doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.12.006

果园秸秆覆盖机宽幅覆土装置设计与试验

李旭东[1]　臧家俊[2]　高　翔[1]　房效东[3]　徐少杰[4]　朱新华[1]

(1.西北农林科技大学机械与电子工程学院,陕西杨凌 712100;2.北京交通大学机械与电子控制工程学院,北京 100044;
3.中国重汽集团济南动力有限公司,济南 250200;4.潍柴雷沃智慧农业科技股份有限公司,潍坊 261200)

摘要:针对果园机械化土壤-秸秆分层覆盖中大幅宽、均匀薄层覆土要求,设计了与果园秸秆覆盖机配套的覆土装置,主要由取土螺旋、抛土轮、集土箱和覆土螺旋组成。取土螺旋取土幅宽 1.5 m,为秸秆层铺设提供平整地基,保证了秸秆层覆盖平整和薄土层均匀度;取土螺旋两侧的抛土轮向后抛送土壤到集土箱,避免了碎石等异物导致的装置卡死问题。经离散元仿真优化,确定取土螺旋采用末段双螺旋结构,抛土轮叶片数量为 10,叶片偏角为 10°,提高了覆土均匀性并降低了作业功耗。田间试验表明,装置覆土宽度为 1.5 m,覆土厚度为 20.8 ~ 31.7 mm;建立了覆土厚度标准差回归模型,其决定系数为 0.934 2,模型误差为 1.8%;以覆土厚度标准差为响应值,确定的最优作业参数组合为:抛土轮转速 300 r/min、抛土角 40°、取土深度 20 mm。该组合下覆土厚度 22.9 mm,覆土厚度标准差 3.7 mm,满足大幅宽、均匀薄层覆土要求。本研究实现了果园土壤-秸秆分层覆盖农艺的机械化作业,为旱区果园管理提供了新方法和新装备。

关键词:旱区果园;秸秆覆盖机;同步覆土装置;离散元仿真

中图分类号:S224　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2023)12-0070-09　　**OSID**:

Design and Test of Broad Soil-covering Device for Orchard Straw Mulching Machine

LI Xudong[1]　ZANG Jiajun[2]　GAO Xiang[1]　FANG Xiaodong[3]　XU Shaojie[4]　ZHU Xinhua[1]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*
2. *School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing* 100044, *China*
3. *Sinotruk Jinan Power Co., Ltd., Ji'nan* 250200, *China*
4. *Weichai Lovol Intelligent Agricultural Technology Co., Ltd., Weifang* 261200, *China*)

Abstract: In response to the requirements of soil-covering with large width, thin thickness and high uniformity for mechanized soil-straw layered mulching technique in orchards, a supporting soil-covering device of orchard straw mulching machine was developed, which mainly consisted of a soil-taking screw, two soil-throwing wheels, a soil-collecting trough, and a soil-covering screw. The soil-taking screw with width of 1.5 m provided a flat foundation for straw layer laying, ensuring a flat-covering of straw layer and uniformity of the thin soil layer. The soil-throwing wheels on both sides of the soil-taking screw threw the soil back into the soil-collecting trough, avoiding the stuck problem of the device caused by foreign objects such as gravel. With discrete element simulation, it was determined that the terminal double helix structure was adopted for the soil-taking screw, the number of the soil-throwing wheel blades was 10, and the blade deflection angle of the soil-throwing wheel was 10° to improve the soil-covering uniformity and reduce the power consumption. The field tests showed that the device had a soil-covering width of 1.5 m and a thickness of 20.8 ~ 31.7 mm. The coefficient of determination of the regression model for the standard deviation of the soil-covering thickness was 0.934 2 with error of 1.8%. The optimal combination of operating parameters with the standard deviation of the soil-covering thickness as the response value was decided as the rotation speed of the soil-throwing wheel was 300 r/min, the soil-throwing angle was 40°, and the soil-taking depth was 20 mm. Under the combination, the soil-covering

收稿日期:2023-05-08　修回日期:2023-07-02

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2022NY-204、2023-ZDLSF-62)和陕西省农业协同创新与推广联盟重大科技项目(LMZD201703)

作者简介:李旭东(1996—),男,博士生,主要从事西部旱区农业技术及装备研究,E-mail:lxd0205@nwafu.edu.cn

通信作者:朱新华(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事西部旱区农业技术及装备研究,E-mail:zxh920@nwsuaf.edu.cn

thickness was 22.9 mm with standard deviation of 3.7 mm, which met the requirements of soil-covering with thin thickness and high uniformity. The research realized the mechanization of the orchard soil-straw layered mulching agronomy and provided a method and equipment for orchard management in arid areas.

Key words: arid orchard; straw mulching machine; synchronous soil-covering device; discrete element simulation

0　引言

苹果是黄土高原地区的重要产业，但该地区是我国典型的生态脆弱区[1]。年降雨量低（500 ~ 700 mm）且蒸发量大[2]，导致深层土壤干燥化和表层土壤次生盐渍化[3]，同时，土壤有机质含量仅 1% 左右[4]，且果园施肥大量依赖化肥[5]，严重影响果园的可持续发展。针对这一现状，减蒸、保墒、增加有机质含量成为果园土壤管理的关键目标。

相关研究表明，行间生草覆盖可逐步提高土壤有机质含量，但种植生草会与果树争水争肥[6]，在旱区果园实施存在争议。秸秆覆盖具有减蒸[7-8]、保墒[9]、增加土壤有机质含量[10-11]、抑制杂草生长[12]、克服次生盐渍化[13]和水土流失[14-15]等多种优势，是被广泛认可的绿色覆盖技术。然而，秸秆覆盖人工成本高，同时存在火灾隐患和秸秆因风雨集堆、飘移等问题。为此，笔者提出了一种机械化土壤-秸秆分层覆盖技术[16]，即由机器同步完成秸秆行间覆盖以及秸秆层上薄土盖压。在秸秆层上覆土对消除火灾隐患，防止秸秆因风雨集堆、飘移具有重要作用。果园试验表明，厚度为 15 ~ 35 mm 且覆盖均匀时，覆土层阻止秸秆层以下土壤水分蒸发、促进秸秆腐解的效果较好。同时，覆土层薄、水分少，可阻止杂草种子发芽或草芽生长，从而有更好的抑制杂草效果。

笔者前期研制了果园秸秆覆盖机，实现了果园行间机械化秸秆覆盖[17]，但该机缺乏配套的同步覆土装置。目前，覆土装置有多种，例如葡萄埋藤机覆土装置[18]、雪茄烟叶苗床起垄铺膜机覆土装置[19]、马铃薯播种机抛扬式膜际覆土装置[20]、蔬菜播种机开沟覆土器[21]、起垄覆膜机种床覆土装置[22]。然而，这些覆土装置作业后覆土层多呈窄条带形式，覆土厚度大、均匀性要求低，无法满足土壤-秸秆分层覆盖技术要求。提土-全膜面覆土装置[23]覆土宽度较大，但仍无法满足秸秆覆盖宽度要求，同时采用的刮板提升装置易卡死，无法很好适应果园环境。ZHU 等[24]设计了对抛式覆土装置，覆土宽度可调，但取土宽度较窄，作业后存在取土沟渠，地表不平整。

