

# 双垄种床耕作施肥作业过程仿真分析与试验

李文龙<sup>1</sup>, 戴飞<sup>1</sup>, 赵武云<sup>1</sup>, 史瑞杰<sup>1</sup>, 宋学锋<sup>1</sup>, 马海军<sup>2</sup>

(1. 甘肃农业大学机电工程学院, 甘肃兰州 730070; 2. 甘肃洮河拖拉机制造有限公司, 甘肃定西 730500)

**摘要:**为深入研究双垄种床耕作施肥作业过程中不同结构装置对作业性能和种床构建质量的影响,采用离散元方法分别对起垄开沟与施肥作业过程进行了单因素数值模拟。以两种类型起土铲、施肥铲的作业成型效果与挖掘阻力变化特性以及两种类型排肥器的排肥均匀度变异系数值与稳定性分别进行对比试验,经优化得出以双翼开沟铲、普通施肥铲以及直槽轮式排肥器进行组合并进行数值模拟,以种床耕作合格率、施肥合格率为指标评价该装置对种床构建性能的作用,结果表明:在联合机前进速度  $0.50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、旋耕刀组转速  $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、排肥器转速  $40 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  的参数条件下,其种床耕作合格率为 95.40%,施肥合格率为 93.40%。田间验证试验表明:施肥合格率均值为 90.30%,与仿真结果相差 3.10%,种床耕作合格率均值为 93.60%,与仿真结果相差 1.80%。可见实际作业工况与仿真模拟结果相差不大,验证了仿真模拟研究模型的准确性。

**关键词:**双垄耕作施肥装置;仿真;离散元法;种床耕作合格率;施肥合格率

**中图分类号:**S223 **文献标志码:**A

## Simulation analysis and experiment on the operation process of mechanized double ridge tillage and fertilization operation

LI Wenlong<sup>1</sup>, DAI Fei<sup>1</sup>, ZHAO Wuyun<sup>1</sup>, SHI Ruijie<sup>1</sup>, SONG Xuefeng<sup>1</sup>, MA Haijun<sup>2</sup>

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

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

**Abstract:** In order to study the effects of different structural devices on the performance and the quality of seed bed construction, the numerical simulation of ridging, ditching and fertilization was carried out by using discrete element method. The operation molding effect and excavation resistance change characteristics of the two types of soil lifting shovel and fertilization shovel as well as the variation coefficient and stability of the fertilizer discharge uniformity of the two types of fertilizer discharge devices were respectively compared and tested. After optimization, the combination of the double-wing trench shovel, the ordinary fertilizer shovel and the straight slot wheel fertilizer discharge device were obtained, and numerical simulation was carried out. The qualified rate of seeding bed tillage and fertilization was used as indicators to evaluate the effect of the device on the performance of seeding bed construction. The results showed that the qualified rate of seeding bed tillage and fertilization was 95.40% and 93.40% under the parameters of  $0.50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  and  $40 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  respectively. Field verification experiments showed that the average pass rate of fertilization was 90.30%, 3.10% lower than the simulation result, and the average pass rate of seed bed tillage was 93.60%, 1.80% lower than the simulation result. The results indicated that there was little difference between the actual working conditions and the simulation results, which verifying the accuracy of the simulation research model.

**Keywords:** double ridge tillage and fertilization device; simulation; discrete element method; qualified rate of

收稿日期:2023-01-03

修回日期:2023-02-10

**基金项目:**国家自然科学基金(52065005);甘肃省杰出青年基金(20JR10RA560);甘肃省技术创新引导计划科技专员专项(22CX8GA052);甘肃省青年科技基金(20JR10RA548)

**作者简介:**李文龙(1998-),男,甘肃天水人,硕士研究生,研究方向为西北旱区膜土-机器-作物互作系统。E-mail: 1850738552@qq.com  
**通信作者:**戴飞(1987-),男,甘肃兰州人,博士,教授,硕导,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

seed bed tillage; qualified rate of fertilization

旱地全膜双垄沟播是中国西北地区旱作农业种植的一项创新技术,尤其对西北旱作玉米种植产业的影响较大,该技术要求通过旋耕耕整、起垄开沟、全膜覆盖和覆土镇压等操作来构建大小垄体、垄沟种床,促进水、肥的有效利用,提高作物的出苗率<sup>[1-3]</sup>。近年来,全膜双垄沟栽培技术在西北旱区、半干旱区应用面积迅速扩大,国内相关研究者与企业团队合作研制出多种全膜双垄沟覆膜、覆土与播种一体化作业机,如圆盘式全膜双垄沟铺膜机、双垄沟自动上土铺膜机、1MLQ-40/70 型全膜双垄沟起垄铺膜喷药联合作业机和 2N2XP 型旋耕双幅覆膜联合作业机等<sup>[4]</sup>。

随着该技术的日益成熟、成型机具的大量推广与实践,全膜双垄沟机械化作业也暴露出不少问题,如种床构建质量差、地膜破损、施肥效果不佳影响后续作物出苗率、功耗大等<sup>[5]</sup>。与此同时,施肥与起垄作业状况也影响作物的出苗率,施肥过浅,起垄过后肥料裸露在垄沟表面或两侧,造成肥料的浪费;施肥过深,起垄后种子无法充分吸收养分导致作物出苗率低,工作效率低。“一膜两年用”方式能够确保施肥精准实施,满足作物在不同时期对土壤养分的不同吸收需求,从而减少肥料施用量与施肥环节,促进农业生产节本增效,但该模式下,当年的施肥状况对后续作物的膜下追肥量影响极大<sup>[6]</sup>。

离散元法通过固体颗粒建立参数化研究模型,并对颗粒体系力学行为进行模拟预测与分析,近年来广泛应用于农业耕作领域,国内外研究学者通过离散元法对农机具触土部件与土壤动态间的相互作用展开了大量研究,特别在农作物收获、土壤耕作等领域取得了丰富的成果<sup>[7]</sup>。如 Zeng<sup>[8]</sup>、Lv<sup>[9]</sup>、张兆国<sup>[10]</sup>、戴飞<sup>[11-12]</sup>、顿国强<sup>[13]</sup>等学者采用离散元法分别对土壤-机具-秸秆残茬作业系统、撒肥机、仿生挖掘铲、种床覆土装置和肥料调配装置开展了仿真研究,证实了离散元法应用于土壤-机具相互作用方面的可行性以及农业机械作业过程的适用性。

因此,本研究借助离散元仿真分析法,开展全膜双垄沟机械化双垄耕作施肥作业过程的模拟研究,建立双垄耕作施肥仿真模型,以垄体成型效果、挖掘阻力、排肥均匀度变异系数为评价指标,通过单因素分析不同结构装置的作业性能并进行仿真优化,进一步以种床耕作合格率、施肥合格率为评价指标对优化获得的工作部件及其工作参数进行

