doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.025

基于 DEM－MBD 仿真的三七分离装置激振点位置优化研究

武占东[1,2]　赛玉相凹[1,2]　解开婷[2,3]　张兆国[1,2]　郭　榕[1,2]　王浦霖[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：针对三七联合收获过程中存在土壤破碎效果不佳、壅土现象严重及根土分离效率低等问题，本文提出一种基于离散元法（Discrete element method，DEM）和多体动力学（Multi-body dynamics，MBD）耦合仿真的激振点位置优化方法，用于改进三七收获机输送分离装置设计。分析输送分离装置结构特征和工作原理，建立三七根土复合体 DEM－MBD 耦合仿真模型，采用 EDEM－Recurdyn 耦合仿真技术，探究三七根茎-土壤分离过程的动态演变规律。仿真结果表明，大土块松散与分离效果主要取决于激振区能量输入特性，其中，激振点位置对受力峰值和冲击节律具有显著影响。以三七根土分离效率和最大受力峰值为评价指标，选取激振点位置、振动频率、振动幅度及升运链速度为影响因素，开展二次回归正交旋转试验，确定输送分离装置最佳参数组合为：激振点位置 500 mm、振动幅度 48 mm、振动频率 3.9 Hz、升运链速度 0.73 m/s。此参数组合下计算得到，根土分离效率为 96.11%、三七激振区受力峰值为 46.05 N。最后，开展台架对比试验，利用高速摄影系统测量土壤颗粒/三七根茎弹跳高度与冲击加速度，结果表明，仿真值与试验值相对误差分别 5.43%、5.6%，验证了模型可靠性。研究结果为三七联合收获机输送分离装置结构改进优化提供可靠理论依据。

关键词：激振点；三七；输送分离装置；DEM－MBD 耦合仿真

中图分类号：S225.7+　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)11-0264-11　　**OSID**：

Optimization of Excitation Point Location for DEM－MBD-based *Panax notoginseng* Separation Device

WU Zhandong[1,2]　SAI Yuxiang'ao[1,2]　XIE Kaiting[2,3]　ZHANG Zhaoguo[1,2]　GUO Rong[1,2]　WANG Pulin[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 in Yunnan University*, *Kunming* 650500, *China*
3. *Faculty of Mechanical and Electrical Engineering*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650500, *China*）

Abstract: Aiming to address issues such as poor soil fragmentation, severe soil clogging, and low root-soil separation efficiency in ginseng combined harvesters, a coupled simulation method was proposed based on the discrete element method and multi-body dynamics, optimized for excitation point location, to improve the design of the conveying and separation device in ginseng harvesters. The EDEM－Recurdyn coupled simulation technology was used to systematically investigate the dynamic evolution law of the separation process of *Panax notoginseng* roots and soil. The simulation results showed that the loosening and separation of large soil clumps mainly depended on the energy input characteristics of the excitation zone, in which the excitation point position had a significant impact on the peak force and impact rhythm. Based on this, the separation efficiency of *Panax notoginseng* roots and soil and the maximum force peak were selected as evaluation indicators, and the excitation point position, vibration frequency, vibration amplitude, and lifting speed were selected as influencing factors to carry out a quadratic regression orthogonal rotation test to analyze and determine the optimal parameter combination for the conveying and separation device: excitation point position was 500 mm, vibration amplitude was 48 mm, vibration

收稿日期：2025－06－20　修回日期：2025－07－10

基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFD2002004）

作者简介：武占东（1989—），男，讲师，主要从事智能农业机械装备设计研究，E-mail：wuzd1989@kust.edu.cn

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

frequency was 3.9 Hz, and lifting speed was 0.73 m/s. Under this parameter combination, the root soil screening rate was 96.11%, and the force on *Panax notoginseng* was 46.05 N. To verify the reliability of the model, a bench comparison test was conducted, using a high-speed photography system to measure the bounce height and impact acceleration of the particles/rhizomes. The results showed that the relative error between the simulation and test data was 5.43% and 5.6%, respectively, verifying the reliability of the model. The research result can provide a reliable theoretical basis for the structural improvement and optimization of the conveyor separation device of the subsequent *Panax notoginseng* combined harvester.

Key words: vibration point; *Panax notoginseng*; conveyor separation device; DEM－MBD coupled simulation

0　引言

三七须根繁茂，根部与土壤黏合紧密，现有三七收获机输送分离装置土壤破碎质量差，壅土现象严重[1-5]，制约了三七收获机的推广与应用，与云南省三七产业的发展需求相矛盾[6-8]。因此，亟需深入研究三七收获过程中的输送分离技术，优化关键作业参数，对提升收获效率、降低损伤率具有重要意义。

输送分离装置振动是提升作物与土壤分离效率的关键技术。研究表明，合理利用振动机制，能够有效促进根茎作物与黏附土壤分离，提高收获作业整体性能[9-11]。如日本松山 GSA600 型收获机[12]，针对不同作物和土壤条件使用不同振动频率采用三挡可调节式振动。魏忠彩等[13]设计了一种缓冲筛式薯杂分离马铃薯收获机，采用 2 级高频低幅振动装置对输送分离筛施加激振作用力，有利于细碎土壤分散分离以及土块破碎与分离。吕金庆等[14]针对粘重土壤条件下，采用升运链式分离装置并配备振幅调节滚轮，显著提高了根土分离率，设计了满足粘重土壤下的薯-土分离装置。魏万行等[15]设计了一种振动杆式元胡药土分离装置，采用交叉分布的多个振动杆对通过的物料进行多次方位振动冲击，得到当振动频率为 22 Hz、振动杆排数为 6 时，药土分离率达到 94.63%。文献[16－18]揭示了三七根土复合体输送分离规律，将升运链充当其振动分离装置，且在升运链中间加入抖动器，以此增加土壤破碎率；并得出影响分离效果关键作业参数，包括升运速度、升运倾角、振动幅度及振动频率。

现有研究已对多级振动、幅度等参数进行了深入探讨，但作为核心激振部件，其在输送分离装置上安装位置（即激振点）对根土复合体分离效果及根茎受力的影响，目前研究相对较少。激振点直接决定着振动能量传递路径、施加时机和有效作用区域，进而显著影响土壤团块破碎效率以及根茎所承受的冲击载荷。因此，优化激振点位置是有效预防作业过程中的壅土、显著提升分离效率和最大限度降低根茎损伤的关键策略。

本文研究激振点位置对三七根土复合体分离效果及激振区根茎受力峰值的影响。建立三七振动输送装置的动力学模型，构建仿真模型；在此基础上，明确影响根土分离效率和根茎受力的关键因素及其合理取值范围；采用 DEM－MBD 耦合仿真技术[19]对仿真模型进行优化求解，获得最佳参数组合；通过台架试验验证仿真结果可靠性，以期为三七联合收获机输送分离装置结构优化提供理论依据。

