

基于 EDEM – RecurDyn 的生姜联合收获机挖采夹拔装置设计与试验

程 进¹ 李 伟¹ 李维华^{2,3} 侯 瑞⁴ 李玉华¹

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 青岛理工大学机械与汽车工程学院, 青岛 266520;
3. 山东省农业机械科学研究院, 济南 250100; 4. 北京邮电大学人工智能学院, 北京 100876)

摘要: 针对生姜联合收获机在生姜植株挖掘拔取时存在耕作松散度不足、根茎土壤堆积等问题,设计了一种协同作业生姜收获装置。系统解析了装置构型与作用机制,对核心组件的运动参数、载荷分布、几何特征及空间位置关系实施协同优化。基于 EDEM – RecurDyn 耦合仿真算法,构建生姜-土壤-挖采夹拔装置交互模型,确定出影响采收质量的主控因子,通过宏微观多尺度仿真揭示生姜植株、土壤介质与收获装置间的动力学耦合规律。选取收获装置前进速度、挖掘铲与振动筛振动频率、挖掘铲倾斜角与夹拔装置倾斜角之比作为试验因素,以土壤粘结失效量及姜块附土率作为评价指标,并实施二次正交旋转组合优化试验。优化后的参数如下:前进速度 0.33 m/s、土壤振动频率 5.4 Hz、挖掘铲倾斜角与夹拔装置倾斜角之比为 0.96,此时土壤颗粒间共发生 95 223 个 Bond 键断裂事件,姜块附土率为 9.93%,挖掘、拔取效果最好。田间试验验证了优化后挖拔收获装置的作业性能,其结果表明实测数据与回归模型预测值吻合良好,通过优化设计的振动式分离装置与夹持装置的协同配合,土壤破碎效果好且有序输送。

关键词: 生姜联合收获机; 挖采夹拔装置; EDEM – RecurDyn

中图分类号: S225.92 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)21-0262-10 OSID: 

Optimization and Experiment of Ginger Digging-clamping-pulling Device Based on EDEM – RecurDyn

Cheng Jin¹ Li Wei¹ Li Weihua^{2,3} Hou Rui⁴ Li Yuhua¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China
2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China
3. Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Jinan 250100, China
4. School of Artificial Intelligence, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Aiming to address issues such as insufficient soil loosening and root-stem accumulation during ginger harvesting using combine harvesters, a collaborative harvesting system was developed. The system configuration and operational mechanisms were thoroughly analyzed, with coordinated optimization implemented for motion parameters, load distribution, geometric characteristics, and spatial relationships of core components. Utilizing the EDEM – RecurDyn coupled simulation algorithm, an interactive model integrating ginger plants, soil, and harvesting equipment was established to identify key factors affecting harvest quality. Macro-micro multi-scale simulations revealed dynamic coupling patterns among ginger plants, soil media, and harvesting devices. Experimental parameters included harvesting speed, excavation blade vibration frequency, and the ratio of excavation blade inclination angle to clamping device angle. Soil cohesion failure threshold and ginger-soil adhesion rate served as evaluation metrics, with a three-factor orthogonal rotation experimental design employed. Optimized parameters yielded as follows: 0.33 m/s of forward speed, 5.4 Hz of soil vibration frequency, and a 0.96 ratio between excavation blade and clamping device angles. These conditions resulted in 95 223 Bond fracture events

收稿日期: 2025 – 11 – 17 修回日期: 2025 – 12 – 29

基金项目: 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2024CXGC010904)、国家重点研发计划项目(2024YFD2000404)和财政部和农业农村部:现代农业产业技术体系建设专项(CARS-22)

作者简介: 程进(1993—),男,副教授,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail: ttcheng@163.com

通信作者: 李玉华(1983—),男,教授,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail: liyuhua@sdau.edu.cn

between soil particles, 9.93% ginger-soil adhesion rate, and optimal harvesting performance. Field trials confirmed the enhanced efficiency of the optimized system, with measured data closely matching regression model predictions. The synergistic interaction between the optimized vibratory separation unit and clamping mechanism ensured effective soil fragmentation and orderly material transport.

Key words: ginger combine harvester; digging-clamping-pulling device; EDEM - RecurDyn

