中国油料作物学报
Chinese Journal of Oil Crop Sciences
2026,48(4):226-235
doi:10.19802/j.issn.1007-9084.2025277

花生播种机双圆盘组合式覆土装置设计与试验

王岩[1,2],张春艳[2,3],张国海[1],张佳蕾[4],万书波[4],张正[4],张悦[2,5],康建明[2,3*]
(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院,山东 淄博,255000;
2. 山东省农业机械科学研究院 山东 济南,250100;
3. 山东省丘陵山区智慧农业装备重点实验室,山东 济南,250100;
4. 山东省农业科学院,山东 济南,250100;
5. 聊城大学机械与汽车工程学院,山东 聊城,252059)

摘要:针对花生膜上打孔播种机覆土装置在工作过程中覆土不均匀,易造成种子裸露、晾种的问题,设计一种双圆盘组合式覆土装置,将覆土圆盘与覆土滚筒相结合,提升覆土均匀性。分析了双圆盘组合式覆土装置在覆土作业时的运动状态,结合覆土装置作业时土壤的运动学分析,得到了影响覆土性能的关键结构参数。借助EDEM仿真软件,建立了覆土装置与土壤的仿真模型,探究了不同参数对覆土装置作业性能的影响规律,确定了覆土滚筒导土片数量,优化了覆土装置的关键结构参数范围,以作业速度、覆土口宽度、导土片偏转角为试验因素,以覆土均匀性变异系数为评价指标进行Box-Behnken试验,确定了双圆盘组合式覆土装置最佳工作参数为作业速度3.9 km/h、覆土口宽度75 mm、导土片偏转角45°。设置播种机平均作业速度为3.9 km/h进行田间试验,田间试验结果表明,在最优工作参数下,覆土均匀性变异系数小于8%,满足花生膜上打孔播种覆土作业要求,能够改善播种机覆土性能。

关键词:花生;播种机;覆土装置;膜上打孔播种
中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1007-9084(2026)04-0226-10

Design and experiment of double-disc combined soil covering device for peanut seeding machine

WANG Yan[1,2], ZHANG Chun-yan[2,3], ZHANG Guo-hai[1], ZHANG Jia-lei[4], WAN Shu-bo[4], ZHANG Zheng[4], ZHANG Yue[2,5], KANG Jian-ming[2,3*]
(1. *Colleges of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo* 255000, *China*; 2. *Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Jinan* 250100, *China*; 3. *Shandong Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment in Hilly and Mountainous Areas, Jinan* 250100, *China*; 4. *Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan* 250100, *China*; 5. *School of Mechanical and Automotive Engineering, Liaocheng University, Liaocheng* 252059, *China*)

Abstract: To address the issue of uneven soil covering by the peanut film seeder's soil covering device during operation, which lead to exposed seeds and seed drying, a double-disc combined soil covering device is designed. The device combines soil covering disc with soil covering roller to enhance the uniformity of soil covering. The motion state of the double-disc combined soil covering device during soil covering operation was analyzed, and the key structural parameters affecting soil covering performance were obtained by combining the kinematic analysis of the soil during operation. With the help of a EDEM simulation software, a simulation model of soil covering device was established to explore the influence of different parameters on operation performance of the soil covering device. The number of soil guiding plates of the soil covering roller was determined, and the key structural parameter range of the device was optimized. Taking the operation speed, soil covering port width, and soil guiding plate deflection angle as the test factors and the coefficient of variation of soil covering uniformity as the evaluation index, a Box-

收稿日期:2025-12-09
基金项目:国家重点研发计划(2024YFD2301002);山东省重点研发计划(重大科技创新工程)(2024CXGC010902);山东省农机研发制造推广应用一体化试点项目(NJYTHSD-202321);国家花生产业技术体系(CARS-13);泰山学者工程(tspd20221107)
作者简介:王岩(2000-),男,硕士研究生,研究方向为农业机械化工程,E-mail: 19862515138@163.com
* 通讯作者:康建明(1984-),男,研究员,博士,主要从事农业机械装备研究,E-mail: kjm531@sina.com

Behnken test was conducted, and the optimal working parameters of the double-disc combined soil covering device were determined as an operation speed of 3.9 km/h, a soil covering port width of 75 mm, and a soil guiding plate deflection angle of 45. Field tests were conducted with the average operation speed set at 3.9 km/h. The field test results showed that under the optimal working parameters, the coefficient of variation of soil covering uniformity was less than 8%, meeting the requirements of soil covering operation on peanut film seeding, and could improve soil covering performance of the seeding machine, contributing to the increase of large-scale peanut yield per unit area.

Key words: peanut; seeder; soil covering device; make holes in the film for sowing

花生是我国主要的油料作物之一,具有很高的经济价值[1-3],覆土作业是花生播种过程中的重要环节,适当的覆土可以调节土壤湿度与温度,抑制杂草生长,满足花生不同生长周期对环境的要求。覆土装置是花生播种机的重要工作部件之一,覆土作业中,覆土装置应当均匀地、适量地将土壤覆盖在种子表层[4],目前常见的覆土装置有拖环式、八字型滑刀式、双圆盘式、V型挤压式4种[5,6],其中双圆盘式覆土器首先应用于铺膜播种机上,用于膜上种行覆土,在花生精量播种机上应用较为广泛。但在花生膜上打孔播种生产作业中,双圆盘式覆土器抛撒土壤距离有限,膜上覆土量少,容易出现断续覆土现象,造成种子裸露、晾种的问题,影响种子出苗,因此还需对覆土装置进行进一步研究。

