

三七收获机输送分离装置作业机理分析与参数优化

王法安^{1,2} 温博^{1,2} 谢晓红^{1,2} 解开婷^{2,3} 郭思危^{1,2} 张兆国^{1,2}

(1. 昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500; 2. 云南省高校中药材机械化工程研究中心, 昆明 650500;
3. 昆明理工大学机电工程学院, 昆明 650500)

摘要: 针对丘陵山区三七机械化收获根土分离难、输送效率低等问题,开展了三七收获机输送分离装置作业机理与参数优化试验研究。首先,通过理论分析建立了三七根土复合体在输送过程中的动力学模型;其次,利用高速摄影获取三七根土复合体的运动轨迹,确定三七输送、根土分离、须根断裂等作业机理;与此同时,基于 EDEM - RecurDyn 耦合开展三七根土复合体输送分离作业联合仿真,验证了模型的可靠性,明确了三七根土复合体输送分离规律,确定了影响三七根土分离的主要作业参数为:升运速度、升运倾角、振动幅度、振动频率;最后,开展台架试验并利用 Design-Expert 软件进行分析寻找最优作业参数。结果表明:当最优作业参数组合升运倾角为 21°、振动幅度为 44 mm、升运速度为 0.9 m/s、振动频率为 1.6 Hz 时,三七输送率、三七筛净率分别为 93.60%、92.64%,符合三七收获机输送分离作业要求。

关键词: 三七收获机; 输送分离机理; 高速摄影; EDEM - RecurDyn; 参数优化

中图分类号: S225.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S1-0201-11

Operation Mechanism Analysis and Parameter Optimization of Conveying and Separating Device of *Panax notoginseng* Harvester

WANG Fa'an^{1,2} WEN Bo^{1,2} XIE Xiaohong^{1,2} XIE Kaiting^{2,3} GUO Siwei^{1,2} ZHANG Zhaoguo^{1,2}

(1. Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China

2. Research Center on Mechanization Engineering of Chinese Medicinal Materials of Universities in Yunnan Province, Kunming 650500, China

3. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Aiming at the problems of difficult root-soil separate and low transportation efficiency in mechanized harvesting of *Panax notoginseng* in hilly and mountainous areas, experimental research on the operation mechanism and parameter optimization of the conveying and separating device of the *Panax notoginseng* harvester was conducted. Firstly, the dynamics model of *Panax notoginseng* root-soil composite during the process of transportation was established through theoretical analysis; secondly, high-speed photography was used to obtain the movement trajectory of the *Panax notoginseng* root-soil composite, and determine the operation mechanism of *Panax notoginseng* transportation, root-soil separation, and fibrous root fracture, etc. Meanwhile, based on EDEM - RecurDyn coupling, the joint simulation of the conveying and separation of *Panax notoginseng* root-soil composite was carried out, which verified the reliability of the conveying separation operation joint simulation model. The conveying and separation laws of *Panax notoginseng* root-soil composite was clarified, and the main operating parameters that affected the separation of *Panax notoginseng* root-soil were determined to be lifting speed, lifting inclination angle, vibration amplitude and vibration frequency. Finally, bench tests were conducted and Design-Expert software was used to analyze and find the optimal operating parameters. The results showed that when the optimal operation parameters were as follows: the lifting inclination angle was 21°, the vibration amplitude was 44 mm, the lifting speed was 0.9 m/s, and the vibration frequency was 1.6 Hz, the conveying rate and the screening rate of *Panax notoginseng* were 93.60% and 92.64%,

收稿日期: 2023-06-08 修回日期: 2023-08-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2002004)和国家自然科学基金项目(51865023)

作者简介: 王法安(1990—),男,讲师,博士,主要从事智能农业装备设计制造研究,E-mail: wfa@kust.edu.cn

通信作者: 张兆国(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械装备设计制造研究,E-mail: zzg@kust.edu.cn

respectively, which met the requirements of the conveying and separation operation of the *Panax notoginseng* harvester. The research result can provide a theoretical basis and reference for the harvesting of rhizome crops in hilly and mountainous areas.

Key words: *Panax notoginseng* harvester; mechanism of conveying separation; high-speed photography; EDEM – RecurDyn; parameter optimization

0 引言

三七是云南省特有的药食同源根茎类中药材, 具有极高的药用价值和经济价值^[1-2]。云南省三七种植面积逐年增长^[3], 由于三七须根众多, 根土黏结性强, 现有的三七收获机输送分离装置存在输送过程易缠绕, 分离效果较差等问题。因此, 针对三七机械化收获中输送分离环节的研究十分重要。

杆条升运链作为输送分离装置主要工作部件, 在根茎类作物收获输送及根土分离等作业环节应用广泛^[4-7]。近年来, 国内外诸多学者对根茎类收获机的输送分离装置进行了相关研究并取得了一定的成果。例如 XIN 等^[8]建立了马铃薯输送分离系统的动力学模型, 采用渐进法进行分析, 提高了马铃薯与土壤的分离率, 保证了收获质量; 吕金庆等^[9-10]针对北方黏重土壤条件下薯土(薯秧)分离效果差的问题, 通过运动学分析和田间试验对升运链式分离装置进行参数优化设计, 提高了破碎、筛分土壤的能力; 魏忠彩等^[11]针对马铃薯薯土分离环节伤薯率较高问题, 基于离散元仿真, 明晰了波浪形筛面作业参数对碎土分离过程和薯块碰撞特征的影响, 通过优化参数, 实现了高效减损。目前, 三七的机械化收获主要由昆明理工大学张兆国教授团队进行研究。于进川^[12]设计了一种链杆式输送分离装置, 可初步实现三七根土分离要求; 赵菲菲^[13]在此基础上, 增设了二级升运链和碎土栅条, 根土分离情况得到改善, 但碎土栅条的拍打造成须根的机械损伤; 崔振猛等^[14]在牵引式三七收获机的基础上进行改进, 设计了一种二级振动筛, 筛净率得到进一步提高。现阶段, 杆条升运链仍是三七机械化收获输送分离环节的主要工作部件, 由于作业参数配置不当, 导致输送率与筛净率较低。因此, 针对三七输送分离装置作业机理分析与相关参数优化仍需深入研究。

综上, 通过作业过程中根土混合物的运动学及动力学分析, 建立数学模型, 确定影响分离效果的主要因素^[15-17], 可为输送分离装置研究与改进提供理论依据。但三七、土壤及装置三者间形成强耦合系统, 难以通过单一数学模型明确表征三者实际运动特性, 有必要在理论分析基础上开展联合仿真与台架试验。因此, 本文设计并研制一款升运倾角、振动

幅度、升运速度、振动频率可调的三七收获输送分离试验台。通过对三七根土复合体的运动过程进行动力学分析和高速摄影研究, 基于 EDEM – RecurDyn 联合仿真, 探究三七根土复合体输送分离规律, 获取影响三七根土分离的主要作业参数, 采用四因素五水平二次旋转正交组合试验对输送分离装置作业参数进行优化, 以期提高三七输送分离效率, 为三七收获机输送分离装置的设计及优化提供理论支撑。

1 整体结构与工作原理

1.1 输送分离装置试验台

三七收获机输送分离装置采用杆条升运链, 对黏重土壤的分离效果好, 输送性能稳定^[9,18], 更适用于三七块根输送分离作业。杆条式输送分离试验台如图 1 所示。

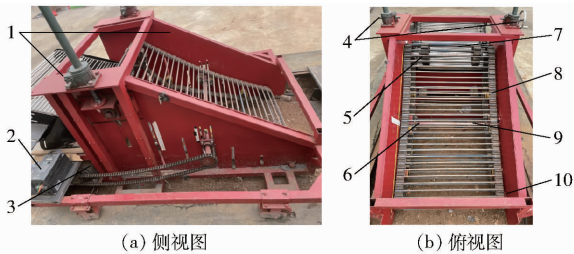


图 1 输送分离试验台结构图

Fig. 1 Structure diagrams of conveying separation test bench
1. 侧板 2. 变频器 3. 电动机 4. 二联蜗轮丝杆升降机构 5. 驱动轮 6. 振动轮 7. 驱动轴 8. 升运链 9. 振动轴 10. 导向轮