0 引言

对于生姜等根茎类作物,其收获技术均依赖于有效的挖掘与拔取过程。现行的生姜收获模式包括分段收获与人工收获,目前没有生姜联合收获机械,生姜收获涉及挖掘、提拉、清土、姜秧姜块分离、收集等诸多流程^[1]。以山东省安丘市的典型生姜为研究对象,其根茎在地下 300 ~ 400 mm 深处呈掌状分布。这种空间构型导致其与土壤的接触面积较大,从而在收获过程中产生显著的机械阻力。此外,姜根质地脆嫩、机械强度低,易发生应力集中断裂,共同构成了其机械化收获的主要技术难点。目前生姜收获作业高度依赖人工,导致生产效率低下且劳动强度巨大^[2],此外,收获期恰逢霜降前后,存在一个狭窄的作业窗口。若在霜降后采收,姜根易受冻害^[3],这会显著削弱其耐贮性,进而导致腐烂率升高,引发严重的采后损失。国内生姜机械化覆盖率低且无法满足农民在收获期的需求,因此亟待研制一种兼具低损伤作业与高效率采收能力的生姜挖采夹拔一体化装置。西方国家收获方式类似于马铃薯等根茎类作物^[4-5],不考虑对生姜的破碎率,对生姜低损收获方面的研究相对不成熟。

生姜挖采夹拔装置是整个生姜收获机的关键部位,实现生姜与土壤松动以及生姜与土壤分离的作业效果。Zhang 等^[6]采用 EDEM 仿真优化了振动式生姜收获装置,通过振动实现姜土分离,验证了用挖掘铲与振动铲组合作用分析工作参数对减少生姜土壤含量的可行性,但该方式对生姜根系的损伤控制有限;魏忠彩等^[7]针对马铃薯收获提出了“双重振动分离 + 弹性揉搓”工艺,其在土薯分离方面效果显著,但直接移植到生姜收获时,因姜块形态不规则、机械强度低,易导致夹伤与断裂;黄新平等^[8]研制了铲筛组合式生姜收获机,通过挖掘铲与振动筛配合实现初步清土,但在姜块有序输送和根部土壤高效脱落方面仍存在提升空间。现有研究多侧重于单一挖掘或分离的优化,缺乏对“挖掘—清土—夹持—输送”协同作业机制的系统考虑,且多依赖传统经验设计或单一物理场仿真,对姜-土-机互作机理的动态解析不足。

为了实现生姜收获全程机械化,有效解决目前

生姜收获存在挖掘提拉困难、去土效果差、挖采夹拔易碎^[9]以及挖掘阻力过大等问题,本文设计一种生姜挖采夹拔装置,将振动挖掘筛与夹持输送装置进行空间与运动协同设计,在振动松土的同时实现植株的主动夹持与提拉,避免传统先挖后夹过程中因姜块位移导致的断裂问题。采用 EDEM - RecurDyn 耦合仿真方法,突破单一离散元仿真在机构运动自由度上的局限,构建生姜-土壤-挖采夹拔装置交互模型^[10-13],确定出影响采收质量的主控因子,通过宏微观多尺度仿真揭示生姜植株、土壤与采收装备间的动力学耦合规律^[14],进一步确定挖采夹拔装置的关键作业参数^[15],对关键部位参数进行分析与优化,旨在显著降低收获过程引发的机械损伤,并保证姜块出土后具有完整的形态与良好的洁净度,以满足市场的特定商品标准。

1 挖采夹拔装置结构与工作原理

1.1 结构与工作原理

生姜在种植期首次开沟后,垄沟顶部宽度为 400 mm,垄沟底部宽度为 120 mm 左右,行距为 700 mm,由于生姜种植农艺要求持续进行二次覆土,使得原来的垄变沟,沟变垄。在生姜收获时期,生姜土壤规格为:垄顶部宽度约为 120 mm,垄底部宽度约为 400 mm,行距不变,垄高约为 400 mm,生姜沿茎秆并排生长方向宽度为 260 ~ 320 mm,沿竖直生长方向高度为 250 ~ 280 mm,基于生姜种植的农艺要求,挖掘铲的作业深度确定为 350 ~ 400 mm。该参数的确定是基于目标作物根系的平均分布深度,旨在实现最优的挖取效果并最大限度减少土壤扰动。以山东省安丘市种植生姜为研究对象,作为生姜种植模式代表性区域,以此为基础设计生姜挖采夹拔装置。

生姜挖采夹拔装置是生姜有序收获机的关键核心部件,主要包括马达、液压油缸、龙门支架、振动筛、挖掘铲及动力匹配装置,如图 1 所示。

生姜挖采夹拔装置进入稳定工作状态后,通过马达提供动力,液压油缸控制挖掘铲的升降,实现挖掘功能。龙门支架作为整个装置的支撑结构,确保装置的稳定性和可靠性。振动筛则用于分离土壤和生姜并且进行一级清土,随后夹持装置夹持生姜茎