1　整体结构与工作原理

1.1　输送分离装置结构组成

三七收获机输送分离装置包括导向轮、张紧轮、栅条、振动轮、加强梁、梅花驱动轮、驱动轮液压马达、升运角度调节液压缸、振动轮液压马达及限深轮（图 1）。

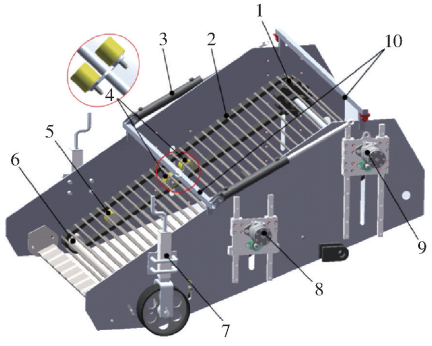


图 1　输送分离装置结构示意图

Fig. 1　Schematic of structure of conveying and separating device

1. 梅花驱动轮　2. 栅条　3. 升运角度调节液压缸　4. 振动轮　5. 张紧轮　6. 导向轮　7. 限深轮　8. 振动轮液压马达　9. 驱动轮液压马达　10. 加强梁

1.2　工作原理与主要技术参数

当三七收获机工作时，动力由液压马达提供，驱动轴动力通过梅花驱动轮传递给挖掘装置将三七根土混合物从土壤中挖掘出，经升运链向后输送。在输送过程中，经过振动轮连续转动，将三七根土复合物上的土壤振碎，实现根茎与土壤有效分离。分离后土壤通过输送链杆隙落回地面，三七则通过升运

链后端被抛送至二级输送分离装置。输送分离装置主要技术参数如表 1 所示。

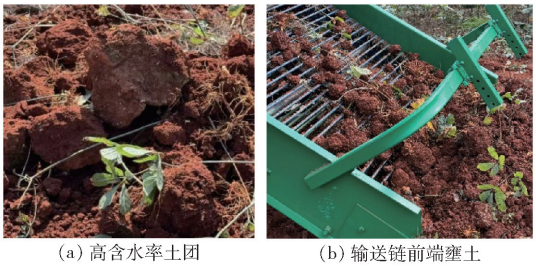
表 1 主要参数

Tab. 1 Main parameters

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 900×1 540×1 080
质量/kg	450
作业幅宽/mm	1 500
作业垄数/垄	1
倾角/(°)	22.5
挖掘深度/mm	200~250

2 根土输送分离过程机理分析

在收获机样机田间试验中,因土壤含水率较高且团粒较大,输送链前端未能有效松散大块土,导致土壤在输送链上堆积,进而引发堵塞问题,如图 2 所示。



(a) 高含水率土团 (b) 输送链前端壅土

图 2 高含水率土团及输送链壅土现象

Fig. 2 Large clods under high soil moisture and resulting conveyor blockage

振动轮核心作用是通过产生周期性的振动力,促使三七根与黏附的土壤之间产生相对运动,使土块持续被粉碎并通过栅缝。振动轮在不同位置发挥不同作用:振动轮安装在前端能够即时破碎土团,避免大块土团直接进入升运链中部,减轻后端筛面负荷;安装在中端可对前端未完全打散的土块进行补充振动,平衡载荷;安装在后端可对即将排出的土壤进行最终松散,远离挖掘装置缓冲卸料。

2.1 根土复合体力学模型分析

为保证三七根土复合体与土壤分离效率和三七根茎损伤率在一定范围内,且三七根茎能顺利向后输送,本文建立三七与输送分离装置之间的运动学模型,对其进行力学分析。

如图 3 所示,在输送分离过程中,将三七根土复合体质心视为中心,应满足

$$\begin{cases} F_f - mg\sin\beta \geqslant ma_x \\ F_N - mg\cos\beta \geqslant ma_y \end{cases} \tag{1}$$

式中 F_N——筛面对三七根土复合体的法向支持力,N

F_f——筛面对三七根土复合体的摩擦力,N

m——根土复合体质量,kg

g——重力加速度,取 9.8 m/s

a_x——三七根茎沿筛面切向加速度,m/s^2

a_y——三七根茎沿筛面法向加速度,m/s^2

β——升运链工作倾角,(°)

当轮面与链面接触时,振动轮交替击打筛面,使筛面产生周期集中的简谐运动[20],为了使根土复合体被抛起,须满足其临界分离条件,即法向支持力为零。由式(1)可得

$$ma_y + mg\cos\beta = 0 \tag{2}$$

因此,为使复合体被抛起,栅面提供的向上加速度须满足

$$a_y \geqslant g\cos\beta \tag{3}$$

在振动分离过程中,三七根茎除受土壤黏附力外,还会受到来自筛面和土壤颗粒的冲击力作用[21]。过大的冲击力是导致根茎损伤的主要原因,损伤通常发生在根茎与栅条碰撞或根茎受到土壤团块挤压时。

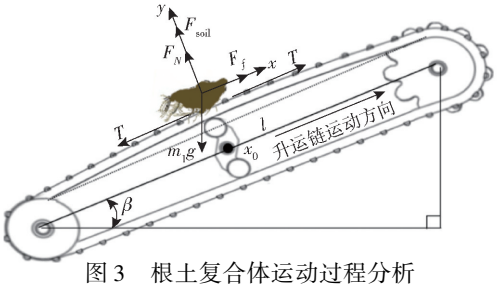


图 3 根土复合体运动过程分析

Fig. 3 Analysis of movement process of root-soil complex

从力学角度看,根茎所受的最大冲击力与法向支持力 F_N的峰值密切相关。当根土复合体被抛起后再次与链面接触时,其受到的法向冲击力远大于其重力分量,此时瞬时法向力 F_{soil}可表示为

$$F_{soil} = m(a_{y1} + g\cos\beta) \tag{4}$$

式中 a_{y1}——复合体与链面接触瞬间法向加速度,m/s^2

为了降低根茎损伤,须限制 F_{soil},使其不超过三七根茎允许抗压或抗剪强度。在设计和优化振动参数时,通过控制振动幅度、升运链速度、频率以及激振点位置,可调控根茎所承受的冲击力。

2.2 关键参数设计与确定

将受激振点抖动的升运链近似等效为弦振动模型[22],将升运链视为两端固定且具有预张力 T 的均匀柔性弦,对根土复合体运动过程进行分析。如图 3 所示,根据牛顿第二定律和胡克定律可得张力弦横向振动波动方程[23-25]为

$$\rho\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c\frac{\partial w}{\partial t} - T\frac{\partial^2 w}{\partial x_n^2} = f(x_n, t) \tag{5}$$