土壤-秸秆分层覆盖农艺要求覆土薄、幅宽大，这极大增加了高均匀性覆土的难度，是覆土装置设计的关键和难点。针对这些要求，有必要为果园秸秆覆盖机研发专用的大幅宽、均匀薄层覆土装置。

本研究基于果园环境和土壤-秸秆分层覆盖农艺，为果园秸秆覆盖机研制配套的覆土装置，以实现秸秆覆盖与覆土的机械化同步作业。重点解决果园秸秆覆盖机覆盖秸秆时同步实现大幅宽均匀薄层覆土这一关键问题。首先对覆土装置结构进行设计，而后经理论分析确定主要结构和工作参数，并通过离散元仿真优化关键结构参数以提高覆土均匀性，最后由田间试验确定覆土均匀性最优的作业参数并评价整体作业性能。

1　覆土装置结构与工作原理

1.1　果园环境及土壤-秸秆分层覆盖农艺

矮砧密植苹果园行宽 3.3 ~ 4.5 m，行间可通行宽度 2.0 ~ 2.5 m[24]。根据果园栽植环境，设置秸秆覆盖层宽度为 1.5 m。土壤-秸秆分层覆盖农艺是将小麦等秸秆覆盖于果园行间，并在秸秆覆盖层之上均匀覆盖一层薄土，其中覆土层宽度为 1.5 m，厚度为 15 ~ 35 mm。果园环境及土壤-秸秆分层覆盖农艺示意图如图 1 所示。

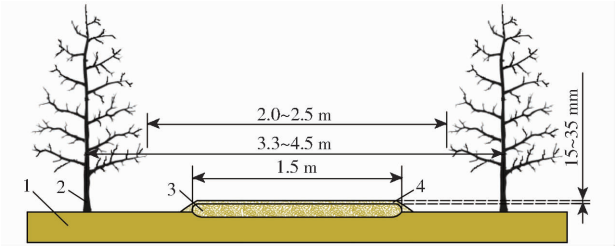


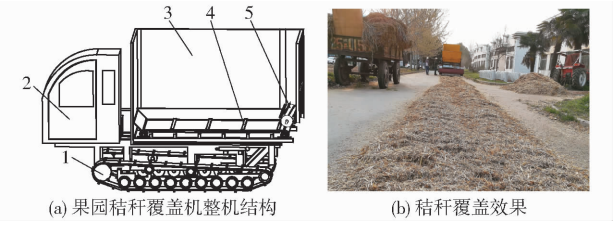
图 1　果园环境及土壤-秸秆分层覆盖农艺示意图

Fig. 1　Schematic of orchard environment and soil - straw layered mulching agronomy

1. 土壤　2. 果树　3. 秸秆覆盖层　4. 覆土层

1.2　果园秸秆覆盖机

果园秸秆覆盖机主要由橡胶履带底盘、发动机、驾驶室、车箱、刮板送料机构、下料辊组成，如图 2a 所示，整机尺寸（长 × 宽 × 高）为 4.3 m × 2.0 m × 2.4 m，具体设计见文献[17]。作业时，刮板送料机构将秸秆向后推送、连续供料，并在车箱后部与下料辊配合，将秸秆连续排出并均匀覆盖于果园行间，作业效果见图 2b。



(a) 果园秸秆覆盖机整机结构 (b) 秸秆覆盖效果

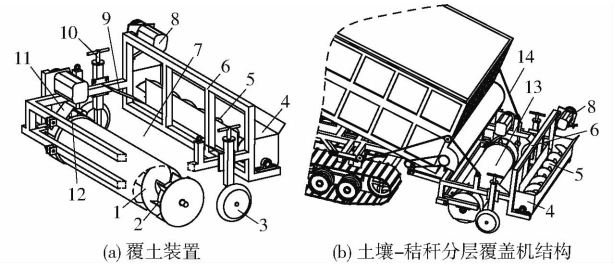
图 2 果园秸秆覆盖机结构图及作业效果

Fig. 2 Structure diagram of orchard straw mulching machine and its working effect

1. 橡胶履带底盘 2. 驾驶室 3. 车箱 4. 刮板送料机构 5. 下料辊

1.3 覆土装置结构

覆土装置主要由取土螺旋、抛土轮、集土箱和覆土螺旋组成,如图 3a 所示。覆土装置通过四杆机构配合液压缸带动的钢丝绳挂接于果园秸秆覆盖机后方,构成土壤-秸秆分层覆盖机(图 3b)。取土螺旋和覆土螺旋均为同轴结构,左右段螺旋叶片对称布置,叶片旋向相反。取土、覆土螺旋分别安装在机架的前后方,在中间区域形成秸秆落料区,同时覆土螺旋安装于集土箱中。两个抛土轮同轴对称安装在取土螺旋轴左、右端,用于将取土螺旋刮拨至两侧的土壤抛送至集土箱中。集土箱底部沿轴向设置有间隙可调的排土口,左、右两侧设置有集土板,用于承接抛土轮抛送的土壤并导流至集土箱。



(a) 覆土装置 (b) 土壤-秸秆分层覆盖机结构

图 3 土壤-秸秆分层覆盖机及覆土装置结构图

Fig. 3 Structure diagrams of soil-straw layered mulching machine and soil-covering device

1. 取土螺旋 2. 抛土轮 3. 地轮 4. 集土箱 5. 覆土螺旋 6. 机架 7. 秸秆落料区 8. 液压马达 9. 集土板 10. 地轮调节装置 11. 抛土板 12. 抛土口 13. 罩壳 14. 钢丝绳

取土螺旋及抛土轮外周均设置有罩壳,罩壳下部开放以便切土。抛土轮罩壳上方开有抛土口,抛土口处切向安装抛土板,通过改变抛土板与罩壳的相切位置调整抛土角。机架两侧安装有地轮调节装置以控制取土深度。取土螺旋、抛土轮和覆土螺旋均由液压马达通过带传动驱动。

1.4 覆土装置工作原理

覆土装置工作原理如图 4 所示,图中 v 为土壤-秸秆分层覆盖机前进速度;n 为取土螺旋及抛土轮转速;n_1 为覆土螺旋转速。作业前,首先根据需求调节取土深度、抛土角及液压马达转速。作业时,位于秸秆落料区前的取土螺旋将行间土壤向两侧刮拨,形成平整地基,秸秆自覆盖机车箱后部排出,经秸秆落料区覆盖于刮拨后的平整地基。与此同时,被刮拨至两侧的土壤由取土螺旋喂入抛土轮,并由抛土轮抛送,经集土板流入位于秸秆落料区之后的集土箱两侧。集土箱中的覆土螺旋将两侧土壤向中间输送,这一过程中,土壤经排土口流出,覆盖于秸秆层之上。