1.2 工作原理和主要技术参数

挖掘后的三七根土复合体进入输送分离装置, 其虚拟装配如图 2 所示。电动机通过链条将动力传递给驱动轴和振动轴, 带动升运链和振动轮转动, 通过变频器控制电动机转速, 实现升运速度和振动频率的改变; 转动二联蜗轮丝杆升降机构摇柄, 实现升运链角度调节; 改变振动轴与升运链工作面距离实现振动幅度的改变。输送过程中细碎的土壤直接通过杆条间隙漏到垄上, 根土复合体及体积较大的土块由振动轮进一步振动分离, 分离出来的三七块根到达升运链末端后输送到下一级工作部件。

三七输送分离试验台主要技术参数如表 1 所示。

1.3 三七根土复合体运动分析

三七根土复合体在升运链切面进行斜向上输

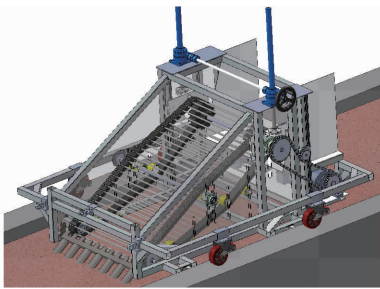


图2 输送分离试验台虚拟装配

Fig.2 Virtual assembly of conveying and separating test bench

表1 输送分离试验台主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of conveying and separating test bench

参数	数值
尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 100×1 650×1 010
质量/kg	280
振动频率/Hz	1~4
作业幅宽/mm	1 500
输送速度/(m·s ⁻¹)	0.4~1.0
振动幅度可调范围/mm	0~58
装置倾角可调范围/(°)	10~30

送、垂直于升运链工作面往复跳跃、升运链末端斜抛、根土分离等运动^[16,19]。升运链未受振动作用,其截面形状可近似直线状态^[20],三七根土复合体视作刚体,若忽略空气阻力,受力分析如图3所示,该状态下动力学方程为

$$F_{S1}-m_1g\sin\alpha_0=m_1a_{x1}\tag{1}$$

$$F_{N1}-m_1g\cos\alpha_0=m_1a_{y1}\tag{2}$$

式中 F_{S1} ——升运链直线状态下,三七根土复合体与升运链摩擦力,N

m_1 ——升运链直线状态下,三七根土复合体质量,kg

g ——重力加速度,取9.8 m/s²

α_0 ——升运链工作面与水平面夹角,(°)

a_{x1} ——升运链直线状态下,三七根土复合体切向加速度,m/s²

F_{N1} ——升运链直线状态下,工作面对三七根土复合体的支持力,N

a_{y1} ——升运链直线状态下,三七根土复合体法向加速度,m/s²

三七根土复合体与升运链相对运动产生的摩擦力克服自身重力在切向上的分力,三七沿升运链斜向上运动。当 $F_{N1}>m_1g\cos\alpha_0$ 时,三七根土复合体在升运链法向小幅度跳动,能促进根土分离,且有利于避免三七与杆条缠绕。

升运链受到振动装置的作用,其截面形状可近似为折线状态^[20],杆条运动方向随之变化,工作面

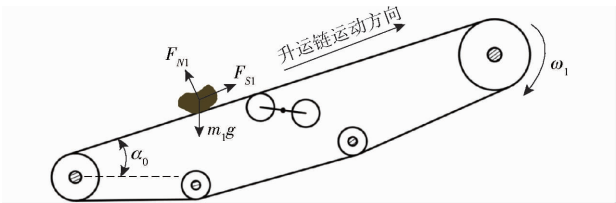


图3 升运链直线状态下三七根土复合体受力分析

Fig.3 Force analysis of *Panax notoginseng* root-soil composite under straight line state of lifting chain

对三七根土复合体的支持力增大,三七被抛离工作面,加剧了根土分离,如图4所示,为了防止三七斜向下回抛,三七根土复合体应满足

$$m_2a_{x2}=F_{S2}-m_2g\sin\alpha_2\geq m_2a_{x1}\tag{3}$$

$$m_2a_{y2}=F_{N2}-m_2g\cos\alpha_2\geq m_2a_{y1}\tag{4}$$

式中 F_{S2} ——升运链折线状态下,三七根土复合体与升运链摩擦力,N

m_2 ——升运链折线状态下,三七根土复合体质量,kg

α_2 ——升运链与水平面瞬时夹角,(°)

a_{x2} ——升运链折线状态下,三七根土复合体切向加速度,m/s²

F_{N2} ——升运链折线状态下,工作面对三七根土复合体的支持力,N

a_{y2} ——升运链折线状态下,三七根土复合体法向加速度,m/s²

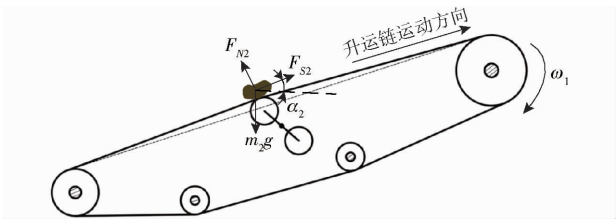


图4 升运链折线状态下三七根土复合体受力分析

Fig.4 Force analysis of *Panax notoginseng* root-soil composite under broken line state of lifting chain

三七根土复合体在升运链末端运动可看作斜抛运动,将三七根土复合体看作刚体,初速度等于升运速度,初速度方向与水平面夹角可近似为升运倾角。如图5所示,三七先斜向上抛至最高点A,再进行平抛运动落到下一级工作部件点C,三七速度可表示为

$$\begin{cases} v_x=v_0\cos\theta \\ v_y=v_0\sin\theta-gt \end{cases}\tag{5}$$

式中 v_x ——三七斜抛运动水平方向速度,m/s

v_y ——三七斜抛运动竖直方向速度,m/s

v_0 ——三七斜抛运动初速度,m/s

θ ——斜抛运动下,升运链工作面与水平面夹角,(°)

t ——三七斜抛运动时间,s

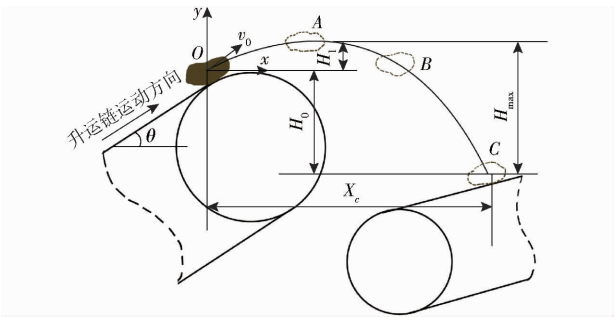


图 5 升运链末端三七运动轨迹

Fig.5 Trajectory of *Panax notoginseng* at end of lifting chain

三七根土复合体到达点 A 的竖直分速度为零,可计算得在 OA 段运动所需的时间、最大位移为

$$t_{OA} = \frac{v_0 \sin \theta}{g} \tag{6}$$

$$H_1 = \frac{(v_0 \sin \theta)^2}{2g} \tag{7}$$

式中 t_{OA} ——三七斜抛运动 OA 段所用时间,s
 H_1 ——三七斜抛运动 OA 段在 y 方向位移,m
升运链末端点 O 与下一级工作部件表面的距离 H_0 由装置的设计参数决定,三七在升运链末端斜抛运动的最大高度差为

$$H_{\max} = \frac{(v_0 \sin \theta)^2}{2g} + H_0 \tag{8}$$

三七斜抛运动所需时间为

$$t_{OC} = t_{OA} + t_{AC} = \frac{v_0 \sin \theta}{g} + \sqrt{\frac{2H_0}{g} + \frac{(v_0 \sin \theta)^2}{g^2}} \tag{9}$$