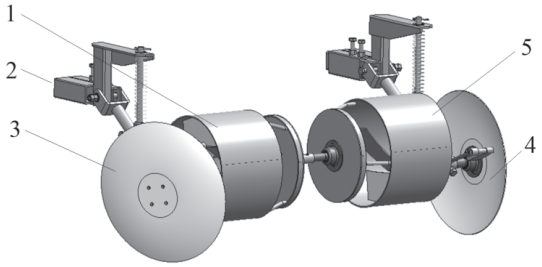
研究人员对覆土装置的结构以及性能参数进行了大量研究。卢琦等[7]针对V型覆土装置在黏土条件下作业不可靠的问题,设计了一种星齿球面盘式覆土装置,能够适应黏土环境,改善播种机覆土性能;张志君等[8]受东方蝼蛄刺状挖掘足的启发,设计了一种破碎式仿生覆土装置,能够提升覆土装置碎土性能,改善覆土均匀性;刘芳等[9]针对重型精量播种机在高速作业时覆土装置影响播种均匀性的问题,设计了一种阿基米德螺线型弧面双齿盘覆土装置,确定弧面双齿盘的最优结构参数,提升了覆土厚度的均匀性,降低了覆土作业对播种均匀性的影响;戴飞等[10]为实现微型垄全膜覆盖种床机械化高性能构建,设计了一种微垄型覆膜覆土联合作业机,能够实现起垄、覆膜、覆土一体化作业;陈海涛等[11]为提升免耕覆秸精量播种机覆土镇压及防黏土性能,设计了一种覆土、镇压和减黏功能的三项可调式V型覆土镇压器,优化了播种机的结构参数。但上述覆土装置多适用于单一膜边或种行上覆土,对于花生膜上打孔播种模式,需同时对膜边及膜上进行覆土的情况不能完全适用。

针对上述问题,本研究设计了一种双圆盘组合式覆土装置,将覆土圆盘与覆土滚筒相结合,实现膜边及膜上均匀覆土,通过覆土装置工作时土壤的运动学分析,结合理论设计确定了影响覆土装置性能的关键结构参数,阐述了覆土装置的工作原理,借助EDEM仿真软件得到了覆土装置的最佳工作参数组合,并通过田间试验加以验证,从而提升覆土装置作业质量。

1 双圆盘组合式覆土装置结构设计

1.1 整体结构

花生膜上打孔播种机覆土装置结构如图1所示,由一对覆土圆盘、覆土滚筒组成,覆土圆盘支架采用加压吊杆机构,可实现随地仿形,覆土滚筒内均匀分布若干偏转角度的导土片,完成土壤输送。



注:1. 覆土滚筒-Ⅰ;2. 覆土装置支架;3. 覆土圆盘-Ⅰ;4. 覆土圆盘-Ⅱ;5. 覆土滚筒-Ⅱ

Note: 1. soil covering roller I; 2. soil covering device support; 3. soil cover disc I; 4. soil cover disc Ⅱ; 5. soil covering roller Ⅱ

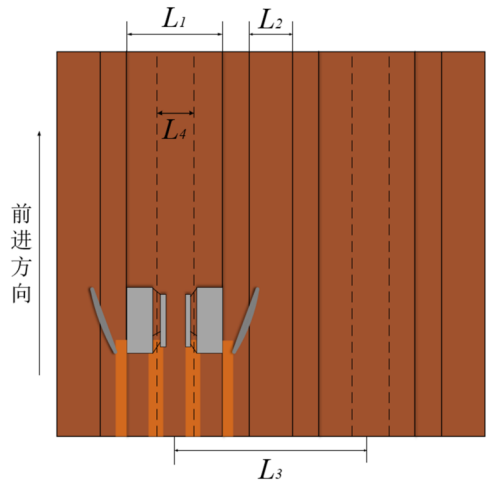
图1 覆土装置结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the soil covering device structure

1.2 工作原理

在花生一垄两行膜上种植模式下,覆土装置工作原理如图2所示。覆土作业时,播种机前进带动覆土圆盘与覆土滚筒转动,两侧覆土圆盘将垄沟内土壤抛洒至膜边及覆土滚筒内,覆土滚筒内土壤经导土片旋转输送至膜上种行处,均匀覆盖至种子表层,完成覆土过程。

依据花生种植全程机械化技术要求[12-14],垄面宽L_1为550 mm,垄沟宽L_2为200 mm,垄距L_3为800~850 mm,行距L_4为300 mm。



注:L_1为垄面宽,mm;L_2为垄沟宽,mm;L_3为垄距,mm;L_4为行距,mm

Note: L_1: ridge width, in mm; L_2: furrow width, in mm; L_3 : ridge space, in mm; L_4: line space, in mm

图2 覆土装置工作原理图

Fig. 2 Working principle diagram of the soil covering device

1.3 运动学分析

覆土作业中,覆土圆盘的作用是将垄沟及垄边的土壤均匀抛撒至膜边及覆土滚筒内,覆土滚筒的作用是将滚筒内的土壤经导土片输送,精准覆盖至种行上方,现对双圆盘组合式覆土装置作业过程中土壤颗粒的运动情况进行分析,如图3所示,覆土装置对称分布,因而选择对左侧覆土圆盘及覆土滚筒作用下的土壤颗粒进行分析。

首先对土壤颗粒与覆土圆盘接触过程进行运动学分析,土壤颗粒主要受覆土圆盘的摩擦力f_1、覆土圆盘的支撑力N、土壤间的黏结力Q_1、重力G。以覆土圆盘中心为空间坐标系原点O,x轴正方向为覆土圆盘运动方向,y轴正方向为水平面内与x轴垂直方向,z轴正方向为竖直方向,土壤颗粒受力情况如式(1)所示。

$$\begin{cases} F_x = f_1\cos\theta_1\cos\alpha_1 + N\sin\alpha_1\sin\theta_1 - Q_{1x} \\ F_y = f_1\cos\alpha_1\sin\theta_1\cos\beta_1 + N\sin\alpha_1\cos\theta_1\cos\beta_1 - Q_{1y} \\ F = m\dfrac{v}{t} \\ f = N\tan\gamma_1 \\ G = mg \end{cases} \tag{1}$$