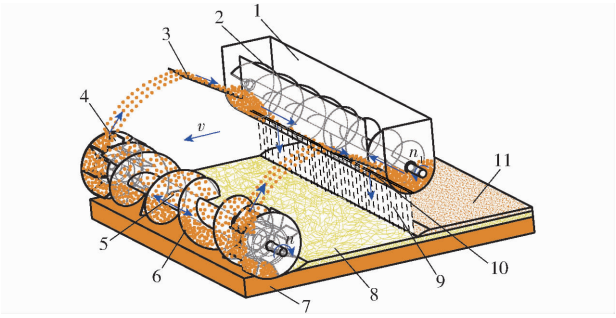


图 4 覆土装置工作原理图

Fig. 4 Working principle diagram of soil-covering device

1. 集土箱 2. 覆土螺旋 3. 集土板 4. 抛土轮 5. 取土螺旋 6. 土壤颗粒 7. 果园土层 8. 秸秆覆盖层 9. 土壤颗粒下落轨迹 10. 排土口 11. 覆土层

覆土装置整体布置呈左右对称形式,取土螺旋和覆土螺旋分别由中间向两侧或由两侧向中间输送土壤,减小了刮拨距离,避免在单侧聚积大量土壤,有利于提高覆土均匀性。取土和覆土螺旋一前一后布置,使得覆土动作相对取土动作在时间和空间上存在一定的滞后,为同步完成秸秆覆盖与覆土作业创造了条件。取土螺旋大幅宽取土,为秸秆覆盖提供了平整地基,有利于秸秆层覆盖平整,并尽可能保证了覆盖后果园行间地表平整。采用抛土轮抛送的方式提升土壤,可避免石块等异物导致提升装置卡死的问题,相比常用的刮板式提升装置能更好适应果园环境。

2 关键部件设计

2.1 取土螺旋

取土螺旋用于切土并向两侧刮拨土壤,其性能直接影响取土量以及向抛土轮喂入土壤的均匀性。作为取土螺旋的关键设计参数,螺旋取土量应满足覆土厚度要求。

2.1.1 螺旋结构设计

左右段取土螺旋叶片同轴对称布置,旋向相反,作业时将行间土壤由中间向两侧刮拨,相比单向作业缩短了土壤横向刮拨距离,避免在单侧聚积大量土壤,有利于提高覆土均匀性。螺旋轴左右

两端安装有抛土轮，抛土轮与螺旋叶片同轴，如图 5 所示。

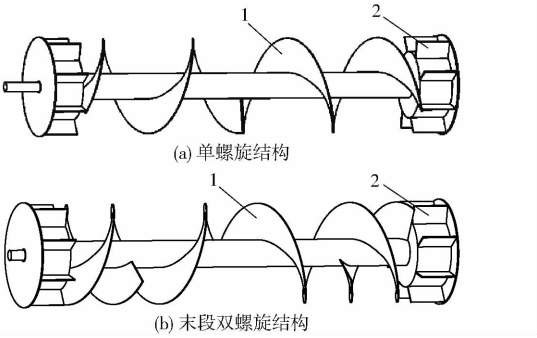


图 5　取土螺旋结构图

Fig. 5　Structure diagrams of soil-taking screw

1. 取土螺旋叶片　2. 抛土轮

为提高取土螺旋向抛土轮喂入土壤的均匀性和连续性，提出了末段双螺旋结构，即在取土螺旋末段增加一段螺旋叶片，叶片长度为取土螺旋直径的 3/4，并与原有螺旋叶片间隔 180°布置，如图 5b 所示。将通过仿真比较取土螺旋在单螺旋及末段双螺旋结构下的取土和土壤喂入性能。

2.1.2　取土量及结构参数计算

秸秆覆盖层宽度为 1.5 m，故取土螺旋取土幅宽 b 取 1.5 m；为保证取土量满足要求，按最大覆土厚度 35 mm 计算螺旋结构参数，综合考虑果园行间地表不平整以及作业前后土壤密度变化的影响，假设取土层厚度等于覆土层厚度，故取土深度 H 取 35 mm；v 取0.28 m/s。则单侧螺旋取土量为

$$Q = 3\,600 v b_1 H / 1\,000 \tag{1}$$

其中

$$b_1 = 0.5 b \tag{2}$$

式中　Q——单侧螺旋取土量，m^3/h

b_1——单侧螺旋取土幅宽，m

从而，取土螺旋叶片外径 D 为

$$D = \sqrt{\frac{Q}{47 n_{\min} s \phi \varepsilon}} \tag{3}$$

式中　$n_{\min}$——取土螺旋最低转速

s——取土螺旋螺距，根据螺旋标准规格，取 $s = D$

ϕ——土壤填充系数，当取土深度为 35 mm 时，相应的土壤填充系数取 0.043

ε——倾斜输送系数，在水平输送的情况下取 1

D 的计算值为 0.41 m。参考《农业机械设计手册》，螺旋叶片外径及螺距均取 0.40 m。

2.2　覆土螺旋

覆土螺旋结构如图 6 所示。与取土螺旋相同，左右段覆土螺旋叶片亦为同轴对称布置，旋向相反。作业时，覆土螺旋将土壤由两侧向中间输送，相比单向输送，缩短了输送距离，降低了土壤输送量的变化幅度，可提高覆土均匀性。覆土螺旋叶片外缘设置有缺口，可降低土壤推送量，避免将过多的土壤推送至集土箱中部，保证土壤均匀分散在整个作业幅宽上。同时，缺口结构可破碎、切断块状土壤和杂草，防止排土口堵塞。根据式(3)，确定覆土螺旋叶片外径和螺距均为 0.25 m。

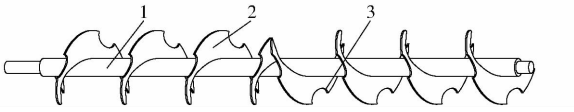


图 6　覆土螺旋结构图

Fig. 6　Structure diagram of soil-covering screw

1. 螺旋轴　2. 螺旋叶片　3. 缺口

2.3　抛土轮

2.3.1　抛土轮结构设计

抛土轮用于将取土螺旋喂入的土壤抛送至集土箱。采用抛送的方式提升土壤可避免碎石等异物导致提升装置卡死的问题，能更好适应果园环境。如图 7a 所示，抛土轮安装在取土螺旋轴外端，其外侧设有端板，中心设有轮毂，轮毂上安装有叶片，叶片外沿与端板嵌合。