其中 $t_{AC} = \sqrt{\frac{2H_{\max}}{g}} = \sqrt{\frac{2H_0}{g} + \frac{(v_0 \sin \theta)^2}{g^2}}$ (10)

式中 t_{AC} ——三七斜抛运动 AC 段所用时间,s
 t_{OC} ——三七斜抛运动 OC 段所用时间,s

由式(5)~(10)可知,三七斜抛运动位移表达式为

$$\begin{cases} D_x = v_0 t \cos \theta & \left(0 < t \leq \frac{v_0 \sin \theta}{g} + \sqrt{\frac{2H_0}{g} + \frac{(v_0 \sin \theta)^2}{g^2}} \right) \\ D_y = \begin{cases} v_0 t \sin \theta - \frac{1}{2} g t^2 & \left(0 < t \leq \frac{v_0 \sin \theta}{g} \right) \\ -\frac{1}{2} g t^2 & \left(\frac{v_0 \sin \theta}{g} < t \leq \frac{v_0 \sin \theta}{g} + \sqrt{\frac{2H_0}{g} + \frac{(v_0 \sin \theta)^2}{g^2}} \right) \end{cases} \end{cases} \tag{11}$$

式中 D_x ——三七斜抛运动在 x 方向位移,m
 D_y ——三七斜抛运动在 y 方向位移,m
三七抛出后的最大水平位移为

$$X_c = v_x t_{OC} = \frac{v_0^2 \sin(2\theta)}{2g} + v_0 \cos \theta \sqrt{\frac{2H_0}{g} + \frac{(v_0 \sin \theta)^2}{g^2}} \tag{12}$$

落到点 C 处的瞬时速度为

$$v_c = \sqrt{v_0^2 + 2H_0 g} \tag{13}$$

2 高速摄影试验

2.1 试验设备

三七根土复合体输送分离过程中,翻滚、跳跃、升运、缠绕、掉落和根土分离是主要的运动形态。为获取三七根土复合体在输送分离过程中的实际运动状态,验证理论分析结果,本试验利用高速相机对输送分离过程进行拍摄记录,如图 6 所示。



图 6 高速摄影试验

Fig.6 High-speed photography test

2.2 输送分离过程分析

由理论分析可知,运动可分为 3 个阶段:第 1 阶段为升运链始端至振动轮作用前段,根土复合体主要受到摩擦力以克服重力的分力,获得斜向上方向的加速度,可近似匀加速运动,直至在切向上的速度趋近于升运速度,若升运倾角不变,升运速度越大,则匀加速运动持续的时间越长。第 2 阶段为受振动轮作用段,升运链截面变成弯折状态,三七根土复合体受到杆条碰撞获得向外的离心力,使其脱离升运链进行上抛运动,上抛运动初始状态时,三七根土复合体具有斜向上的速度,所以根土复合体在第 2 阶段的运动轨迹为一条曲线。第 3 阶段为受振动轮作用后至升运链末端,三七根土复合体此时已去掉大部分土壤,继续以趋近于升运速度的速度斜向上输送后抛出,越接近升运链末端,三七根茎受到瞬时升运速度变化的影响更强烈,部分球度较大的三七易朝斜向下滚落一段距离。

以升运速度 0.8 m/s、升运倾角 22.5°、振动幅度 35 mm、振动频率 2 Hz 为例^[21],三七根土复合体沿筛面斜向上运动轨迹如图 7 所示,受振动轮作用前升运平稳,具有小幅度振动,筛面弯折处被抛起一

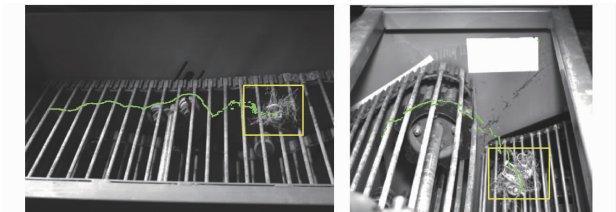


图 7 三七根茎输送轨迹

Fig.7 Transportation trajectory of *Panax notoginseng* rhizome

定高度,上抛初始瞬间和下落瞬间都会受到碰撞,土块被击打而破碎,实现根土分离(图 8),在升运链末端,受到驱动轮段振动影响,斜向上抛出。通过高速摄影记录三七根茎在升运链切面上输送行程与时间的关系,如图 9 所示,三七根土复合体先进行变加速运动,最终速度趋近于升运速度,与理论分析结果相符合。

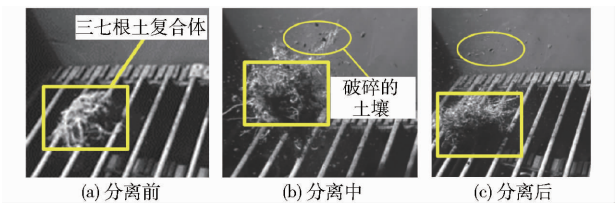


图 8 三七根土分离

Fig. 8 Root-soil separation of *Panax notoginseng*

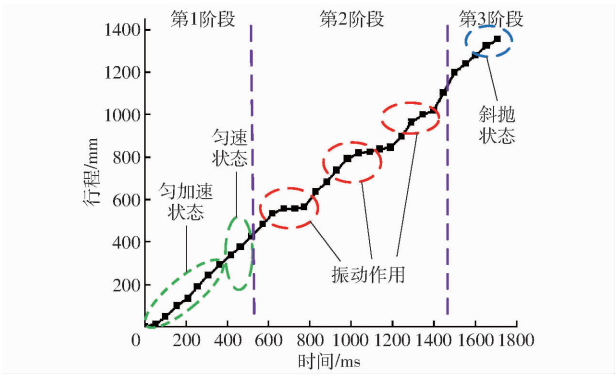


图 9 三七输送行程与时间的关系

Fig. 9 Relationship between transportation distance and time of *Panax notoginseng*

此外,通过分析可知,三七根茎升运过程中须根抵抗变形的能力较弱,部分细小须根会发生断裂,振动频率大于 4 Hz,三七须根断裂严重;升运链末端的斜抛运动水平位移对三七输送率影响较大,若水平位移较小则导致三七根茎抛起高度低而缠绕在杆条上;或从两工作部件之间的缝隙处漏下。相关作业现象如图 10 所示。

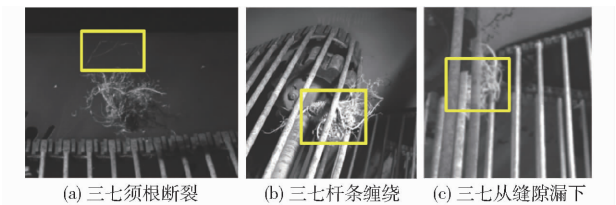


图 10 三七损伤和漏收作业现象

Fig. 10 Phenomenon of damage and leakage operation of *Panax notoginseng*

3 基于 EDEM – RecurDyn 耦合的输送分离仿真

3.1 离散元模型建立

3.1.1 接触模型选择与参数设定

本文利用 EDEM 软件建立三七和土壤的颗粒

模型。EDEM 中 Hertz – Mindlin with JKR 是表征凝聚力的接触模型^[22],主要用于构建强黏性的系统,可有效地模拟三七根土复合体含湿颗粒在输送分离过程中相互黏着的现象^[23],土壤与土壤颗粒之间同样选择 JKR 接触模型。