了种床构建作业过程仿真分析,以期全膜双垄沟起垄覆膜播种联合作业机作业部件的优化设计和提高种床构建质量提供理论参考。

## 1 双垄耕作施肥装置结构与工作原理

### 1.1 整机结构与工作过程

全膜双垄沟起垄覆膜播种联合作业机主要由主机架、悬挂装置、旋耕刀组、排肥装置、喷药装置、起垄装置、覆膜装置、覆土装置、播种器和镇压装置等部分组成,可一次性完成旋耕、条施肥、起垄开沟、覆膜覆土、播种、镇压等工作<sup>[14]</sup>。双垄耕作施肥装置主要由旋耕刀组、施肥铲、排肥轴、排肥器、导肥管、起土铲等组成,其中施肥铲通过 U 型卡箍固定于机架前梁,起土铲通过横梁连接采用螺栓固定于机架后梁,联合机及双垄耕作施肥装置结构如图 1(见 269 页)所示,主要技术参数列于表 1。

表 1 作业机主要技术参数

Table 1 Operation machine main technical parameters

参数 Parameter	数值 Value
整机尺寸(长×宽×高) Machine size (length×width×height) /(mm×mm×mm)	2450×1420×1120
配套动力 Supporting power/kW	14.5~29.5
工作幅宽 Working width/mm	1100
作业速度 Operating speed/(km·h <sup>-1</sup> )	2.0~5.0
施肥深度 Fertilization depth/mm	70~90
旋耕深度 Rotary tillage depth/mm	100~150
施肥行数/行 Number of fertilization rows/row	2
旋耕刀排列形式 Rotary tillage knife arrangement form	双头螺旋线排列 Double helix arrangement
生产率 Productivity/(hm <sup>2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	3.71

双垄耕作施肥作业过程中,传动装置驱动旋耕刀组转动,完成对种床的旋耕作业;拖拉机带动地轮与地表发生相对转动进而驱动排肥轴转动,同时施肥铲随机具前进主动深入旋耕后的地表土壤,形成稳定深度的肥沟,排肥轴带动排肥器将肥料颗粒排至出肥口,再通过施肥铲内导肥管投入肥沟内;起土铲随机具前进对施肥过后的肥沟上方土壤进行掘土开沟起垄,继而完成双垄耕作施肥作业。

### 1.2 双垄耕作施肥农艺要求

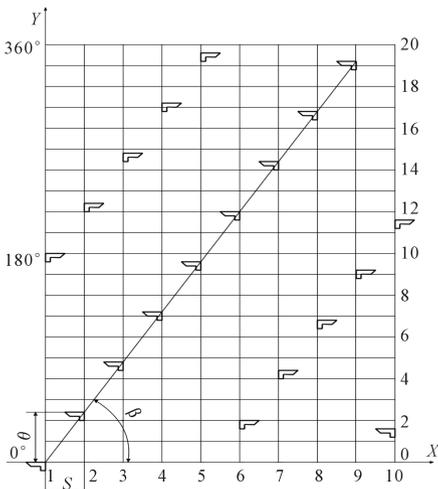
全膜双垄沟起垄覆膜播种联合作业机能够一次性完成施肥、喷药、起垄、覆膜、播种等工作,其作业方式是将一定量肥成条施放于垄沟土壤中,形成播种基肥,从而降低了施肥量,大大提高了肥料的

利用率,但需准确地把握施肥深度与起垄高度,保障肥料与后期播种的农艺要求<sup>[15]</sup>。为分析双垄耕作施肥作业过程,本文通过模拟机械化构建种床,即一次性完成大垄垄体(垄宽 700 mm、垄高 100~150 mm)与小垄垄体(垄宽 400 mm、垄高 150~200 mm)相间的异型双垄体<sup>[4]</sup>构建,同时将肥料深施在小垄两侧垄沟内且肥料颗粒成条状分布,种苗与肥料颗粒在全膜双垄沟位置分布如图 2(见 269 页)所示。肥料颗粒与种苗的位置关系由肥料颗粒与垄沟底部纵向距离  $h$  控制,根据全膜双垄沟施肥技术要求, $h$  取 70~90 mm。

## 2 关键部件理论分析与建模

### 2.1 旋耕刀组

旋耕刀组的排列方式是影响旋耕作业性能的重要因素之一,合理的刀具排列是对功率消耗、作业质量、切土阻力及机具平衡性等指标的重要保障<sup>[16]</sup>。因此该联合作业机旋耕刀以交错安装法排列,刀具采用双螺旋线排布,即刀轴左边起始以右旋排列 10 把刀具,刀轴右边起始以左旋排列 10 把刀具,以保障旋耕时旋耕刀组能够完全切削土壤并往中间推送土壤,同时保持刀轴旋耕时的稳定性。该旋耕刀组旋向为顺时针(正转),旋耕刀刀尖的运动轨迹为余摆线(旋耕速比  $\lambda > 1$ ),同一回转面上两把刀具的相位角为  $180^\circ$ ,相邻两把刀具安装的相位角为  $\theta$  ( $\theta = 43^\circ$ ),相邻两把刀具的间距为  $S$  ( $S = 79$  mm),旋耕刀轴转速为  $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,旋耕刀组排列展开图如图 3 所示。



注: $\theta$  为相位角; $\beta$  为螺旋升角; $S$  为旋耕刀间距。

Note: $\theta$  is the phase angle;  $\beta$  is spiral rise angle;  $S$  is the distance between rotary tilling knives.

图 3 旋耕刀组排列展开图

Fig.3 Arrangement and expansion diagram of rotary tillage tool group

### 2.2 起垄装置

联合作业机工作时,旋耕刀组对地表土壤进行旋耕耕整,起土铲配合施肥作业同时对排肥过后的肥沟上方土壤进行掘土开沟起垄,保障小垄两侧垄沟底部与肥料之间的距离,继而完成异型双垄体种床构建。

通过分析双垄耕作施肥作业过程可以得出,联合作业机前进速度、旋耕刀组的转速与旋耕深度、起土铲类型对小垄两侧垄沟内的施肥状况、机械化构建异型双垄垄体种床质量均具有一定影响。因此,本文选取弧形起土铲与双翼开沟铲两种类型进行仿真分析,研究其影响状况,铲体模型及其重要参数如图 4 所示。

### 2.3 施肥装置

施肥装置主要包括肥料箱、外槽轮式排肥器、排肥轴、导肥管和施肥铲,肥料箱固定于排肥器支架上方,施肥铲通过 U 型卡箍固定于主机架前梁,施肥装置结构图如图 5 所示。