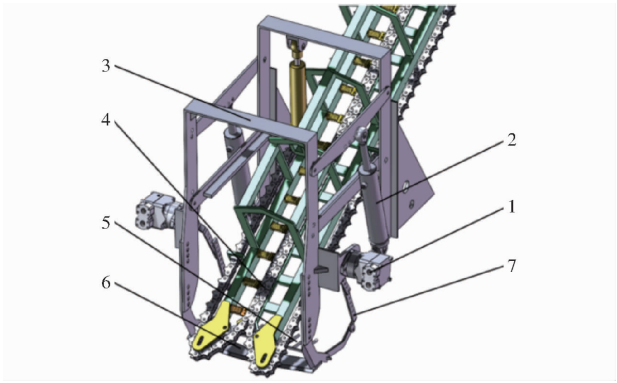


图 1 生姜挖采夹拔装置结构图

Fig. 1 Structure diagram of ginger digging-clamping-pulling device

1. 马达 2. 液压油缸 3. 龙门支架 4. 夹持装置 5. 振动筛
6. 挖掘铲 7. 动力联动装置

秆向上输送,提高收获效率。挖掘铲的设计考虑到生姜的生长特性和土壤条件,确保在挖掘过程中能够减少对生姜的损伤。

1.2 挖采夹拔装置工作过程

挖采夹拔过程中,挖掘铲在驾驶员的操作下对齐姜垄并且保持收获速度沿着姜垄前进^[16],夹持输送装置自动对齐姜垄^[17],挖掘铲深度在土壤下要大于 280 mm,为对姜块的机械损伤最小化,挖掘深度的设定以生姜姜根群的平均垂直分布为依据,故将挖掘铲的作业深度确定为 350 mm 左右,确保生姜姜根被完整挖取的同时免受铲刃的直接冲击。挖掘铲在破土后于首株植株前切入的同时,振动筛的振动作用对姜土混合物进行一级清土,完成挖掘,实现初步分离。最后由夹持输送装置完成对姜株的可靠夹持与有序输送,进而实现完整的挖采夹拔收获。

2 生姜挖采夹拔装置关键部件设计

2.1 尺寸分析

生姜在实际收获过程中主要面临两大挑战。植株空间分布密集,株距较小;其根茎在土壤中的生长取向具有高度随机性,如图 2 所示。试验结果表明,即使在单行收获作业条件下,装置所受土壤阻力也已达到显著水平,这一现象对收获机械的动力系统提出了明确要求。因此,本文中采用单行收获^[18],保证挖掘铲低阻工作,结合实际情况,对挖掘铲的物

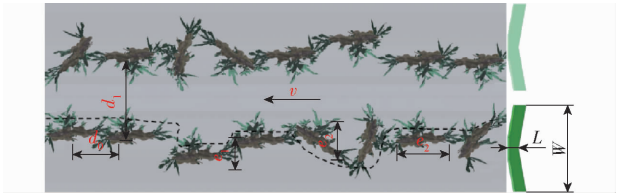


图 2 挖掘过程示意图

Fig. 2 Working process of digging shovel

理尺寸参数进行优化设计。
图中 e_1 ——对齐垄沟误差,mm
 W ——挖掘铲宽度,mm
 L ——挖掘铲长度,mm
 d_0 ——株距,mm
 d_1 ——行距,mm
 v ——前进速度,m/s
 e_2 ——生姜在垄沟中的倾斜误差之和,mm

考虑到人工种植存在株距偏差以及对齐垄沟存在误差,本设计的核心约束之一在于挖掘部件的几何形状与入土运动规划,必须确保其仅在预定作业区域内作用,从而实现对非目标姜株根茎系统的零损伤。挖掘铲的宽度与长度应满足

$$\begin{cases} e_2 < W < d_1 \\ 2gL = \frac{2gh_0}{\sin\alpha} + \frac{v^2 \cos\beta}{\sin(\alpha + \beta)} \end{cases} \quad (1)$$

式中 h_0 ——挖掘铲后端距离挖掘面的高度,mm
 β ——土壤对挖掘铲的摩擦角,(°)
 α ——挖掘铲振动幅度,(°)

实际测量得到,对齐垄沟误差为 5 ~ 10 mm,生姜在垄沟中的倾斜角度为 0° ~ 180°,生姜的宽度为 260 ~ 320 mm,生姜的埋地深度为 250 ~ 280 mm,由于生姜本身脆易碎的特性^[19-21],在满足既定挖掘设计要求的前提下,致力于实现挖掘深度的最大化,并协同优化挖掘过程中的阻力与能耗,由公式(1)可得,挖掘铲宽度 W 为 630 mm,设计长度 D 为 65 mm,厚度 t 为 10 mm,如表 1 所示。振动筛筛条形状选为圆柱形,设计间距为 33 mm,筛条长度为 150 mm。

表 1 装置技术参数

Tab.1 Technical parameters of device

技术参数	数值
工作宽幅/mm	630
挖掘铲铲面数	3
作业垄数	1
机具前进速度/(m·s ⁻¹)	0.3 ~ 1.0
挖掘铲入土深度/mm	300 ~ 350

2.2 力学分析

本文重点对生姜繁杂收获环节中的挖采夹拔阶段展开研究,如图 3 所示,挖掘铲的形状、入土角度以及夹持装置的夹拔过程会对整个收获过程产生阻力^[22],对夹拔过程中的生姜植株以及挖掘过程中的挖掘铲进行受力分析,确定影响作业过程的关键因素,为后续参数选取提供参考。