式中F_x、F_y、F_z分别为土壤颗粒在x、y、z轴正方向所受的合力,N;Q_{1x}、Q_{1y}、Q_{1z}分别为土壤颗粒所受黏结力在x、y、z轴正方向所受分力,N;α_1为土壤颗粒与覆土圆盘中心点沿竖直方向夹角,°;θ_1为土壤颗粒与覆土圆盘中心点连线与土壤颗粒所受覆土圆盘支撑力方向夹角,°;β_1为覆土圆盘安装倾角,°;γ_1为土壤颗粒与覆土圆盘摩擦角,°;m为土壤颗粒质量,kg;v为土壤颗粒运动速度,m/s;g为重力加速度,m/s^2。

后对土壤颗粒运动至覆土滚筒内输送过程进行运动学分析,如图4所示,土壤颗粒主要受覆土滚筒导土片的摩擦力f_2、覆土滚筒导土片的支撑力K、土壤间的黏结力Q_2、重力G。以导土片中心点为空间坐标系原点O,x轴正方向为覆土滚筒前进方向,y轴正方向为水平面内与x轴垂直方向,z轴正方向为竖直方向,土壤颗粒受力情况如式(2)所示。

$$\begin{cases} F_x = K\sin\alpha_2\sin\theta_2 - f_2\cos\theta_2\cos\alpha_2 - Q_{2x} \\ F_y = f_2\cos\alpha_2\sin\theta_2\cos\beta_2 + K\sin\alpha_2\cos\theta_2\cos\beta_2 - Q_{2y} \\ F_z = K\cos\alpha_2\cos\beta_2 - f2\sin\alpha_2\cos\beta_2 - G - Q_{2z} \\ f = N\tan\gamma_2 \\ G = mg \end{cases} \tag{2}$$

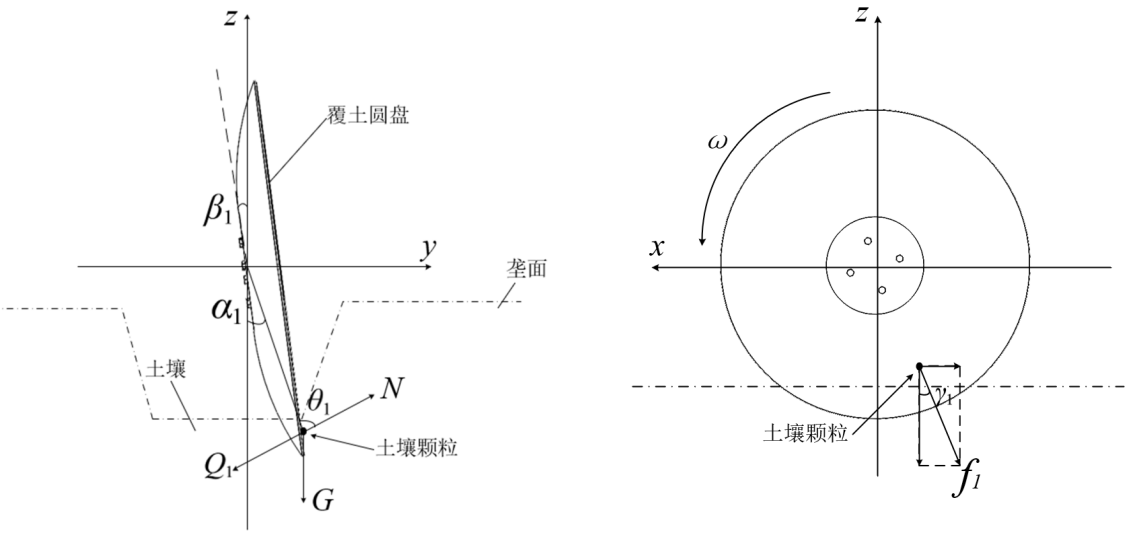


图3 覆土圆盘处土壤颗粒受力分析的后视图(A)和左视图(B)

Fig. 3 Force analysis under the rear view (A) and left view (B) of soil particles at soil-covering disc

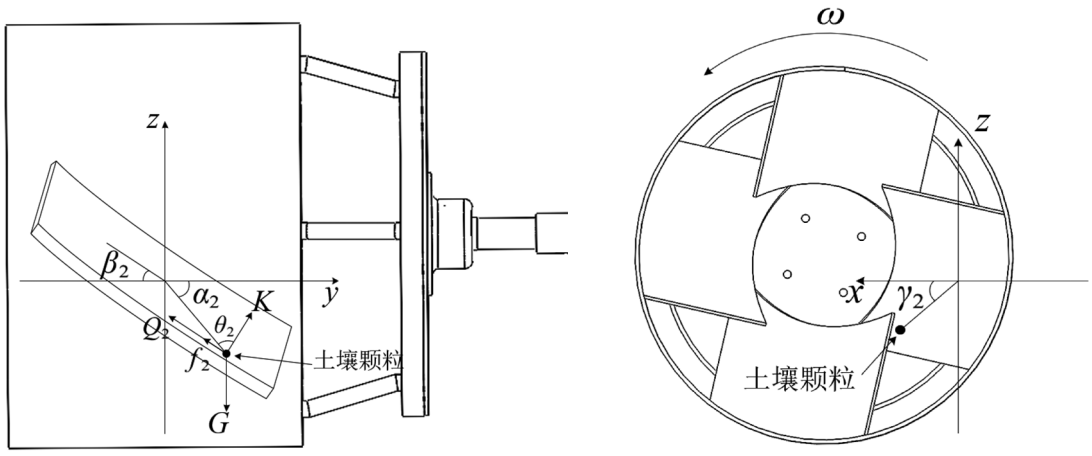


图4 覆土滚筒内土壤颗粒受力分析的后视图(A)和左视图(B)

Fig. 4 Force analysis under the rear view (A) and left view (B) of soil particles in the soil-covering drum

式中F_x、F_y、F_z分别为土壤颗粒在x、y、z轴正方向所受的合力,N;Q_{2x}、Q_{2y}、Q_{2z}分别为土壤颗粒所受黏结力在x、y、z轴正方向所受分力,N;α_2为土壤颗粒与覆土滚筒导土片中心点沿竖直方向夹角,°;θ_2为土壤颗粒与导土片中心点连线与土壤颗粒所受支撑力方向夹角,°;β_2为覆土滚筒导土片偏转角,°;γ_2为土壤颗粒与覆土滚筒导土片摩擦角,°。