式中　ρ——单位长度质量，kg/m

t——运动时间，s

w——链面（等效弦）瞬时横向位移，m

c——粘性阻尼系数，N·s/m

x_n——链面上某点到入口端距离，取 0～l

l——升运链总长度

当 $n=0$ 时，x_0 为振动轮中心位置到入口端距离。方程中稳态谐响应可写成

$$|w(x_n)| = |w_0| e^{-\delta|x_n - x_0|} \tag{6}$$

其中

$$\delta = \frac{c}{2\sqrt{T\rho}} \tag{7}$$

式中　$w(x_n)$——位移幅值

δ——空间衰减系数

由式（6）可知振幅沿传播距离呈指数衰减，阻尼越大或传播距离越远，振动强度越弱，惯性冲击力越弱。即激振点距离物料越远，其提供的有效激振强度越弱，直接影响土壤破碎效率。因此，为保证在整个输送过程中对根土复合体都能施加足够的激振力以实现有效分离，并解决土块不及时松散造成的壅土问题，选取振动轮在升运链上的安装位置 187～1 273 mm 进行仿真，比较两端及中间典型位置对土壤破碎的影响，择优确定最佳激振位置与参数组合。

在工作过程中，振动轮每转 1 圈，三七根土复合体被反复抛起 2 次，在抛起过程中实现根土分离。由式（1）可得振动轮转速 n 应满足

$$\begin{cases} \dfrac{mg}{z}\omega^2(L/2+r)\cos\beta > mg \\ \omega = \dfrac{\pi b}{30} \end{cases} \tag{8}$$

$$n > 30\sqrt{\frac{1}{(L/2+r)\cos\beta}} \tag{9}$$

$$f = \frac{nb}{60} \tag{10}$$

式中　z——加速度传递系数

f——频率，Hz

r——振动轮半径，mm

ω——振动轮角速度，rad/s

b——激振次数系数，每转一圈激振次数

L——振动轮连杆长度，mm

振动轮半径为 140 mm，装置倾角为 22.5°，由式（8）～（10）可得最小临界频率为 2.78 Hz，结合一般根茎类作物分离装置振动频率[26]，确定频率 f 为 3～8 Hz。

栅条沿 y 方向运动的相对距离 A 即为振幅，H 为振动轴距中心与工作面相对距离，如图 4 所示，振动幅度为

$$\begin{cases} A = \dfrac{2}{L|\sin(\omega t_1)|} + r - H \\ \dfrac{\alpha + a\pi}{\omega} \geqslant t_1 \geqslant \dfrac{\alpha + (a+1)\pi}{\omega} = 0 \end{cases} \tag{11}$$

式中　α——振动轮转动角，（°）

t_1——振动轮运动时间，s

a——振动系数，取 0，1，2，…

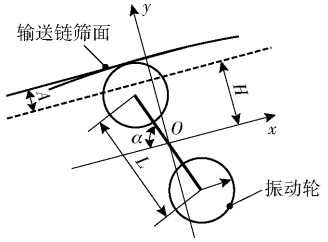


图 4　振动轮顶起筛面后

Fig. 4　Vibrating wheel after lifted screen surface

当 $t_1 = \dfrac{(2a+1)\pi}{2\omega}$ 时，振动幅度最大值为 58 mm。当 $t_1 \in \left(\dfrac{a\pi}{\omega}, \dfrac{\alpha + a\pi}{\omega}\right) \cup \left(\dfrac{(a+1)\pi - \alpha}{\omega}, \dfrac{(a+2)\pi}{\omega}\right)$ 时，振动幅度最小值为 0。

基于收获机作业速度 v_F 确定升运链速度 v，二者之间关系为

$$v_F < v \tag{12}$$

三七机械化收获技术规范[27]要求生产效率应大于等于 0.2 hm^2/h，根据整机作业幅宽可知整机作业速度应大于等于 0.38 m/s，结合田间条件，作业速度为 0.5 m/s。

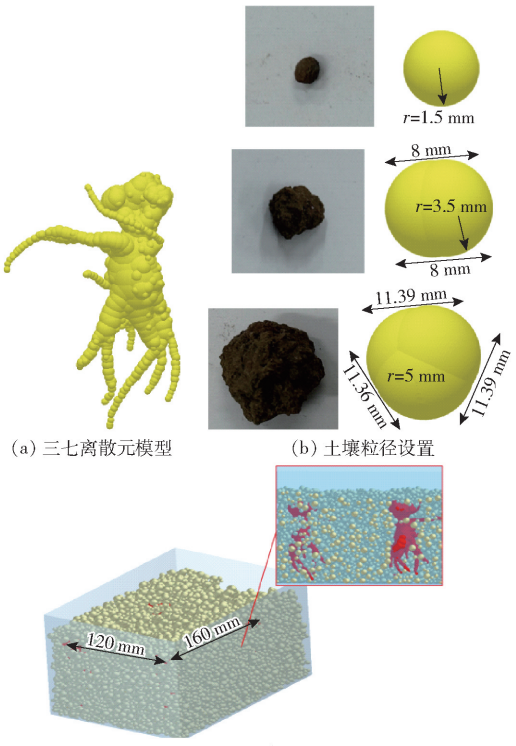
结合前期研究及实际工况[17]，得到：激振点位置为 187～1 273 mm，振动幅度为 20～50 mm，振动频率为 3～8 Hz；根据现有收获机在田间作业时相关作业参数，升运链速度为 0.6～1 m/s。

3　DEM－MBD 耦合仿真试验

3.1　离散元模型构建

建立三七根茎与土壤颗粒离散元模型，如图 5 所示。根据三七三轴尺寸，利用不同直径颗粒填充经扫描过的三七模型，得到多球体表面三七集合体，如图 5a 所示。土壤颗粒数量占比由取样的土壤质量决定，结合前期研究[28]，将土壤组合成单球型、双球型、三球型，半径分别为 1.5、3.5、5 mm。土壤颗粒如图 5b 所示。

针对土壤与三七根茎表面接触分析，三七根土复合体之间的粘连模型符合 JKR 理论，选择 Hertz－Mindlin with JKR 模型配置根土复合体[28]，设置土壤-土壤表面能为 15.51 J/m^2，三七-土壤表面能为 8.25 J/m^2，三七-三七表面能为 19.5 J/m^2，仿真参



(a) 三七离散元模型 (b) 土壤粒径设置

(c) 根土复合体模型

图 5 三七-土壤离散元仿真模型

Fig. 5 *Panax notoginseng* - soil discrete element simulation model

数如表 2、3 所示。

表 2 材料本征参数

Tab. 2 Intrinsic parameters of materials

参数	三七	土壤	钢
泊松比	0.05	0.40	0.30
密度/(g·cm^{-3})	1.23	1.35	7.85
剪切模量/MPa	4.45	1.09	1.92×10^{5}

表 3 颗粒接触参数

Tab. 3 Particle contact parameters

参数	三七-三七	三七-钢	三七-土壤	土壤-土壤	土壤-钢
恢复系数	0.16	0.177	0.136	0.20	0.20
静摩擦因数	0.55	0.20	0.34	0.30	0.40
滚动摩擦因数	0.35	1.07	1.06	0.40	0.50