图中 F_c ——切向挖掘阻力,N
 μ ——接触部件与土壤摩擦因数
 μ_0 ——土壤与挖掘铲的摩擦因数

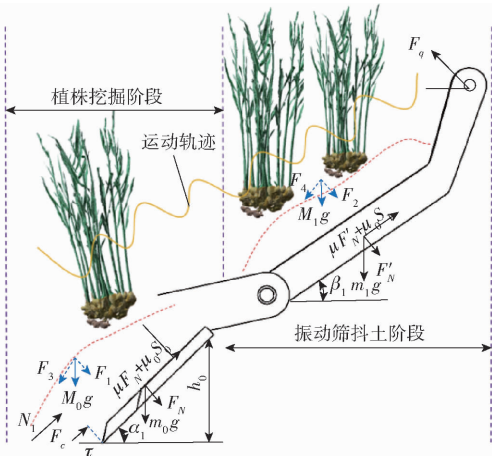


图 3 挖掘过程受力示意图

Fig. 3 Force diagram of excavating shovel and vibrating screen

- F_N ——土壤给挖掘铲的法向载荷, N
 S_0 ——挖掘铲与土壤的接触面积, m^2
 α_1 ——铲面倾斜角度, ($^\circ$)
 β_1 ——振动筛倾斜角度, ($^\circ$)
 m_0 ——挖掘铲质量, kg
 m_1 ——振动筛质量, kg
 S_1 ——振动筛与土壤接触面积, m^2
 F'_N ——土壤给振动筛的法向载荷, N
 F_q ——外部牵引力, N
 M_0 ——姜土混合物质量, kg
 τ ——入土相位角
 N_1 ——挖掘铲前部破坏面上的载荷, N
 M_1 ——振动筛所受姜土混合物载荷, N

在田间采收作业中,由于土壤普遍存在石块与作物残留物等组分,本研究选取收获期的安丘生姜种植示范区为研究对象。该区域土壤环境具有显著复杂性,对收获机械的作业性能评估构成有效验证情境。实测土壤含水率介于 13.8% ~ 14.6% 之间(该含水率为历年 11 月生姜收获期土壤含水率的均值测量结果),重点分析挖掘铲-振动筛系统的土壤-机具相互作用力学特性,描述其动力学平衡关系的方程为

$$m_0g - F_N(\cos\alpha_1 - \mu\sin\alpha_1) - F_N(\cos\beta_1 - \mu\sin\beta_1) + (\lambda S_0 + F_1)\sin\tau + N_1\mu_1\sin\tau + \mu_0S_0\sin\alpha_1 + M_1g + F_2\sin(90^\circ - \beta_1) + \mu_0S_1\sin\beta_1 - N_1\cos\tau = 0 \quad (2)$$

$$F_N(\sin\alpha_1 + \mu\cos\alpha_1) + \mu_0S_0\cos\alpha_1 + F_N(\sin\beta_1 + \mu\cos\beta_1) + \mu_0S_1\cos\beta_1 - (\lambda S_0 + F_1)\cos\tau - N_1\sin\tau - N_1\mu_1\cos\tau - F_2\cos(90^\circ - \beta_1) = 0 \quad (3)$$

式中 λ ——土壤粘性力

由挖掘过程受力示意图 3 可知挖掘铲以及振动筛总阻力 f_z 为

$$f_z = \mu F_N \cos\alpha_1 + \mu_0 S_0 \cos\alpha_1 + F_N \sin\alpha_1 + F_e \cos\alpha_1 + \mu F'_N \cos\beta_1 + F'_N \sin\beta_1 - 2F_q \cos\theta \quad (4)$$

式中 θ ——外部牵引力与水平面夹角

在稳定收获阶段,挖掘铲引导土壤颗粒获得特定的运动速度,在某一时刻 t ,会产生土壤加速度 a 以及土壤惯性力 F ,其满足等式

$$\begin{cases} a = \frac{dv}{dt} = v \cos\delta \frac{d\delta}{dt} \\ F = M \frac{dv}{dt} = \rho S v^2 \frac{\sin\alpha_1}{\sin\delta} \end{cases} \quad (5)$$

式中 δ ——前方土体破坏面与挖掘铲铲面之间的夹角

M ——土壤质量 ρ ——土壤密度

参考根茎类收获装置中挖掘铲的设计参数^[23-26],结合公式(2)、(4)以及挖掘和振动装置的土壤破碎过程分析,可以得出,影响收获质量最主要的 3 个因素为机器前进速度 v 、挖掘铲与振动筛振动频率 f ,以及铲面倾斜角度 α_1 和夹拔装置倾斜角度 β_1 之比 Ω ,直接影响前进阻力和土壤含量。

