

基于离散元法高垄膜上覆土装置设计与试验

张秀丽¹ 秦浩珺¹ 仝振伟¹ 孔阳阳¹ 刘剑君² 陈永¹ 刘晓潺¹

(1. 河南农业大学机电工程学院, 郑州 450002; 2. 中国烟草总公司河南省公司, 郑州 450046)

摘要: 针对丘陵地区高垄作物覆膜后易造成大风揭膜的问题,结合高垄膜上覆土农艺要求,设计了一种高垄膜上覆土装置。根据阿基米德螺旋线在圆台的成线原理,设计了覆土滚筒螺旋叶片,对土壤在覆土滚筒中的运动进行动力学分析,确定了影响膜上覆土量和土堆聚拢值的主要因素;使用 EDEM 软件建立了覆土装置和土壤交互作用仿真模型,以螺旋线结束角、机具前进速度和出口口对应圆周角度为试验因素,以覆土量和土堆聚拢值为试验指标开展单因素和三因素三水平正交试验,确定了影响因素范围并建立了响应面模型。正交试验结果表明,螺旋线结束角和前进速度对覆土量影响极显著,前进速度和出口口对应圆周角度对土堆聚拢值影响极显著,最佳作业参数为螺旋线结束角 57.44°、前进速度 3.82 km/h、出口口对应圆周角度 32.02°。根据最佳作业参数完成样机试制并开展田间试验,结果表明膜边覆土宽度 90.2 mm,膜边覆土厚度 35.7 mm,膜上土堆质量 545.2 g,地膜透光面占比 72.25%,满足丘陵地区高垄覆膜和膜上覆土农艺要求。

关键词: 高垄;膜上覆土;覆土滚筒;EDEM;正交试验

中图分类号: S223.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)10-0033-11

OSID:



Design and Experiment of Covering Soil on Plastic-film Device for High Ridge Based on Discrete Element Method

ZHANG Xiuli¹ QIN Haojun¹ TONG Zhenwei¹ KONG Yangyang¹ LIU Jianjun² CHEN Yong¹
LIU Xiaochan¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China

2. Henan Provincial Tobacco Company of CNTC, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Aiming to address the problem of plastic-film lifting caused by strong winds after mulching on high ridges in hilly areas, a covering soil on plastic-film device was designed according to the agronomic requirements of high ridge mulching. Based on the generating principle of the Archimedean spiral line on a truncated cone, a spiral blade of the overlying drum was designed. The dynamics of soil movement within the drum were analyzed to determine the main factors affecting the soil pile mass and the soil pile convergence value. Using EDEM, a simulation model of the interaction between the covering device and soil was established. Taking the spiral end angle, forward velocity, and circumferential angle corresponding to the soil discharge port as experimental factors, the soil pile mass and soil convergence value as evaluation indices, single-factor and three-factor three-level orthogonal experiments were carried out to determine the factor ranges and establish a response surface model. The orthogonal test results showed that the spiral end angle and forward velocity had a highly significant effect on the soil pile mass, while the forward velocity and circumferential angle corresponding to the soil discharge port had a highly significant effect on the soil pile convergence value. The optimal operating parameters were determined as follows: spiral end angle was 57.44°, forward velocity was 3.82 km/h, and circumferential angle corresponding to the soil discharge port was 32.02°. A prototype was manufactured based on the optimized parameters, and field experiment was conducted. The field experiment results showed that the soil pile mass on the film was 545.2 g, the lighting-struck ratio of the plastic-film was 72.25%, the soil

收稿日期: 2025-11-19 修回日期: 2025-12-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(32501803)、河南省科技攻关项目(242102110349)和中国烟草总公司河南省公司重大科技专项(2024410000240026)

作者简介: 张秀丽(1973—),女,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备技术研究,E-mail: zhangxiuli619@126.com

通信作者: 仝振伟(1992—),男,讲师,博士,主要从事现代农业装备技术研究,E-mail: tongzhenwei917@163.com

wide on film side was 90.2 mm, and the soil depth on film side was 35.7 mm, all meeting the agronomic requirements of film mulching and covering soil on plastic-film for high ridge in hilly areas.

Key words: high ridge; covering soil on plastic-film; overlying drum; EDEM; orthogonal experiment

0 引言

丘陵山地地形复杂,坡度变化大,气候特征表现为多风少雨,生态脆弱^[1]。其中,马铃薯、甘薯和烤烟作为西南、黄淮丘陵地区常见作物,常采用起高垄、覆膜种植方式^[2-4]。高垄种植土层疏松,透气性好,有利于根系下扎;垄体覆膜具有保温保墒,抑制杂草生长,减少土壤风蚀水蚀,保持良好的土壤结构,提高土壤保肥能力的作用^[5-7]。然而,在丘陵地区多风环境下,覆膜后易出现大风揭膜问题。膜上覆土可以增强地膜抗风性能,提高膜土贴合度,促进芽茎萌发,保障幼苗顺利生长^[8]。机械化程度相对落后的丘陵地区现有覆膜机仅具备膜边覆土功能,且由于作物高垄种植特点,膜上覆土仍靠人工完成。因此,设计一款能够进行高垄膜上覆土机械,对于丘陵地区覆膜作业发展具有重要的现实意义。

针对幼苗成活率低、膜土贴合度差的问题,结合不同地区不同作物农艺要求,相关学者对种行覆土、对穴覆土和全膜面覆土机械进行了研究和改进。李革等^[9]分析了圆柱形覆土滚筒导土板横向输送土壤的基本条件,确定了导土板螺旋角范围。陈学庚等^[10]设计了棉花双膜覆盖播种机,利用宽膜覆土滚筒实现棉花种行覆土。张惠等^[11]设计了旱地螺旋式覆土装置,实现番茄、辣椒移栽后对穴覆土。戴飞等^[12]针对全膜双垄沟种植模式,设计了一种双幅覆膜覆土联合作业机,实现全膜面和垄沟覆土。史瑞杰等^[13]对比分析偏置轴承式、凸轮顶杆式、地轮拨齿式横向土带堆放机构,发现地轮拨齿式适宜全膜双垄沟覆膜种床横向土带堆放。赵坤^[14]设计了一款自走式破膜覆土机,实现了烟苗移栽后对苗覆土,但该机具没有覆膜功能。综上所述,圆柱形覆土滚筒和旱地螺旋式覆土装置解决了番茄、辣椒和棉花这些低垄作物的膜上覆土问题;双幅覆膜覆土联合作业机和横向土带堆放机构更适应全膜双垄沟种植模式。相关膜上覆土机的研究多集中于低垄和全膜面覆土,针对高垄种植场景以及如何保证地膜透光面合格率的膜上覆土研究欠缺。

因此,本文结合丘陵地区高垄膜上覆土农艺要求,设计一种高垄膜上覆土装置。采用覆土圆盘和覆土滚筒组合结构,实现膜边覆土和膜上定距覆土。对覆土滚筒中土壤运动进行动力学分析,确定影响膜上覆土量和土堆聚拢值的主要因素;通过 EDEM

仿真试验,开展单因素试验和正交试验,获得机具最佳结构参数和运动参数;通过田间试验验证机具作业性能。

1 高垄膜上覆土农艺要求

马铃薯、甘薯和烤烟的根系发达,适宜质地疏松、土层深厚的高垄覆膜种植方式。以烤烟为例,参照文献[15]并调研河南省三门峡市丘陵地区烤烟覆膜作业,当地普遍采用“冬耕起垄、翌年早春覆膜移栽”的种植模式,获得烤烟起垄覆膜后农艺参数如图 1 所示。垄体结构采用梯形高垄方式,垄高为 300 mm,垄顶宽度为 300 mm,垄底宽度为 900 mm,垄距为 1 200 mm。为适应丘陵地区多风环境,提升地膜抗风性能,保证地膜透光面合格率,以及便于后期揭膜,膜上覆土土堆间距约 1 100 mm。