由式(1)可得,土壤颗粒在覆土圆盘的作用下,三轴方向上的运动速度为

$$\begin{cases} V_x = \dfrac{t}{m}(N\tan\gamma_1\cos\theta_1\cos\alpha_1 + N\sin\alpha_1\sin\theta_1 - Q_{1x}) \\ V_y = \dfrac{t}{m}(N\tan\gamma_1\cos\alpha_1\sin\theta_1\cos\beta_1 + N\sin\alpha\cos\theta\cos\beta - Q_{1y}) \\ V_z = \dfrac{t}{m}(N\tan\gamma_1\sin\alpha_1\cos\beta_1 + N\cos\alpha\cos\beta - G - Q_{1z}) - gt \end{cases} \tag{3}$$

由式(2)可得,土壤颗粒在覆土滚筒内三轴方向上的运动速度为

$$\begin{cases} V_x = \dfrac{t}{m}(K\sin\alpha_2\sin\theta_2 - K\tan\gamma_2\cos\theta_2\cos\alpha_2 + Q_{2x}) \\ V_y = \dfrac{t}{m}(K\sin\alpha_2\cos\theta_2\cos\beta_2 - K\tan\gamma_2\cos\alpha_2\sin\theta_2\cos\beta_2 - Q_{2y}) \\ V_z = \dfrac{t}{m}(K\cos\alpha_2\cos\beta_2 - K\tan\gamma_2\sin\alpha_2\cos\beta_2 - G - Q_{2z}) - gt \end{cases} \tag{4}$$

由式(3)、(4)可知,覆土作业中土壤颗粒的运动状态与覆土圆盘安装倾角β_1、覆土滚筒导土片偏转角β_2有关,因此需进一步对覆土装置的结构参数进行设计。

1.4 覆土圆盘结构设计

覆土圆盘在覆土作业中,与覆土滚筒保持一定的安装间距,并以一定角度和深度推动土壤,并抛洒至膜边覆土滚筒内。覆土圆盘工作示意图如图5所示。

基于上述工作原理,覆土圆盘作业时抛洒土壤质量及体积计算公式为

$$\begin{cases} L = 2\sqrt{R_2 - (R-h)^2} \\ D = L\sin\beta_1 \\ V(\varepsilon) = vd(L\varepsilon) \\ M(\varepsilon) = \rho V(\varepsilon) \end{cases} \tag{5}$$

式中R为覆土圆盘直径,mm;h为覆土圆盘作业深度,mm;v为覆土圆盘作业速度,m/s;L为覆土圆盘与土壤接触宽度,mm;D为覆土作业宽度,mm;V为抛洒土壤体积,m^3;M为抛洒土壤质量,kg;ρ为土壤密度,kg/m^3。

基于式(5)可得,覆土作业过程中,覆土圆盘土壤抛洒量与覆土圆盘直径R、覆土圆盘安装倾角β_1、覆土圆盘作业深度h有关。

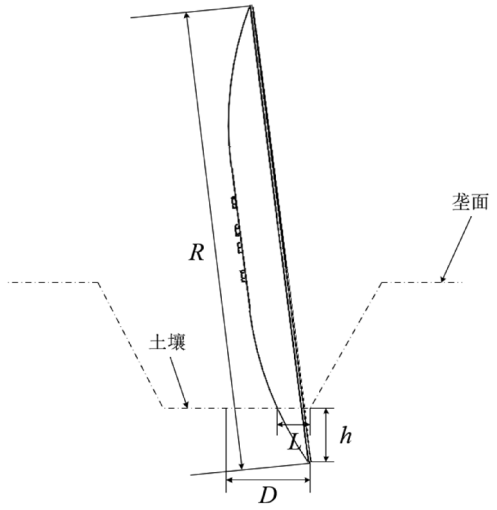


图5 覆土圆盘作业示意图

Fig. 5 Schematic diagram of soil-covering disc operation

根据花生播种技术要求,花生播种深度一般在30 mm~50 mm之间,依据经验公式[15]得覆土圆盘直径应满足

$$\begin{cases} D = Kh \\ D > 2h + d \end{cases} \tag{6}$$

式中K为覆土圆盘径深比,本文取5;d为法兰盘最大外径,mm。

由于花生播种深度在30 mm~50 mm范围内,因此为满足覆土要求,覆土圆盘作业深度h在40 mm~70 mm范围内,取d为100 mm,结合式(5)和(6),取覆土圆盘直径R为350 mm。

为增强覆土圆盘抛土能力,安装覆土圆盘时将其调至合适的安装角度,并与覆土滚筒保持合适的安装间距,如图6所示。

由图6几何关系可知,安装倾角过大时,覆土圆盘抛洒土壤方向偏上,导致抛洒土壤水平位移较短,无法进入覆土滚筒,安装倾角过小时,抛洒土壤竖直位移较小,高度无法满足土壤进入覆土滚筒的要求,且基于花生播种农艺要求,膜上种行与垄边距离为125 mm,垄沟底宽200 mm,覆土圆盘抛土时应避免对两侧垄边产生影响,因此本文取覆土圆盘安装倾角为15°,覆土圆盘安装间距l_1为150 mm。

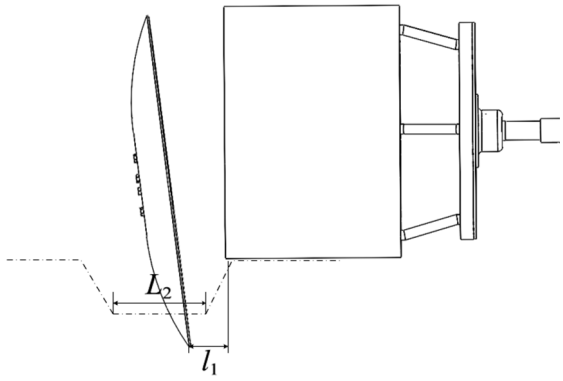


图6 覆土圆盘安装示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the installation of the soil covering disc