2.3 挖掘铲振动筛抖土分析

采用曲柄摇杆机构驱动振动筛,通过运动转换实现高效清土功能。该装置主要由偏心轮、传动连杆及摆动筛体组成,其中该机构设计通过优化摆动参数(频率 f 、振幅)与筛面特性(摩擦因数、筛条数),实现了生姜与土壤的有效分离。相比传统振动筛分方式,曲柄连杆驱动的摆动模式具有冲击小、能耗低的优势,特别适合生姜等易损伤作物的收获作业,如图 4 所示机构运动分析图。

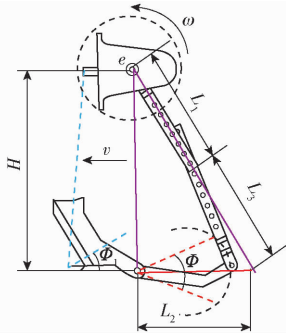


图 4 挖采装置运动分析图

Fig. 4 Kinematic analysis diagram of excavating mechanism

- 图中 L_1 ——一级振动连杆长度
 L_3 ——二级振动连杆长度
 L_2 ——挖掘铲与振动筛之间的铰接距离, mm
 ω ——偏心轮角速度, rad/s
 e ——偏心轮的偏心距, mm
 H ——偏心轮旋转中心与振荡中心高度, mm
 Φ ——振动筛振动角度, ($^\circ$)
 Φ_1 ——挖掘铲振动角度, ($^\circ$)

实际挖采过程中,振动筛与挖掘铲采用动力学分离方法,往复振动使得土壤团粒在交变惯性力作用下发生疲劳破碎,破碎力 F_p 应大于等于土壤结合力,即

$$F_p = \rho_0 S_3 \tag{6}$$

式中 ρ_0 ——土壤粘结强度, kPa
 S_3 ——土壤断裂破碎的面积, m^2

2.4 夹拔力学分析

如图 5 所示,生姜植株经破土与初步振动作业后,其根茎与土壤复合体将产生显著的时变载荷。为确保该复合体在后续输送阶段不发生滑移或脱落,夹持机构必须提供足够的正压力与摩擦力,以克服由土壤粘附及植株自重共同引起的作业阻力,从而实现整株姜的稳定、连续传输,应满足

$$\begin{cases} F_t = \mu_b F_x \\ F \geq F_p + \rho S v^2 \frac{\sin \alpha_1}{\sin \delta} + G \cos \alpha' \end{cases} \tag{7}$$

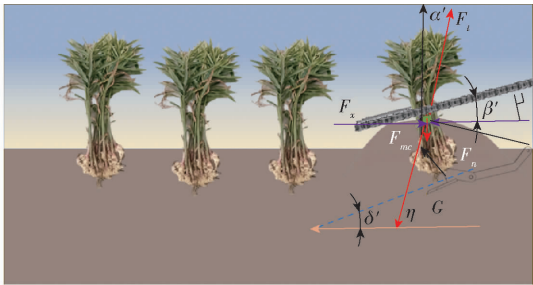


图 5 挖采夹拔取示意图

Fig. 5 Schematic of entire ginger plant extraction

图中 F_t ——收获夹持链条对生姜整株的提拉力, N
 F_{mc} ——铲面对植株的支持力
 η ——收获拔取时土壤对生姜整株的阻力, N
 F_x ——拔取时夹持链条对生姜茎秆的夹持力, N
 F_n ——收获拔取时挖掘铲对生姜整株支持力, N
 G ——生姜整株重力, N
 δ' ——挖掘铲面倾角, ($^\circ$)
 α' ——植株受力方向与竖直方向的夹角
 β' ——生姜拔起时水平方向与夹持链条夹角
 μ_b ——生姜整株与夹持链条间的摩擦因数

2.5 空间位置关系分析

在收获过程中,生姜的挖掘铲倾斜角度与夹拔装置的倾斜角度存在一定的配合关系,会直接影响收获效率以及后期的姜秧分离阶段^[27],由 2.1 节可知,生姜在土壤中分布呈现无规律性,如图 6 所示,空间位置的配合影响到输送效率,避免出现拥堵的情况。