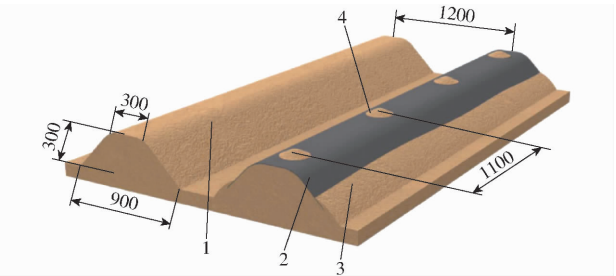


图 1 丘陵地区高垄膜上覆土农艺示意图
Fig.1 Schematic of covering soil on plastic-film for tobacco high ridge in hilly areas
1. 梯形高垄 2. 地膜 3. 膜边覆土 4. 膜上覆土

2 整机结构与工作原理

2.1 整机结构

高垄膜上覆土机主要由主机架、整形镇压装置、滴灌带铺设装置、覆膜装置和膜上覆土装置组成。如图 2 所示,滴灌带铺设装置由滴灌带卷盘和支撑架组成;覆膜装置由挂膜架、展膜辊和弧形压边轮组成;膜上覆土装置由覆土圆盘和覆土滚筒组成,保证膜边覆土和膜上覆土质量;整形镇压装置由推土板、镇压辊和土壤分流板组成,可在覆膜前对垄面进行平整和压实,提高膜土贴合性。侧支架采用螺栓紧定的方式连接于主机架,便于调节作业幅宽。

2.2 工作原理

高垄膜上覆土机具由拖拉机牵引作业,工作原理如图 3 所示。机具作业时,整形镇压装置将垄顶平整并略微压实。垄面不平整的土壤被土壤分流板

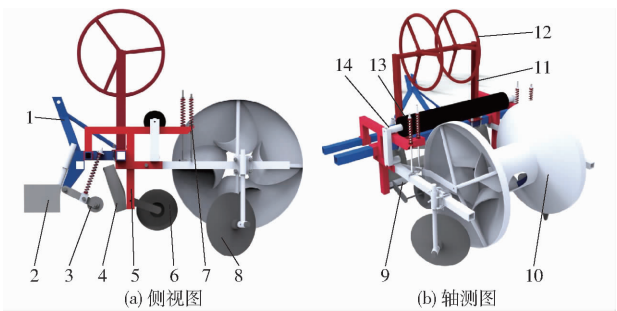


图 2 高垄膜上覆土机结构

Fig. 2 Schematics of machine with covering soil on plastic-film for high ridge

1. 主机架 2. 推土板 3. 镇压辊 4. 土壤分流板 5. 侧支架
6. 弧形压边轮 7. 仿形弹簧 8. 覆土圆盘 9. 展膜辊 10. 覆土滚筒 11. 支撑架 12. 滴灌带卷盘 13. 地膜 14. 挂膜架

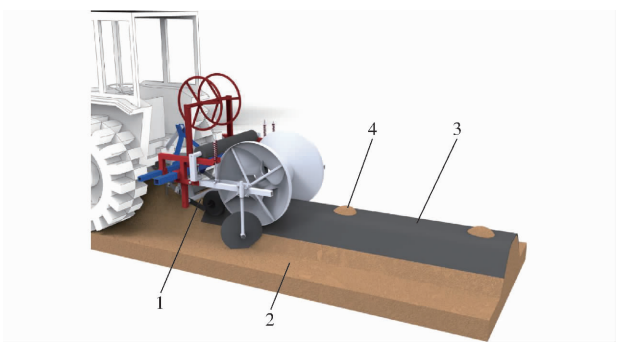


图 3 高垄膜上覆土机工作原理

Fig. 3 Working principle of machine with covering soil on plastic-film for high ridge

1. 平整镇压后垄形 2. 垄沟 3. 覆膜后垄形 4. 膜上覆土

推移至垄侧,提高垄面平整度,并为膜边覆土和膜上覆土提供部分土量储备。在机具前进过程,地膜在挂膜架上被动扯出,经展膜辊平整铺设至垄体表面。覆土圆盘收集垄沟和垄顶掉落的土壤,一部分用于膜边覆土,另一部分被壅入覆土滚筒;覆土滚筒在机具牵引下,依靠摩擦力被动转动,其内置的螺旋叶片和导土板将土壤沿覆土滚筒轴向输送至出土口,实现膜上定间距覆土。

3 关键部件结构与参数分析

覆土圆盘和覆土滚筒是高垄膜上覆土机的关键部件,其结构与工作参数直接影响膜上覆土土堆的间距、覆土量和土堆在膜面的散落状态。一定的覆土量可以增强地膜抗风性能且不影响后续揭膜,土堆在膜面的散落状态会影响地膜的透光面占比。因此,覆土圆盘和覆土滚筒的结构设计和参数匹配是保证膜上覆土量和地膜透光面合格率的重要因素。

3.1 覆土滚筒结构

覆土滚筒由集土锥筒、螺旋叶片、径向支撑筋、轴向连接筋、圆柱形导土筒和导土板组成,如图 4 所

示。覆土滚筒外形结构如图 4a 所示,螺旋叶片与集土锥筒内壁相交部分为阿基米德螺旋线,利用阿基米德螺旋线极径随极角均匀变化的特性将土壤运送至圆柱形导土筒;覆土滚筒内部结构如图 4b 所示,圆柱形导土筒主要利用导土板将土壤轴向运送至出土口。

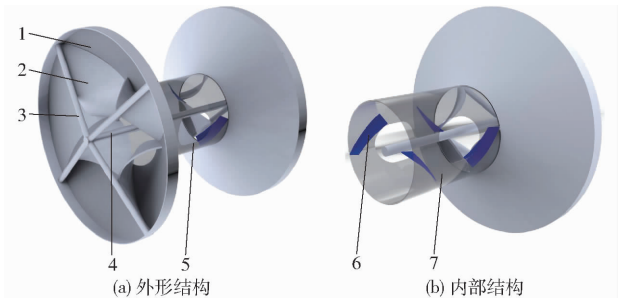


图 4 覆土滚筒结构

Fig. 4 Schematics of soil overlying drum

1. 集土锥筒 2. 螺旋叶片 3. 径向支撑筋 4. 轴向连接筋 5. 出土口 6. 导土板 7. 圆柱形导土筒

3.1.1 集土锥筒的螺旋叶片成形

螺旋叶片在物料输送中应用广泛,如混凝土搅拌运输车、离心泵叶片等^[16-17]。本文运用阿基米德螺旋线在圆台的成线原理,在集土锥筒上设计一种用于输送土壤的螺旋叶片,如图 5a 所示。不同螺旋线结束角 θ_{end} 对应不同的螺旋线行程,图 5b 分别展示了螺旋线结束角 θ_{end} 为 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90° 时的线型,其上任意点参数方程为

$$\begin{cases} x = \left(\frac{D_1}{2} + \frac{D_1 - D_2}{2\theta_{\text{end}}} \theta \right) \cos \theta \\ y = \left(\frac{D_1}{2} + \frac{D_1 - D_2}{2\theta_{\text{end}}} \theta \right) \sin \theta \\ z = \frac{h}{\theta_{\text{end}}} \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中 θ ——阿基米德螺旋线上任意点转角, $(^\circ)$

D_1 ——集土锥筒大端直径, mm

D_2 ——集土锥筒小端直径, mm

h ——集土锥筒高度, mm

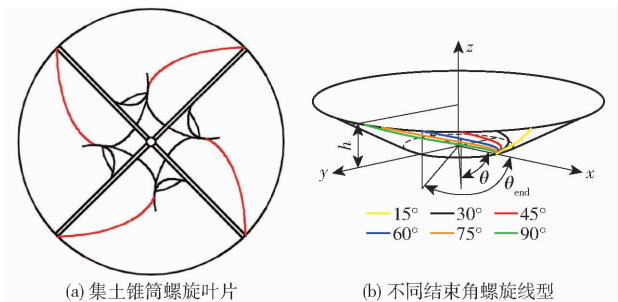


图 5 集土锥筒示意图

Fig. 5 Schematics of soil-collecting conical cylinder

结合图 5b,通过定性分析,螺旋线结束角 θ_{end} 较大,螺旋叶片进土能力强,但土壤沿螺旋线运动

距离远;螺旋线结束角 θ_{end} 较小时,土壤可快速进入导土筒,但螺旋叶片进土能力相对较弱。此外,在螺旋叶片的试制中发现,当螺旋线结束角 $\theta_{\text{end}} > 60^\circ$ 时,螺旋叶片曲面曲率变化较大,加工成形困难。因此,将螺旋线结束角 θ_{end} 控制在 $30^\circ \sim 60^\circ$,再通过 EDEM 仿真试验探究不同螺旋线结束角对进土质量的影响。另外,螺旋叶片数量也会对进土量造成影响,当覆土滚筒和覆土圆盘等参数确定的情况下,叶片数量少集土效率低;叶片数量大于 4 时,由于集土锥筒内部空间不足会引起螺旋叶片两两相交,土壤通过螺旋叶片运输到导土筒的节点可能发生拥堵。因此,本设计沿集土锥筒周向均匀布置 4 个螺旋叶片。