1.5 覆土滚筒结构设计

覆土滚筒作业时,导土片将覆土圆盘抛撒的土壤输送至覆土口处,覆盖在膜上种行处,覆土滚筒作业示意图如图7所示。

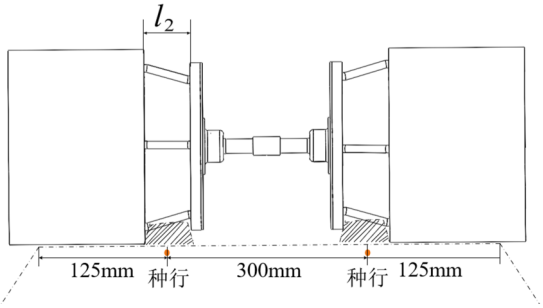


图7 覆土滚筒作业示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the operation of soil covering roller

两侧覆土滚筒内导土片呈对称分布,如图8所示,当导土片数量较少时,无法满足覆土滚筒输送土壤需求,当导土片数量较多时,土壤输送能力趋于饱和,且由于土壤堆积,降低土壤输送量。

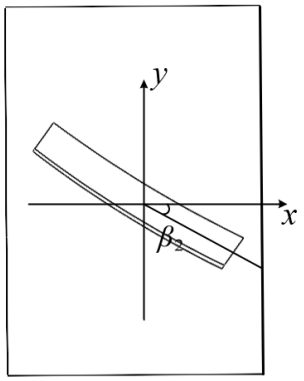


图8 导土片偏转示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the deflection of soil guide sheet

由图8几何关系可得,导土片偏转角应满足

$$\gamma_2 < \beta_2 < \frac{\pi}{2} - \gamma_2 \tag{7}$$

覆土滚筒转动时,土壤应向覆土滚筒内侧运动,结合式(4)、(7)可知,导土片偏转角取值范围为[35°, 55°],并通过仿真试验确定导土片数量。

依据花生播种农艺要求,垄上行距为300 mm,

种行与垄边距离为125 mm,穴播器鸭嘴横向宽度约为60 mm,因此为保证膜上种行覆土均匀性,覆土滚筒覆土口宽度取值范围为[60 mm, 80 mm]。

考虑到覆土滚筒在覆土作业中的稳定性,以及覆土圆盘向覆土滚筒内抛洒土壤的运动状态,本文选取覆土滚筒直径为300 mm。

2 结果与分析

2.1 EDEM仿真模型建立

为确定双圆盘组合式覆土装置关键结构参数,借助离散元法,对覆土装置进行仿真试验[16,17],模拟覆土装置作业情况。

根据前期设计结果,使用SolidWorks软件绘制覆土装置三维图,并将其导入EDEM软件中,覆土装置简化模型如图9所示,仿真模型相关参数见表1[18-20]。

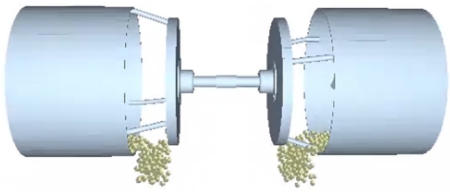


图9 覆土装置简化模型

Fig. 9 Simplified model of soil covering device

表1 仿真模型参数

Table 1 Simulation model parameters

材料 Material	参数 Parameter	数值 Numerical value
土壤颗粒 Soil particle	泊松比 Poisson's ratio	0.30
	密度 Density/(kg·m^{-3})	1638
	剪切模量 Shear elasticity	1.15×10^{7}
双圆盘组合式覆土装置 Double disc combined covering device	泊松比 Poisson's ratio	0.25
	密度 Density/(kg·m^{-3})	7.83×10^{3}
	剪切模量 Shear elasticity	7.9×10^{10}
土壤颗粒-土壤颗粒 Soil particles - Soil particles	恢复系数 Recovery coefficient	0.55
	静摩擦因数 Static friction factor	0.8
	动摩擦因数 Dynamic friction factor	0.2
土壤颗粒-双圆盘组合式覆土装置 Soil particle - double-disc combined soil covering device	恢复系数 Recovery coefficient	0.3
	静摩擦因数 Static friction factor	0.5
	动摩擦因数 Dynamic friction factor	0.05

2.2 试验因素与评价指标

为进一步确认双圆盘组合式覆土装置覆土性能,结合理论分析结果,得到作业速度、导土片个数、覆土口宽度、导土片偏转角为影响覆土性能的关键因素,覆土作业时膜上覆盖土壤越多,覆土效果越好,因此以覆土厚度、覆土均匀性变异系数为试验评价指标,其中覆土均匀性变异系数计算式为

$$C = \sqrt{\frac{\sum n_i M_i^2}{n_2'} - \bar{M}^2} \times 100\% \tag{8}$$

式中,C为覆土均匀性变异系数,%;M为覆土量,g;$\bar{M}$为平均覆土量,g。

$$H = l_1 - l_2 \tag{9}$$

式中,H为覆土厚度,l_1为覆土后垄面高度,l_2为覆土前垄面高度。

对双圆盘组合式覆土装置分别进行单因素仿真试验以及Box-Behnken试验。

2.3 单因素仿真试验

根据双圆盘组合式覆土装置理论设计结果,覆土口宽度范围为60 mm~80 mm,导土片偏转角范围为35°~55°,分别对不同导土片数量、覆土口宽度、导土片偏转角的覆土装置进行单因素试验,取覆土装置前进速度为4.0 km/h[21],在导土片数量单因素试验中,取导土片偏转角为45°,覆土口宽度为70 mm,导土片数量分别为1~6个,以覆土厚度为试验指标,试验结果如图10所示;在覆土口宽度单因素试验中,取导土片偏转角为45°,覆土口宽度设置5个水平,在导土片偏转角单因素试验中,取覆土口宽度为70 mm,导土片偏转角设置5个水平,以覆土均匀性变异系数为试验指标,覆土口宽度单因素试验与导土片偏转角单因素试验设计如表2所示,试验结果如图11所示。