设置仿真区域长×宽×高为 250 mm×300 mm×250 mm,动态生成土壤颗粒,颗粒工厂中土壤总数量为 13 833 个,单球型、双球型、三球型颗粒数分别为 5 698、4 320、3 815 个。参考三七种植农艺要求,静态生成 4 株三七根茎,按照种植株行距 120 mm×160 mm 垂直落入土壤中,得到三七根土离散元复合模型如图 5c 所示。

3.2 多体动力学模型创建

将输送分离装置三维模型以 X_T 格式导入 Recurdyn 2023 软件中,使用 Library 模块将栅条、导向轮材料设定为 steel,驱动轮为 Rubber。通过调整振动轮安装位置改变激振点位置。

设置栅条与导向轮、振动轮、张紧轮及驱动轮之间的接触为 Solid to Solid Contact,后添加约束,在振动轮与驱动轮上增加 Revolute 转动副,并添加 motion 驱动,其中振动轮的运动为匀速运动,驱动轮运动先进行 0.5 s 的加速运动,然后进行匀速运动,选用 STEP(time,x_0,h_0,x_1,h_1)驱动函数实现参数随时间平滑变化,在过渡时间 x_0 ~ x_1 内,速度/位移由 h_0 平滑过渡到 h_1。振动轮和驱动轮驱动函数分别为

$$E_{x1}=f\pi \tag{13}$$

$$E_{x2}=\mathrm{STEP}(\mathrm{time},0,0,0.5,\omega_1) \tag{14}$$

式中 ω_1——振动分离装置驱动轮角速度,rad/s

3.3 DEM 与 MBD 耦合模型

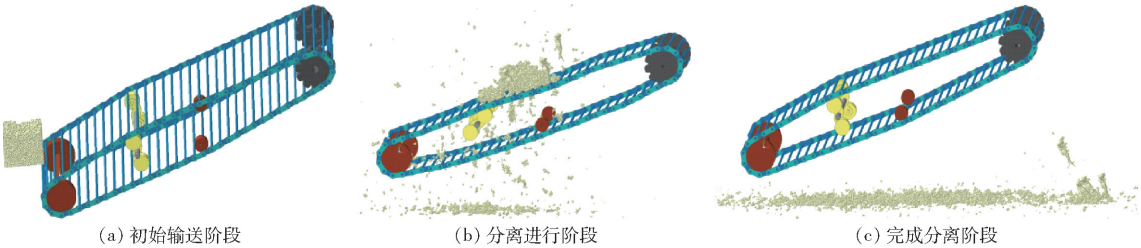
通过耦合仿真实现三七和土壤颗粒离散元模型与振动分离装置动力学模型之间的模拟计算。将 Recurdyn 2023 中的动力学模型以 wall. 文件导入到 EDEM 2022 中,在 EDEM 的几何模块中添加挡板和收集盒,观察收集盒中分离结果。为提高仿真效率,在 Analyst 中以 0 s 导出提前生成的颗粒工厂。

设置仿真时间为 6 s,固定时间步长为 4×10^{-5} s,每 0.01 s 保存一次数据,步数为 600,为协调步长避免颗粒穿模现象,在 Recurdyn 的 Parameter 中设置最大允许步长为 4×10^{-4} s。创建虚拟几何模拟根土复合体以速度 0.4 m/s 喂入振动分离装置,打开耦合接口,运行 EDEM - Recurdyn 耦合仿真。仿真过程如图 6 所示。

3.4 试验设计与仿真结果

3.4.1 试验方案与试验指标

采用二次回归正交组合设计安排试验,选取试



(a) 初始输送阶段 (b) 分离进行阶段 (c) 完成分离阶段

图 6 EDEM - Recurdyn 耦合仿真过程

Fig. 6 EDEM - Recurdyn coupling simulation process

验因素激振点位置(x_1)、振动轮振动频率(x_2)、振动幅度(x_3)和升运链速度(x_4)为试验因素，因素编码如表 4 所示。

表 4　仿真试验因素编码

Tab. 4　Simulation test factors and coding

编码	因素			
	振动点位置 x_1/mm	振动频率 x_2/Hz	振动幅度 x_3/mm	升运链速度 x_4/(m·s^{-1})
2	1 273.0	8.00	50.0	1.0
1	1 001.5	6.75	42.5	0.9
0	730.0	5.50	35.0	0.8
−1	458.5	4.25	27.5	0.7
−2	187.0	3.00	20.0	0.6

选取三七根土分离效率 W_1 和激振区受力峰值 W_2 作为评价指标。三七-土壤分离效率计算式为

$$W_1 = \left(1 - \frac{G_2}{G_1}\right) \times 100\% \tag{15}$$

式中　G_1——进入分离装置前入口处三七-土壤初始总质量，kg

G_2——经分离装置处理后在出口处获得的剩余三七-土壤总质量，kg

激振区受力峰值 W_2 为振动动能在碰撞瞬间转换为冲击力最高点，直接对应根-土体系在极短时间内承受的最大应力。若小于土块内聚力，松散难以启动；若超出根皮强度，则易引发裂伤。为使不同激振方案的冲击强度可在同一尺度下比较，将质量、刚度、振幅和频率耦合效应为一个标量，是触发土块松散或根茎损伤的关键物理量，故将其作为核心评价指标。

3.4.2　试验结果与回归显著性分析

在仿真过程中，在 EDEM 中设置 Grid Bin Group 01 监测进入输送分离装置前三七和土壤总质量，设置 Grid Bin Group 02 监测每个时间步累积的通过分离装置出口处三七和土壤剩余质量。试验方案及结果如表 5 所示，X_1、X_2、X_3、X_4 为因素编码值。

利用 Design-Expert 13 软件对试验结果进行方差分析。三七的根土分离效率与三七受力峰值方差分析结果如表 6 所示。

(1)根土分离效率回归模型建立与显著性分析

由表 6 可知，x_1、x_2、x_3、x_4、x_1x_4、x_2x_3、x_3x_4、x_1^2、x_2^2、x_4^2 对分离效率的影响显著($P<0.05$)，模型极显著($P<0.01$)，失拟项 P 为 0.700 7，表明模型能够充分解释试验数据而不存在系统性误差。剔除不显著因素后，可得 W_1 回归方程为

$$W_1 = 21.096 + 0.009x_1 + 11.092x_2 + 0.429x_3 + 62.629x_4 + 0.021x_1x_4 - 0.054x_2x_3 + 0.673x_3x_4 - 2.115\times10^{-5}x_1^2 - 0.658x_2^2 - 63.542x_4^2 \tag{16}$$