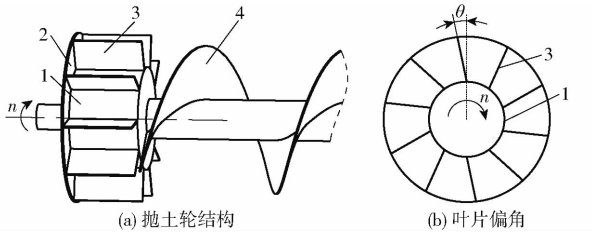


图 7　抛土轮结构及叶片偏角示意图

Fig. 7　Schematics of soil-throwing wheel and blade deflection angle

1. 轮毂　2. 端板　3. 叶片　4. 取土螺旋

叶片配置对抛土效果有重要影响。其中，叶片数量直接影响土壤抛送均匀性、取土螺旋向抛土轮的土壤喂入性能以及抛土轮作业阻力矩；为降低作业阻力矩、提升土壤抛送性能，叶片安装方向相对抛土轮径向偏转一定角度，形成叶片偏角 θ，如图 7b 所示。叶片数量及偏角 θ 将在后文通过仿真确定。

2.3.2　抛土角及抛土轮转速分析

抛土角和抛土轮转速是影响土壤抛送效果的关键参数，其中抛土角是指土壤抛出后初速度方向与水平方向的夹角，由抛土板调整。如图 8 所示，O_1 为抛土轮中心点，点 B 位于集土板边沿，直线 AB 是抛土轮外圆周的切线，切点为 A。土壤颗粒被抛出后做斜抛运动，通过点 B 是其进入集土箱的边界条件。设土壤颗粒在点 O 以初速度 v_1 抛出，其对应的抛土角为 δ，抛出后到达的最高点为点 M。

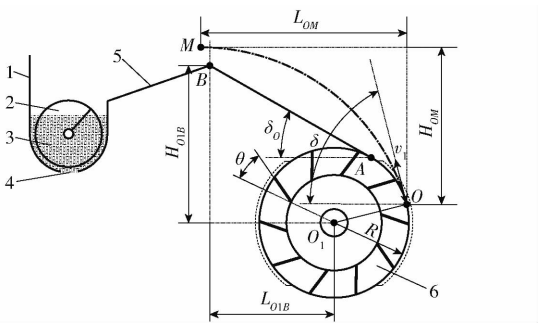


图 8 土壤颗粒被抛土轮抛出后运动分析

Fig. 8 Kinematics analysis of soil particles thrown by soil-throwing wheel

1. 集土箱 2. 覆土螺旋 3. 土壤 4. 排土口 5. 集土板 6. 抛土轮

土壤颗粒通过点 B 的必要条件之一是抛出点 O 对应的抛土角 δ 大于切点 A 对应的抛土角 δ_0，根据抛土轮半径 $R=0.21$ m，抛土轮中心 O_1 与点 B 的水平及竖直距离分别为 $L_{O1B}=0.31$ m、$H_{O1B}=0.44$ m，可得 $\delta_0=31.9°$，故要求 $\delta>31.9°$，同时 δ 应小于 90°。

点 M 高于点 B 是土壤颗粒通过点 B 的另一个必要条件，即

$$H_{OM}=\frac{(v_1\sin\delta)^2}{2g}>H_{O1B}-R\cos\delta \tag{4}$$

式中 H_{OM}——土壤颗粒抛出后到达最高点的竖直位移，m

g——重力加速度，取 9.81 m/s^2

由式(4)可知，$v_1>4.29$ m/s 时，在抛土角 31.9°~90°范围内土壤颗粒抛出后到达的最高点 M 均高于点 B，此时对应的抛土轮最低转速 $n_{\min}$ 为

$$n_{\min}=\frac{60v_1}{2\pi R}=195\ \text{r/min} \tag{5}$$

3 取土螺旋及抛土轮仿真分析

3.1 仿真设置与方法

3.1.1 仿真设计与条件

取土螺旋向抛土轮的土壤喂入性能以及抛土轮土壤提升抛送和切土性能是影响覆土装置作业效果的关键，本研究利用离散元仿真优化取土螺旋及抛土轮关键结构参数。在左半段螺旋为单螺旋结构、右半段螺旋为末段双螺旋结构的情况下，比较取土深度 15~35 mm 时装置的取土性能和土壤抛送均匀性；在抛土轮取土深度 35 mm(对应取土螺旋取土深度中间水平 25 mm)时，分析抛土轮叶片数量对土壤抛送均匀性和抛土轮作业阻力矩的影响；在抛土轮最大取土深度 45 mm(对应取土螺旋最大取土深度 35 mm)时，比较叶片偏角 θ 对抛土轮作业阻力矩和土壤抛送性能的影响。

仿真过程中，取土螺旋和抛土轮转速均取 250 r/min，前进速度 0.28 m/s，抛土角 40°，并以稳定工作阶段 2 s 内的数据统计结果。因就地取土，被抛送的土壤颗粒具有一定的湿度和团聚结构，故在仿真中忽略空气阻力的影响。

3.1.2 仿真模型及参数

在 EDEM 中建立了球型、直线型、三角型和四面体型 4 种土壤颗粒[25]，土壤颗粒间接触模型为 Hertz-Mindlin with bonding。取土螺旋及抛土轮几何模型由 Creo 建立并导入 EDEM。离散元仿真参数[25]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
土壤密度/(kg·m^{-3})	1 770
土壤泊松比	0.4
土壤剪切模量/Pa	1×10^6
钢材密度/(kg·m^{-3})	7 850
钢材泊松比	0.31
钢材剪切模量/Pa	8.08×10^{10}
土壤-土壤恢复系数	0.2
土壤-土壤静摩擦因数	0.4
土壤-土壤滚动摩擦因数	0.3
土壤-装置恢复系数	0.3
土壤-装置静摩擦因数	0.5
土壤-装置滚动摩擦因数	0.05
法向刚度/(N·m^{-3})	2.4×10^6
切向刚度/(N·m^{-3})	1.7×10^6
法向临界应力/Pa	2.35×10^5
切向临界应力/Pa	1.86×10^5
粘结半径/mm	3.5