3.1.2 覆土滚筒结构设计

假设覆土滚筒在工作过程做无滑动滚动,运土轨迹如图 6a 所示,理论膜上土堆间距 L_s 等于相邻出土口中心所成圆周夹角 φ 对应的弧长,设圆柱形导土筒圆周均布出土口数量为 N ,则

$$L_s = \varphi \frac{D_1}{2} = \frac{2\pi}{N} \frac{D_1}{2} = \frac{\pi D_1}{N} \tag{2}$$

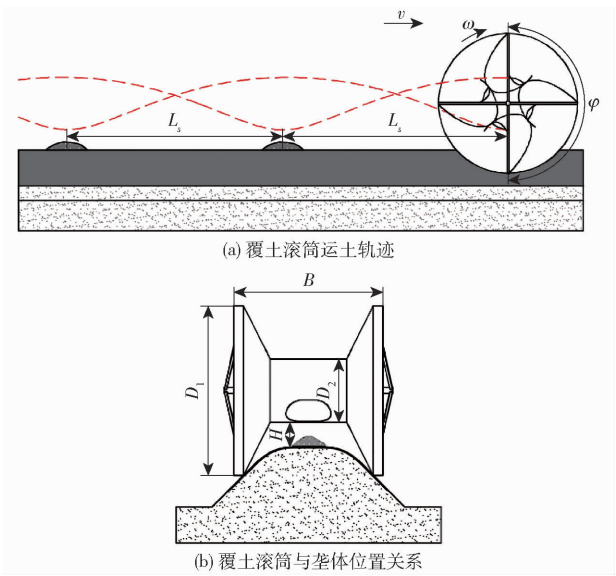


图 6 覆土滚筒运土轨迹及其与垄体位置关系
Fig. 6 Trajectory of soil discharge port of soil overlying drum and positional relationship with ridge body

依据高垄膜上覆土农艺要求,土堆间距 L_s 为 1 100 mm,将出土口数量 N 设计为 2,通过式(2)计算得集土锥筒大端直径 D_1 为 700 mm。圆柱形导土筒主要依靠导土板轴向运送土壤,影响轴向运土质量的因素有导土板螺旋角和导土板头数^[9]。查阅文献[18-19],根据丘陵地区土壤特性,将导土板螺旋角设置为 38° ,导土板头数设置为 2。覆土滚筒与垄体位置关系如图 6b 所示,高垄覆膜时使用的地膜宽度通常为 800 ~ 1 100 mm,垄底宽度为 900 mm。

为了保证膜边覆土宽度,覆土滚筒总宽度 B 应小于地膜覆盖在垄体后宽度,因此,将覆土滚筒宽度 B 设为 700 mm。为了避免机具行进中出土口与地膜直接接触造成地膜破损,使圆柱形导土筒最低处与垄顶地膜留置余量 H 为 100 mm,将集土锥筒小端直径 D_2 设为 260 mm。

3.2 覆土滚筒中土壤动力学分析

3.2.1 土壤沿螺旋线动力学分析

为研究影响覆土质量的其他因素,对土壤沿螺旋线的运动进行动力学分析。土壤在运动过程受到集土锥筒内壁和螺旋叶片的共同作用,同时还存在土壤之间以及土壤与集土锥筒内壁的相对滑动,使得土壤运动过程变得较为复杂。为了便于分析土壤的运动,暂不考虑土壤之间的相互影响,将土壤看作质点,将土壤在空间内的运动转换为竖直平面内的运动,分析过程将土壤视为动点,将覆土滚筒视为动系,土壤受力分析如图 7 所示。

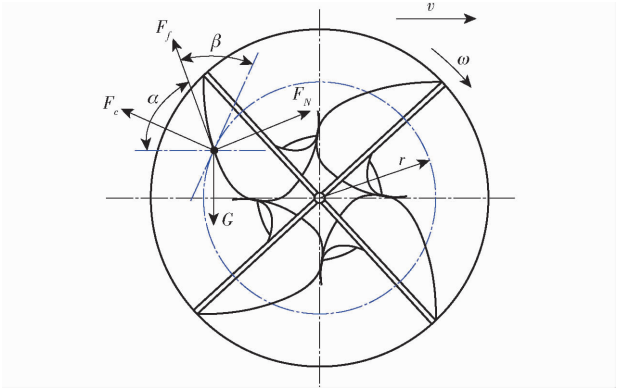


图 7 土壤沿螺旋线运动受力分析
Fig. 7 Force analysis of soil movement along spiral

由图 7 可知,土壤沿螺旋线运动受到自身重力 G ,沿螺旋线切线方向的摩擦力 F_f ,沿螺旋线法线方向的支持力 F_N ,以及沿集土锥筒内壁做圆周运动受到的离心力 F_c 。根据牛顿第二定律,沿螺旋线切线方向有

$$m \frac{d^2 s}{dt^2} = G \sin \alpha - F_c \sin \beta - F_f \tag{3}$$

其中

$$\begin{cases} G = mg \\ F_c = m\omega^2 r \\ F_f = \mu F_N \\ \omega = \frac{2v}{D_1} \end{cases} \tag{4}$$

式中 α ——螺旋线上任意点处切线与水平方向夹角, $(^\circ)$
 β ——螺旋线上任意点处切线与圆周方向夹角, $(^\circ)$
 ω ——滚筒角速度,rad/s

r ——土壤距滚筒转动中心距离,mm
 μ ——土壤与滚筒接触的动摩擦因数
 v ——机具前进速度,km/h

土壤沿螺旋线运动,在螺旋线法线方向并无相对移动,在法线方向受力近似平衡,所以沿螺旋线法线方向有

$$F_N = G \cos \alpha + F_c \cos \beta \quad (5)$$

联立式(3)~(5)得到

$$\frac{d^2 s}{dt^2} = g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha) - 4 \left(\frac{v}{D_1} \right)^2 r(\sin \beta + \mu \cos \beta) \quad (6)$$

由式(6)可知,土壤在螺旋线上任意点处切线方向的加速度不仅与螺旋叶片结构(α 、 β)和摩擦因数 μ 有关,还与机具前进速度 v 有关。前进速度 v 增大,土壤沿螺旋线切线方向的加速度将变小,覆土滚筒运土效率降低。另外,前进速度 v 会对地膜展平度造成影响,在保证覆膜作业质量的情况下,参照文献[20]及对丘陵地区现有覆膜机的作业调研,将机具前进速度设为3~5 km/h。再通过 EDEM 仿真试验探究不同前进速度对覆土量的影响。

3.2.2 圆柱形导土筒内土壤动力学分析

当土壤离开集土锥筒螺旋叶片束缚后,接触导土板之前,仅在重力作用下做抛落运动,分析过程将土壤视为质点,相对圆柱形导土筒土壤运动轨迹如图8a所示,蓝色虚线为土壤做抛落运动轨迹,红色虚线为土壤在导土板上的运动轨迹,以下只分析土壤做抛落运动情况。