三七和土壤的材料属性与相关接触参数参照文献[23 – 24],杆条的相关离散元仿真参数如表 2 所示。

表 2 杆条相关离散元仿真参数

Tab. 2 Bar-related discrete element simulation parameters

参数	数值
杆条泊松比	0.3
杆条密度/(g·cm ⁻³)	7.85
杆条剪切模量/Pa	1.92 × 10 ⁶
三七-杆条恢复系数	0.2
三七-杆条静摩擦因数	1.07
三七-杆条动摩擦因数	0.177
土壤-杆条恢复系数	0.3
土壤-杆条静摩擦因数	0.4
土壤-杆条动摩擦因数	0.5

3.1.2 三七根土复合体模型建立

经过前期对样本土壤进行测量得到土壤粒径和分布比例,土壤离散元颗粒参数如表 3 所示。

表 3 土壤离散元颗粒参数

Tab. 3 Soil discrete element particle parameters

名称	模型	直径/mm	比例/%
单球型颗粒		1.5	33.8
双球型颗粒		3.5	25.0
三球型颗粒		5.0	41.2

使用 EinScan – SP 扫描仪获取三七根茎三维模型,通过高速摄影试验可知,须根对三七输送过程位移变化影响不大,为了缩短仿真时长,对须根进行处理,仅保留主根与粗壮的支根,保存为 STL 格式文件。在 EDEM 中导入三七模型,对模型进行自动填充,三七根茎离散元模型的建立过程如图 11 所示。



图 11 三七根茎离散元建模过程

Fig. 11 Discrete element modeling process of *Panax notoginseng* rhizome

3.2 耦合仿真模型建立

利用 SolidWorks 对升运链模型进行简化,以导

向轮质心作为模型原点,梅花链轮与抖动轮固定升运链的相对位置、倾角和振动幅度,升运链可看作套筒滚子链^[25]。将三维模型保存为 X_T 文件,导入 RecurDyn 中,添加接触和约束,建立多体动力学模型,如图 12 所示。

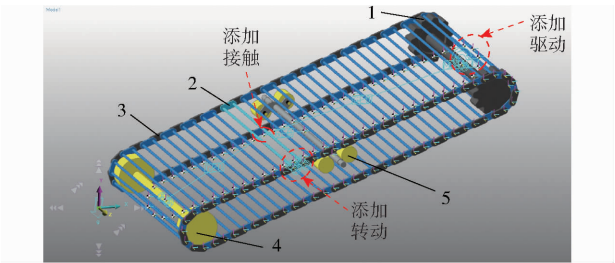


图 12 RecurDyn 构建输送分离模型

Fig. 12 Construction of conveying separation model in RecurDyn

1. 梅花轮 2. 杆条(内链节) 3. 外链节 4. 导向轮 5. 振动轮

通过 EDEM 与 RecurDyn 耦合接口,在 EDEM 中导入升运链模型,并在升运链始端和末端各生成一块实体薄板,模拟土壤掉落地面,以及与下一级工作部件衔接作业的情景。同时在升运链前端建立一个盒型颗粒工厂,用来生成包裹土壤颗粒的三七根茎离散元模型,模拟三七根土复合体刚进入升运链的作业场景,仿真时长为 4 s,步长为 0.01 s,耦合仿真模型如图 13 所示。

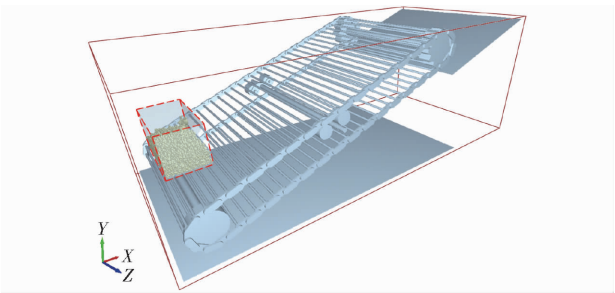


图 13 EDEM - RecurDyn 耦合仿真模型

Fig. 13 EDEM - RecurDyn coupling simulation model

3.3 仿真结果与分析

3.3.1 仿真结果与试验对比

设置输送分离装置的升运速度为 0.8 m/s、升运倾角为 22.5°、振动幅度为 35 mm、振动频率为 2 Hz 进行仿真,设定梅花轮为驱动件,升运链从静止状态通过 0.5 s 的变加速运动至 0.8 m/s,后保持匀速运动 3.5 s,通过计算可知驱动轮角速度约为 2.92π rad/s,抖动轮角速度为 2π rad/s。

为验证联合仿真模型的可靠性,对三七根土复合体运动情况进行对比分析,图 14 所示为 EDEM - RecurDyn 联合仿真过程中三七块根在输送分离装置上的运动轨迹,与高速摄影试验下的三七根茎输送轨迹基本保持一致。同时对升运链末端的三七根土复合体的斜抛运动水平位移进行比较,如表 4 所

示,仿真结果与理论水平位移相对误差为 1.83%,验证了联合仿真模型可靠。

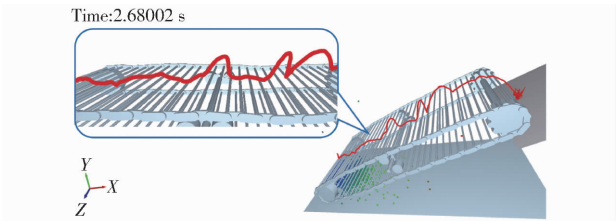


图 14 三七块根仿真运动轨迹

Fig. 14 Simulation motion trajectory of *Panax notoginseng* root

表 4 仿真结果与理论水平位移对比

Tab. 4 Comparison of simulation results and theoretical

		horizontal displacement		m
序号	H_0	理论水平位移	仿真水平位移	
1	0.180	0.167	0.168	
2	0.168	0.162	0.156	
3	0.173	0.164	0.160	
均值		0.164	0.161	

3.3.2 三七块根在升运链上的受力分析

为了探究三七块根在升运链上的受力情况,通过 EDEM 后处理模块和 Origin 绘制三七块根三轴受力变化曲线,如图 15 所示。升运链前端,三七根土复合体土壤黏附较多,重量相对较大,较难被抛起,因此在 0 ~ 0.84 s 时,三七块根受力不均匀,呈现无规律变化;0.84 s 之后,三七块根每隔 0.5 s 左右受力剧变一次,与振动频率一致,说明受振动轮作用,升运链沿法线方向上的位移呈规律性变化,可看作简谐运动^[26],杆条击打三七块根的瞬间,三七块根主要受到振动面法向上的力,表现为沿 Y 轴正方向的分力、X 轴方向的分力和少量 Z 轴方向的分力,三七被抛起后受到的力为 Y 轴负方向的重力,X 轴和 Z 轴上受力趋近于零,当 X 轴方向的速度为负值时,则三七块根沿着升运链向下滚动,存在“回流”的情况(图 16),当 X 轴方向的速度为正值时,则三七块根沿着升运链向上输送,受到 Y 轴方向的作用力而出现“跳跃”的运动形态(图 17),此时升运分离效果显著;2.68 s 时输送分离结束。仿真分析与理论