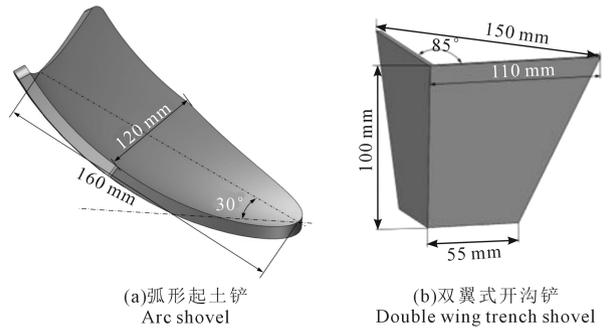
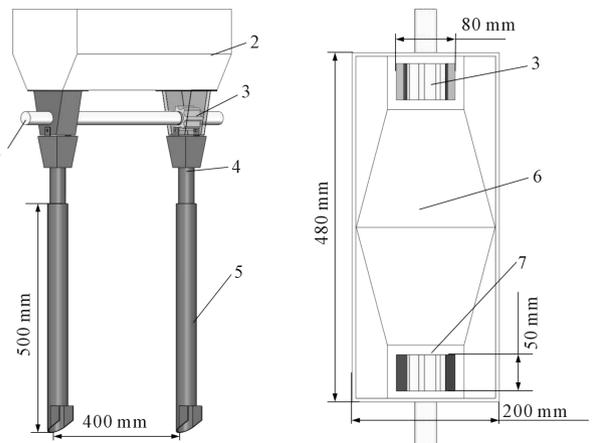


图 4 起土铲类型  
Fig.4 Shovel type



- 1.排肥轴;2.肥料箱;3.外槽轮式排肥器;
- 4.导肥管;5.施肥铲;6.分肥溜板;7.排肥口
- 1. Fertilizer discharge shaft; 2. Fertilizer box;
- 3. Outer groove wheel type fertilizer discharge device;
- 4. Fertilizer guide tube; 5. Fertilizer spatula;
- 6. Fertilizer distribution chute; 7. Fertilizer outlet

图 5 施肥装置结构图

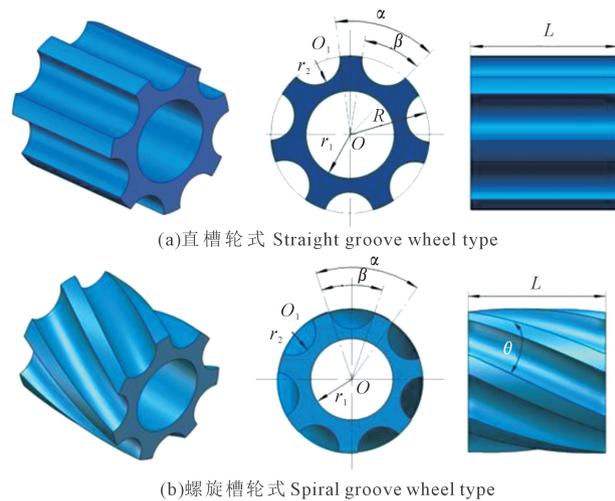
Fig.5 Structure diagram of fertilizer device

依据全膜双垄沟农艺栽培技术要求,肥料箱的容积为<sup>[17]</sup>:

$$C = \frac{1.1L_1B_1Q_{\max}}{10000\gamma_1} \quad (1)$$

式中, $C$ 为肥料箱总容积(L); $B_1$ 为肥料箱作业幅宽,取 400 mm; $L_1$ 为满足肥料箱中肥料的施肥距离,取 1 000 m; $\gamma_1$ 为肥料颗粒密度,取  $1.86 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[18]</sup>; $Q_{\max}$ 为单位面积最大施肥量,取  $378 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[5]</sup>。由式(1)计算可得  $C=8.94 \text{ L}$ ,参考该容积参数对施肥装置肥量进行仿真参数设置。

**2.3.1 排肥器** 排肥器作为施肥装置中的关键部件,其结构类型直接影响施肥作业效果,为研究联合作业机的合理性与小垄两侧垄沟内施肥质量状况,现选取直槽轮式和螺旋槽轮式两类排肥器结构进行研究分析。其中,两类排肥槽轮的有效长度  $L$  均为 50 mm,外端半径  $R$  均为 26.5 mm,周向均布 7 个圆弧槽口且半径  $r_2$  均为 8.6 mm,排肥主轴半径  $r_1$  均为 15 mm,单个凹槽在同一回转面上的跨度  $\alpha$  均为 0.89 rad,相邻凹槽之间的节距角  $\beta$  均为  $35^\circ$ ,而螺旋槽轮式的螺旋升角  $\theta$  为  $50^\circ$ 。装置建模如图 6 所示。



注: $O$ 为槽轮轴心; $O_1$ 为圆弧凹槽圆心; $r_1$ 为排肥主轴半径(mm); $r_2$ 为圆弧凹槽半径(mm); $\alpha$ 为单个凹槽在同一回转面上的跨度(rad); $\beta$ 为相邻凹槽之间的节距角; $L$ 为槽轮作业的有效长度(mm); $\theta$ 为螺旋升角。

Note:  $O$  is the axle center of the groove wheel;  $O_1$  is the center of circular groove;  $r_1$  is the radius of the fertilizer discharge spindle (mm);  $r_2$  is the radius of the circular groove (mm);  $\alpha$  is the span of a single groove on the same rotary plane (rad);  $\beta$  is the pitch angle between adjacent grooves;  $L$  is the effective length of the groove wheel operation (mm);  $\theta$  is the angle of spiral rise.

图 6 排肥器类型

Fig.6 Type of fertilizer drainer

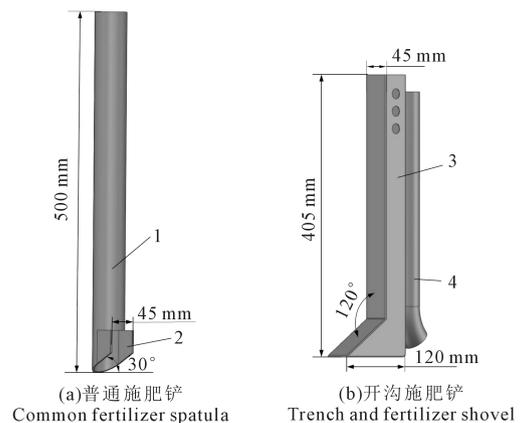
**2.3.2 施肥铲** 施肥铲作为施肥装置的入土部件,实现了垄沟形成前对行开沟和垄沟内深施肥的作用。一般施肥铲由开沟器和施肥导管两部分构成,施肥导管焊接于开沟器后方,为研究施肥铲在作业时对机械化构建异形双垄体种床质量的影响和肥料在垄沟内的分布情况,选取普通施肥铲和开沟施肥铲进行仿真分析,装置建模如图 7 所示。

### 3 基于离散元法的双垄耕作施肥装置仿真分析

为深入解析全膜双垄沟起垄覆膜播种联合作业机中不同类型施肥起垄装置的动态工作特性,基于离散元法对双垄耕作施肥作业过程进行数值模拟,首先通过单因素分析不同类型的起土铲、排肥器以及施肥铲的作业性能并进行仿真优化,再对优化获得的工作部件及其工作参数进行种床构建作业过程仿真分析。