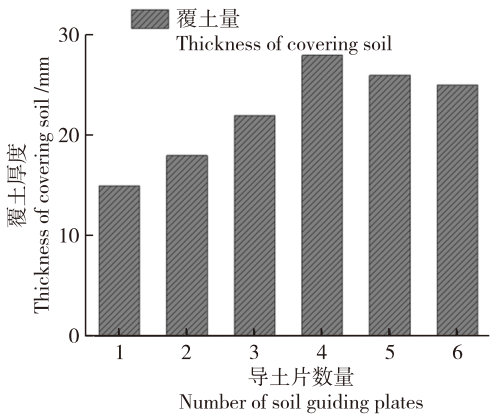


图10 导土片数量单因素试验

Fig. 10 Simulation test results of the number of soil guide sheets

表2 单因素试验

Table 2 Single-factor trials

序号 No.	因素 Factor	
	覆土口宽度 Width of the soil cover opening /mm	导土片偏转角 Deflection angle of soil guide sheet /°
1	70	35
		40
		45
		50
		55
2	60	45
	65	
	70	
	75	
	80	

如图10所示,覆土厚度随导土片数量增加呈先升高后降低的趋势,当导土片数量从1增加到4时,覆土厚度逐渐升高,覆土量逐渐增加,因为当导土片数量过少时,无法将土壤及时输送至膜上种行处,导致覆土性能降低;当导土片数量为4时,覆土厚度达到最大值,此时覆土性能最优,当导土片数量大于4时,覆土厚度呈小幅度降低,因为导土片数量过多,覆土滚筒内土壤可移动空间缩小,土壤在覆土滚筒内堆积,阻塞土壤运动,影响了覆土滚筒正常覆土。综上所述,其余参数相同时,覆土滚筒内导土片数量为4个时覆土性能最优。

如图11A所示,覆土均匀性变异系数随导土片偏转角呈先降低后升高的趋势,当导土片偏转角小于40°时,覆土滚筒输送土壤效率较低,不满足播种时覆土需求,当导土片偏转角大于50°时,覆土滚筒输送土壤距离较近,无法准确输送至膜上种行处,导土片偏转角在40°~50°范围内时,覆土均匀性变异系数小于10%,覆土性能较优。

如图11B所示,覆土均匀性变异系数随覆土口宽度呈先降低后升高的趋势,当覆土口宽度小于70 mm时,覆土滚筒输送土壤量较少,无法完整覆盖种行,影响覆土效果,当覆土口宽度在70 mm~80 mm范围内时,覆土均匀性变异系数小于11%,覆土性能较优。

综上所述,选取覆土性能较优的覆土口宽度范围为[70 mm, 80 mm],导土片偏转角为[40°, 50°],进一步优化双圆盘组合式覆土装置结构参数范围。

2.4 覆土装置Box-Behnken响应面试验

2.4.1 试验设计 对覆土装置进行三因素三水平组合试验[22],以作业速度[21,23]、覆土口宽度、导土片偏转角为试验因素,以覆土均匀性变异系数为试验指标[24],试验因素水平设置如表3所示。

表3 试验因素编码

Table 3 Coding of test factors

水平 Level	X_1	X_2	X_3
-1	3.0	70	40
0	4.0	75	45
1	5.0	80	50

注:X_1、X_2、X_3分别为作业速度、覆土口宽度、导土片偏转角的编码值

Note: X_1, X_2, and X_3 are the encoded values for working speed, covering soil mouth width, and soil guiding plate deflection angle, respectively

2.4.2 试验结果与分析 使用Design-Expert 13软件对试验结果进行分析,如表4所示,共进行17组试验,每组试验重复3次取平均值。

对试验结果进行方差分析,如表5所示,其中作业速度、覆土口宽度、导土片偏转角均对覆土均匀性变异系数有显著的影响,排除不显著的因素后,得出覆土均匀性变异系数的回归方程为:

$$Y_1=6.91+0.2125X_1-0.7588X_2-0.1763X_3-0.4575X_1X_2-0.8275X_1X_3+1.47X_1^2+0.7855X_3^2 \quad (10)$$

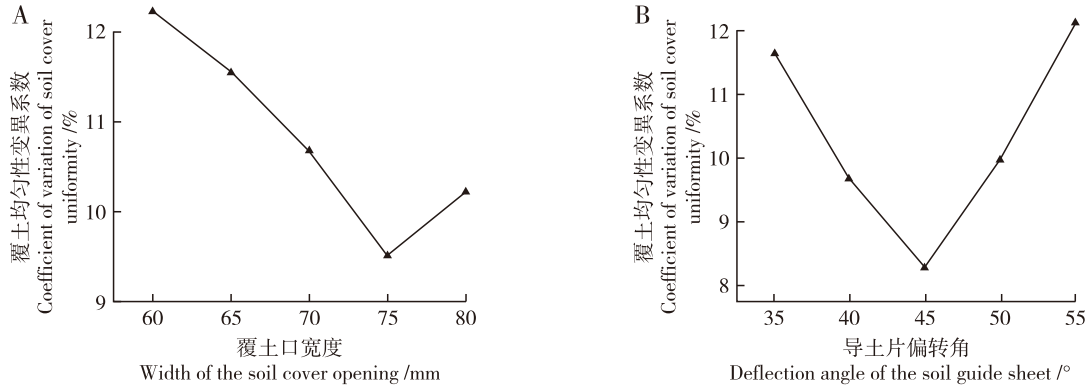


图11 覆土口宽度单因素试验(A)和导土片偏转角单因素试验(B)的结果

Fig. 11 Single-factor test results on soil cover opening width (A) and deflection angle of soil guide sheet (B)

