黄30’,百粒重20.6~22.0 g,种植株距12 cm,行距30 cm,播种量37.1~39.6 kg/hm²;玉米品种为‘金穗3号’,百粒重33.2~34.8 g,种植株距12 cm,行距40 cm,播种量24.9~26.1 kg/hm²。样机配套动力为110 kW 农用拖拉机,前进速度1 m/s,使用宽1.2 m,厚0.01 mm的白色地膜。

4.2 试验方法及结果

在试验场地内,用卷尺测出长50 m,宽度满足机具往返2个行程作业要求,两端预备区域15 m。采用五点取样法进行取样和测量,按照GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》^[23]和NY/T 987—2006《铺膜穴播机作业质量》^[24]的要求,测定播种机的空穴率、穴粒数合格率、播种深度合格率、穴距合格率、膜边覆土厚度合格率和膜上覆土厚度合格率,机具田间试验结果见表4。试验结果基本符合GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》^[23]和NY/T987—2006《铺膜穴播机作业质量》^[24]的要求。

表4 机具田间试验结果
Table 4 Field test results of machines and tools %

参数 Parameter	试验值 Test value		标准值 ^[23-24] Standard value ^[23-24]
	大豆 Soybean	玉米 Corn	
空穴率 Hole rate	0	1.6	≤ 2
穴粒数合格率 Pass rate of hole number	90.8	90.4	≥ 85
播种深度合格率 Qualified rate of sowing depth	89.2	85.6	≥ 85
穴距合格率 Pass rate of hole spacing	99.2	96.8	≥ 90
膜边覆土宽度合格率 Qualified rate of membrane edge soil coverage width	97.6	97.6	≥ 95
膜边覆土厚度合格率 Qualified rate of membrane edge soil cover thickness	97.6	97.6	≥ 95

5 结束语

本研究基于大豆玉米复合种植技术农艺要求及种植模式,设计了一种大豆玉米复合种植联合播种机,对机具关键作业部件进行结构和参数设计,应用EDEM软件对覆土装置进行仿真试验,研究覆土过程中膜边膜上覆土均匀性;采用DEM-MBD耦合对大豆玉米播种装置播种性能耦合仿真,分析大豆玉米播种装置播种均匀性。

仿真结果表明,土壤因跳跃和泼撒而落到垄面的颗粒数≤1.3%,播种装置对大豆和玉米种子挤压力≤10 N,土壤颗粒对鸭嘴的阻力≤50 N。覆土过程中膜间覆土带土壤颗粒过多,影响大豆玉米种子生长;播种装置对大豆和玉米种子及土壤颗粒对鸭嘴的挤压力均较小,不会破坏大豆和玉米种子,也不会造成鸭嘴的损伤,机具功耗小。田间试验表明,大豆玉米复合种植联合播种机田间试验指标均

符合GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》^[23]和NY/T987—2006《铺膜穴播机作业质量》^[24]的要求,田间试验结果与仿真结果基本一致。

参考文献 References

[1] 王昕彤,奚小波,陈猛,黄盛杰,金亦富,张瑞宏. 大豆玉米带状复合种植技术与装备发展现状[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(11):36-45
Wang X T, Xi X B, Chen M, Huang S J, Jin Y F, Zhang R H. Development status of soybean and corn strip composite planting technology and equipment [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(11):36-45 (in Chinese)

[2] 齐彦栋,金诚谦,刘岗微,杨腾祥. 大豆玉米带状复合种植全程机械化关键技术及装备[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(1):14-24
Qi Y D, Jin C Q, Liu G W, Yang T X. 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)