#### 3.1 仿真模型建立

肥料颗粒属于类球形颗粒,球形度在 90% 以上,提高模型仿真效率,种床土壤颗粒和肥料颗粒均采用球体颗粒建模,以史丹利复合肥作为肥料参考(干燥无结块颗粒),其土壤模型单球颗粒半径设定为 5 mm,肥料模型单球颗粒半径设定为 1.65 mm。旋耕刀组、起土铲以及施肥铲均为钢材料,排肥槽轮材料为 PLA 塑料,则土壤颗粒与土壤颗粒、肥料颗粒与肥料颗粒、土壤颗粒与肥料颗粒、肥料颗粒与排肥器、土壤颗粒与旋耕刀组、起土铲以及施肥铲均采用 Hertz-Mindlin (no-slip) 模型,试验仿真相关参数见表 2<sup>[19-22]</sup>。



1. 施肥铲导管外壁; 2. 施肥铲翼; 3. 开沟器; 4. 导肥管  
1. Outer wall of fertilizer spatula catheter; 2. Fertilizer spatula wing;  
3. Trench opener; 4. Fertilizer guide tube

图 7 施肥铲类型

Fig.7 Type of spatula

表 2 离散元仿真参数

Table 2 Discrete element simulation parameters

材料 Material	泊松比 Poisson's ratio	剪切模量 Shear modulus/Pa	密度 Density /(kg·m <sup>-3</sup> )
土壤 Soil	0.300	1.00×10 <sup>8</sup>	2680
肥料 Fertilizer	0.250	1.00×10 <sup>7</sup>	1861
钢 Steel	0.280	3.50×10 <sup>10</sup>	7850
排肥槽轮 Slot wheel fertilizer drainer	0.394	3.18×10 <sup>8</sup>	1240
接触类型 Contact type	恢复系数 Coefficient of restitution	静摩擦因数 Static friction factor	动摩擦因数 Dynamic friction factor
土壤-土壤 Soil-Soil	0.30	0.50	0.30
肥料-肥料 Fertilizer-Fertilizer	0.11	0.30	0.10
土壤-钢 Soil-Steel	0.30	0.40	0.10
土壤-肥料 Soil-Fertilizer	0.30	0.50	0.02
肥料-排肥槽轮 Fertilizer-Slot wheel fertilizer drainer	0.41	0.32	0.18

根据全膜双垄沟农艺栽培技术要求,在 EDEM 中建立适用于双垄耕作施肥作业的土槽模型,设置其尺寸为长×宽×高=2 700 mm×1 200 mm×400 mm,并将上述模型以 IGES 格式模型导入 EDEM 软件中分别进行仿真试验。

### 3.2 双垄耕作施肥装置单因素仿真试验

3.2.1 起垄作业效果仿真分析 根据双垄耕作施肥作业过程,以垄体成型效果和挖掘阻力为评价指标进行单因素仿真。考虑到仿真时间与可行性,采用以弧形起土铲、双翼开沟铲分别配合旋耕刀组的组合形式。运动参数均为:前进速度 0.50 m·s<sup>-1</sup>,旋耕刀组转速 200 r·min<sup>-1</sup>,仿真时间步长 2.08×10<sup>-5</sup>s,仿真时间共 6.2 s,起土铲作业过程及仿真完成效果如图 8 所示。

在各仿真参数相同的情况下,对比两类铲体类型的垄体成型效果(图 8c、d),双翼开沟铲小垄体倾斜角介于 38~42°、垄沟底部凹陷明显,弧形起土铲小垄体倾斜角介于 25~30°,垄沟底部凹陷较浅,双翼开沟铲明显比弧形起土铲作业效果更佳,有利于水肥在垄沟底部地带汇集及地膜的铺展。说明铲体类型对形成异型双垄体种床结构参数影响较大。

如图 9 所示,0~1 s 为铲体接触到土槽的空载运动,1 s 之后铲体与土槽接触,双翼铲挖掘阻力介于 180~250 N,弧形铲挖掘阻力 100~150 N,双翼铲

受到的挖掘阻力比弧形铲受到的挖掘阻力大 72% 左右,这是由结构差异造成的,因为双翼开沟铲的双翼板结构增大了土壤的流动性,同时其双翼特殊的开口角度确保了起垄开沟的质量要求。

3.2.2 排肥器作业效果仿真分析 将上述排肥器模型以 IGES 格式导入 EDEM 软件,仿真设置总时间为 5.5 s,仿真时间步长 1.93×10<sup>-5</sup> s。其中前 1 s 生成肥料颗粒,生成总量为 40 000 个,后 4.4 s 为排肥轮与肥料颗粒的运动时间。为观察肥料颗粒在地面的分布情况,在导肥管正下方建立一长方体用于模拟地面,尺寸为长×宽×高=2 100 mm×1 000 mm×200 mm。研究发现,外槽轮式排肥器的转速在 20~60 r·min<sup>-1</sup> 时拥有较好的排肥性能<sup>[23]</sup>,因此在研究中槽轮转速均取 40 r·min<sup>-1</sup>;为保持联合机作业速率的一致性,与起土铲作业前进速度取值相同,排肥器的前进速度均为 0.5 m·s<sup>-1</sup>,其仿真试验作业过程如图 10 所示。

依照外槽轮排种器试验规定,本文以排肥均匀度变异系数作为排肥性能的评价指标<sup>[24]</sup>。仿真结束后,进入后处理界面,取单行施肥过后模拟地面中间 1 000 mm 区域作为参数取样区,并将其均匀分为 5 组网格单元,各组网格单元尺寸为长×宽×高=200 mm×200 mm×50 mm,而后统计并分析每个网格单元内肥料颗粒质量,如图 11 所示。

排肥均匀度变异系数计算公式:

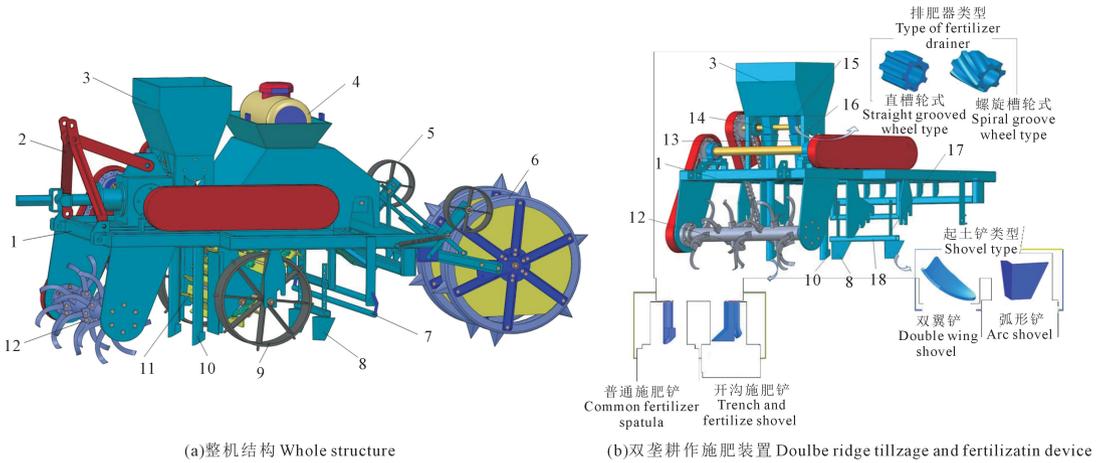
$$\bar{m} = \frac{1}{n} \sum m_i \quad (2)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (m_i - \bar{m})^2} \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{s}{\bar{m}} \times 100\% \quad (4)$$