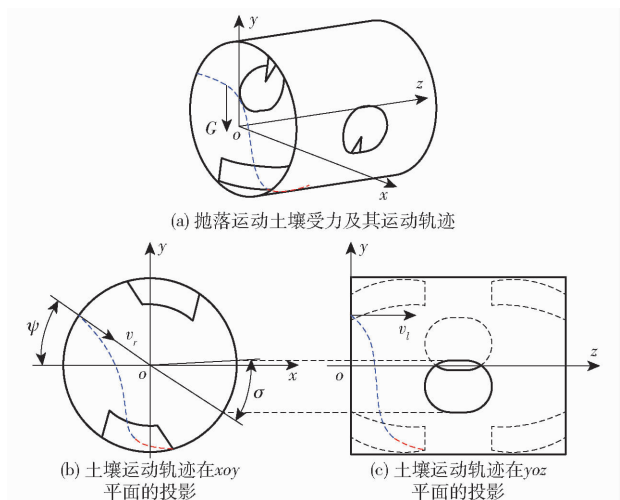


图8 圆柱形导土筒内土壤受力及其运动轨迹
Fig.8 Force and movement trajectory of soil in overlying drum

为进一步探究土壤抛落阶段的运动过程,将运动轨迹分别投影至 xoy 平面和 $yozy$ 平面,如图8b、8c所示,则土壤颗粒做抛落运动方程为

$$\begin{cases} x = \left(v_r t - \frac{D_2}{2} \right) \cos \psi \\ y = \left(v_r t + \frac{D_2}{2} \right) \sin \psi + \frac{1}{2} g t^2 \\ z = v_l t \end{cases} \quad (7)$$

式中 v_r ——土壤脱离螺旋叶片后沿滚筒径向速度,m/s
 v_l ——土壤脱离螺旋叶片后沿滚筒轴向速度,m/s
 ψ —— v_r 与水平方向夹角,(°)

由式(7)可知,土壤做抛落运动的位移与脱离螺旋叶片时轴向和径向速度有关。为了使土壤从出土口有效排出,同时避免出土口轴向宽度过大造成土壤从垄体两侧掉落。因此,将出土口轴向宽度设为150 mm,通过控制出土口对应圆周角度 σ 控制土壤在膜面的散落状态。

3.3 覆土圆盘设计

覆土圆盘主要作用是膜边覆土,并为覆土滚筒提供土壤。影响覆土量的因素有覆土圆盘工作偏角、倾角和入土深度^[21],考虑到机具结构,覆土圆盘工作倾角设为0°,通过调整入土深度 h_1 和工作偏角 δ 改变覆土量,覆土圆盘结构如图9所示。

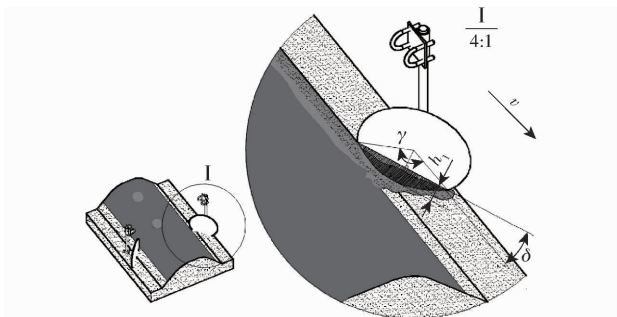


图9 覆土圆盘结构

Fig.9 Schematic of soil covered disc

将覆土圆盘工作时与土壤的接触面积近似为弓形,则单个覆土圆盘触土面积 S_1 和前进距离 l 内有效聚土质量 M 计算式为

$$\begin{cases} S_1 = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \frac{\gamma}{360^\circ} - \left(\frac{D}{2} - h_1 \right) \frac{D}{2} \sin \frac{\gamma}{2} \\ M = \frac{1}{10\,000} \rho l S_1 \sin \delta \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{其中} \quad \gamma = 2 \arccos \left(\frac{D - 2h_1}{D} \right) \quad (9)$$

式中 D ——覆土圆盘直径,mm
 γ ——覆土圆盘触土区域对应圆心角,(°)
 ρ ——土壤密度,kg/m³

当膜上覆土装置进行覆膜和膜上覆土作业时,将膜边覆土截面形状近似为三角形,膜上土堆近似为球冠体,则机具前进距离 l 内理论上所需覆土总

质量 Q 计算式为

$$Q=\rho\left[bh_2l+\frac{\pi h_3^2}{3}(3R-h_3)\frac{l}{L_s}\right]$$
 (10)

式中 b ——覆土宽度,指垄底到满足膜边覆土宽度的宽度,取 0.2 m

h_2 ——膜边覆土厚度,取 0.03 m

R ——球冠对应球体半径,取 0.1 m

h_3 ——球冠高度,取 0.04 m

由式(10)计算得 $Q=0.006\,4\rho l$,而聚土质量 M 与所需覆土总质量 Q 应满足

$$2M=Q=0.006\,4\rho l$$
 (11)

本设计将覆土圆盘直径 D 设计为 400 mm,考虑覆土圆盘切土阻力,参考《农业机械设计手册》覆土圆盘入土深度 h_1 为 30 ~ 50 mm,综合式(8)、(9)、(11),解得覆土圆盘工作偏角 δ 为 $21^\circ\sim49^\circ$ 。

4 EDEM 仿真试验

在覆土滚筒设计中发现,螺旋线结束角会影响覆土滚筒的集土能力,进而影响膜上覆土量。机具前进速度和出土口对应圆周角度会影响土壤的运动,进而影响覆土量和土堆散落状态。离散元法通过数值模拟表征散粒物料的运动,已广泛应用于农业领域。土壤属于典型的散粒物料,借助 EDEM 软件模拟膜上覆土过程,探究不同螺旋线结束角、不同前进速度和不同出土口对应圆周角度对膜上覆土量和土堆聚拢值的影响,并确定各因素的取值范围。

4.1 仿真模型

运用 Solidworks 按比例 1:1 构建标准垄体和覆土装置仿真模型,另存为 .step 格式导入 EDEM 软件,仿真模型如图 10 所示。考虑到计算机运算性能和实际需要,仿真垄体长度 12 m,仿真总时长 12 s, Rayleigh 时间步 15%,重力加速度为 $9.8\,\text{m/s}^2$ 。土壤颗粒采用球体颗粒建模,仿真 0 ~ 1 s 生成垄沟及垄侧土壤颗粒,半径 5 mm,垄体两侧共计生成 460 000 个,为了使仿真贴合实际,结合河南省三门

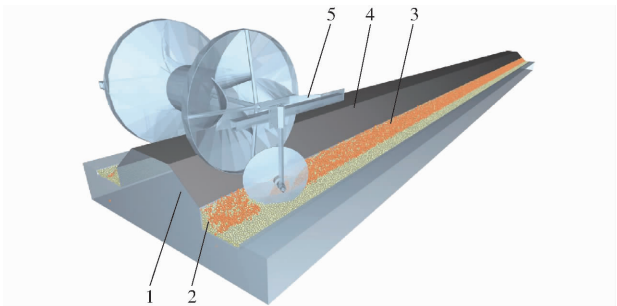


图 10 仿真模型

Fig. 10 Simulation model

1. 垄体 2. 垄沟及垄侧土壤 3. 垄顶掉落土壤 4. 地膜 5. 膜上覆土装置

峡市“冬耕起垄、翌年早春覆膜移栽”农艺要求,考虑垄体在此期间的坚实度变化,颗粒接触模型选用 Hertz - Mindlin with Bonding; 仿真 1 ~ 1.2 s 生成“推土板推落垄顶不平整部分”的土壤颗粒,半径 3 mm 和 5 mm,垄体两侧共计生成 80 000 个,接触模型选用 Hertz - Mindlin (no slip)。仿真 1.2 ~ 2.5 s 用于颗粒稳定和 Bond 键生成,2.5 ~ 11 s 模拟膜上覆土过程,11 ~ 12 s 用于颗粒稳定。覆土装置材料为 45 号钢,地膜材料为聚乙烯。参照文献[22 - 26],相关仿真试验参数设置如表 1 所示。