[3] 刘燕,陈彬,于庆旭,裴亮,缪友谊,陈小兵,谭本垠. 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 Y, Chen B, Yu Q X, Pei L, Miao Y Y, Chen X B, Tan B Y. Research progress of mechanization technology and equipment of soybean and corn strip compound planting[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2023, 44(1):39-47 (in Chinese)
- [4] 吕小荣,陈小虎,杨璐杰,刘铮,唐鹏,涂心叶. 大豆玉米气吸式播种机补种系统的设计与试验[J]. 四川农业大学学报, 2023, 41(5):826-833
- Lyu X R, Chen X H, Yang L J, Liu Z, Tang P, Tu X Y. Design and experiment of missing seeding detection and reseeding control system for soybean and corn air-suction seeder[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2023, 41(5):826-833 (in Chinese)
- [5] 吴雄维,罗锡文,杨文钰,彭淑卉. 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(S1):1-7
- Wu W X, Luo X W, Yang W Y, Peng S H. Review on mechanization of strip compound planting system of wheat-maize-soybean [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(S1):1-7 (in Chinese)
- [6] 袁晓婷,汤松,罗凯,蒋靖怡,杨文钰,雍太文. 大豆玉米带状复合种植产量与效益分析:基于全国16个示范省(市、区)的调查数据[J]. 四川农业大学学报, 2023, 41(5):834-841, 872
- Yuan X T, Tang S, Luo K, Jiang J Y, Yang W Y, Yong T W. Yield and benefit analysis of soybean and maize strip compound planting: Based on survey data of 16 demonstration provinces (municipalities, autonomous regions)[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2023, 41(5): 834-841, 872 (in Chinese)
- [7] 韩丹丹,何彬,杨文钰,徐友,吕小荣,张黎骅. 气吸式大豆-玉米带状间作播种机的设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报, 2023, 58(4):260-268
- Han D D, He B, Yang W Y, Xu Y, Lv X R, Zhang L H. Design and experiment of an integrated air-suction soybean-corn strip intercropping planter[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2023, 58(4):260-268 (in Chinese)
- [8] 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 R. Design and research of precision seeder for soybean and corn strip compound planting [J]. *Agricultural Development and Equipments*, 2023(7):139-142 (in Chinese)
- [9] 杨昌敏,赵帮泰,程方平,梅林森,宋乐见,张巍,王义鹏,刘琳. 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 C M, Zhao B T, Cheng F P, Mei L S, Song L J, Zhang W, Wang Y P, Liu L. Study on integrated machine of soybean and corn compound planting, fertilization and sowing [J]. *South Agricultural Machinery*, 2022, 53(19):5-7 (in Chinese)
- [10] 戴飞,赵武云,张锋伟,马海军,辛尚龙,马明义. 西北雨养区全膜双垄沟播技术与配套机具研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5):1-16
- Dai F, Zhao W Y, Zhang F W, Ma H J, Xin S L, Ma M Y. Research progress analysis of furrow sowing with whole plastic-film mulching on double ridges technology and machine in northwest rainfed area [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(5):1-16
- [11] 马忠明,白玉龙,薛亮,杜少平. 不同覆膜栽培方式对旱地土壤水热效应及西瓜产量的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(3): 514-522
- Ma Z M, Bai Y L, Xue L, Du S P. Effects of different plastic film mulching methods on soil water and temperature as well as watermelon yield in loess dryland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(3): 514-522 (in Chinese)
- [12] 田旭,张春林,王帮高. 大豆玉米带状复合种植机械化技术与装备应用[J]. 农业机械, 2022(8):59-61
- Tian X, Zhang C L, Wang B G. Mechanized technology and equipment application of soybean and corn belt compound planting [J]. *Farm Machinery*, 2022(8):59-61 (in Chinese)
- [13] 顿国强,刘文辉,杜佳兴,周成,毛宁,纪文义. 弧槽双螺旋式排肥器优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10):118-125, 174
- Dun G Q, Liu W H, Du J X, Zhou C, Mao N, Ji W Y. Optimal design and experiment of arc-groove double-spiral fertilizer discharge device[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(10):118-125, 174 (in Chinese)
- [14] 戴飞,赵武云,马明义,王久鑫,石林榕,马军民. 双垄耕作施肥喷药覆膜机工作参数优化[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1):83-90
- Dai F, Zhao W Y, Ma M Y, Wang J X, Shi L R, Ma J M. Parameters optimization of operation machine for tillage-fertilization and spraying-filming on double ridges [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(1):83-90 (in Chinese)
- [15] 孙伟,刘小龙,石林榕,张华,刘全威,吴建民. 刮板升运带式膜上覆土装置覆土特性[J]. 机械工程学报, 2016, 52(7):38-45
- Sun W, Liu X L, Shi L R, Zhang H, Liu Q W, Wu J M. Covering soil on plastic-film characteristics of scraper lifting belt mechanism [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(7):38-45 (in Chinese)
- [16] 戴飞,宋学锋,赵武云,张锋伟,马海军,马明义. 全膜双垄沟覆膜土壤离散元接触参数仿真标定[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2):49-56, 77
- Dai F, Song X F, Zhao W Y, Zhang F W, Ma H J, Ma M Y. Simulative calibration on contact parameters of discrete elements for covering soil on whole plastic film mulching on double ridges [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(2):49-56, 77 (in Chinese)
- [17] 石林榕,吴建民,赵武云,孙伟,张锋伟,孙步功. 基于离散单元法农田土壤单轴压缩模型的建立及参数校核[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(4):174-182
- Shi L R, Wu J M, Zhao W Y, Sun W, Zhang F W, Sun B G. Establishment and parameter verification of farmland soil model in uniaxial compression based on discrete element method [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(4):174-182 (in Chinese)
- [18] 张荣芳,周纪磊,刘虎,史嵩,位国建,何腾飞. 玉米颗粒粘结模型离散元仿真参数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(S1):69-77
- Zhang R F, Zhou J L, Liu H, Shi S, Wei J G, He T F. Determination of interspecific contact parameters of corn and simulation calibration of discrete element[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(S1):69-77 (in Chinese)
- [19] 屈哲,刘龙,安雪,卢琦,丁力,余永昌. 基于EDEM的大豆窝眼轮式排种器优化设计与试验[J]. 农机化研究, 2023, 45(8):103-110
- Qu Z, Liu L, An X, Lu Q, Ding L, Yu Y C. Optimization design and experiment of soybean hole wheel seed metering device based on EDEM [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2023, 45(8): 103-110 (in Chinese)
- [20] 石林榕,吴建民,孙伟,张锋伟,孙步功,刘全威,赵武云. 基于离散单元法的水平圆盘式精量排种器排种仿真试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8):40-48
- Shi L R, Wu J M, Sun W, Zhang F W, Sun B G, Liu Q W, Zhao W Y. Simulation test for metering process of horizontal disc precision metering device based on discrete element method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(8):40-48 (in Chinese)
- [21] 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, Zhou R Y. Design and experiment of air-suction high-speed precision soybean seed metering device [D]. Changchun: Jilin University (in