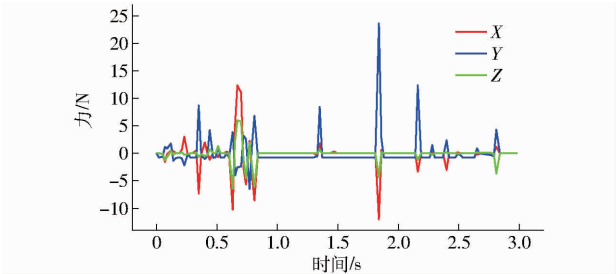


图 15 三七块根受力变化曲线

Fig. 15 Stress variation curves of *Panax notoginseng* root tubers

分析和高速摄影试验相符合。

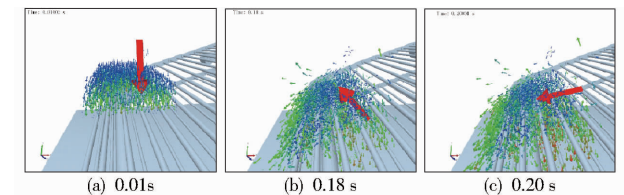


图 16 三七块根速度矢量局部放大图

Fig. 16 Partial enlarged detail of *Panax notoginseng* root tubers speed vector

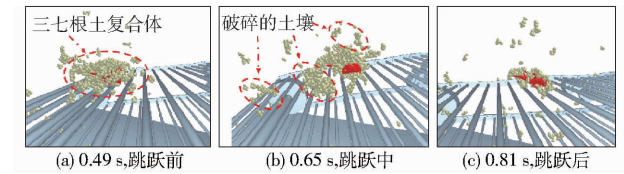


图 17 三七块根位移局部放大图

Fig. 17 Partial enlarged detail of *Panax notoginseng* root tubers displacement

3.3.3 根土输送分离的影响因素分析

根据以上分析可知,影响输送装置作业效果的主要因素有升运速度、升运倾角、振动幅度、振动频率。升运速度过大会导致升运链传动平稳性降低,增加须根或剪口断裂,土壤等杂质不易分离;升运速度过小,三七更易掉落或缠绕在杆条上,降低输送效率;升运倾角太小,升运链在水平面上的杆条间隙相对较大,三轴尺寸较小的三七根茎更易从杆条间隙漏下;升运倾角太大,三七根土复合体容易往回滚落,升运效果不理想;振动幅度和振动频率越大,根土分离效果越好,但三七根土复合体输送过程中被杆条击打的次数越多,抛起的高度越大,将导致主根和须根损伤或断裂,输送不平稳。

4 台架试验

4.1 试验材料与设备

试验样本为三七根土复合体,采样地点位于云南省石林县,海拔为 1 763 m,采样时空气相对湿度为 69%,经过后续测定三七样本含水率为 64%,土壤含水率为 24%。2022 年 10 月 19 日开展三七收获机输送分离装置参数组合优化试验,试验场地位于昆明理工大学土壤植物机械系统实验室。

4.2 试验方法与评价指标

考虑三七收获机械作业性能要求与实际作业情况,输送分离装置应优先满足较优的输送性能,再考虑三七根土分离的效果。因此,先探究升运倾角、升运速度对输送性能的影响,再明晰抖动装置振动频率、振幅对升运链筛分效果的影响,进一步通过正交试验获得最优作业参数组合,以输送率 Y_1 和筛净率 Y_2 为评价指标开展试验。输送率即为单位时间内,

升运链向下一级工作部件输送三七的个数占进入升运链的三七总数百分比,筛净率即为实际筛出物质量占应筛出物质量百分比。

4.3 作业参数对输送分离性能的影响

4.3.1 输送参数确定

为确定输送参数水平范围,设置升运倾角分别为 15° 、 20° 、 25° 、 30° 时,升运速度在 $0.4 \sim 1.0 \text{ m/s}$ 范围内输送率的变化规律,试验结果如图 18 所示。试验结果表明:随着升运速度增加,输送率呈现先增加后减小的变化规律,升运速度在 0.8 m/s 时输送率较优,升运倾角较大或较小均不利于三七根茎的输送,在 $20^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 区间输送率较优。

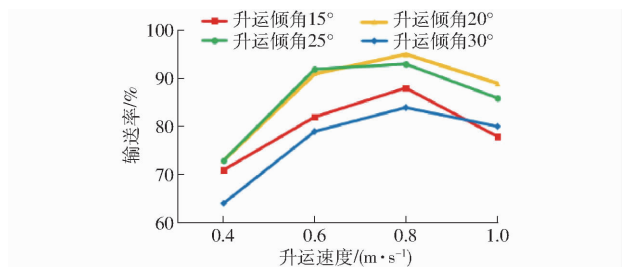


图 18 不同输送参数对输送率的影响

Fig. 18 Influence of different conveying parameters on conveying rate

4.3.2 振动参数范围

为探究不同振动参数输送分离的变化规律,选取振动频率为 1、2、3、4 Hz,分析振动幅度在 $10 \sim 50 \text{ mm}$ 变化过程中对输送率和筛净率的影响,设定升运速度为 0.8 m/s ,升运倾角为 22.5° 。

不同振动参数下输送率变化曲线如图 19 所示,输送率随着振动幅度和振动频率增加呈现降低趋势。振动频率 1 ~ 3 Hz 的变化过程中,输送率变化缓慢;当振动频率为 4 Hz 时,输送率为最小值,振动频率较大,整机共振明显,三七须根断裂而造成损失。振动幅度较低时,三七根土复合体在升运链上输送平缓;振动幅度由弱到强的变化过程中,三七根土复合体输送效果逐渐变差。

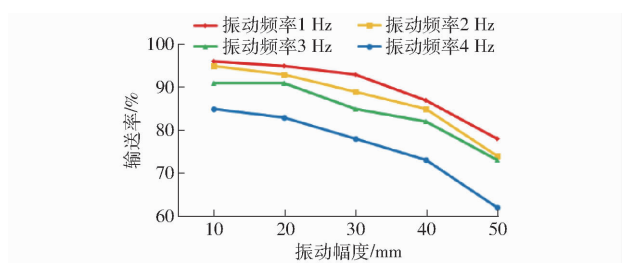


图 19 不同振动参数对输送率的影响

Fig. 19 Influence of different vibration parameters on conveying rate

不同振动参数下筛净率的变化曲线如图 20 所示,筛净率与振动幅度和振动频率均呈正相关。振

动幅度较低时,振动装置碎土能力较差,当振动幅度为 10 mm 时,筛净率有最小值,振动幅度逐渐增加,升运链弯折程度越明显,三七根土复合抛起的高度越大,跌落时撞击筛面而提高根土分离效果;振动频率由小变大的过程中,振动装置击打筛面的次数增加,筛净率随着增加。综上试验结果可知,当振动频率为 1 ~ 3 Hz、振动幅度为 20 ~ 50 mm 时,符合作业要求。

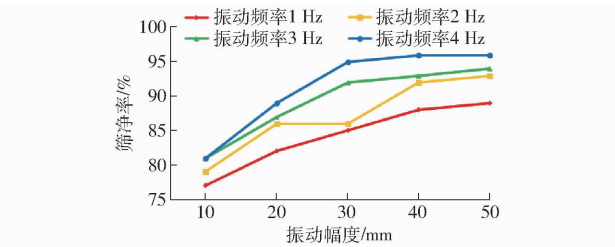


图 20 不同振动参数对筛净率的影响

Fig. 20 Influence of different vibration parameters on screening rate

4. 4 正交试验

4. 4. 1 试验设计与结果

基于作业参数对输送分离性能的影响规律,选取升运倾角 20° ~ 25°、振动幅度 20 ~ 50 mm、升运速度 0. 6 ~ 1. 0 m/s、振动频率 1 ~ 3 Hz 为作业参数,探究各试验因素及交互作用对输送分离作业质量的影响,以输送率 Y_1 与筛净率 Y_2 为试验指标,开展二次回归正交旋转组合试验。试验因素编码如表 5 所示,试验方案与结果见表 6(表中 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 为因素编码值),共开展 23 组试验,在每一种组合水平上重复 3 次试验,取平均值为输送率、筛净率试验值。

表 5 试验因素编码

因素				
编码	升运倾角/ (°)	振动幅度/ mm	升运速度/ (m·s ⁻¹)	振动频率/ Hz
1. 682	25. 0	50	1. 00	3. 0
1	24. 0	44	0. 92	2. 6
0	22. 5	35	0. 80	2. 0
- 1	21. 0	26	0. 68	1. 4
- 1. 682	20. 0	20	0. 60	1. 0