取土螺旋仿真模型(图 9a)主要由取土螺旋、罩壳、抛土轮、土槽Ⅰ及质量流量传感器Ⅰ、Ⅱ组成，左半段取土螺旋为单螺旋结构，右半段为末段双螺旋结构。为真实反映大幅宽下装置的作业效果，土槽Ⅰ的尺寸设置为 1000 mm×2200 mm×70 mm(长×宽×高)。质量流量传感器Ⅰ、Ⅱ设置在抛土口处，分别监测左段和右段取土螺旋及抛土轮的土壤质量流量。抛土轮叶片数量仿真模型(图 9b)主要由取土螺旋、罩壳、抛土轮、土槽Ⅱ及质量流量传感器Ⅲ组成，取土螺旋采用末段双螺旋结构。因覆土装置结构左右对称，为提高仿真效率，仅建立单侧结构，土槽Ⅱ的尺寸为 1000 mm×1100 mm×70 mm(长×宽×高)。质量流量传感器Ⅲ布置位置同取土螺旋仿真模型。抛土轮叶片偏角仿真模型(图 9c)主要由抛土轮、土槽Ⅲ以及质量传感器Ⅳ、Ⅴ组成，其中质量传感器Ⅳ与抛土轮中心的水平及

竖直距离分别为 0.31、0.44 m(对应图 8 中点 B),质量传感器Ⅴ位于抛土口处,分别监测通过集土板边沿进入集土箱的土壤累计质量和抛土轮抛出土壤的累计质量,传感器Ⅳ、Ⅴ的尺寸相等,均为 180 mm × 100 mm × 100 mm(长 × 宽 × 高)。土槽Ⅲ的尺寸为 1 500 mm × 270 mm × 70 mm(长 × 宽 × 高)。

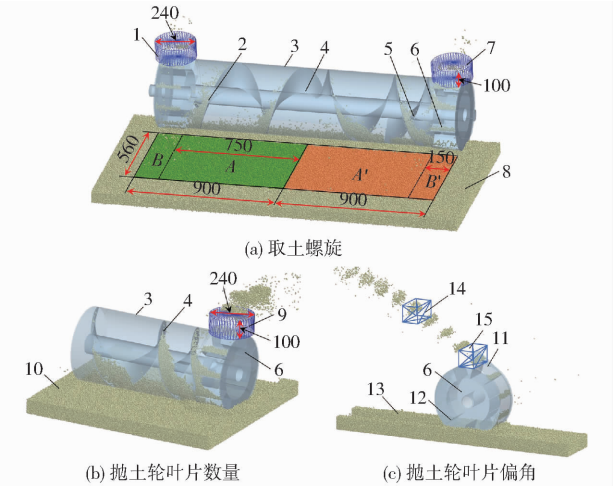


图 9　取土螺旋及抛土轮仿真模型

Fig. 9　Simulation models of soil-taking screw and soil-throwing wheel

1. 质量流量传感器Ⅰ　2. 单螺旋结构　3. 罩壳　4. 取土螺旋　5. 末段双螺旋结构　6. 抛土轮　7. 质量流量传感器Ⅱ　8. 土槽Ⅰ　9. 质量流量传感器Ⅲ　10. 土槽Ⅱ　11. 抛土板　12. 抛土轮叶片　13. 土槽Ⅲ　14. 质量传感器Ⅳ　15. 质量传感器Ⅴ

3.1.3　仿真评价指标

以取土效率和土壤抛送均匀性为指标,比较左右两段不同取土螺旋结构对装置取土和土壤抛送性能的影响。如图 9a 所示,A 及 A'为取土螺旋取土区域,B 及 B'为抛土轮取土区域,其深度较取土螺旋区域大 10 mm。设 $A+B$ 区域($A'+B'$区域)仿真前土壤颗粒总质量为 m_1,仿真后剩余土壤颗粒质量为 m_2。仿真过程中,土壤颗粒只能通过抛土口抛出或回流至取土区域,不存在其他土壤流向,故定义取土效率 η 为

$$\eta = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \tag{6}$$

土壤抛送均匀性通过质量流量传感器Ⅰ、Ⅱ在抛土口处监测的土壤质量流量变异系数表征。该指标既能考察取土过程的总体作业效果,也能反映取土螺旋的土壤喂入性能。取土螺旋仿真模型中(图 9a),左右两段的差异仅在于取土螺旋向抛土轮的喂入结构不同,其余结构、参数完全一致,因此土壤抛送均匀性的差异完全取决于取土螺旋向抛土轮的土壤喂入性能。

抛土轮不仅要将取土螺旋喂入的土壤抛送至集土箱中,而且要切割、抛送自身工作区域内的土壤,其作业性能由抛土性能和作业阻力矩评价。由质量流量传感器Ⅲ测得的土壤质量流量变异系数评价抛土轮叶片数量对土壤抛送均匀性的影响。对所有时间步长的阻力矩做单因素方差分析,研究叶片数量及偏角的不同水平对抛土轮作业阻力矩是否有显著影响。以抛土效率为指标,考察不同叶片偏角下抛土轮抛送的土壤能否进入集土箱,抛土效率定义为仿真全过程中质量传感器Ⅳ监测的土壤累计质量占传感器Ⅴ监测的土壤累计质量的百分比。

覆土厚度要求一定时,取土效率越高,则取土螺旋的取土深度越小,有利于降低能耗,维持作业参数稳定。较小的抛土轮作业阻力矩同样有利于维持作业参数稳定。土壤抛送均匀性则直接影响覆土均匀性。

3.2　仿真结果与分析

3.2.1　单螺旋和末段双螺旋结构下取土及土壤抛送均匀性比较

单螺旋和末段双螺旋结构下,装置的取土及土壤抛送均匀性、取土螺旋的土壤喂入效果如图 10 所示。由图 10a 可知,各取土深度下,末段双螺旋结构的取土效率较单螺旋结构无明显差异,均大于 91.67%,但其土壤质量流量变异系数比单螺旋结构低 30.70% ~ 34.02%,土壤抛送均匀性提高约 35%。这是由于采用末段双螺旋结构时,大大减小了取土螺旋向抛土口喂入土壤的间隔以及单次喂入土壤颗粒的数量(图 10b、10c),降低了抛出土壤质量流量的波动幅度(图 10d),从而提高土壤抛送以及覆土均匀性。此外,比较图 10b、10c 可知,单螺旋结构下单段螺旋叶片输送了更多的土壤颗粒,在喂入效率基本一致的情况下,单螺旋结构向抛土口一次喂入后回带的土壤颗粒更多。综合比较,取土螺旋采用末段双螺旋结构。

3.2.2　抛土轮叶片数量对土壤抛送均匀性和抛土轮作业阻力矩的影响

抛土口处土壤质量流量变异系数及抛土轮作业阻力矩随抛土轮叶片数量的变化曲线如图 11 所示(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同)。可知,随着抛土轮叶片数量的增加,土壤质量流量变异系数先减小后增大,抛土轮作业阻力矩整体上呈增大趋势。叶片数量为 6、8、10 时,抛土轮作业阻力无显著性差异,且当叶片数量为 10 个时,土壤质量流量变异系数最小,土壤抛送均匀性最优。因此,确定最优的抛土轮叶片数量为 10。