Chinese)

- [22] 陈栋泉,李国莹,曹潘冬,李振佐,杨然兵. 基于EDEM仿真玉米高位投种结构参数分析与试验[J]. 农机化研究, 2024, 46(2)

Chen D Q, Li G Y, Cao G D, Li Z Z, Yang R B. Analysis and test of structural parameters of high-height planting of corn simulation based on EDEM[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2024, 46(2) (in Chinese)

- [23] GB/T 6973—2005 单粒(精密)播种机试验方法[S]. 北京:中国标准出版

社, 2005

GB/T 6973—2005 Testing method of single grain seed drills (precision drills)[S]. Beijing: China Standard Press, 2005 (in Chinese)

- [24] NY/T 987—2006 铺膜穴播机作业质量[S]. 北京:中国标准出版社, 2006.

NY/T 987—2006 Operation quality of film laying hole seeder [S]. Beijing: China Standard Press, 2006 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 曲经武,中共党员,甘肃农业大学硕士研究生。获得2023年校级二等学业奖学金,参与甘肃省技术创新引导计划科技专员专项(22CX8GA052)和甘肃农业大学伏羲青年英才培养计划项目(Gaufx-03Y01)



通讯作者简介: 戴飞,男,汉族,1987年12月生,甘肃榆中人,中共党员,教授,博士(后),硕士生导师,甘肃农业大学机电工程学院副院长。入选农业农村部“农业科研杰出人才”,甘肃省“飞天学者”青年学者,甘肃省“杰出青年基金”获得者,甘肃省“陇原青年创新创业人才”,甘肃农业大学“伏羲青年英才”。兼任中国农业机械学会青年工作委员会副秘书长,甘肃省首批“科技专员”,甘肃农业大学“北方特色作物生产机械化与农废资源化利用团队”负责人,国家特色油料产业技术体系胡麻机械化岗位核心成员,《智能化农业装备学报(中英文)》青年编委,《南方农机》期刊编委。荣获甘肃农业大学“优秀共产党员”、甘肃农业大学“‘十三五’本科毕业设计优秀指导教师”等称号。