表 1 离散元仿真参数

Tab. 1 Discrete element simulation parameters

参数	数值
土壤泊松比	0.35
土壤剪切模量/MPa	1
土壤密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 300
45 号钢泊松比	0.31
45 号钢剪切模量/MPa	7×10^4
45 号钢密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 800
地膜泊松比	0.45
地膜剪切模量/MPa	345
地膜密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	958
土壤-土壤颗粒碰撞恢复系数	0.20
土壤-土壤颗粒静摩擦因数	0.54
土壤-土壤颗粒动摩擦因数	0.20
45 号钢-土壤颗粒碰撞恢复系数	0.28
45 号钢-土壤颗粒静摩擦因数	0.50
45 号钢-土壤颗粒动摩擦因数	0.04
地膜-土壤颗粒碰撞恢复系数	0.30
地膜-土壤颗粒静摩擦因数	0.42
地膜-土壤颗粒动摩擦因数	0.34
土壤颗粒黏接模型法向刚度/($\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$)	2.1×10^7
土壤颗粒黏接模型剪切刚度/($\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$)	8.0×10^7
土壤颗粒黏接模型法向应力/MPa	0.15
土壤颗粒黏接模型剪切应力/MPa	0.08

4.2 单因素仿真试验

4.2.1 试验方案

结合理论分析,为排除覆土圆盘对覆土量的干扰,着重探究覆土滚筒对膜上覆土量的影响规律,将覆土圆盘的参数固定为入土深度 40 mm、工作偏角 45° 。单因素仿真试验采用控制变量法进行设计,分别以螺旋线结束角、机具前进速度和出土口对应圆周角度为自变量,其余 2 个参数依次选择中位值的条件下,研究单一因素变化对仿真结果的影响。单因素仿真试验方案如表 2 所示。

4.2.2 评价指标

膜上覆土量应在一定范围内使地膜具有抗风能力且不影响揭膜,同时,土堆的散落状态会影响地膜

表 2 单因素仿真试验方案

因素	数值
螺旋线结束角 $\theta_{\text{end}}/(\circ)$	30,40,45,50,60
前进速度 $v/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	3,3.5,4,4.5,5
出土口对应圆周角度 $\sigma/(\circ)$	20,30,40,50,60

的透光面占比。以土堆聚拢值 d 表征仿真试验土堆的散落状态,即一定高度下落于地膜上形成的类球冠体土堆,计算其所有颗粒到该土堆形心的平均距离,即为土堆聚拢值。土堆聚拢值越小意味着土堆颗粒相对聚拢,相应地膜透光面占比越大。因此,选取覆土量和土堆聚拢值作为膜上覆土装置仿真试验评价指标。土堆聚拢值计算式为

$$d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}$$

(12)

式中 n ——土堆颗粒总数,个

$x_i、y_i、z_i$ ——仿真结束时土堆任意颗粒坐标

$x_0、y_0、z_0$ ——土堆形心坐标

仿真结果如图 11 所示,为了减小误差,选取机具运行稳定区域内 5 个土堆,利用 EDEM 后处理功能划分网格,逐个输出土堆质量,计算单组试验 5 个土堆质量均值,表征“覆土量”;利用 EDEM 后处理功能以 .csv 格式输出单个土堆所有颗粒在仿真结束时刻的空间位置坐标,利用 Excel 计算土堆所有颗粒到土堆形心的平均距离,计算单组试验 5 个土堆聚拢值均值,表征“土堆聚拢值”。

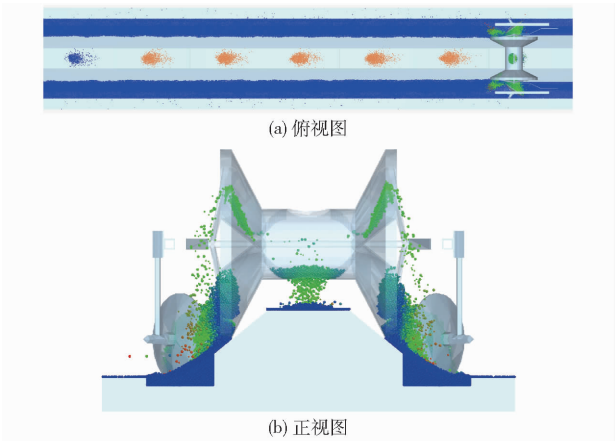


图 11 仿真结果
Fig. 11 Simulation results

4.3 单因素仿真试验结果与分析

4.3.1 螺旋线结束角对覆土量和土堆聚拢值的影响

当前进速度为 4 km/h、出土口对应圆周角度为 40°时,螺旋线结束角对覆土量和土堆聚拢值的影响如图 12 所示。

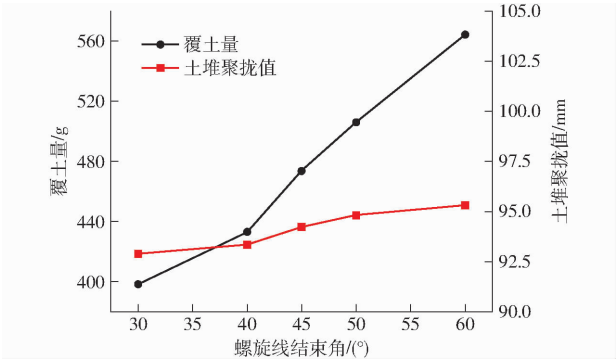


图 12 螺旋线结束角对覆土量和土堆聚拢值的影响
Fig. 12 Influence of helix termination angle on soil pile mass and soil pile convergence value

随着螺旋线结束角增大,覆土量整体呈上升趋势,且在角度较大区间(如 50°~60°)上升速率明显加快。原因为当螺旋线结束角较小时,螺旋线曲率变化小,只有少部分土壤被螺旋叶片送入圆柱形导土筒,覆土量小;而当螺旋线结束角较大时,螺旋线曲率变化大,进土能力强,土壤颗粒回落量少,覆土量显著增加。由于覆土量增加,土堆聚拢值伴随螺旋线角增大也呈缓慢上升趋势,但整体变化并不明显。

4.3.2 前进速度对覆土量和土堆聚拢值的影响

当螺旋线结束角 45°、出土口对应圆周角度 40°时,前进速度对覆土量和土堆聚拢值的影响如图 13 所示。

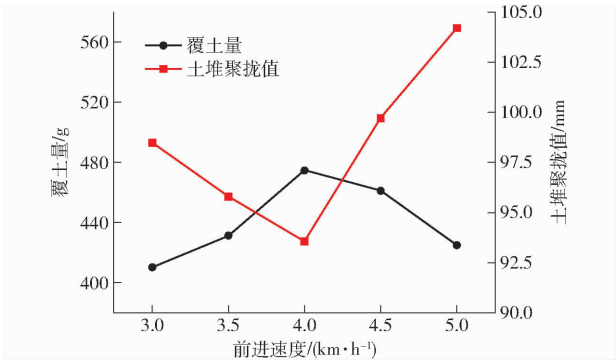


图 13 前进速度对覆土量和土堆聚拢值的影响
Fig. 13 Influence of forward speed on soil pile mass and soil pile convergence value

随着前进速度增加,覆土量呈先上升后下降趋势。原因为当前进速度较小时,土壤在螺旋叶片上出现回流的情况,只有部分土壤被运送至圆柱形导土筒;而当前进速度较大时,土壤所受离心力显著增大,沿螺旋线切线方向的加速度变小,土壤仍不能有效进入圆柱形导土筒。

随着前进速度增加,土堆聚拢值呈先下降后上升趋势。这是由于前进速度较小时,土壤伴随圆柱形导土筒转动,缓慢从出土口落向垄顶,土堆沿机具

前进方向呈长条状,土堆颗粒分散;而当前进速度较大时,土壤颗粒离开出土口初始动能较大,导致土堆颗粒更分散。

4.3.3 出土口对应圆周角度对覆土量和土堆聚拢值的影响

当螺旋线结束角 45°、前进速度 4 km/h 时,出土口对应圆周角度对覆土量和土堆聚拢值的影响如图 14 所示。

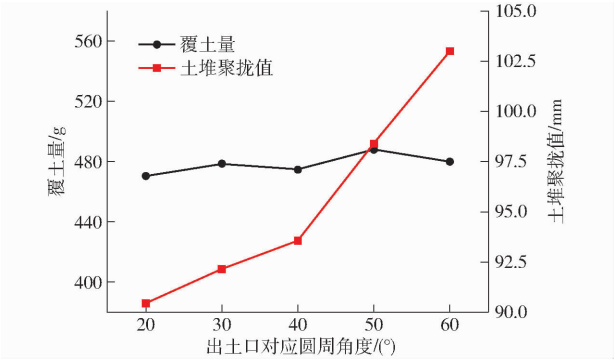


图 14 出土口对应圆周角度对覆土量和土堆聚拢值的影响

Fig. 14 Influence of circumferential angle corresponding to soil discharge port on soil pile mass and soil pile convergence value