表 5　试验方案与结果

Tab. 5　Experimental design and results

序号	因素				根土分离效率	激振区受力
	X_1	X_2	X_3	X_4	W_1/%	峰值 W_2/N
1	−1	−1	−1	−1	86.68	49.83
2	1	−1	−1	−1	80.21	49.66
3	−1	1	−1	−1	90.55	59.18
4	1	1	−1	−1	82.70	60.29
5	−1	−1	1	−1	95.25	45.08
6	1	−1	1	−1	85.50	50.19
7	−1	1	1	−1	96.38	65.73
8	1	1	1	−1	87.01	67.89
9	−1	−1	−1	1	84.10	59.47
10	1	−1	−1	1	78.20	69.89
11	−1	1	−1	1	87.15	65.41
12	1	1	−1	1	80.90	69.94
13	−1	−1	1	1	92.95	55.16
14	1	−1	1	1	87.60	66.87
15	−1	1	1	1	94.34	67.38
16	1	1	1	1	87.54	80.03
17	−2	0	0	0	91.10	58.81
18	2	0	0	0	77.91	74.92
19	0	−2	0	0	84.56	55.90
20	0	2	0	0	88.70	69.54
21	0	0	−2	0	84.31	48.10
22	0	0	2	0	96.43	66.32
23	0	0	0	−2	88.56	45.86
24	0	0	0	2	87.84	68.50
25	0	0	0	0	90.32	57.94
26	0	0	0	0	91.49	56.24
27	0	0	0	0	90.85	56.73
28	0	0	0	0	91.80	48.02
29	0	0	0	0	90.00	56.11
30	0	0	0	0	89.55	57.44

由表 6 可知，试验指标与各试验因素之间存在显著的二次响应关系，模型具有良好的可信度。方差分析进一步表明，对根土分离效率 W_1 影响程度从大到小为：激振点位置、振动幅度、振动频率、升运链速度。

(2)激振区受力峰值回归模型建立与显著性分析

由表 6 可看出，x_1、x_2、x_3、x_4、x_1^2 对三七受力的影响均极显著，交互项 x_2x_3、x_1x_4、x_2^2 对试验结果影响显著。模型极显著($P<0.01$)，失拟项 P 为 0.626 8，剔除不显著因素后，可得 W_2 回归方程为

$$W_2 = 98.76 - 0.113x_1 - 6.544x_2 - 6.545x_3 + 11.035x_4 + 0.072x_1x_4 + 0.252x_2x_3 + 3.97\times10^{-5}x_1^2 + 1.21\times10^{-5}x_2^2 \tag{17}$$

由表 6 可知，模型具有良好的可信度，对受力峰值 W_2 影响程度从大到小为：升运链速度、振动频

表 6 方差分析结果

Tab. 6 Analysis of variance

项目	W_1				W_2			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	700.576	14	81.643	<0.000 1 **	2 176.238	14	12.888	<0.000 1 **
x_1	294.840 6	1	481.037	<0.000 1 **	264.936	1	21.967	0.000 3 **
x_2	24.725	1	40.340	<0.000 1 **	570.180	1	47.275	<0.000 1 **
x_3	268.804	1	438.558	<0.000 1 **	108.800	1	9.021	0.008 9 **
x_4	6.977	1	11.383	0.004 **	721.387	1	59.813	<0.000 1 **
x_1x_2	0.490	1	0.799	0.385	2.739	1	0.227	0.641
x_1x_3	1.440	1	2.349	0.146	15.484	1	1.284	0.275
x_1x_4	5.221	1	8.519	0.011 *	60.451	1	5.012	0.041 *
x_2x_3	4.141	1	6.756	0.020 *	89.114	1	7.389	0.016 *
x_2x_4	0.230	1	0.376	0.549	45.428	1	3.767	0.071
x_3x_4	4.080	1	6.657	0.021 *	1.690	1	0.140	0.713
x_1^2	66.679	1	108.788	<0.000 1 **	234.903	1	19.477	0.000 5 **
x_2^2	28.981	1	47.284	<0.000 1 **	97.999	1	8.125	0.012 *
x_3^2	0.237	1	0.386	0.544	7.210	1	0.598	0.451
x_4^2	11.074	1	18.068	0.000 7 **	7.001	1	0.580	0.458
残差	9.194	15			180.912	15		
失拟	5.386	10	0.707 3	0.700 7	112.857	10	0.829	0.626 8
误差	3.807	5			68.055	5		
总和	709.770	29			2 357.150	29		

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

率、激振点位置、振动幅度。

3.4.3 响应曲面

通过 Origin 2021 软件对数据、回归方程进行处理分析，得到激振点位置、振动频率、振动幅度、升运链速度对三七-根土分离效率和受力峰值的响应曲面，观察和分析响应面变化情况。

因素交互作用对根土分离效率的影响如图 7 所示。在图 7a 中，激振点位置从 187 mm 到 1 273 mm 变化时，三七-土壤分离效率呈先增大后减小趋势。在图 7b、7c 中，振动幅度从 20 mm 到 50 mm 变化时，三七-土壤分离效率呈增大趋势。在图 7b 中，振动频率从 3 Hz 到 8 Hz 变化时，三七-土壤分离效率呈先增大后减小趋势。在图 7a、7c 中，升运链速度从 0.6 m/s 到 1 m/s 变化时，三七-土壤分离效率也呈先增大后减小趋势。

因素交互作用对激振区受力峰值的影响如图 8 所示。在图 8b 中，振动频率从 3 Hz 到 8 Hz，振动幅度从 20 mm 到 50 mm 变化时，受力峰值呈增大趋势。在图 8b 中，振动频率从 3 Hz 到 8 Hz，受力峰值呈增大趋势。在图 8a 中，升运速度从 0.6 m/s 到 1 m/s 变化时，受力峰值呈增高趋势。响应面进一步说明在各因素协同增大的情况下，三七在激振区的受力峰值可能出现快速增长趋势，加剧受损可能性。

分析其原因：针对含水率 20% 以上的土壤，土壤黏性和团聚性较强，合适的振动位置能够有效地打散土块，减少土壤附着和壅土问题，提高分离效率。相比之下，过靠前或过靠后的激振点可能无法实现理想的分离效果，前端易导致土壤堆积，而后端可能无法逆转前端形成的板结。振动频率和幅度增

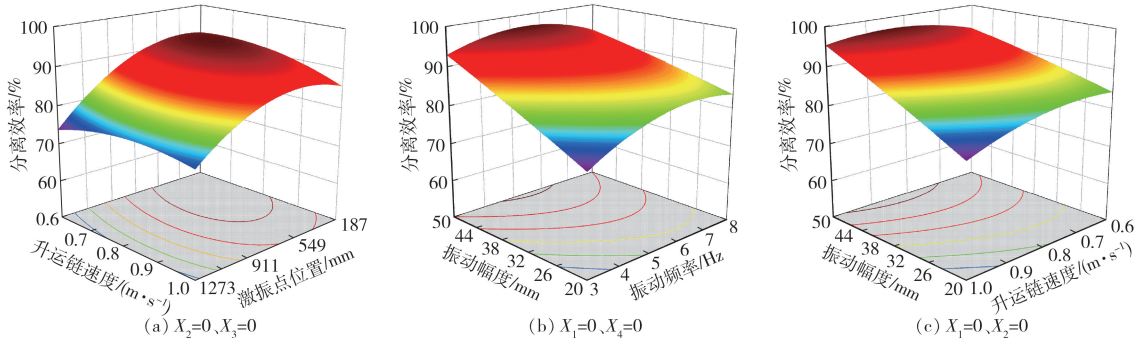


图 7 各因素交互作用对根土分离效率的影响

Fig. 7 Effect of interactions between various factors on root-soil separation efficiency