在生姜植株提拉阶段,收获机的收获速度 v_d 和

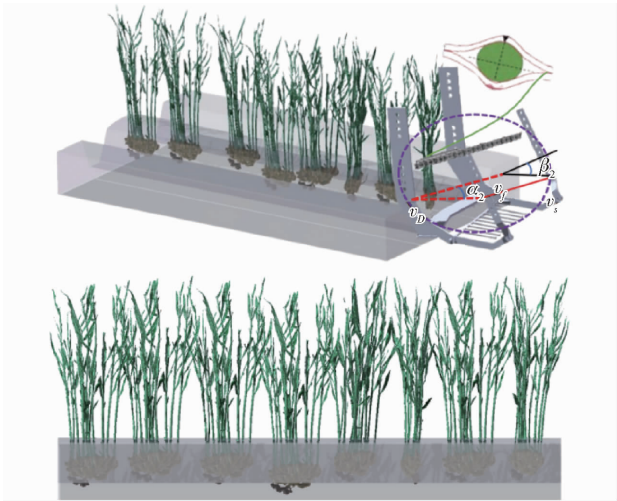


图 6 生姜植株空间分布示意图

Fig. 6 Schematic of ginger plant spatial distribution

链条的夹持输送速度 v_f 关系式为

$$\begin{aligned} v_f \sin(\beta_2 - \alpha_2) &= v_d \sin \beta_2 \tag{8} \\ \alpha_2 &= \arccos \frac{v_f^2 + v_d^2 - v_s^2}{2 v_f v_d} \end{aligned}$$

式中 v_s ——拔取阶段生姜植株实际速度, mm/s
 α_2 ——实际拉拔角, ($^\circ$)
 β_2 ——喂入倾角, ($^\circ$)
 v_d ——收获机行驶速度

3 EDEM – RecurDyn 耦合仿真

挖采夹拔交互机理主要涉及生姜-土壤-挖采夹拔装置交互模型^[28-29],直接影响植株运动轨迹、土块破碎程度等关键参数,现国内很多研究土壤交互作用采用离散元方法,但 EDEM 本身存在忽略自由度的问题,尽管土壤-农机相互作用研究已较成熟,但针对作物-土壤-机具三元系统的研究仍存在明显不足,特别是在挖拔动力学领域。本研究采用 EDEM 与 RecurDyn 耦合仿真^[30],弥补 EDEM 自由度缺失的问题,为生姜的联合收获提供理论基础。

3.1 仿真模型建立

本研究基于 Solidworks 构建装置以及生姜三维参数化模型,采用 EDEM 离散元软件实现土壤动力学分析并且生成生姜颗粒填充模型,为准确模拟生姜收获的动力学过程并综合考虑土壤的物理机械特性,采用单球体、双球体、三球体、四方体四球、直线型四球和四面体型四球生成土壤床,考虑到土壤之间的粘聚特性,在颗粒之间设置了 Bond 键;最终采用 1 620 个颗粒生成生姜颗粒填充模型(颗粒直径范围 3.9 ~ 20 mm);为提升 EDEM 仿真效率,模拟土壤颗粒床规格(宽 × 高 × 长)为 200 mm × 350 mm × 600 mm,土壤颗粒直径为 2 mm,接触半径为 2.5 mm,如图 7 所示。

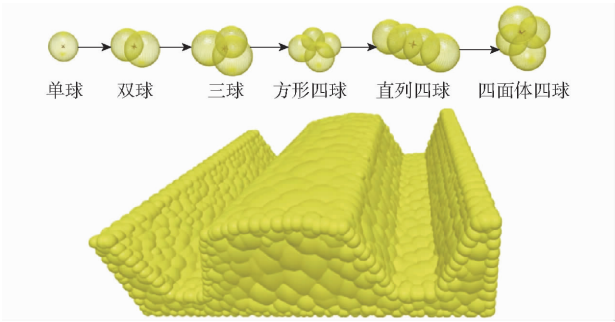


图 7 土壤颗粒床示意图

Fig. 7 Schematic of soil particle bed

参考已有的研究和土壤机械参数的试验测试,确定 Hertz - Mindlin with Bonding 模型参数如表 2 所示。

表 2 挖采夹拔接触模型参数

Tab. 2 Parameter settings for excavation-clamping-pulling contact model

对象	参数	数值
土壤颗粒	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 360
	泊松比	0. 4
	剪切模量/Pa	$1. 00 \times 10^6$
	接触半径/mm	2. 5
茎秆颗粒	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	213. 5
	泊松比	0. 28
	剪切模量/Pa	$1. 8 \times 10^6$
	半径/mm	10
土壤颗粒-土壤颗粒	碰撞恢复系数	0. 2
	动摩擦因数	0. 3
	静摩擦因数	0. 4
茎秆颗粒-茎秆颗粒	碰撞恢复系数	0. 5
	动摩擦因数	1. 2
	静摩擦因数	0. 8
土壤颗粒-挖掘铲	碰撞恢复系数	0. 4
	动摩擦因数	0. 32
	静摩擦因数	0. 01
茎秆颗粒-夹持链条	碰撞恢复系数	0. 5
	动摩擦因数	0. 09
	静摩擦因数	0. 85
粘结键单位面积法向刚度/($\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$)		$2. 40 \times 10^7$
粘结键单位面积切向刚度/($\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$)		$1. 20 \times 10^7$
粘结颗粒比例系数		1. 1