随着出土口对应圆周角度增大,覆土量无明显变化,土堆聚拢值呈上升趋势。原因为当出土口对应圆周角度较大时,土壤脱离螺旋叶片后直接从出土口飞出,土堆聚拢值增大。在仿真中使用小颗粒模拟土壤,当出土口对应圆周角度为 20°~30°时,土壤颗粒仍可通过出土口,土堆聚拢值较小。但机具在实际使用中,出土口并非越小越好,出土口过小会导致大土块无法排出。

4.4 优化试验

4.4.1 正交试验设计方案

根据单因素试验结果,选取螺旋线结束角 45°~60°、前进速度 3.5~4.5 km/h、出土口对应圆周角度 30°~50°进行三因素三水平正交试验,确定因素交互作用影响和最佳参数组合,试验因素编码如表 3 所示。

表 3 仿真试验因素编码

Tab.3 Simulation experiment factors and codes

编码	因素		
	螺旋线结束角/(°)	前进速度/(km·h ⁻¹)	出土口对应圆周角度/(°)
-1	45.0	3.5	30
0	52.5	4.0	40
1	60.0	4.5	50

4.4.2 正交试验结果与分析

以覆土量 Y_1 和土堆聚拢值 Y_2 为评价指标,利用 Design-Expert 软件制定二次旋转正交试验方案并对

试验结果进行分析,共计 17 组仿真试验,试验方案和结果如表 4 所示,表中 A、B、C 为因素编码。

表 4 正交试验方案与结果

Tab.4 Experimental design and results

试验序号	因素			覆土量 Y_1 /g	土堆聚拢值 Y_2 /mm
	A	B	C		
1	0	0	0	509.0	92.42
2	0	-1	1	462.5	99.98
3	0	1	-1	499.5	99.56
4	1	0	-1	552.0	92.65
5	1	-1	0	495.0	94.32
6	0	-1	-1	448.5	90.86
7	-1	1	0	461.0	101.37
8	1	1	0	615.0	100.83
9	1	0	1	562.0	98.21
10	-1	-1	0	431.5	95.35
11	0	0	0	535.0	93.93
12	0	0	0	513.0	92.23
13	0	0	0	524.0	94.60
14	-1	0	-1	478.5	93.90
15	0	0	0	520.0	92.02
16	-1	0	1	495.0	99.00
17	0	1	1	571.5	103.50

对正交试验结果进行多元线性回归拟合,剔除不显著项,得到覆土量 Y_1 、土堆聚拢值 Y_2 的二次回归模型为

$$Y_1 = 520.20 + 44.75A + 38.69B + 14.06C + 22.62AB - 22.98B^2 \tag{13}$$

$$Y_2 = 93.04 + 3.09B + 2.96C - 1.30BC + 1.20A^2 + 3.73B^2 + 1.70C^2 \tag{14}$$

对覆土量和土堆聚拢值进行显著性方差分析,试验结果方差分析如表 5 所示。覆土量 Y_1 二次回归模型 $P < 0.01$,说明回归模型极显著;A、B 影响极显著,C 影响显著,AB 的交互作用影响显著;失拟项 $P > 0.05$,表示模型与实际情况有较高的拟合度。根据试验因素 F 值可得影响覆土量的主次因素为螺旋线结束角、前进速度、出土口对应圆周角度。土堆聚拢值 Y_2 二次回归模型 $P < 0.01$,说明回归模型极显著;B、C 影响极显著,BC 的交互作用影响显著;失拟项 $P > 0.05$,表示模型与实际情况有较高的拟合度。根据试验因素 F 值可得影响土堆聚拢值的主次因素为前进速度、出土口对应圆周角度、螺旋线结束角。

当出土口对应圆周角度为 40°时,螺旋线结束角和前进速度对覆土量的交互作用响应曲面如图 15 所示。当前进速度一定时,随着螺旋线结束角增大,覆土量呈现增加的趋势;当螺旋线结束角一定时,随着前进速度增大,覆土量呈先增加后减小趋势。

表 5 试验结果方差分析

Tab. 5 Analysis of variance for results of orthogonal experiments

来源	覆土量					土堆聚拢值				
	平方和	自由度	均方和	<i>F</i>	<i>P</i>	平方和	自由度	均方和	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	34 751. 73	9	3 861. 30	16. 81	0. 000 6 **	238. 72	9	26. 52	30. 61	<0. 000 1 **
<i>A</i>	16 020. 50	1	16 020. 50	69. 73	<0. 000 1 **	1. 63	1	1. 63	1. 88	0. 212 7
<i>B</i>	11 973. 78	1	11 973. 78	52. 12	0. 000 2 **	76. 57	1	76. 57	88. 36	<0. 000 1 **
<i>C</i>	1 582. 03	1	1 582. 03	6. 89	0. 034 2 *	70. 33	1	70. 33	81. 16	<0. 000 1 **
<i>AB</i>	2 047. 56	1	2 047. 56	8. 91	0. 020 4 *	0. 06	1	0. 06	0. 07	0. 799 9
<i>AC</i>	10. 56	1	10. 56	0. 05	0. 836 3	0. 053	1	0. 053	0. 06	0. 811 9
<i>BC</i>	841. 00	1	841. 00	3. 66	0. 097 3	6. 71	1	6. 71	7. 74	0. 027 2 *
<i>A</i> ²	48. 67	1	48. 67	0. 21	0. 659 3	6. 03	1	6. 03	6. 95	0. 033 6 *
<i>B</i> ²	2 222. 53	1	2 222. 53	9. 67	0. 017 1 *	58. 62	1	58. 62	67. 64	<0. 000 1 **
<i>C</i> ²	12. 53	1	12. 53	0. 05	0. 822 0	12. 22	1	12. 22	14. 10	0. 007 1 **
残差	1 608. 24	7	229. 75			6. 07	7	0. 8 666		
失拟项	1 197. 44	3	399. 15	3. 89	0. 111 4	0. 759 6	3	0. 253 2	0. 190 9	0. 897 5
误差	410. 80	4	102. 70			5. 31	4	1. 33		
总和	36 359. 97	16				244. 79	16			

注：**表示影响极显著($P<0.01$), *表示影响显著($0.01\leq P<0.05$)。

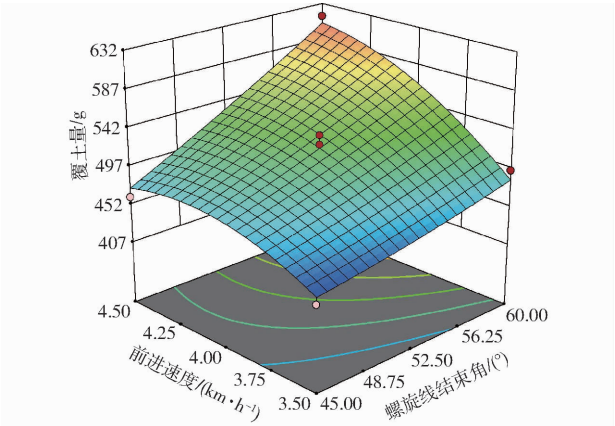


图 15 *AB* 交互作用对覆土量的响应曲面

Fig. 15 Response surface of soil pile mass under interaction of factors *A* and *B*

当螺旋线结束角 52.5°时,前进速度和出土口对应圆周角度对土堆聚拢值的交互作用响应曲面如图 16 所示。当前进速度一定时,随着出土口对应圆周角度增大,土堆聚拢值呈逐渐上升趋势。当出土口对应圆周角度一定时,随着前进速度增大,土堆聚拢值呈先减小后上升趋势。