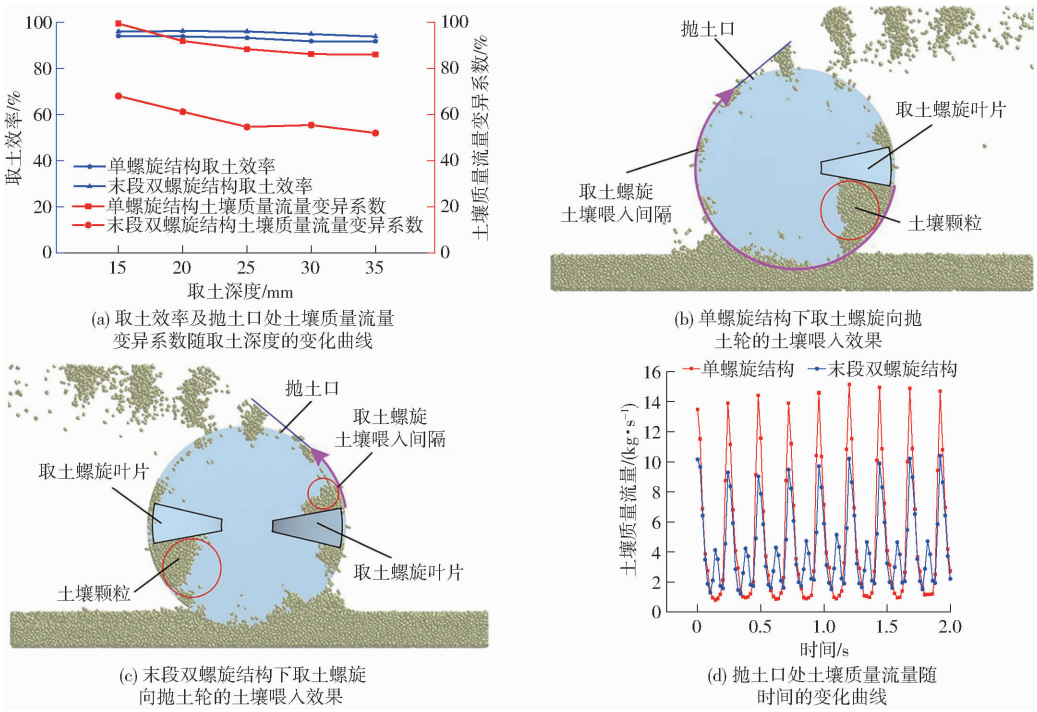


图 10 取土螺旋仿真结果

Fig. 10 Simulation results of soil-taking screw

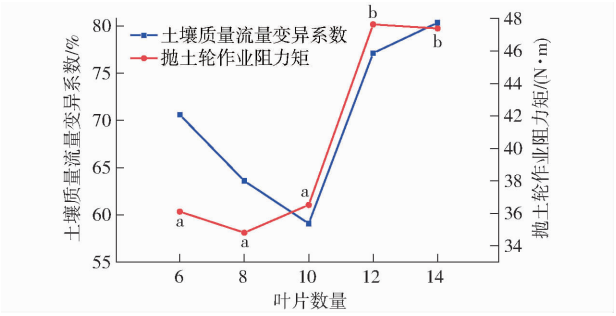


图 11 抛土口处土壤质量流量变异系数及抛土轮作业阻力矩随抛土轮叶片数量变化曲线

Fig. 11 Variation curves with number of soil-throwing wheel blades of coefficient of variation for soil mass flow rate at soil-throwing port and operation resistance torque of soil-throwing wheel

3.2.3 叶片偏角对抛土轮作业阻力矩和抛土效率的影响

叶片偏角对抛土轮作业阻力矩和抛土效率的影响如图 12a 所示，当叶片偏角为 10°时，抛土轮作业阻力矩最小，且相比其他叶片偏角有显著性差异。不同叶片偏角下，抛土轮抛土效率均在 96.48% 以上，表明大部分土壤颗粒能通过集土板边沿进入集土箱。当叶片偏角为 10°时，抛土效率为 98.17%，土壤抛送效果如图 12b 所示，满足 2.3.2 节提出的抛送距离要求。综合考虑作业阻力矩和土壤抛送效果，抛土轮叶片偏角取 10°。

4 覆土装置田间试验

4.1 材料与方法

覆土装置挂接于果园秸秆覆盖机上，在西北农林科技大学试验田测试作业性能，试验田土壤为塿土，湿基含水率为 11.7%，土壤紧实度为 4 930 kPa。为单独评价覆土装置作业性能，试验过程中秸秆覆盖机构不工作。为提高覆土层厚度测量准确性，在取土螺旋之后、集土箱之前安装有额外的覆膜机构。

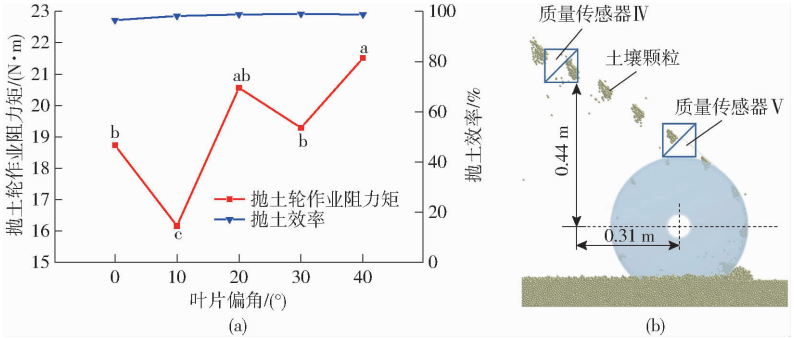
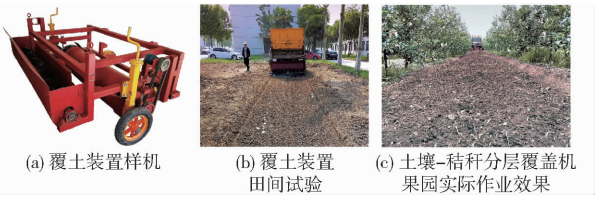


图 12 抛土轮叶片偏角仿真结果

Fig. 12 Simulation results of blade deflection angle of soil-throwing wheel

覆膜机构可在取土螺旋取土后于平整地基同步覆盖一层地膜，由地膜承接自集土箱落下的土壤形成覆土层，以此达到分离覆土层与地面土壤的目的。试验时土壤-秸秆分层覆盖机的前进速度为 0.28 m/s，覆土螺旋转速为 120 r/min。覆土装置样机及作业效果如图 13 所示。



(a) 覆土装置样机　(b) 覆土装置田间试验　(c) 土壤-秸秆分层覆盖机果园实际作业效果

图 13　覆土装置样机及作业效果

Fig. 13　Prototype of soil-covering device and its operation effect

每次试验以间隔 4 m 选取 5 个测量区，测量区大小为 1 m×1 m，在每个测量区用深度游标卡尺按五点取样法测量覆土厚度，单次试验可得到 25 个覆土厚度值。单组试验重复 2 次，以获取的 50 个覆土厚度的平均值及标准差作为试验结果。