表4 覆土装置Box-Behnken响应面实验结果

Table 4 Results of soil covering device Box-Behnken response surface test

序号No.	X_1	X_2	X_3	Y/%
1	−1	−1	0	11.13
2	1	−1	0	12.22
3	−1	1	0	10.45
4	1	1	0	9.71
5	−1	0	−1	8.25
6	1	0	−1	10.58
7	−1	0	1	9.42
8	1	0	1	8.44
9	0	−1	−1	10.98
10	0	1	−1	9.62
11	0	−1	1	10.84
12	0	1	1	9.32
13	0	0	0	6.75
14	0	0	0	7.03
15	0	0	0	7.02
16	0	0	0	6.85
17	0	0	0	6.92

2.4.3 响应面分析与参数优化 对试验结果进行分析处理,排除不显著因素的影响,可得作业速度、覆土口宽度、导土片偏转角交互作用下对试验指标影响的响应曲面,如图12所示。

由图12A可知,作业速度一定时,覆土均匀性变异系数随覆土口宽度增加呈先降低后升高的趋势,覆土口宽度较小时,土壤无法均匀覆盖至膜上种行处,且覆土量较少,无法满足覆土需求,覆土口宽度较大时,覆土量较多,土壤在覆土滚筒内易堵塞,且在无阻塞现象发生时,覆土厚度较高,影响花生出芽;覆土口宽度一定时,覆土均匀性变异系数随作业速度升高呈先降低后升高的趋势,作业速度较小时,土壤无法从覆土圆盘处抛撒至覆土滚筒内,导致覆土量减少,降低覆土性能,作业速度较大时,覆土滚筒输送土壤范围较大,降低覆土厚度。

由图12B可知,作业速度一定时,覆土均匀性变异系数随导土片偏转角增大呈升高的趋势,导土片偏转角较大时,土壤在靠近覆土滚筒的一侧堆积,覆土量过多,导致覆土厚度过大,影响覆土均匀性。

为了得到双圆盘组合式覆土装置最优工作参数组合,以覆土均匀性变异系数最小为优化目标,目标函数及约束条件为

$$\begin{cases} \min Y(X_1, X_2, X_3) \\ 3.0\ \text{km/h} \leqslant X_1 \leqslant 4.0\ \text{km/h} \\ 70\ \text{mm} \leqslant X_2 \leqslant 80\ \text{mm} \\ 40^\circ \leqslant X_3 \leqslant 50^\circ \end{cases} \tag{11}$$

对式(10)进行求解,保留X_1小数点后一位,对X_2、X_3进行取整,可得覆土装置最优工作参数为:作业速度为3.9 km/h,覆土口宽度为75 mm,导土片偏转角为45°,此时覆土均匀性变异系数为6.85%。

2.5 田间试验

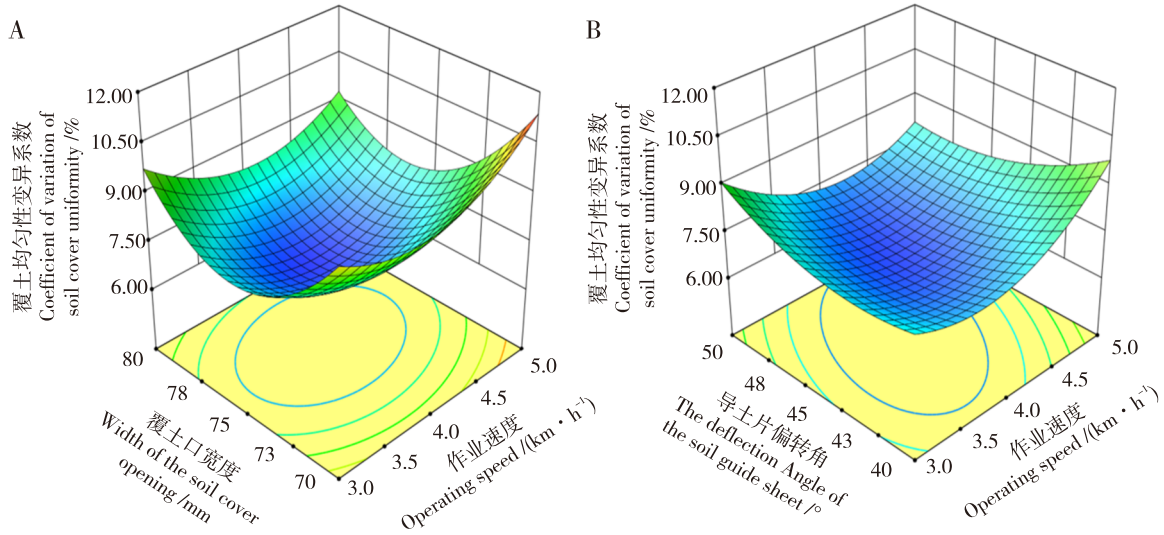
为检验双圆盘组合式覆土装置覆土效果,在山东省农业科学院济阳试验基地开展试验,机具作业速度在3.5~4.5 km/h内随机选取垄长为20 m以内的覆土情况,每组取5个测试点,对测试结果取平均值,共选取6组,田间试验如图13所示。

田间试验结果如表6,覆土厚度大于28 mm,覆土均匀性变异系数小于8%,满足花生播种覆土

表5 方差分析结果

Table 5 Results of analysis of variance

指标Index	方差来源 Source of variation	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	F	P
Y	模型 Model	50.06	9	170.89	<0.0001
	X_1	0.3612	1	11.10	0.0126
	X_2	4.61	1	141.50	<0.0001
	X_3	0.2485	1	7.63	0.0280
	X_1X_2	0.8375	1	25.72	0.0014
	X_1X_3	2.74	1	84.15	<0.0001
	X_2X_3	0.0064	1	0.1966	0.6708
	X_1^2	9.14	1	280.67	<0.0001
	X_2^2	26.12	1	802.36	<0.0001
	X_3^3	2.60	1	79.82	<0.0001
	残差 Residual	0.2278	7		
	失拟 Lack of fit	0.1721	3	4.12	0.1025
	总和 Total	50.29	16		



注:A. 覆土口宽度与作业速度交互作用响应曲面;B. 导土片偏转角与作业速度交互作用响应曲面

Note: A: response surface of the interaction between soil cover opening width and operation speed; B: response surface of the interaction between deflection angle of the soil guide sheet and operation speed