为了使地膜具有一定抗风性能,且保证可以顺利揭膜,覆土量越大越好;为了保证地膜透光面合格率,土堆聚拢值越小越好。因此,为获取覆土装置最优结构参数与运动参数组合,对试验指标进行优化设计,得到非线性数学模型为

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \min Y_2 \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq A \leq 1 \\ -1 \leq B \leq 1 \\ -1 \leq C \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (15)$$

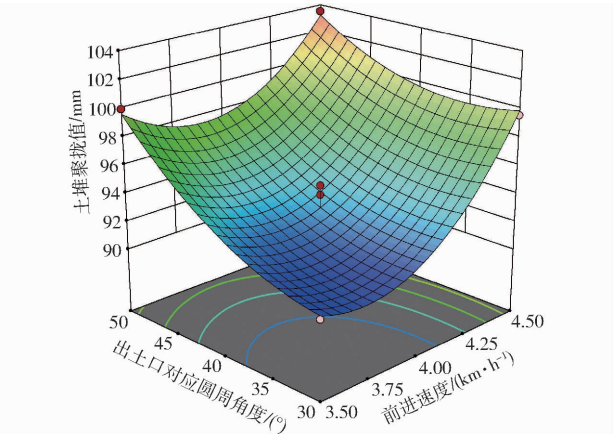


图 16 *BC* 交互作用对土堆聚拢值的响应曲面

Fig. 16 Response surface of soil pile convergence value under interaction of factors *B* and *C*

求解可得机具较优参数组合为螺旋线结束角 57.44°、前进速度 3.82 km/h、出土口对应圆周角度 32.02°,此时机具作业性能较为理想,覆土量为 520.26 g,土堆聚拢值为 90.86 mm。

5 田间试验

5.1 试验条件

考虑制造的可操作性,试制螺旋线结束角 58°,出土口对应圆周角 32°的覆土滚筒。在河南省三门峡市渑池县仰韶镇刘果村烟田示范区进行高垄膜上覆土机田间工作性能试验。试验田土壤为褐土,垄高为 300 mm,垄顶宽度为 300 mm,垄底宽度为 900 mm,土壤密度为 1 300 kg/m³,土壤含水率为 27%,土壤坚实度为 30.2 kPa。试验前将挂膜架上地膜牵拉至展膜辊下铺平压实,地膜宽度为

800 mm。作业配套拖拉机功率为 40 kW,机具前进速度维持 3.8 km/h,如图 17 所示。



图 17 田间试验
Fig. 17 Field experiment

5.2 试验内容与方法

膜上覆土暂无准确量化标准,且田间试验无法精准获得膜上覆土土堆聚拢值,因此,结合前述分析,田间试验选用地膜透光面占比作为与仿真试验中土堆聚拢值相对应的指标。同时,结合 NY/T 986—2006《铺膜机作业质量》^[27]要求,参照文献[28]及丘陵地区高垄膜上覆土农艺要求,选取膜边覆土宽度、膜边覆土厚度、膜上土堆质量和地膜透光面占比作为高垄膜上覆土机田间试验的评价指标。在一个工作幅宽内,选取机具运行稳定区域内 30 m 作为测区长度 L ,在测区内随机选取 5 点测量膜边覆土宽度、膜边覆土厚度和膜上土堆质量;同时测量测区内土堆宽度和纵向长度用于计算地膜透光面占比。测区长度 L 内,地膜透光面占比计算式为

$$S = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^m (b_i l_i) + 2L\bar{b}}{800L} \right] \times 100\% \quad (16)$$

式中 S ——地膜透光面占比,%
 m ——稳定测量区域内土堆数量,个
 b_i ——第 i 个土堆宽度,mm
 l_i ——第 i 个土堆纵向长度,mm
 $\bar{b}$ ——膜边覆土宽度均值,mm

5.3 试验结果与分析

田间试验结果如表 6 所示。膜边覆土宽度均值为 90.2 mm、膜边覆土厚度为 35.7 mm,满足相关农艺标准。膜上土堆质量为 545.2 g、地膜透光面占比为 72.25%,满足丘陵地区高垄膜上覆土农艺要求。试验结果表明,高垄膜上覆土机工作性能稳定,膜上覆土效果良好。

表 6 田间试验结果

Tab. 6 Field experiment results

参数	数值	评价标准
膜边覆土宽度/mm	90.2	50 ~ 100
膜边覆土厚度/mm	35.7	30 ~ 50
膜上土堆质量/g	545.2	500 ~ 600
地膜透光面占比/%	72.25	70 ~ 80

6 结论

(1)根据丘陵地区高垄膜上覆土农艺要求,设计了高垄膜上覆土装置。从理论上对覆土滚筒进行了结构设计,对土壤进行动力学分析,得到了影响膜上覆土量和土堆聚拢值的因素为螺旋线结束角、机具前进速度和出土口对应圆周角度。

(2)利用 EDEM 仿真进行单因素和正交试验,确定了影响因素范围并建立了响应面模型,正交试验结果表明,螺旋线结束角和前进速度对覆土量影响极显著,前进速度和出土口对应圆周角度对土堆聚拢值影响极显著,最佳作业参数为螺旋线结束角 57.44°、前进速度 3.82 km/h、出土口对应圆周角 32.02°。

(3)根据最佳作业参数试制了高垄膜上覆土机,并进行了田间试验。田间试验结果表明,膜边覆土宽度 90.2 mm,膜边覆土厚度 35.7 mm,膜上土堆质量 545.2 g,地膜透光面占比 72.25%,满足丘陵地区高垄覆膜和膜上覆土农艺要求。

参 考 文 献

[1] 胡志超,张萌,罗伟文,等. 加快中国丘陵山区农机化发展的思考与对策[J]. 农业工程学报, 2025, 41(14): 39–50.
HU Zhichao, ZHANG Meng, LUO Weiwen, et al. Advancing agricultural mechanization in China's hilly and mountainous areas: key strategies and technological focus[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(14): 39–50. (in Chinese)

[2] 李慧,何腾飞,刘虎,等. 丘陵山地甘薯膜上仿形扦插移栽机研制[J]. 农业工程学报, 2023, 39(16): 26–35.
LI Hui, HE Tengfei, LIU Hu, et al. Development of the profiling up-film transplanter for sweet potato in hilly and mountainous region[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(16): 26–35. (in Chinese)

[3] 张还,郭鑫雨,张健,等. 马铃薯播种机两段式组合起垄装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊1): 76–83, 92.
ZHANG Huan, GUO Xinyu, ZHANG Jian, et al. Design and experiment of two-stage combined ridging device for potato planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp.1): 76–83, 92. (in Chinese)

[4] 裴宜坤,宋强龙,陈雪婷,等. 烤烟垄体分层施肥土壤镇压试验与肥料颗粒偏移分析[J]. 河南农业大学学报, 2024, 58(4): 654–662.
PEI Yikun, SONG Qianglong, CHEN Xueting, et al. Tobacco ridge layered fertilization soil compaction test and analysis of fertilizer particle migration[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2024, 58(4): 654–662. (in Chinese)

[5] 赵引, 李国安, 夏江宝, 等. 覆膜和灌水量对制种玉米根系分布及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(15): 104 – 114.
ZHAO Yin, LI Guoan, XIA Jiangbao, et al. Effects of film mulching and irrigation amount on the root distribution and yield of seed-maize[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(15): 104 – 114. (in Chinese)

[6] 白圣贺, 苑严伟, 牛康, 等. 棉花精量铺膜穴播机作业质量监测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(5): 49 – 58.
BAI Shenghe, YUAN Yanwei, NIU Kang, et al. Design and test of operation quality monitoring system for cotton precision film-laying hole seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(5): 49 – 58. (in Chinese)

[7] 徐佳星, 封涌涛, 叶玉莲, 等. 地膜覆盖条件下黄土高原玉米产量及水分利用效应分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53(12): 2349 – 2359.
XU Jiaxing, FENG Yongtao, YE Yulian, et al. Effects of plastic film mulching on yield and water use of maize in the Loess Plateau[J]. Scientia Agricultural Sinica, 2020, 53(12): 2349 – 2359. (in Chinese)