3. 2 耦合仿真模型建立

将 Solidworks 构建的模型另存为 Step 格式导入到 RecurDyn 软件中,调整坐标与 EDEM 坐标相同,利用 Professional 板块中的 CMotion(G)对挖掘铲施加 Joints(约束),Y 方向的约束设置为速度,范围是 0. 2 ~ 0. 4 m/s,以位移设置振动频率为正弦波,设置 Z 方向运动约束,公式为 $5 * \text{SIN}(31 * \text{TIME})$,最后在 External SPI 中创建 Wall 文件与 EDEM 进行耦合联动,实现生姜-土壤-挖采夹拔装置交互模型仿真,如图 8 所示。

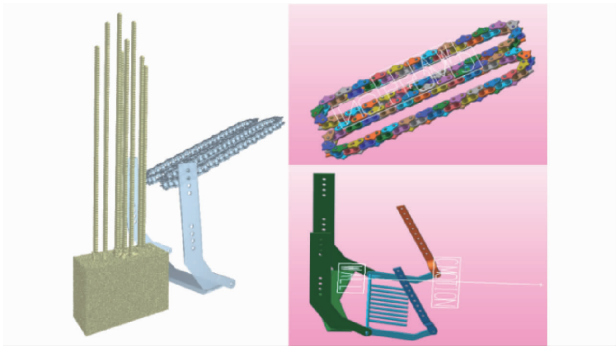


图 8 生姜-土壤-挖采夹拔装置交互模型图

Fig. 8 Interactive model diagram of ginger - soil - interaction and harvesting device (including digging, clamping, and pulling mechanisms)

3. 2. 1 土壤 Bond 键断裂分析

为探究挖采过程中对土壤破碎的效果,采用 EDEM 中 Bonding v2 进行 Bond 键的设立,即模拟土壤之间存在的粘结力,以土壤 Bond 键的断裂情况反映土壤的破碎程度,如图 9 所示。

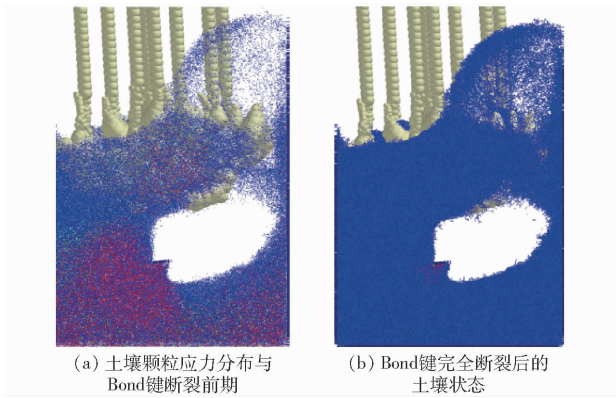


图 9 土壤 Bond 键断裂情况

Fig. 9 Bond breakage status in soil particles

基于控制变量法开展的单因素试验结果表明,土壤中 Bond 键的破碎数量受各操作参数的显著影响,并呈现明确的非线性响应特征。具体而言,Bond 键破碎数量随前进速度的增加先增大后减小,最终逐渐趋于稳定,反映出系统在高速条件下的能量饱和效应;随振动频率的提升,该数量持续增大,表现出明显的频率强化作用;而随挖掘铲倾斜角与夹拔装置倾斜角之比的增大,其变化则呈先增后减的趋势,表明存在一最优几何配置来最大化界面破坏效应。

Bond 键断裂数量是离散元仿真中用于量化土壤内部粘结失效的虚拟量化指标。为验证该指标与实际作业效果的物理关联,本研究在田间验证试验中,同步采用 TPY - 2 土壤硬度计测量了优化参数作业后的土壤硬度(土壤穿透阻力)。结果如图 10 所示,仿真中 Bond 键断裂数量的增加,与田间实测土壤穿透阻力的下降呈显著相关。这证明该仿真指

标能有效反映实际土壤团聚结构的破碎程度,从而为通过仿真优化来降低实际挖掘阻力、改善碎土效果提供了理论依据。

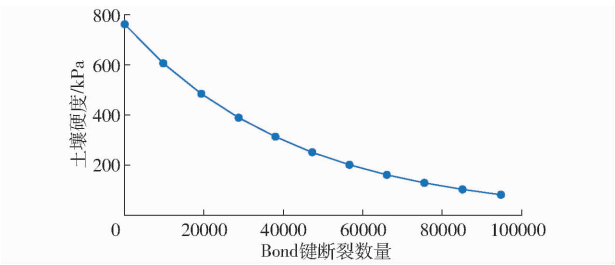


图 10 Bond 键断裂数量仿真曲线

Fig. 10 Simulation curve for number of bond breakages

3.2.2 含土率分析

在生姜机械化收获过程中,土壤与根茎之间的粘附现象导致大量土壤残留于姜块表面,这一现象显著降低生姜的商品品质,并增加产后处理环节的劳动强度与经济成本。具体而言,高含水率土壤在挖掘过程中易形成塑性变形,加剧姜块-土壤的粘结力;同时,生姜表面凹凸不平的形态特征为土壤颗粒提供了机械锚固点,进一步阻碍了土壤的自动脱落。因此,含土率是生姜机械化收获的一项重要指标,本研究中以土壤颗粒流动速度以及方向反映清土效果,如图 11 所示。