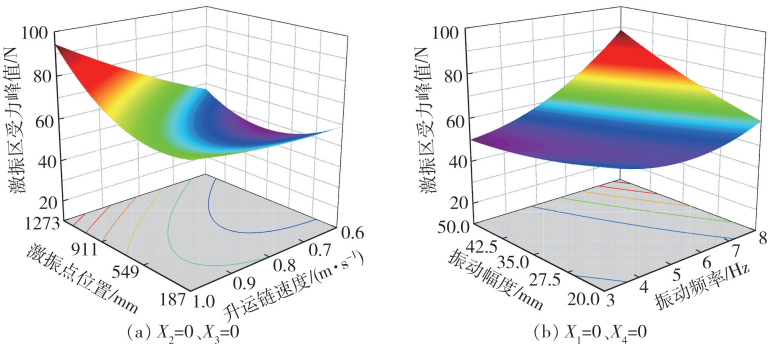


图 8　各因素交互作用对三七受力的影响

Fig. 8　Influence of interaction of various factors on force exerted on *Panax notoginseng*

大会增强土块松动效果，提高分离效率，但过高的振动强度可能导致三七根系受力过大，增加损伤风险。升运链速度对分离效果的影响也是双向的，较低的升运链速度导致土壤携带量过大，分离效果差，而过快的升运链速度则可能导致土块重新堆积，影响分离效果并增加三七受损概率。

3.4.4　参数组合优化

为寻求输送分离装置最佳筛分性能的工作参数组合，利用 Design-Expert 13 Optimization 模块对回归模型进行优化求解，确定参数优化的边界条件。基于提高根土分离效率和降低三七受损风险的原则，结合各试验因素的边界条件，构建参数模型，得到约束条件为

$$\begin{cases} \max W_1(x_1,x_2,x_3,x_4) \\ \min W_2(x_1,x_2,x_3,x_4) \\ \text{s.t.} \begin{cases} 187\ \text{mm} \leqslant x_1 \leqslant 1\,273\ \text{mm} \\ 3\ \text{Hz} \leqslant x_2 \leqslant 8\ \text{Hz} \\ 20\ \text{mm} \leqslant x_3 \leqslant 50\ \text{mm} \\ 0.6\ \text{m/s} \leqslant x_4 \leqslant 1.0\ \text{m/s} \end{cases} \end{cases} \tag{18}$$

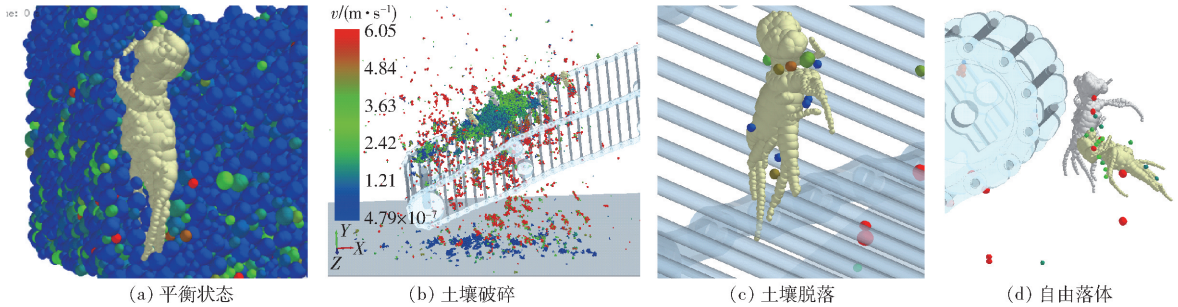
通过优化求解，得到当激振点位置为 500 mm、振动幅度为 48 mm、振动频率为 3.9 Hz、升运链速度为 0.73 m/s 时，根土分离效率为 96.11%、激振区三七受力峰值为 46.05 N。

3.4.5　最优组合模型验证

对采用优化几何和激振参数的升运链进行了虚拟样机仿真，其根－土分离过程可划分为 3 阶段，根土分离过程如图 9 所示。在 0 ~ 0.5 s 时，如图 9a 所示，梅花驱动轮处于匀加速阶段，链面尚未进行有效输送，根－土复合体基本保持静平衡。当进入 0.5 ~ 3.6 s 时，振动轮作用，产生剪切与冲击先将块状土团破碎，随后碎土在惯性与重力作用下透过杆条间隙连续脱落，根系表面逐步裸露，如图 9b、9c 所示。土壤与三七根茎筛分过程中，在振动轮周期激振力作用下，在 3.6 ~ 4.2 s 时，筛面上三七根茎自行脱链完成自由落体，仅残留极少胶结细土黏附于根表，至此根－土分离基本结束。

三七根茎在升运链上轨迹如图 10 所示。三七根茎随土层被喂入升运链后，其纵向运动可划分为 4 个阶段：①在入口至激振区前缘，根茎与包覆土体随链条做近似匀速平移，运动极为平稳。②进入激振区后，振动轮周期性顶起链面并瞬时释放，高幅短脉冲动量使根茎反复被抛起与落回，形成锯齿状跃迁轨迹。③离开激振区后，多余振动经铰链摩擦迅速衰减，根茎运动重新趋于平稳，此段低扰动环境有助于碎土透缝排出。④根茎以残余动能做短程抛物运动，自由落体回到基板。

在激振区，纵向运动与受力载荷关系如图 11 所示。由图 11 可看出，三七受到的载荷峰值越高，说明在极短时间内向根茎输入动量越大，根茎获得的初始向上速度越高，被抛出的高度和滞空时间都会随之增加，曲线上表现为蓝色拱弧的峰值更高、跨度更大。即高载荷尖峰与高位移拱弧一一对应，揭示