[8] 史瑞杰, 赵武云, 戴飞, 等. 全膜双垄沟膜面气流场与种床覆土互作过程模拟研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 40 – 51.
SHI Ruijie, ZHAO Wuyun, DAI Fei, et al. Simulation of interaction between air flow field and soil seedbed covering on whole plastic film mulching on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 40 – 51. (in Chinese)

[9] 李革, 艾力·哈斯木, 康秀生, 等. 地膜播种机螺旋覆土滚筒的参数优化[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 135 – 138.
LI Ge, AILI Hasimu, KANG Xiusheng, et al. Parametric optimization of the spiral cylinder of a plastic-film mulch seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(6): 135 – 138. (in Chinese)

[10] 陈学庚, 赵岩. 棉花双膜覆盖精量播种机的研制[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 106 – 112.
CHEN Xuegeng, ZHAO Yan. Development of double-film mulch precision planter for cotton seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(4): 106 – 112. (in Chinese)

[11] 张惠, 纪超, 宋洪飞, 等. 1GF-2.4 型膜上覆土机参数优化与试验[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(12): 40 – 46.
ZHANG Hui, JI Chao, SONG Yifei, et al. Optimum design and experiment of 1GF-2.4 type membrane soil covering machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(12): 40 – 46. (in Chinese)

[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 Fei, ZHANG Shilin, SONG Xuefeng, 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. (in Chinese)

[13] 史瑞杰, 戴飞, 赵武云, 等. 全膜双垄沟起垄覆膜机横向土带堆放机构的设计与试验[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(5): 140 – 149.
SHI Ruijie, DAI Fei, ZHAO Wuyun, et al. Design and experiment of transverse soft-belt stacking mechanism for full-film double-furrow ridge mulching laminating machine[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(5): 140 – 149. (in Chinese)

[14] 赵坤. 自走式破膜覆土机关键部件设计与试验[D]. 贵阳: 贵州大学, 2025.
ZHAO Kun. Design and test on critical components of self-propelled film-breaking and covering soil machine[D]. Guiyang: Guizhou University, 2025. (in Chinese)

[15] 杜文斌, 杨春雷, 杨锦鹏, 等. 雪茄烟叶可调式苗床起垄铺膜机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 116 – 126, 295.
DU Wenbin, YANG Chunlei, YANG Jinpeng, et al. Design and experiment of cigar tobacco adjustable seed-plot ridging and film spreading machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 116 – 126, 295. (in Chinese)

[16] 李保育. 全封闭式混凝土搅拌运输车结构优化设计与仿真分析研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.
LI Baoyu. Research on structural optimization design and simulation analysis of fully enclosed concrete mixing truck[D]. Xi'an: Chang'an University, 2022. (in Chinese)

[17] 温周. 离心泵仿生螺旋线型水力模型的设计及参数优化[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
WEN Zhou. Design and parameter optimization of bionic helical hydraulic model for centrifugal pump[D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)

[18] 果霖, 方启明, 李明飞, 等. 滇中地区坡耕地红黏土离散元仿真模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 185 – 193, 285.
GUO Lin, FANG Qiming, LI Mingfei, et al. Parameter calibration for discrete element simulation of red clay soils in sloping cropland in Central Yunnan[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 185 – 193, 285. (in Chinese)

[19] 张秀丽, 全振伟, 李连豪, 等. 复合切削式烤烟中耕培土机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 73 – 81.
ZHANG Xiuli, TONG Zhenwei, LI Lianhao, et al. Design and experiment of tobacco hilling machine for compound cutting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 73 – 81. (in Chinese)

[20] 马瑞峻,萧金庆,郑普峰,等.穴盘水稻秧苗茎秆蠕变与应力松弛特性的试验研究[J].农业工程学报,2018,34(13): 43-53.
MA Ruijun,XIAO Jinqing,ZHENG Pufeng,et al. Experimental study on characteristics of creep and stress relaxation for rice seedling stem raised in cell tray[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(13):43-53. (in Chinese)

[21] 李光乐,覃艳雅,张喜瑞.玉米联合收获机夹持输送喂入装置的优化试验[J].江苏农业科学,2011,39(5):511-512.

[22] 侯加林,李超,娄伟,等.大蒜联合收获机浮动式夹持装置设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(1):137-145.
HOU Jialin,LI Chao,LOU Wei,et al. Design and test of floating clamping device for garlic combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(1):137-145. (in Chinese)

[23] 刘佳军,燕海朋,田羽,等.半喂入花生联合收获夹持输送装置的设计与研究[J].中国农机装备,2023(11):21-26.
LIU Jiajun, YAN Haipeng, TIAN Yu, et al. Design and research of the clamping conveying device for semi-feed peanut combine harvester[J]. China Agricultural Machinery Equipment, 2023(11): 21-26. (in Chinese)

[24] 侯加林,李超,娄伟,等.大蒜联合收获机按压式切根装置设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(10):167-174.
HOU Jialin, LI Chao, LOU Wei, et al. Operation mechanism analysis and test of press root cutting device for garlic combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022, 53(10): 167-174. (in Chinese)

[25] 王金武,关睿,高鹏翔,等.胡萝卜联合收获机单圆盘对顶切割装置设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(9):73-81.
WANG Jinwu, GUAN Rui, GAO Pengxiang, et al. Design and experiment of single disc to top cutting device for carrot combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020, 51(9): 73-81. (in Chinese)

[26] 廖宜涛,李运通,万星宇,等.龙门式电驱动油菜薹收获机设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(12):147-159.
LIAO Yitao, LI Yuntong, WAN Xingyu, et al. Design and experiment of gantry type electric drive rapeseed stalks harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022, 53(12): 147-159. (in Chinese)

[27] 辛杰,侯加林,李玉华.大蒜联合收获机夹持输送机构的设计与分析[J].农机化研究,2019,41(4):75-79.
XIN Jie, HOU Jialin, LI Yuhua. Design and analysis of the clamping conveying mechanism for a garlic combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(4): 75-79. (in Chinese)

(上接第 43 页)

[20] 窦玉宽. 秸秆纤维地膜栽培烤烟垄上覆膜机研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
DOU Yukuan. Research on tobacco mulching machine on the ridge based on straw fiber film [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021. (in Chinese)

[21] 麻芳兰,苗金泽,樊广坤,等.丘陵地区甘蔗种植机仿形覆土器设计与试验[J].农业工程学报,2025,41(2):26-36.
MA Fanglan, MIAO Jinze, FAN Guangkun, et al. Design and test of a contour-following soil cover device for sugarcane planters in hilly areas[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(2): 26-36. (in Chinese)

[22] 宋强龙. 单行起垄施肥作业机镇压装置设计与试验[D]. 郑州: 河南农业大学, 2024.
SONG Qianglong. Design and experiment of compaction device for single-row ridging fertilizer machine [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2024. (in Chinese)

[23] 廖庆喜,裴立民,张青松,等.油菜铺膜打孔播种机滚动式割膜打孔装置设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(9):85-98.
LIAO Qingxi, PEI Limin, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of rolling film cutting and hole punching device for rapeseed seeder with film mulching and perforating[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 85-98. (in Chinese)

[24] 戴飞,宋学锋,赵武云,等.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 Fei, SONG Xuefeng, ZHAO Wuyun, et al. 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)

[25] 廖庆喜,王迪,姚露,等.油菜覆膜打孔穴播机打孔装置设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(8):62-72.
LIAO Qingxi, WANG Di, YAO Lu, et al. Design and experiment of membrane punch device for rapeseed film perforating and precision dibbling-planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 62-72. (in Chinese)

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

[27] 中华人民共和国农业农村部. 铺膜机作业质量: NY/T 986—2006[S]. 北京: 中国农业出版社, 2006.

[28] 徐晓赞. 穴播覆土一体化装置设计与研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2024.
XU Xiaoyun. Design and research of integrated device for hole sowing and soil covering [D]. Shihezi: Shihezi University, 2024. (in Chinese)