4.2　覆土性能试验结果

根据单因素试验结果，以抛土轮转速 n(250 ~ 300 r/min)、抛土角 δ(35° ~ 45°)、取土深度 H(20 ~ 40 mm)为影响因素，以覆土厚度平均值及标准差为指标进行三因素三水平正交试验，评价装置覆土性能，并确定最优作业参数。试验设计及结果如表 2 所示。

表 2　覆土性能试验设计及结果

Tab. 2　Arrangement and results of soil-covering test

试验号	因素			覆土厚度平均值	覆土厚度标准差
	抛土轮转速 n/(r·min^{-1})	抛土角 δ/(°)	取土深度 H/mm	d_s/mm	σ/mm
1	250	45	30	31.7	13.8
2	250	35	30	20.8	5.9
3	275	40	30	21.2	6.5
4	275	45	40	26.6	12.2
5	300	40	40	25.8	8.0
6	300	35	30	23.1	6.4
7	275	45	20	27.7	10.9
8	275	40	30	21.8	5.7
9	275	40	30	21.0	8.0
10	275	35	20	21.4	5.7
11	300	40	20	22.5	3.8
12	275	40	30	23.3	6.2
13	250	40	40	21.2	8.6
14	250	40	20	20.8	6.1
15	300	45	30	30.1	6.0
16	275	40	30	22.0	6.7
17	275	35	40	22.3	8.0

试验结果表明，覆土厚度 d_s 在 20.8 ~ 31.7 mm 范围内，满足 15 ~ 35 mm 的覆土厚度要求。覆土宽度为 1.5 m。覆土厚度标准差在 3.8 ~ 13.8 mm 范围内。设计的覆土装置满足机械化土壤-秸秆分层覆盖中大幅宽、高均匀性的覆土要求。

为提高覆土均匀性，以覆土厚度标准差 σ 为响应值建立二次回归模型

$$\sigma = -112.807\,5 + 1.076\,8n - 1.230\,5\delta - 0.492\,75H - 0.016\,6n\delta + 0.001\,7nH - 0.005\delta H - 0.000\,936n^2 + 0.079\,6\delta^2 + 0.005\,9H^2 \quad (7)$$

回归模型的 P 值小于 0.01，模型极显著，其决定系数为 0.934 2，失拟项不显著。

随机选取 5 组参数验证覆土厚度标准差回归模型，结果如表 3 所示。

表 3　覆土厚度标准差回归模型验证试验结果

Tab. 3　Verification test results of regression model for standard deviation of soil-covering thickness

试验号	因素			覆土厚度标准差实测值/mm	覆土厚度标准差预测值/mm
	n/(r·min^{-1})	δ/(°)	H/mm		
1	300	40	20	3.7	3.6
2	288	38	26	5.1	5.2
3	270	36	28	5.8	5.8
4	264	42	31	8.4	8.7
5	253	44	39	12.7	12.8

由表 3 可知，覆土厚度标准差实测值与预测值接近，二者间平均误差为 1.8%，模型可用于装置覆土厚度标准差预测。

由 Design-Expert 分析得到覆土厚度标准差最小的参数组合为：抛土轮转速 300 r/min、抛土角 40°、取土深度 20 mm。在该参数组合下进行 3 次验证试验，测得平均覆土厚度为 22.9 mm，标准差为 3.7 mm，满足机械化土壤-秸秆分层覆盖中覆土厚度及均匀性要求。

5　结论

(1)研制了果园秸秆覆盖机同步覆土装置，主要由取土螺旋、抛土轮、集土箱以及覆土螺旋组成。取土螺旋取土幅宽 1.5 m，为秸秆层铺设提供了平整地基，保证了秸秆层覆盖平整和薄土层均匀度；抛土轮以抛送的方式提升土壤，避免了碎石等异物导致提升装置卡死的问题，对果园环境适应性好。

(2)离散元仿真表明：装置取土效率大于 91.67%，取土螺旋采用末段双螺旋结构时，抛土口处土壤抛送均匀性提高约 35%；抛土轮叶片数量为 10 时，土壤抛送均匀性最优，作业阻力矩较小；叶片偏角为 10°时，抛土轮作业阻力矩最小，抛土效率为

98.17%,满足土壤抛送距离要求。

(3)田间试验中覆土宽度为 1.5 m,覆土厚度为 20.8 ~ 31.7 mm;覆土厚度标准差回归模型决定系数为 0.934 2,模型误差为 1.8%;确定最优的作业参数组合为:抛土轮转速 300 r/min、抛土角 40°、取土深度 20 mm,该组合下装置覆土厚度 22.9 mm,覆土厚度标准差 3.7 mm,满足薄厚度、高均匀性覆土要求。覆土装置配合果园秸秆覆盖机实现了土壤-秸秆分层覆盖农艺的机械化作业,为旱区果园管理提供了新方法和新装备。

参 考 文 献

[1] 张良侠, 樊江文, 张海燕, 等. 黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析[J]. 环境科学, 2022, 43(9): 4902 - 4910.
ZHANG Liangxia, FAN Jiangwen, ZHANG Haiyan, et al. Spatial-temporal variations and their driving forces of the ecological vulnerability in the Loess Plateau[J]. Environmental Science, 2022, 43(9): 4902 - 4910. (in Chinese)

[2] TAN H, LIU Z, RAO W, et al. Stable isotopes of soil water: implications for soil water and shallow groundwater recharge in hill and gully regions of the Loess Plateau, China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2017, 243: 1 - 9.

[3] XU J, LAN W, LI Y, et al. Evaporation-induced water and solute coupled transport in saline loess columns in closed and open systems[J]. Geofluids, 2019, 2019: 3781410.

[4] GE S, ZHU Z, PENG L, et al. Soil nutrient status and leaf nutrient diagnosis in the main apple producing regions in China[J]. Horticultural Plant Journal, 2018, 4(3): 89 - 93.

[5] WANG N, JOOST W, ZHANG F S. Towards sustainable intensification of apple production in China-yield gaps and nutrient use efficiency in apple farming systems[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(4): 716 - 725.

[6] SUO G D, XIE Y S, ZHANG Y, et al. Long-term effects of different surface mulching techniques on soil water and fruit yield in an apple orchard on the Loess Plateau of China[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 246: 643 - 651.

[7] CHANG L, HAN F, CHAI S, et al. Straw strip mulching affects soil moisture and temperature for potato yield in semiarid regions[J]. Agronomy Journal, 2020, 112(2): 1126 - 1139.

[8] HOU X, LI R. Interactive effects of autumn tillage with mulching on soil temperature, productivity and water use efficiency of rainfed potato in Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2019, 224: 105747.