式中, $\bar{m}$  为每组网格单元的颗粒平均质量(kg); $n$  为网格单元总组数; $m_i$  为第  $i$  组网格单元内的颗粒总质量(kg); $s$  为所有分组网格单元的标准差; $\sigma$  为排肥均匀度变异系数(%)。

分别完成对直槽轮式与螺旋槽轮式排肥器各网格单元取样区域的质量测量,得出试验数据(见表 3),而以变异系数  $\sigma$  作为排肥器排肥稳定性和均匀性的评价参量, $\sigma$  值越小表明其对应排肥器性能就越好。通过式(2)~(4)计算可知,直槽轮排肥器相比螺旋槽轮排肥器的排肥均匀度变异系数低 4.69%,直槽轮稳定性系数高达 97.05%,说明在相同参数条件下,直槽轮排肥效果更好。

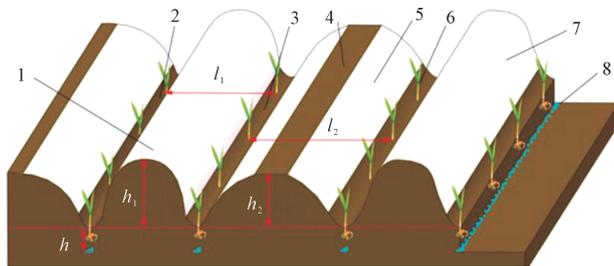


1. 主机架; 2. 悬架装置; 3. 施肥箱; 4. 喷药装置; 5. 镇压装置; 6. 穴播器; 7. 地膜挂架; 8. 起垄装置; 9. 地轮; 10. 施肥铲; 11. 覆土装置; 12. 旋耕刀组; 13. 导肥管; 14. 排肥轴; 15. 排肥器; 16. 排肥器支架; 17. 起土铲调节装置; 18. 起土铲横梁架

1. Main frame; 2. Suspension device; 3. Fertilizer box; 4. Spray device; 5. Suppression device; 6. Burrowing device; 7. Mulch hanger; 8. Ridge raising device; 9. Ground wheel; 10. Fertilizer spatula; 11. Soil covering device; 12. Rotary tillage tool set; 13. Fertilizer guide tube; 14. Fertilizer discharge shaft; 15. Fertilizer drainer; 16. Fertilizer drainer support; 17. Shovel adjusting device; 18. Shovel beam frame

图 1 整机及双垄耕作施肥装置结构图

Fig.1 Structure diagram of whole machine and double ridge tillage fertilization device



1. 小垄垄体; 2. 垄沟地带; 3. 垄沟覆土带; 4. 大垄体面覆土带; 5. 大垄垄体; 6. 种苗; 7. 覆盖地膜; 8. 肥料颗粒

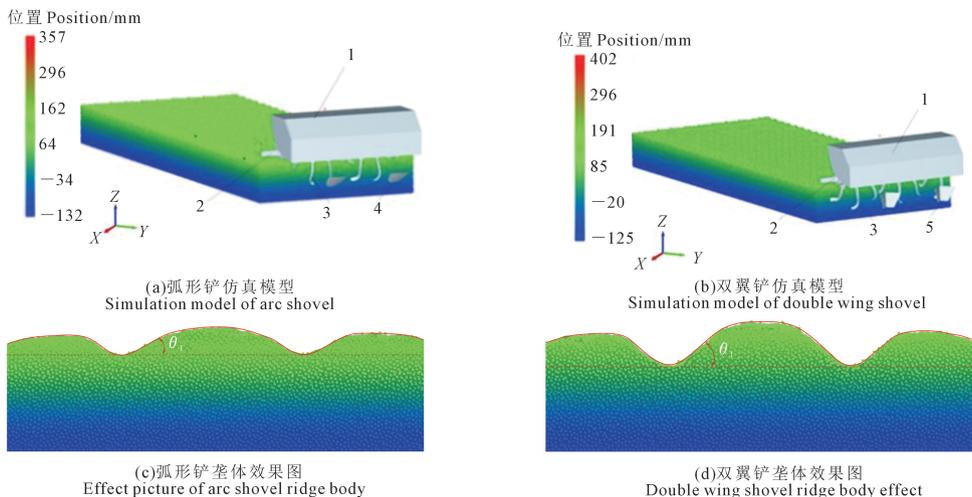
$h$ : 施肥深度 (mm);  $h_1$ : 小垄高度 (mm);  $h_2$ : 大垄高度 (mm);  $l_1$ : 小垄宽度 (mm);  $l_2$ : 大垄宽度 (mm)

1. Small ridge body; 2. Ridge furrow zone; 3. Ridge furrow covering belt; 4. Large ridge covering belt; 5. Large ridge body; 6. Seedling; 7. Mulching film; 8. Fertilizer particles

$h$ : Fertilization depth (mm);  $h_1$ : Ridge height (mm);  $h_2$ : Large ridge height (mm);  $l_1$ : Ridge width (mm);  $l_2$ : Large ridge width (mm)

图 2 全膜双垄沟农艺技术要求及施肥工艺方案示意图

Fig.2 Schematic diagram of agricultural technology requirements and fertilization process scheme of whole plastic-film double ridge furrow



1. 挡土罩; 2. 旋耕刀轴; 3. 旋耕刀具; 4. 双翼开沟铲; 5. 弧形起土铲;  $\theta_1$ : 小垄垄体倾斜角

1. Retaining hood; 2. Rotary tillage tool shaft; 3. Rotary tillage tool; 4. Double wing ditching shovel; 5. Arc shovel;  $\theta_1$ : Slope angle of the ridge body

图 8 不同铲体仿真模型

Fig.8 Simulation models of different shovel bodies

3.2.3 施肥铲作业效果仿真分析 施肥铲不仅控制施肥的量,还需对作物根系的的不同部位进行对点的施肥,合理的施肥铲装置是肥料均匀排入土壤内部和促使作物有效吸收水、肥的重要保障。考虑到仿真运行与效率,采用以普通施肥铲、开沟施肥铲分别配合旋耕刀组的组合形式进行仿真模拟。运动参数均为:前进速度  $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,旋耕刀组转速  $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,仿真时间步长  $2.08 \times 10^{-5} \text{ s}$ ,仿真时间共  $6.2 \text{ s}$ ,施肥铲仿真作业如图 12 所示。