4. 4. 2 方差分析与拟合度检验

通过 Design-Expert 11 软件对输送率、筛净率试验结果进行方差分析,如表 7 所示,通过显著性检验得到回归方程。

(1) 输送率回归分析与显著性检验

输送率 Y_1 模型拟合度非常显著 ($P < 0. 01$), 其失拟项 $P = 0. 840 3$, 说明不存在其他影响输送率的

表 6 试验方案与结果

Tab. 6 Test plan and results

试验 序号	因素				$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
	X_1	X_2	X_3	X_4		
1	1	1	1	- 1	86. 0	90
2	1	1	- 1	- 1	83. 5	86
3	1	- 1	1	1	89. 0	93
4	1	- 1	- 1	1	89. 5	88
5	- 1	1	- 1	1	81. 5	89
6	- 1	- 1	1	- 1	93. 0	83
7	- 1	1	1	1	92. 0	96
8	- 1	- 1	- 1	- 1	89. 0	84
9	1. 682	0	0	0	82. 0	86
10	- 1. 682	0	0	0	89. 0	91
11	0	1. 682	0	0	85. 0	95
12	0	- 1. 682	0	0	96. 0	84
13	0	0	1. 682	0	91. 0	91
14	0	0	- 1. 682	0	84. 0	84
15	0	0	0	1. 682	86. 5	95
16	0	0	0	- 1. 682	95. 0	87
17	0	0	0	0	92. 0	93
18	0	0	0	0	93. 0	92
19	0	0	0	0	91. 0	90
20	0	0	0	0	90. 0	92
21	0	0	0	0	90. 5	91
22	0	0	0	0	91. 0	90
23	0	0	0	0	90. 0	89

表 7 方差分析

Tab. 7 Analysis of variance

方差	Y_1				Y_2			
	平方 和	自由 度	F	P	平方 和	自由 度	F	P
模型	335. 33	14	25. 06	<0. 000 1 **	301. 41	14	13. 97	0. 000 4 **
X_1	24. 50	1	25. 64	0. 001 0 **	12. 50	1	8. 11	0. 021 6 *
X_2	60. 50	1	63. 31	<0. 000 1 **	60. 50	1	39. 25	0. 000 2 **
X_3	58. 53	1	61. 25	<0. 000 1 **	52. 48	1	34. 05	0. 000 4 **
X_4	36. 13	1	37. 80	0. 000 3 **	32. 00	1	20. 76	0. 001 9 **
$X_1 X_2$	22. 22	1	23. 25	0. 001 3 **	0. 82	1	0. 53	0. 487 3
$X_1 X_3$	19. 53	1	20. 44	0. 001 9 **	1. 13	1	0. 73	0. 417 8
$X_1 X_4$	3. 89	1	4. 07	0. 078 5	8. 97	1	5. 82	0. 042 4 *
$X_2 X_3$	11. 28	1	11. 81	0. 008 9 **	6. 13	1	3. 97	0. 081 4
$X_2 X_4$	4. 33	1	4. 54	0. 065 8	14. 77	1	9. 58	0. 014 8 *
$X_3 X_4$	1. 53	1	1. 60	0. 241 2	10. 13	1	6. 57	0. 033 5 *
X_1^2	56. 35	1	58. 97	<0. 000 1 **	10. 84	1	7. 03	0. 029 2 *
X_2^2	0. 21	1	0. 22	0. 650 1	3. 55	1	2. 30	0. 167 7
X_3^2	21. 98	1	23. 00	0. 001 4 **	22. 11	1	14. 34	0. 005 3 **
X_4^2	0. 01	1	0. 01	0. 914 6	0. 05	1	0. 03	0. 857 5
残差	7. 64	8			12. 33	8		
失拟	0. 43	2	0. 18	0. 840 3	0. 33	2	0. 08	0. 921 3
误差	7. 21	6			12. 00	6		
总和	342. 98	22			313. 74	22		

注: ** 表示极显著 ($P < 0. 01$), * 表示显著 ($P < 0. 05$)。

主要因素,回归模型不失拟,试验因素升运倾角 X_1 、振动幅度 X_2 、升运速度 X_3 、振动频率 X_4 对输送率的影响极显著。 X_1X_2 、 X_1X_3 、 X_2X_3 、 X_1^2 、 X_3^2 影响均极显著,剔除对输送率影响不显著项,输送率 Y_1 的回归模型为

$$Y_1 = 90.92 - 1.41X_1 - 2.64X_2 + 2.07X_3 - 2.53X_4 - 2.59X_1X_2 - 1.56X_1X_3 + 1.19X_2X_3 - 1.88X_1^2 - 1.18X_3^2 \quad (14)$$

(2) 筛净率回归分析与显著性检验
对筛净率试验结果进行方差分析,筛净率 Y_2 模型的拟合度非常显著 ($P = 0.0004 < 0.01$),失拟项 $P = 0.9213$,不显著 ($P > 0.05$),证明不存在影响筛净率的其他因素。试验因素对筛净率的影响显著性由大到小依次为:振动幅度 X_2 、升运速度 X_3 、振动频率 X_4 、升运倾角 X_1 。 X_1 、 X_1X_4 、 X_2X_4 、 X_3X_4 、 X_1^2 影响均为显著, X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_3^2 影响极显著。剔除对筛净

率影响不显著项,得筛净率 Y_2 的回归模型为

$$Y_2 = 90.71 - 1.49X_1 + 3.27X_2 + 1.96X_3 + 2.67X_4 + 1.65X_1X_4 - 2.11X_2X_4 + 1.12X_3X_4 + 0.8232X_1^2 - 1.18X_3^2 \quad (15)$$

4.4.3 交互项对输送性能影响的响应曲面分析

(1) 交互项对输送率的影响
根据回归模型分析可知,升运倾角与振动幅度、升运倾角与升运速度、振动幅度与升运速度的交互作用对输送率的影响显著,绘制各因素交互响应曲面。

当升运速度为 0.8 m/s、振动频率为 2.0 Hz 时,升运倾角和振动幅度对输送率的影响响应曲面如图 21a 所示,两者交互作用明显,当振动幅度一定时,输送率随升运倾角的增加先增大后减小,当升运倾角一定时,输送率随振动幅度增加呈现逐渐减小趋势。

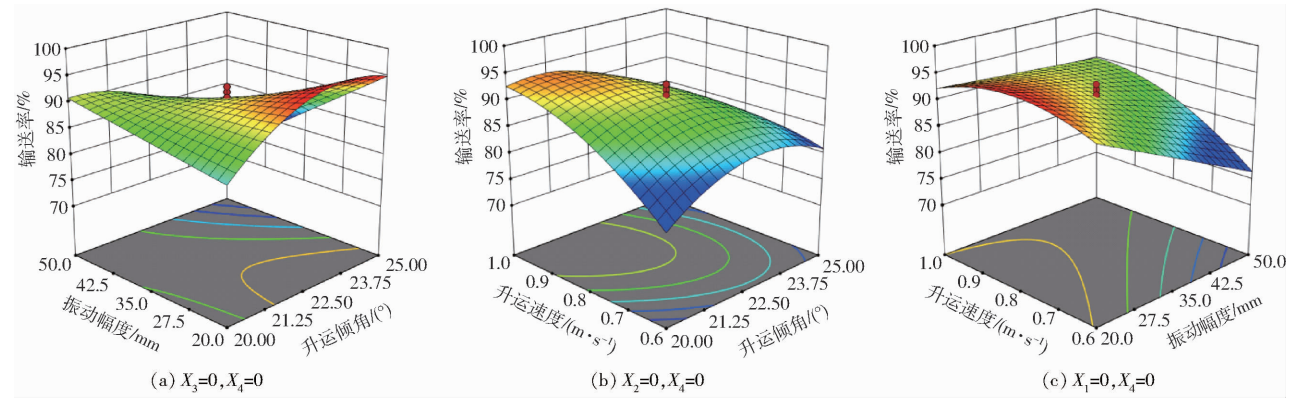


图 21 输送率响应面分析
Fig. 21 Response surface analyses of conveying rate

当振动幅度为 35 mm、振动频率为 2.0 Hz 时,升运倾角和升运速度对输送率的影响响应曲面如图 21b 所示,交互作用非常显著,升运速度范围为 0.8 ~ 1.0 m/s、升运倾角范围 20° ~ 22.5° 时,输送率较优。当升运速度一定时,输送率随升运倾角的增加先增大后减小,当升运倾角一定时,输送率随升运速度的增加先增大后减小。