[9] WANG Y, CAO L. The effects of tillage practices on interrill erosion in the red soil region of China[J]. Transactions of the ASABE, 2020, 63(1): 211 - 219.

[10] HU Y, SUN B, WU S, et al. Soil carbon and nitrogen of wheat-maize rotation system under continuous straw and plastic mulch [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2021, 119(2): 181 - 193.

[11] MA Z, ZHANG X, ZHENG B, et al. Effects of plastic and straw mulching on soil microbial P limitations in maize fields: dependency on soil organic carbon demonstrated by ecoenzymatic stoichiometry[J]. Geoderma, 2021, 388: 114928.

[12] WEBBER S M, BAILEY A P, HUXLEY T, et al. Traditional and cover crop-derived mulches enhance soil ecosystem services in apple orchards[J]. Applied Soil Ecology, 2022, 178: 104569.

[13] 张建兵, 杨劲松, 姚荣江, 等. 有机肥与覆盖方式对滩涂围垦农田水盐与作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 116 - 125.
ZHANG Jianbing, YANG Jinsong, YAO Rongjiang, et al. Dynamics of soil water, salt and crop growth under farmyard manure and mulching in coastal tidal flat soil of northern Jiangsu Province[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(15): 116 - 125. (in Chinese)

[14] GAO Z, XU Q, SI Q, et al. Effects of different straw mulch rates on the runoff and sediment yield of young citrus orchards with lime soil and red soil under simulated rainfall conditions in southwest China[J]. Water, 2022, 14(7): 1119.

[15] PRATS S A, MERINO A, GONZALEZ-PEREZ J A, et al. Can straw-biochar mulching mitigate erosion of wildfire-degraded soils under extreme rainfall? [J]. Science of the Total Environment, 2021, 761: 143219.

[16] 王清江. 矮砧苹果园秸秆覆盖模式及秸秆机械化覆盖作业技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
WANG Qingjiang. Study on straw mulching model and straw mechanized mulching technology in apple orchard[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese)

[17] 徐少杰, 朱新华, 王东阳. 果园秸秆覆盖机设计与试验[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(7): 122 - 130.
XU Shaojie, ZHU Xinhua, WANG Dongyang. Design and experiment on straw mulching machine in arid orchards[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(7): 122 - 130. (in Chinese)

[18] YANG S, SHE H, YANG S, et al. Design and experimental validation of improved grapevine burying machine[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(2): 95 - 100.

[19] 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)

(下转第 120 页)

[24] 盖金星,李学强,魏忠彩,等. 马铃薯高效低损产地贮运集薯装车机研制与试验[J]. 中国农机化学报,2022,43(4):53 - 59.
GAI Jinxing, LI Xueqiang, WEI Zhongcai, et al. Development and test of potato loading machines for storage and transportation in potato producing area with high efficiency and low damage[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(4): 53 - 59. (in Chinese)

[25] 杨小平,石林榕,臧金,等. 水重力式马铃薯静摩擦因数测定仪设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(3):167 - 174,320.
YANG Xiaoping, SHI Linrong, ZANG Jin, et al. Design and test of water gravity-based potato static friction coefficient determination device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 167 - 174,320. (in Chinese)

[26] 纪龙龙. 马铃薯干式刷脱清土装置试验与优化[D]. 北京:中国农业科学院,2021.
JI Longlong. Experiment and optimization of potato dry-type brush roller cleaning device[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021. (in Chinese)

[27] 王立军,彭博,宋慧强. 玉米收获机聚氨酯橡胶筛筛分性能仿真与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(7):90 - 96.
WANG Lijun, PENG Bo, SONG Huiqiang. Cleaning of maize mixture based on polyurethane rubber sieve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 90 - 96. (in Chinese)

[28] 冯斌,孙伟,石林榕,等. 收获期马铃薯块茎碰撞恢复系数测定与影响因素分析[J]. 农业工程学报,2017,33(13):50 - 57.
FENG Bin, SUN Wei, SHI Linrong, et al. Determination of restitution coefficient of potato tubers collision in harvest and analysis of its influence factors[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13): 50 - 57. (in Chinese)

[29] 王相友,张蒙,李学强,等. 辊式导流马铃薯定重装袋机设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(6):159 - 168.
WANG Xiangyou, ZHANG Meng, LI Xueqiang, et al. Design and text of roller-guided potato fixed weight bagging machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 159 - 168. (in Chinese)

[30] 杜小强,李党伟,贺磊盈,等. 基于电子果实技术的机械振动采收过程果实运动分析[J]. 农业工程学报,2017,33(17):58 - 64.
DU Xiaoqiang, LI Dangwei, HE Leiying, et al. Fruit motion analysis in process of mechanical vibration harvesting based on electronic fruit technique[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(17): 58 - 64. (in Chinese)

[31] 蒙建国,王春光,谢胜仕,等. 马铃薯恢复系数测定试验分析[J]. 中国农业大学学报,2017,22(9):93 - 100.
MENG Jianguo, WANG Chunguang, XIE Shengshi, et al. Measurements test analysis of potato restitution coefficient[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(9): 93 - 100. (in Chinese)

[32] 谢胜仕,王春光,邓伟刚. 马铃薯碰撞损伤试验与碰撞加速度特性分析[J]. 中国农业大学学报,2020,25(1):163 - 169.
XIE Shengshi, WANG Chunguang, DENG Weigang. Collision damage test and acceleration characteristic analysis of potato [J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(1): 163 - 169. (in Chinese)

(上接第 78 页)

[20] 石林榕, 杨小平, 赵武云, 等. 抛扬式膜际覆土马铃薯播种联合作业机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 129 - 137.
SHI Linrong, YANG Xiaoping, ZHAO Wuyun, et al. Design and test of potato combine seeder with throwing and covering soil on film edge[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 129 - 137. (in Chinese)

[21] 王方艳, 孙光全, 张钦. 电控锥盘式蔬菜播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 70 - 79.
WANG Fangyan, SUN Guangquan, ZHANG Qin. Design and experiment of electric control cone type vegetable seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 70 - 79. (in Chinese)

[22] 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)

[23] 戴飞, 赵武云, 宋学锋, 等. 提土-全膜面覆土装置作业参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 88 - 96.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, SONG Xuefeng, et al. Operating parameter optimization and experiment of device with elevating and covering soil on plastic-film[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 88 - 96. (in Chinese)

[24] ZHU X, GAO X, LI X, et al. Design and test of bilateral throwing soil-covering device for straw mulching machine in orchards [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2023, 16(1): 162 - 171.

[25] HANG C, GAO X, YUAN M, et al. Discrete element simulations and experiments of soil disturbance as affected by the tine spacing of subsoiler[J]. Biosystems Engineering, 2018, 168: 73 - 82.