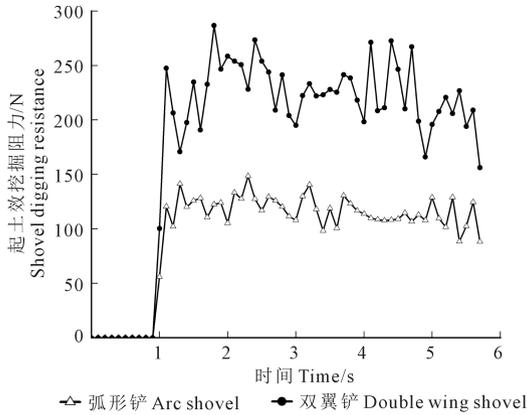
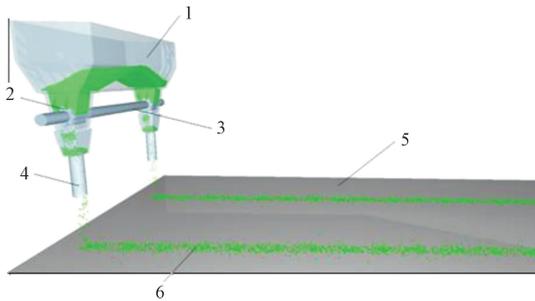


图 9 不同铲体挖掘阻力变化

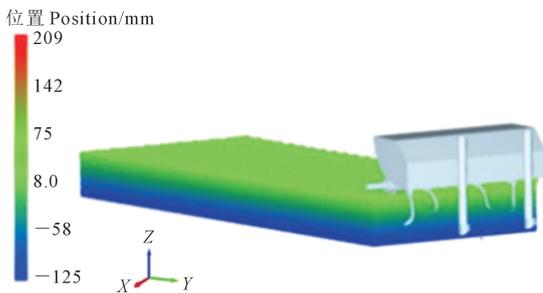
Fig.9 Excavation resistance changes with different shovel bodies



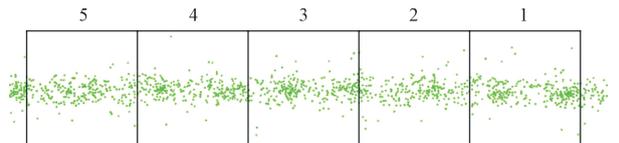
1.肥料箱;2.槽轮排肥器;3.排肥轴;4.导肥管;5.地面;6.肥料颗粒  
1.Fertilizer box; 2.Trough wheel fertilizer drainer; 3.Fertilizer discharge shaft; 4.Fertilizer guide pipe; 5.Ground; 6.Fertilizer particle

图 10 排肥器仿真试验过程

Fig.10 Simulation test process of fertilizer drainer



(a)普通铲仿真模型 Ordinary shovel simulation model

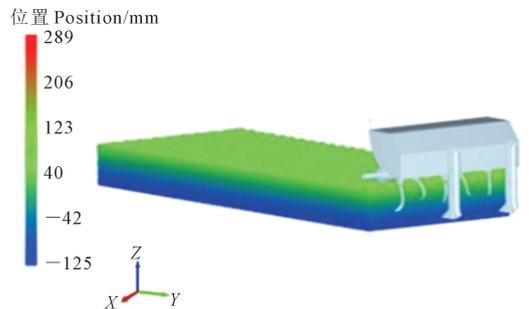


注:1~5 为数据采集取样区域编号。

Note: 1 to 5 are the numbers of the sampling areas for data collection.

图 11 数据采集取样区域

Fig.11 Data acquisition sampling area



(b)开沟铲仿真模型 Simulation model of ditching shovel

图 12 不同类型施肥铲仿真作业模型

Fig.12 Different types of fertilizer shovel simulation operation model

如图 13 普通施肥铲、开沟施肥铲的挖掘阻力变化曲线可以看出,在施肥作业过程设定工作参数一致的情况下,普通施肥铲施肥阻力介于  $300 \sim 400 \text{ N}$ ,开沟施肥铲施肥阻力介于  $200 \sim 300 \text{ N}$ ,前者较后者高约  $40\%$ 。普通铲结构呈圆筒状,有利于促进土壤流动,不易造成土壤扰动,其工作时土壤回流量大,更易形成垄体,提升起垄开沟质量;而开沟施肥铲不利于形成垄体,无法保障后续起垄质量。

表 3 仿真试验数据结果

Table 3 Results of simulation test

排肥器类型 Types of fertilizer dischargers	组数 Group count	每组肥料质量 Fertilizer quality per group /kg	变异系数 Variable coefficient /%	稳定性系数 Stability coefficient /%
直槽轮 Straight groove wheel	1	0.0078	2.95	97.05
	2	0.0082		
	3	0.0084		
	4	0.0079		
	5	0.0081		
螺旋槽轮 Spiral groove wheel	1	0.008	7.64	92.36
	2	0.0077		
	3	0.0083		
	4	0.0094		
	5	0.0085		

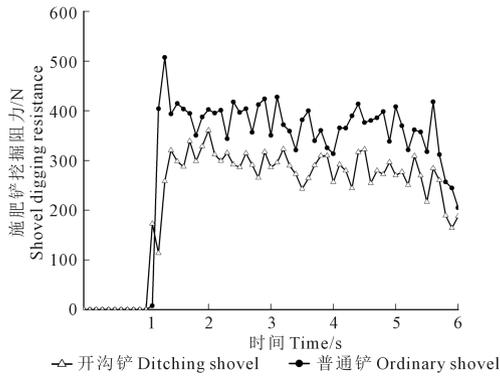


图 13 不同类型施肥铲施肥阻力变化

Fig.13 Fertilization resistance changes with different types of spatula

### 3.3 双垄耕作施肥作业过程仿真试验

通过上述单因素仿真模拟优化结果,以双翼开沟铲、普通施肥铲以及直槽轮式排肥器配合旋耕刀组的组合模式进行联合仿真模拟作业,设置运动参数为:联合机前进速度  $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,旋耕刀组转速  $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,直槽轮式排肥器转速  $40 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,仿真时间共  $6 \text{ s}$ 。依照全膜双垄沟农艺技术要求,符合该标准可确定为合格的异型双垄体种床耕作,以种床耕作完全合格为指标,同时依据 NY/T 1229-2006《旋耕施肥播种联合作业机作业质量》<sup>[24]</sup> 要求,以施肥合格率为指标,评价该结构装置组合仿真试验。

仿真模型如图 14 所示,待仿真模拟结束后随机对起垄种床不同位置截面求解,并对施肥合格率和种床耕作合格率进行测定。

种床耕作合格率 ( $Y, \%$ ) 测定计算公式为:

$$Y = \frac{N_1}{N} \times 100\% \quad (5)$$

式中,  $N_1$  为种床耕作合格测试点数;  $N$  为总试验测试点数。

施肥合格率 ( $H, \%$ ) 测定计算公式为:

$$H = \frac{H_1}{H_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中,  $H_1$  为施肥深度合格测试点数;  $H_0$  为总试验测试点数。

如图 15 所示为仿真完成模拟后施肥起垄开沟装置在不同视角下耕作作业过程以及肥料在垄沟内的分布状况,小垄高度  $h_1 = 152 \sim 157 \text{ mm}$ ,大垄高度  $h_2 = 140 \sim 145 \text{ mm}$ ,施肥深度  $h = 73 \sim 86 \text{ mm}$ (图 15d),此时种床耕作合格率为  $95.40\%$ ,施肥深度合格率为  $93.40\%$ 。