(a) 平衡状态　(b) 土壤破碎　(c) 土壤脱落　(d) 自由落体

图 9　根土复合体状态过程

Fig. 9　Root-soil complex state process

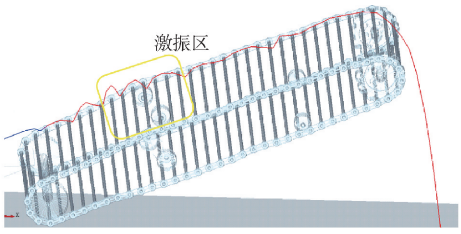


图 10 三七颗粒仿真运动轨迹

Fig. 10 Simulated motion trajectory of *Panax notoginseng* granules

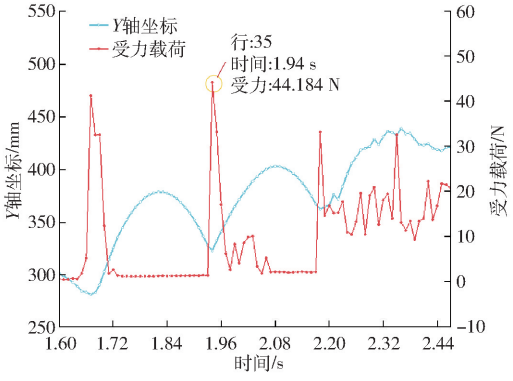


图 11 颗粒纵向运动与受力载荷的关系

Fig. 11 Relationship between longitudinal movement of particles and applied load

了“冲击越强,抛得越高”的能量-动量转换关系,因此,受力峰值存在于激振区。

在优化参数组合下,根土分离效率为 96.53%,受力峰值为 44.184 N,相对误差分别为 0.44%、4.22%,在合理范围内,回归模型成立。

4 台架试验验证

4.1 试验条件

试验样本为三七根茎,取样自云南省昆明市石林彝族自治县,海拔 1 933 m,103°19′E,24°55′N,样本含水率为 65.18%,其三轴尺寸、质量与仿真模型相似。试验设备采用千眼狼 5F01 型高速摄像机,图像采集速度为 4 GB/s,全图为 2 000 f/s;随后对比仿真与台架试验中颗粒/根茎的弹跳高度与冲击加速度,高度反映冲击后能量释放,加速度表征动态受力过程。若峰值及趋势一致,即可确认模型在能量转换和动力响应上与实测相符。为验证仿真结果的准确性,用高速视频目标跟踪测量软件 V1.0 对拍摄序列进行逐帧处理。

试验场地位于昆明理工大学土壤植物机械系统实验室,设备如图 12 所示。

4.2 试验方法

选用两联动 SWL1 螺母升降型涡轮丝杆升降机实现升运链倾角调节,设置倾角为 22.5°,台架动力由三相异步电机驱动,由变频器改变电机转速,从而

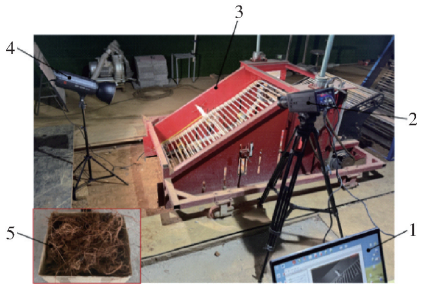


图 12 台架试验

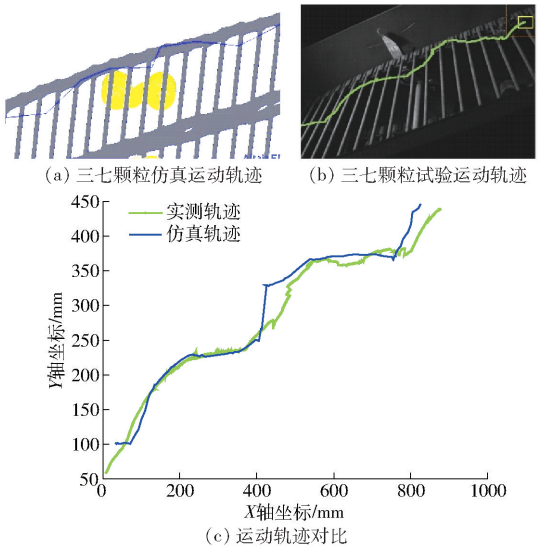
Fig. 12 Bench test

1. 采集工作台 2. 高速摄像机 3. 试验台架 4. 补光灯 5. 试验三七根茎

改变升运链速度及振动频率。运用千眼狼高速摄影系统,3 次重复试验确保工况一致,间接校核峰值法向力与滚动等受力参数。为了避免黏附土质量差异对抛射高度的干扰,在仿真中增加“裸根仅受链面激振”的对照工况,使仿真根茎与台架试验根茎具有一致的等效质量。

4.3 试验结果

提取得到三七块根质心轨迹,仿真轨迹整体与实测轨迹走向一致,激振区根茎仿真轨迹与试验轨迹结果如图 13a、13b 所示。



(a) 三七颗粒仿真运动轨迹 (b) 三七颗粒试验运动轨迹

(c) 运动轨迹对比

图 13 激振区根茎运动轨迹

Fig. 13 Motion trajectory of root stem in excitation zone

高速摄影与仿真中根茎坐标结果如图 13c 所示。选取激振区最大冲击加速度与谷-峰距离最大(垂距),将冲击加速度与高度进行对比如表 7 所示。由表 7 可知,两者冲击加速度相对偏差为 5.43%,距分离筛面距离峰值相对误差为 5.6%,验证了模型对根茎动力响应的预测准确性。

5 结论

(1)提出了将激振点位置纳入设计变量,并通过对模型的机理分析,得到关键工况参数为:激振点

表 7　仿真颗粒与实测根茎对比指标

Tab. 7　Comparison of simulated particles and actual root stem indicators

参数	序号	仿真三七颗粒	实测三七颗粒	相对误差/%
冲击加速度/($m \cdot s^{-2}$)	1	119	107	5.43
	2	114	111	
	3	116	113	
	平均值	116.33	110.33	
距分离筛面距离峰值/mm	1	59.96	54.58	5.60
	2	60.81	56.36	
	3	58.85	59.15	
	平均值	59.873	56.697	

位置 187 ~ 1 273 mm、振幅 20 ~ 50 mm、振动频率 3 ~ 8 Hz、升运链速度 0.6 ~ 1 m/s。

(2)通过 EDEM－Recurdyn 耦合仿真试验模拟三七根茎-土壤分离、块根跳动的过程,并通过二次回归旋转正交试验求解工作的最佳参数组合为:激振点位置为 500 mm、振动幅度为 48 mm、振动频率为 3.9 Hz、升运链速度为 0.73 m/s,该参数配置下,根土分离效率为 96.11%、三七受力峰值为 46.05 N,并进行了最优组合模型验证,根土分离效率为 96.53%,受力峰值为 44.184 N,相对误差分别为 0.44%、4.22%,回归模型具有较高精度。

(3)通过合加速度-高度配对验证了模型对峰值冲击与抛高的同步预测能力。高速摄影台架试验结果表明,根茎弹跳高度及冲击加速度仿真与实测相对误差分别为 5.43%、5.6%,模型可靠。

参　考　文　献

[1] 曹钦洲,张兆国,王法安,等. 三七生产机械化技术与装备研发现状[J]. 中国农机装备,2023(7):58－65.
CAO Qinzhou, ZHANG Zhaoguo, WANG Faan, et al. Research and development status of mechanization technology and equipment for *Panax notoginseng* production[J]. China Agricultural Machinery Equipment, 2023(7): 58－65. (in Chinese)

[2] XIE Kaiting, ZHANG Zhaoguo, WANG Faan. Multi-scenario variable-state robust fusion algorithm for ranging analysis framework[J]. Agriculture-Basel,2024,14(4):516.