当升运倾角为 22.5°、振动频率 2.0 Hz 时,振动幅度和升运速度对输送率的影响响应曲面如图 21c 所示,振动幅度取值范围 20 ~ 27.5 mm,输送率较优,当振动幅度一定时,输送率随升运速度的增加先增大后减小,当升运速度一定时,输送率随振动幅度增加呈现逐渐减小的趋势。

(2) 交互项对筛净率的影响
升运倾角与振动频率、振动幅度与振动频率、升运速度与振动频率交互项对筛净率有显著影响,根据相互影响规律绘制交互项响应曲面,如图 22 所示。

当升运速度为 0.8 m/s、振动幅度为 35 mm 时,升运倾角和振动频率对筛净率的影响响应曲面如图 22a 所示,振动频率取值范围为 2.5 ~ 3 Hz、升运倾角大于 21°,筛净率较优,当升运倾角一定时,筛净率随振动频率的增加呈现逐渐增加的趋势,当振动频率一定时,筛净率随升运倾角的增加呈现逐渐减小的趋势。

当升运倾角为 22.5°、升运速度为 0.8 m/s 时,振动幅度和振动频率对筛净率的影响响应曲面如图 22b 所示,交互项的影响非常显著,当振动幅度一定时,筛净率随振动频率的增加呈现逐渐增加趋势,当振动频率一定时,筛净率随振动幅度增加也呈现逐渐增加的趋势。

当升运倾角为 22.5°、振动幅度为 35 mm 时,升运速度和振动频率对筛净率的影响响应曲面如图 22c 所示,交互作用极显著,升运速度大于 0.8 m/s、振动频率大于 2.5 Hz,筛净率较优,当升运速度一定时,筛净率随振动频率的增加呈现逐渐增

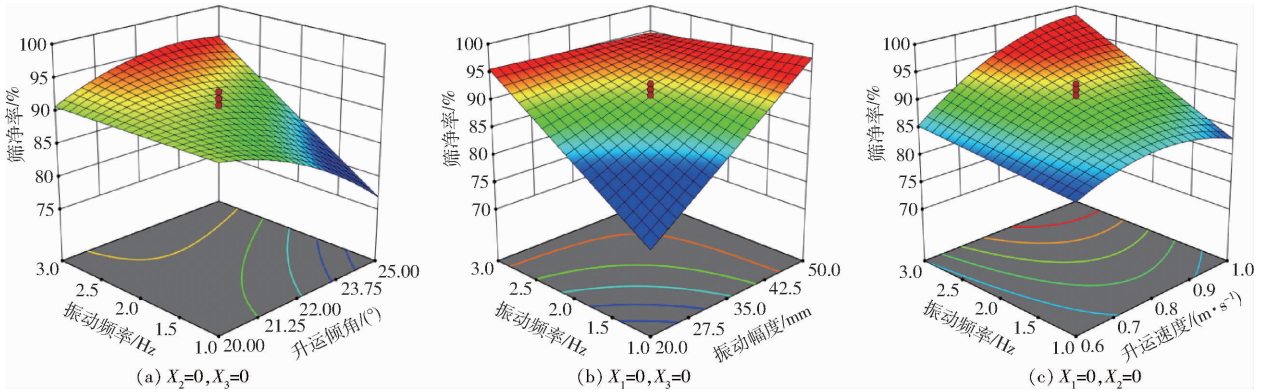


图 22 筛净率响应面分析

Fig. 22 Response surface analyses of screening net rate

加的趋势,当振动频率一定时,筛净率随升运速度的增加呈现先增加后减小的变化规律。

4.4.4 参数组合优化与验证

利用 Design-Expert 11 软件进行输送分离参数组合多目标优化,根据三七收获机输送分离作业条件,以及输送率、筛净率方差分析结果,确定参数优化约束条件为

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_1(X_1, X_2, X_3, X_4) \geq 95\% \\ Y_2(X_1, X_2, X_3, X_4) \geq 95\% \\ \text{s. t.} \left\{ \begin{array}{l} -1.682 \leq X_1 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq X_2 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq X_3 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq X_4 \leq 1.682 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (16)$$

通过软件优化求解,得到最佳参数组合:升运倾角为 21°、振动幅度为 44 mm、升运速度为 0.9 m/s、振动频率为 1.6 Hz,预测得到输送率 Y_1 为 95.29%,筛净率 Y_2 为 96.34%。

为了进一步验证参数优化的可靠性,采用上述参数组合进行 5 次重复验证试验,输送率平均值为 93.60%,筛净率平均值为 92.64%。输送率试验值与回归模型预测值相对误差为 1.77%,筛净率相对误差为 3.84%,与回归模型预测结果基本一致,说明最佳参数组合可靠。试验值略低于预测值,主要原因是试验过程中受到三七根茎结构、三轴尺寸和根土复合体含水率等不可控因素影响。

5 结论

(1)对三七收获机输送分离装置的作业机理开展研究,进行输送分离作业的过程分析和受力分析。通过高速摄影获取三七根土复合体在升运链上的输送轨迹,在此基础上研究三七输送、根土分离、须根断裂、杆条缠绕等现象,得到三七根土复合体输送行程与时间的关系曲线。

(2)建立了三七根土复合体输送分离装置 EDEM-RecurDyn 耦合仿真模型,对其输送分离过程进行了仿真分析,仿真运动轨迹和高速摄影试验下的三七根茎输送轨迹基本保持一致,仿真试验水平位移与理论值相对误差为 1.83%,验证了耦合模型的可靠性,得到三七块根受力变化曲线,分析输送分离过程的规律以及回流、跳跃等运动状态出现的原因,获取影响根土分离的主要因素:升运速度、升运倾角、振动幅度、振动频率。

(3)通过台架试验分析了作业参数对输送分离性能的影响规律,开展参数组合优化试验,通过 Design-Expert 对结果进行方差分析,对影响指标的交互项进行响应曲面分析,确定最优作业参数组合:升运倾角为 21°、振动幅度为 44 mm、升运速度为 0.9 m/s、振动频率为 1.6 Hz。进行验证试验,得到输送率为 93.60%,筛净率为 92.64%,与回归模型预测结果基本一致,符合三七收获机输送分离作业要求。

参 考 文 献

[1] 郑冬梅,王丽,欧小宏,等. 三七传统产区和新产区植株农艺性状比较及相互关系研究[J]. 中国中药杂志, 2014, 39(4): 558 – 565.
ZHENG Dongmei, WANG Li, OU Xiaohong, et al. Comparison of agronomic traits of *Panax notoginseng* between traditional cultivated fields and new cultivated fields[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2014, 39(4): 558 – 565. (in Chinese)

[2] 石礼平,张国壮,刘丛盛,等. 三七化学成分和药理作用研究概况及质量标志物的预测[J]. 中国中药杂志, 2023, 48(8): 2059 – 2067.
SHI Liping, ZHANG Guozhuang, LIU Congsheng, et al. Research summary of chemical constituents and pharmacological

effects of *Panax notoginseng* and predictive analysis on its Q-markers[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2023, 48(8): 2059 – 2067. (in Chinese)

[3] 张兆国, 王一驰, 李汉青, 等. 液压控制履带自走式温室三七收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 127 – 135, 158.
ZHANG Zhaoguo, WANG Yichi, LI Hanqing, et al. Design and test of hydraulic control tracked self-propelled greenhouse *Panax notoginseng* harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 127 – 135, 158. (in Chinese)

[4] 王虎存, 赵武云, 孙伟, 等. 马铃薯机械化收获技术与装备研究进展[J/OL]. 农业工程学报: 1 – 22[2023 – 07 – 14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2047.s.20230629.1358.050.html>.
WANG Hucun, ZHAO Wuyun, SUN Wei, et al. Research progress in mechanized potato harvesting technology and equipment [J/OL]. Transactions of the CSAE: 1 – 22[2023 – 07 – 14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2047.s.20230629.1358.050.html>. (in Chinese)

[5] 张兆国, 王法安, 张永成, 等. 自走式三七收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 234 – 240.
ZHANG Zhaoguo, WANG Fa'an, ZHANG Yongcheng, et al. Design and experiment of self-propelled *Panax notoginseng* harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 234 – 240. (in Chinese)

[6] 吕金庆, 田忠恩, 杨颖, 等. 4U2A 型双行马铃薯挖掘机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 17 – 24.
LÜ Jinqing, TIAN Zhong'en, YANG Ying, et al. Design and experimental analysis of 4U2A type double-row potato digger[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 17 – 24. (in Chinese)

[7] LI H, GAO F. Improvement design of separation and conveying machinery and equipment of potato excavator in heavy soil[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2023, 130: 103363.