图 12 各因素交互作用对试验指标的响应曲面

Fig. 12 Response surfaces of the interaction of various factors to the test indicators



图 13 田间试验

Fig. 13 Field experiment

要求[25,26]。

3 讨论与结论

花生是我国重要的油料作物之一,本研究设计的双圆盘组合式覆土装置,将覆土圆盘与覆土滚筒集成,实现了膜边与膜上协同覆土,克服了覆土装置在膜上播种模式下覆土量不足、断续覆土的局限。

拖环式、八字型滑刀式等覆土装置不适用于膜上打孔播种模式,它们主要适用于膜边覆土,无法向膜上的播种行输送土壤。本研究设计的双圆盘组合式覆土装置正是为了解决这一问题,覆土圆盘负责从垄沟取土,覆土滚筒通过导土片将土壤横向输送并精准覆盖至膜上种行处。

表 6 田间试验结果

Table 6 Field experiment results

序号 No.	覆土厚度 Thickness of covering soil /mm	覆土均匀性变异系数 Coefficient of variation of soil cover uniformity /%
1	28	7.25
2	30	7.42
3	29	7.14
4	28	7.15
5	31	7.23
6	29	7.44

随着花生种植规模化发展,播种机各个环节配合工作的重要性逐渐升高,通过对覆土口宽度、导土片偏转角等结构参数进行调节,能够适配不同垄型规格、土壤质地,增强覆土装置的适应性。

1)针对花生膜上打孔播种机覆土装置在作业时覆土不均匀造成种子裸露、晾种的问题,设计了一种双圆盘组合式覆土装置,构建了土壤颗粒在覆土圆盘及覆土滚筒处的运动学模型,并通过结构设计与理论分析确定了覆土装置结构参数范围,保证了双圆盘式覆土装置膜上覆土的可行性。

2)利用离散元法构建了双圆盘组合式覆土装置简化模型,通过仿真试验确定了覆土滚筒内导土

片个数,缩小了覆土装置结构参数范围,借助Design-Expert软件优化模块得到覆土装置最佳工作参数:作业速度为3.9 km/h,覆土口宽度为75 mm,导土片偏转角为45°。

3)田间试验结果与仿真试验结果相符,覆土厚度大于28 mm,覆土均匀性变异系数小于8%,满足花生膜上打孔播种覆土要求。

参考文献:

[1] 油梅霞.花生高产栽培技术及其经济效益研究[J].粮油与饲料科技,2024(11):86-88.

[2] 徐文晖.花生种植技术及提高种植效益的措施[J].现代农村科技.2024(2):18-19

[3] 万书波,张佳蕾,高华鑫,等.中国花生高产栽培研究进展与展望[J].作物学报,2025,51(7):1703-1711.

[4] 贾洪雷,陈忠亮,马成林,等.北方旱作农业区耕作体系关键技术[J].农业机械学报,2008(11):59-63.

[5] 郭慧,陈志,贾洪雷,等.锥形轮体结构的覆土镇压器设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(12):56-65.

[6] 王景立.精密播种机覆土与镇压过程对种子触土后位置控制的研究[D].长春:吉林大学,2012.

[7] 卢琦,刘立晶,刘忠军,等.播种机星齿球面盘式覆土装置设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(4):23-31+73.

[8] 张志君,孙旭伟,金柱男,等.大豆播种机破碎式仿生覆土装置设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(2):34-40+73.

[9] 刘芳,高筱钧,贾宪,等.高速精量播种机阿基米德螺线型弧面双齿盘覆土装置设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(6):91-100+120.

[10] 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.

[11] 陈海涛,徐源,史乃煜.三向可调式V型覆土镇压器设计与试验[J].东北农业大学学报,2018,49(11):65-73.

[12] 李娜,姜伟,周进,等.山东省花生生产全程机械化现状与对策建议[J].中国农机化学报,2019,40(10):42-50+71.

[13] 万书波,张佳蕾,张智猛.花生种植技术的重大变革——单粒精播[J].中国油料作物学报,2020,42(6):927-933.

[14] 周桂元,梁炫强,李少雄,等.花生生产全程机械化技术规范[J].广东农业科学,2014,41(16):14-17.

[15] 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,2017.

[16] Hang C G, Gao X J, Yuan M C, et al. Discrete element simulations and experiments of soil disturbance as affected by the tine spacing of subsoiler[J]. Biosyst Eng, 2018, 168: 73-82. DOI: 10.1016/j. biosystemseng.2017.03.008.

[17] Ucgul M, Saunders C. Simulation of tillage forces and furrow profile during soil-mouldboard plough interaction using discrete element modelling[J]. Biosyst Eng, 2020, 190: 58-70. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2019.11.022.

[18] 王宪良,胡红,王庆杰,等.基于离散元的土壤模型参数标定方法[J].农业机械学报,2017,48(12):78-85.

[19] 宋占华,李浩,闫银发,等.桑园土壤非等径颗粒离散元仿真模型参数标定与试验[J].农业机械学报,2022,53(6):21-33.

[20] 向伟,吴明亮,吕江南,等.基于堆积试验的黏壤土仿真物理参数标定[J].农业工程学报,2019,35(12):116-123.

[21] 张春艳,康建明,张宁宁,等.花生气吸滚筒式穴播器分种盘设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(6):28-37.

[22] 辛涛.回归分析与实验设计[M].北京:北京师范大学出版社,2010.

[23] 康建明,向阳,张春艳,等.气吸滚筒式花生穴播器投种性能分析与试验[J].农业工程学报,2022,38(14):1-11.

[24] 中国农业机械标准化技术委员会.播种机质量评价技术规范:NY/T 1143-2006[S].北京:中国农业出版社,2006.

[25] 中国农业机械标准化技术委员会.单粒(精密)播种机试验方法:GB/T 6973-2005[S].中国标准出版社,2005.

[26] 中华人民共和国农业农村部.铺膜穴播机作业质量:NY/T 987-2006[S].北京:中国标准出版社,2006.

(责任编辑:郭学兰)