[3] 张兆国,邓寓轩,王法安,等. 自走式三七联合收获机底盘通过性能分析与模型试验[J]. 农业机械学报,2023,54(9):164－177.
ZHANG Zhaoguo, DENG Yuxuan, WANG Faan, et al. Performance analysis and model test of self-propelled *Panax notoginseng* combine harvester chassis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(9):164－177. (in Chinese)

[4] 曹钦洲. 三七联合收获机关键工作部件的设计与试验[D]. 昆明:昆明理工大学,2024.
CAO Qinzhou. Design and experiment of key working parts of *Panax notoginseng* combine harvester working[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)

[5] 王海翼. 山地自走式马铃薯联合收获机设计与试验[D]. 昆明:昆明理工大学,2021.
WANG Haiyi. Design and experiment of self-propelled potato combine harvester for mountainous regions[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2021. (in Chinese)

[6] 姚华,王丽,欧立冬,等. 三七传统产区和新产区植株农艺性状比较及相关因素研究[J]. 中草药,2019,50(3):558－565.
YAO Hua, WANG Li, OU Lidong, et al. Comparative study on agronomic traits of *Panax notoginseng* plants in traditional and new production areas and their influencing factors[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2019, 50(3): 558－565. (in Chinese)

[7] 徐居禹. 智慧农业推动云南三七产业提质增效研究[D]. 昆明:云南农业大学,2024.
XU Juyu. Study on quality and efficiency improvement of Yunnan *Panax notoginseng* industry driven by smart agriculture[D]. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2024. (in Chinese)

[8] 黎思琦,卢娜,乔进超,等. 药食同源视角下云南省三七产业发展建议[J]. 绿色科技,2021,23(13):86－89.
LI Siqi, LU Na, QIAO Jinchao, et al. Development suggestions for Yunnan's *Panax notoginseng* industry from the perspective of medicine-food homology[J]. Green Science and Technology,2021,23(13):86－89. (in Chinese)

[9] 郑侃,刘国阳,夏俊芳,等. 振动技术在耕种收机械中的应用研究进展与展望[J]. 江西农业大学学报,2020,42(5):1067－1077.
ZHENG Kan, LIU Guoyang, XIA Junfang, et al. Research progress and prospects on the application of vibration technology in farming and harvesting machinery[J]. Journal of Jiangxi Agricultural University,2020, 42(5):1067－1077. (in Chinese)

[10] 王泽宇,刘小龙,张华,等. 根茎类中药材机械化收获现状及展望[J]. 林业机械与木工设备,2024,52(1):13－19.
WANG Zeyu, LIU Xiaolong, ZHANG Hua, et al. Current status and prospects of mechanized harvesting of root and rhizome herbal medicines[J]. Forestry Machinery and Woodworking Equipment,2024, 52(1):13－19. (in Chinese)

[11] 崔普杰. 振动技术在耕种收机械中的应用研究进展与展望[J]. 南方农机,2024,55(2):183－185.
CUI Pujie. Research progress and prospects of vibration technology application in farming, planting, and harvesting machinery[J]. Southern Agricultural Machinery,2024,55(2):183－185. (in Chinese)

[12] Matsuyama GSA600 Harvester[EB/OL]. http://www.niplo.co.jp/products/index.php? id=b020.

[13] 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 a buffer screen potato harvesting machine for separating potato waste[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(8): 1 - 11. (in Chinese)

[14] 吕金庆,刘金妮,竹筱歆,等. 黏重黑土条件下马铃薯收获机挖掘装置设计与试验[J]. 东北农业大学学报,2024,55(5):76 - 89.
LÜ Jinqing, LIU Jinni, ZHU Xiaoxin, et al. Design and test of potato harvester digging device under sticky black soil conditions[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2024, 55(5): 76 - 89. (in Chinese)

[15] 魏万行,任志贵,冯明豪,等. 振动杆式元胡药土分离装置设计与试验[J]. 农机化研究,2022,44(8):144 - 150.
WEI Wanxing, REN Zhigui, FENG Minghao, et al. Design and testing of a vibrating rod-type Yuanhuao soil separation device [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(8): 144 - 150. (in Chinese)

[16] 薛浩田. 三七联合收获机整机设计及关键部件的仿真试验[D]. 昆明: 昆明理工大学,2022.
XUE Haotian. Design of *Panax notoginseng* combine harvester and simulation test of key components[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)

[17] 王法安,温博,谢晓红,等. 三七收获机输送分离装置作业机理分析与参数优化[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊 1):201 - 211,259.
WANG Faan, WEN Bo, XIE Xiaohong, et al. Operation mechanism analysis and parameter optimization of conveying and separating device of *Panax notoginseng* harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54 (Supp. 1): 201 - 211, 259. (in Chinese)

[18] 张兆国,杜宗霖,崔振猛,等. 三七收获机挖掘去土装置运动分析与仿真试验[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版),2019,44(3):41 - 51.
ZHANG Zhaoguo, DU Zonglin, CUI Zhenmeng, et al. Motion analysis and simulation experiment of the digging and soil-removal device of *Panax notoginseng* harvester[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 44(3): 41 - 51. (in Chinese)

[19] 张青松,郑中原,廖庆喜,等. 农业工程领域耦合仿真技术应用现状与展望[J]. 农业机械学报,2025,56(7):20 - 37,149.
ZHANG Qingsong, ZHENG Zhongyuan, LIAO Qingxi, et al. Application status and prospect of coupled simulation in agricultural engineering research[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 20 - 37, 149. (in Chinese)

[20] 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 Zhongen, WU Jine, et al. Design and experiment on 4U1Z vibrating potato digger[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 39 - 47. (in Chinese)

[21] 杨然兵,田光博,尚书旗,等. 马铃薯收获机辊组式薯土分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(2):107 - 118.
YANG Ranbing, TIAN Guangbo, SHANG Shuqi, et al. Design and experiment of roller group type potato soil separator for potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 107 - 118. (in Chinese)

[22] 王正. 弦振动理论在木工带锯条中的研究与应用[D]. 南京:南京林业大学,2008.
WANG Zheng. Research and application of string vibration theory in woodworking band saw blades[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2008. (in Chinese)

[23] RAO S. Vibration of continuous systems[M]. 2nd ed. Hoboken: Wiley, 2019.

[24] LU Liqing, ZHAO Liyan, HU Jing. Effect of Kelvin-Voigt damping on spectrum analysis of a wave equation[J]. Electronic Journal of Differential Equations, 2018, 2018(186): 1 - 16.

[25] 刘建. 半线性阻尼波动方程的解的能量指数衰减性[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2007.
LIU Jian. Energy exponential decay of solutions to semi-linear damped wave equations[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2007. (in Chinese)

[26] 田忠恩. 马铃薯挖掘机防堵装置系统的设计与性能试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2016.
TIAN Zhongen. Design and experiment research on anti blocking system of potato digger[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)

[27] DBS3/T 985—2020 三七机械化收获技术规程[S]. 云南:云南省市场监督管理局,2020.

[28] 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. Research on the separation mechanism of *Panax notoginseng* root soil complex[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)