[8] XIN L, LIANG J. A dynamic analysis on the potato conveying and separation system considering the acting force of a material [J]. Transactions of FAMENA, 2019, 43(Supp.1): 35 – 42.

[9] 吕金庆, 孙贺, 兑瀚, 等. 粘重土壤下马铃薯挖掘机分离输送装置改进设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 146 – 155.
LÜ Jinqing, SUN He, DUI Han, et al. Design and experiment on conveyor separation device of potato digger under heavy soil condition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 146 – 155. (in Chinese)

[10] 吕金庆, 王鹏榕, 刘志峰, 等. 马铃薯收获机薯秧分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 100 – 109.
LÜ Jinqing, WANG Pengrong, LIU Zhifeng, et al. Design and experiment of potato harvester stem separation equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 100 – 109. (in Chinese)

[11] 魏忠彩, 苏国梁, 李学强, 等. 基于离散元的马铃薯收获机波浪形筛面参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 109 – 122.
WEI Zhongcai, SU Guoliang, LI Xueqiang, et al. Parameter optimization and test of potato harvester wavy sieve based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 109 – 122. (in Chinese)

[12] 于进川. 悬挂式三七挖掘收获机的研制与试验[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
YU Jinchuan. The development and testing on hanging type harvester of *Panax notoginseng* [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)

[13] 赵菲菲. 牵引式三七收获机的设计与试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
ZHAO Feifei. The tractive notoginseng harvester design and experimental research [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)

[14] 崔振猛, 张兆国, 王法安, 等. 振动式三七根土分离装置的运动学分析及优化设计[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(11): 146 – 154.
CUI Zhenmeng, ZHANG Zhaoguo, WANG Fa'an, et al. Kinematic analysis and optimal design of vibration-type device for *Panax notoginseng* root-soil separation[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2018, 46(11): 146 – 154. (in Chinese)

[15] 魏忠彩, 李洪文, 苏国梁, 等. 低位铺放双重缓冲马铃薯收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 140 – 152.
WEI Zhongcai, LI Hongwen, SU Guoliang, et al. Design and experiment of potato harvester using double cushions for low laying separation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 140 – 152. (in Chinese)

[16] 魏忠彩, 李洪文, 苏国梁, 等. 缓冲筛式薯杂分离马铃薯收获机研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8): 1 – 11.
WEI Zhongcai, LI Hongwen, SU Guoliang, et al. Development of potato harvester with buffer type potato-impurity separation sieve[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(8): 1 – 11. (in Chinese)

[17] 魏忠彩, 王兴欢, 李学强, 等. 履带自走式分拣型马铃薯收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 95 – 106.
WEI Zhongcai, WANG Xinghuan, LI Xueqiang, et al. Design and experiment of crawler self-propelled sorting type potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 95 – 106. (in Chinese)

[27] REN P, XIAO Y, CHANG X, et al. A comprehensive survey of neural architecture search: challenges and solutions[J]. ACM Computing Surveys (CSUR), 2021, 54(4): 1-34.

[28] LIU H, SIMONYAN K, YANG Y. Darts: differentiable architecture search[J]. arXiv preprint arXiv:1806.09055, 2018.

[29] ZOPH B, VASUDEVAN V, SHLENS J, et al. Learning transferable architectures for scalable image recognition[C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018.

[30] BARBEDO J G A, KOENIGKAN L V, SANTOS T T, et al. A study on the detection of cattle in UAV images using deep learning[J]. Sensors, 2019, 19(24): 5436.

[31] BARBEDO J G A, KOENIGKAN L V, SANTOS P M, et al. Counting cattle in UAV images—dealing with clustered animals and animal/background contrast changes[J]. Sensors, 2020, 20(7): 2126.

[32] LIU C, ZOPH B, NEUMANN M, et al. Progressive neural architecture search[C] // Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV), 2018.

[33] YAO L, HU Z, LIU C, et al. Cow face detection and recognition based on automatic feature extraction algorithm[C] // Proceedings of the ACM Turing Celebration Conference. Association for Computing Machinery, 2019: 95.10.1145/3321408.3322628.

[34] FANG J, SUN Y, ZHANG Q, et al. Densely connected search space for more flexible neural architecture search[C] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2020.

(上接第 211 页)

[18] 吕金庆, 杨晓涵, 吕伊宁, 等. 马铃薯挖掘机升运分离过程块茎损伤机理分析与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 103-113.

LÜ Jinqing, YANG Xiaohan, LÜ Yining, et al. Analysis and experiment of potato damage in process of lifting and separating potato excavator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 103-113. (in Chinese)

[19] 魏忠彩, 李洪文, 孙传祝, 等. 振动与波浪二级分离马铃薯收获机改进[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 42-52.

WEI Zhongcai, LI Hongwen, SUN Chuanzhu, et al. Improvement of potato harvester with two segment of vibration and wave separation[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 42-52. (in Chinese)

[20] 权龙哲, 张丹, 曾百功, 等. 玉米根茬抖动升运机构的建模与优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 23-29.

QUAN Longzhe, ZHANG Dan, ZENG Baigong, et al. Modeling and optimizing dither mechanism for conveying corn stubble [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 23-29. (in Chinese)

[21] 王法安. 三七收获机的设计与试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.

WANG Fa'an. The design and experimental study of *Panax notoginseng* harvester[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)

[22] 张智泓, 赵亮亮, 赖庆辉, 等. 基于 DEM-MBD 耦合的铲板式滚动触土部件作业机理分析与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(15): 10-20.

ZHANG Zhihong, ZHAO Liangliang, LAI Qinghui, et al. Operation mechanism analysis and experiments of shovel-type rolling soil-engaging components based on DEM-MBD coupling[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(15): 10-20. (in Chinese)

[23] 解开婷. 三七根土复合体分离机理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.

XIE Kaiting. Study on separation mechanism of *Panax notoginseng* soil complex[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)

[24] 解开婷, 张兆国, 王法安, 等. 土壤与三七根茎黏附数学模型构建与验证[J]. 农业工程学报, 2022, 38(增刊): 131-141.

XIE Kaiting, ZHANG Zhaoguo, WANG Fa'an, et al. Mathematical model construction and verification of soil and *Panax notoginseng* root adhesion[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(Supp.): 131-141. (in Chinese)

[25] 张振东. 丘陵山地自走式马铃薯联合收获机设计与仿真[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.

ZHANG Zhendong. Design and simulation of propelled potato combined harvester in hilly country[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)

[26] 吕金庆, 田忠恩, 吴金娥, 等. 4U1Z 型振动式马铃薯挖掘机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 39-47.

LÜ Jinqing, TIAN Zhong'en, WU Jin'e, et al. Design and experiment on 4U1Z vibrating potato digger[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 39-47. (in Chinese)