## 4 田间试验

为进一步验证全膜双垄沟起垄覆膜播种联合作业机在最优结构装置下的双垄耕作施肥作业性能,2019年6月在甘肃省定西市临洮县洮河拖拉机

制造有限公司试验田进行了田间试验(图 16)。试验地土壤为黄绵土,含水率为  $16.86\%$ ,土壤容重  $1300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,坚实度  $< 0.20 \text{ MPa}$ ,田面较平整、疏松且前茬作物较少。根据 NY/T 1229-2006《旋耕施肥播种联合作业机作业质量》<sup>[24]</sup> 和 DB62/T 1935-2010《全膜双垄沟铺膜机操作规程及作业质量验收》<sup>[25]</sup> 标准规定方法开展试验,在联合机作业完成后随机选取  $15 \text{ m}$  测定,将该区域平均分为 5 个测定小区,以测定小区的平均值作为实际测试结果,得到施肥合格率为  $90.30\%$ ,种床耕作合格率为  $93.60\%$ 。

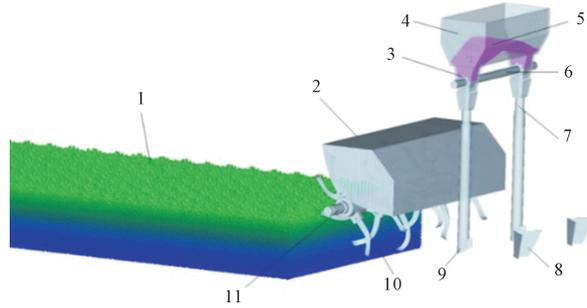
对比仿真模拟与该样机实际作业过程发现,两者作业成型效果无太大差异,说明建立的离散元仿真模型与运动参数相对合理,以离散元法仿真模拟研究旋耕刀组、施肥装置以及起垄开沟装置的配置组合方式模型来实现施肥起垄作业过程完全可行。通过田间试验发现,该样机在坚实度较大、根茬较多的土壤以及高低不平的地表作业时,容易产生旋耕刀组切削不平衡、普通施肥铲与双翼开沟铲作业阻力不平稳等问题,导致排肥均匀性差,同时对起垄开沟作业质量产生影响。本研究主要侧重于起垄施肥装置的结构参数分析及其作业性能研究,后续将进一步开展该装置运动参数的优化选取工作。

## 5 结论

1) 结合双垄耕作施肥装置的结构组成以及工作原理对影响施肥、起垄开沟作业性能的关键因素进行了分析与确定。应用离散元法分别对施肥作业过程与起垄开沟作业过程进行数值模拟,通过对比两种类型起土铲、施肥铲的作业成型效果与挖掘阻力变化特性以及两种类型排肥器的排肥变异系数值与稳定性,得出双翼开沟铲、普通施肥铲以及直槽轮式排肥器对全膜双垄沟机械化双垄耕作施肥作业性能可起到提高作用。

2) 将优化得到的双翼开沟铲、普通施肥铲以及直槽轮式排肥器进行组合数值模拟,以种床耕作合格率和施肥合格率为指标,在联合机前进速度  $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、旋耕刀组转速  $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、排肥器转速  $40 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  的参数条件下,其种床耕作合格率均值为  $95.40\%$ ,施肥合格率为  $93.40\%$ 。

3) 田间试验结果表明:施肥合格率均值为  $90.30\%$ ,与仿真结果相差  $3.10\%$ ;种床耕作合格率均值为  $93.60\%$ ,与仿真结果相差  $1.80\%$ 。对比仿真模拟与实际作业工况发现两者结果相差不大,验证了仿真试验和结构模型的正确性,说明基于离散元法开展双垄耕作施肥作业过程分析是合理的。



1.土槽;2.挡土罩;3.直槽轮式排肥器;4.肥料箱;5.肥料颗粒;6.排肥轴;7.导肥管;8.双翼开沟铲;9.普通施肥铲;10.旋耕刀具;11.旋耕刀轴  
1. Soil tank;2. Retaining cover;3. Straight groove wheel type fertilizer drainer;4. Fertilizer box;5. Fertilizer particles;6. Fertilizer discharge shaft;  
7. Fertilizer guide tube;8. Double wing trench shovel;9. Common fertilizer shovel;10. Rotary tillage tool;11. Rotary tillage tool shaft

图 14 双垄耕作施肥作业仿真模型

Fig.14 Simulation model of double ridge tillage and fertilization operation

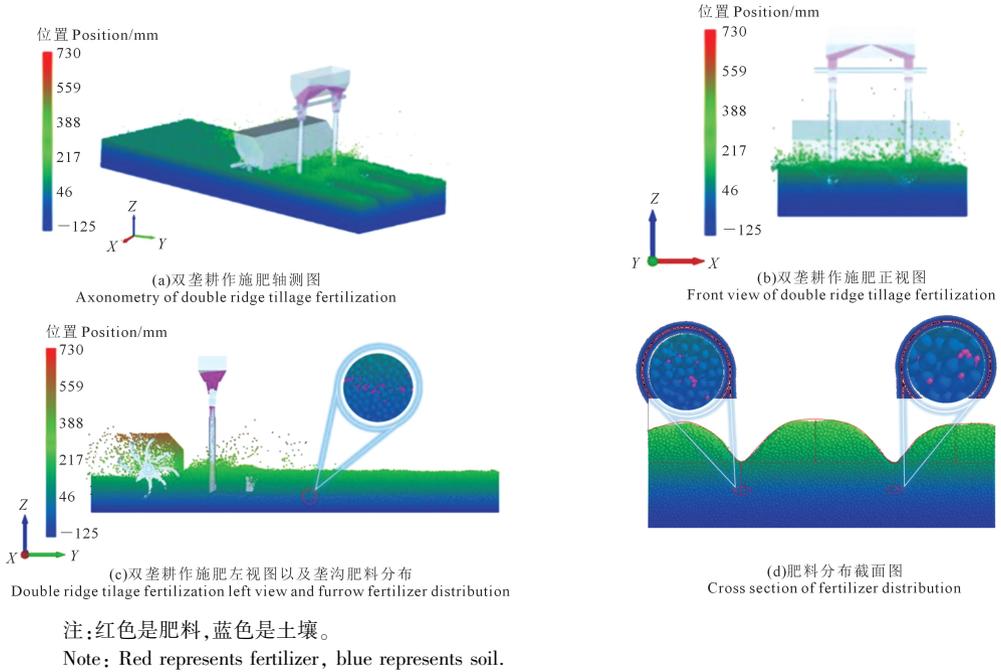


图 15 联合作业仿真模拟效果

Fig.15 Joint operation simulation effect



图 16 田间试验

Fig.16 Field test

参考文献:

[1] 戴飞, 赵武云, 张锋伟, 等. 西北旱区玉米全膜双垄沟机械化播种技术与装备研究进展[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(8): 217-222.  
DAI F, ZHAO W Y, ZHANG F W, et al. Current status of mechanization planting technology and equipment for corn whole plastic-film mulching on double ridges in the arid of northwest China[J]. Journal

of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(8): 217-222.  
[2] 李来祥, 刘广才, 杨祁峰, 等. 甘肃省旱地全膜双垄沟播技术研究与 应用进展[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1): 114-118.  
LI L X, LIU G C, YANG Q F, et al. Research and application develop- ment for the techniques of whole plastic-film mulching on double ridges and planting in catchment furrows in dry land[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(1): 114-118.  
[3] 杨祁峰, 刘广才, 熊春蓉, 等. 旱地玉米全膜双垄沟播技术的水分高 效利用机理研究[J]. 农业现代化研究, 2010, 31(1): 113-117.  
YANG Q F, LIU G C, XIONG C R, et al. Study on highly efficient water utilizing mechanisms on techniques of whole plastic-film mulching on double ridges and planting in catchment furrows of dry-land maize[J]. Research of Agricultural Modernization, 2010, 31(1): 113-117.  
[4] 戴飞, 赵武云, 张锋伟, 等. 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, et al. Research progress analysis of furrow sowing with whole plastic-film mulching on double ridges technol- ogy and machine in northwest rainfed area [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 1-16.  
[5] 戴飞, 赵武云, 马明义, 等. 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, et al. 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.
- [6] 杨国恒, 张树海, 郭忠富, 等. “一膜两年用”关键技术及节本增产效应研究[J]. 宁夏农林科技, 2013, 54(6): 144-146.
- YANG G H, ZHANG S H, GUO Z F, et al. Technology and the effect of reducing cost and increasing production of "a film with two years" [J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2013, 54(6): 144-146.
- [7] 曾智伟, 马旭, 曹秀龙, 等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 1-20.
- ZENG Z W, MA X, CAO X L, et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 1-20.
- [8] ZENG Z W, MA X, CHEN Y, et al. Modelling residue incorporation of selected chisel ploughing tools using the discrete element method (DEM) [J]. Soil and Tillage Research, 2020, 197: 104505.
- [9] LV H, YU J Q, FU H. Simulation of the operation of a fertilizer spreader based on an outer groove wheel using a discrete element method [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 58(3/4): 842-851.
- [10] 张兆国, 薛浩田, 王一驰, 等. 基于离散元法的三七仿生挖掘铲设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 100-111.
- ZHANG Z G, XUE H T, WANG Y C, et al. Design and experiment of *Panax notoginseng* bionic excavating shovel based on EDEM [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 100-111.
- [11] DAI F, GUO W J, SONG X F, et al. Design and field test of crosswise belt type whole plastic-film ridging-mulching corn seeder on double ridges [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(4): 88-96.
- [12] 戴飞, 张仕林, 宋学锋, 等. 全膜双垄沟双幅覆膜覆土联合作业机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 108-117.
- DAI F, ZHANG S L, SONG X F, et al. Design and test of combined operation machine for double width filming and covering soil on double ridges [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 108-117.
- [13] 顿国强, 陈海涛, 冯夷宇, 等. 基于 EDEM 软件的肥料调配装置关键部件参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 36-42.
- DUN G Q, CHEN H T, FENG Y N, et al. Parameter optimization and test of key parts of fertilizer allocation device based on EDEM software [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(7): 36-42.
- [14] 史增录, 赵武云, 马海军, 等. 全膜双垄沟播起垄施肥铺膜机的研制[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(2): 169-174.
- SHI Z L, ZHAO W Y, MA H J, et al. Whole plastic-film double furrow sowing cultivation of the design and manufacture of ridge fertilization filming machine [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(2): 169-174.
- [15] 赵淑红, 周勇, 刘宏俊, 等. 玉米垄作深施肥免耕播种机关键部件设计与试验[J]. 东北农业大学学报, 2015, 46(11): 102-108.
- ZHAO S H, ZHOU Y, LIU H J, et al. Design and experiment on ridge-till and deep fertilization no-till corn seeder [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2015, 46(11): 102-108.
- [16] 陈伟, 朱继平, 陈小兵, 等. 旋耕刀排列方式对反转旋耕机作业性能的影响研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(11): 205-209, 215.
- CHEN W, ZHU J P, CHEN X B, et al. Study on the effect of rotary tillage knife arrangement style on operation performance of reverse rotary tiller [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(11): 205-209, 215.
- [17] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(下册) [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007: 877-1028.
- Academy of Agricultural Mechanization Science. Agricultural machinery design manual (volume 2) [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2007: 877-1028.
- [18] 顿国强, 刘文辉, 杜佳兴, 等. 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, et al. 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.
- [19] 石林榕, 赵武云, 孙伟. 基于离散元的西北旱区农田土壤颗粒接触模型和参数标定[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 181-187.
- SHI L R, ZHAO W Y, SUN W. Parameter calibration of soil particles contact model of farmland soil in northwest arid region based on discrete element method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(21): 181-187.
- [20] 石林榕, 吴建民, 赵武云, 等. 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, et al. 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.
- [21] 顿国强, 杨永振, 陈海涛, 等. 基于 EDEM 的控位分层施肥开沟器作业过程的仿真与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44(1): 95-100.
- DUN G Q, YANG Y Z, CHEN H T, et al. Simulation analysis of working process of control position separated layer fertilizer furrow opener based on EDEM and test [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2018, 44(1): 95-100.
- [22] 汪博涛, 白璐, 丁尚鹏, 等. 外槽轮排肥器关键工作参数对排肥量影响的仿真与试验研究[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(10): 1-6, 23.
- WANG B T, BAI L, DING S P, et al. Simulation and experimental study on impact of fluted-roller fertilizer key parameters on fertilizer amount [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(10): 1-6, 23.
- [23] 祝清霞, 武广伟, 陈立平, 等. 槽轮结构参数对直槽轮式排肥器排肥性能的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 12-20.
- ZHU Q X, WU G W, CHEN L P, et al. Influences of structure parameters of straight flute wheel on fertilizing performance of fertilizer apparatus [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(18): 12-20.
- [24] 中华人民共和国农业农村部. 旋耕施肥播种联合作业机作业质量: NY/T 1229-2006 [S]. [出版地不详]: [出版者不详], 2006.
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Operating quality of combined machines for rotary tillage, fertilizing and seeding: NY/T 1229-2006 [S]. [S.l.]: [s.n.], 2006.
- [25] 甘肃省质量技术监督局. 全膜双垄沟铺膜机操作规程及作业质量验收: DB62/T 1935-2010 [S]. [出版地不详]: [出版者不详], 2010.
- Gansu Provincial Bureau of Quality and Technical Supervision. Operating procedures and quality acceptance of full film double ridge furrow film laying machine: DB62/T 1935-2010 [S]. [S.l.]: [s.n.], 2010.