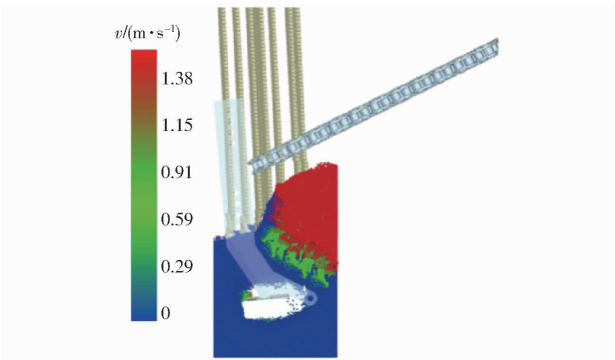


图 11 生姜-土壤挖采夹拔过程土壤速度矢量

Fig. 11 Velocity vector field of soil during ginger-soil excavation-clamping-pulling process

通过控制变量试验,明确各因素对土壤颗粒流动速度的影响规律:前进速度的提升初期增强土壤的剪切扰动,导致流速增加,但达到一定阈值后,扰动充分,流速增长趋于饱和;振动频率的增大直接提升土壤的破碎程度,故流速呈单调递增响应;而倾角比的变化影响土壤的导向与约束,比值过小或过大均会形成阻滞,从而导致流速呈现先增后降的抛物线特征,这预示了一个最优的几何配置参数。

4 试验

4.1 试验方法与结果

本收获装置的作业性能受多个操作参数的协同

影响。前进速度通过调控挖掘铲与振动筛的工作倾角,直接影响姜块的完整性与夹持输送的通过性,若参数失配,将引发姜块断裂或秧茎切割损伤。与此同时,挖掘与清土部件的振动频率共同决定了附着土壤的清除率,是保证姜块收获后表面洁净、提升商品价值的关键。

综上所述,本文选取收获装置前进速度 v 、挖掘铲与振动筛振动频率 f 、挖掘铲倾斜角与夹拔装置倾斜角之比 Ω 作为试验因素,进行单因素仿真试验,以土壤 Bond 键断裂数量 Y_1 、姜块附土率 Y_2 作为试验指标进行单因素台架试验,开展三因素三水平的二次旋转正交组合多因素优化试验,共计 17 组。试验因素及编码如表 3 所示,试验设计方案与结果如表 4 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

表 3 试验因素编码

Tab. 3 Code of test factors

编码	因素		
	前进速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	振动频率/ Hz	倾角比
-1	0.30	4	0.90
0	0.35	5	0.95
1	0.40	6	1.00

表 4 试验方案与结果

Tab. 4 Experimental program and results

试验号	因素			Bond 键断裂 数量 Y_1 /个	附土率 Y_2 /%
	X_1	X_2	X_3		
1	0	0	0	95 905	9.93
2	1	0	-1	77 452	11.13
3	0	0	0	99 966	10.35
4	0	0	0	96 363	9.46
5	1	1	0	70 816	11.63
6	0	-1	1	71 646	13.23
7	-1	0	-1	75 907	11.52
8	0	0	0	93 133	10.05
9	0	1	1	88 282	11.28
10	0	1	-1	82 509	10.54
11	-1	0	1	79 420	11.62
12	1	-1	0	65 528	14.13
13	-1	-1	0	64 453	13.71
14	0	0	0	99 437	9.83
15	1	0	1	79 331	12.54
16	-1	1	0	79 855	11.95
17	0	-1	-1	70 099	13.51

试验田选在生姜种植区安丘农场进行,试验选取有机生姜以及普通大姜进行,根据田间实际生长方式选取横式生长、竖式生长、倾斜式生长等进行挖采夹拔收获,进行多次重复试验,试验结果取平均值。

对表中的 3 种因素与两种指标用数据处理软件 Design-Expert 13 进行多元线性回归方程拟合以及方差分析,由表 5 进行回归方程方差分析可知,Bond 键断裂数量、附土率的回归模型拟合度均 $P < 0.000\ 1$,模型极显著,回归模型失拟项 $P > 0.05$,失拟项不显著,Bond 键断裂数量与附土率决定系数 R^2 分别为

0.976 8 和 0.981 3,表明回归模型拟合度高。去掉不显著的变量项后,回归方程为

$$Y_1 = 96\ 960.80 - 813.50X_1 + 6\ 217.00X_2 + 1\ 589.00X_3 - 13\ 452.15X_1^2 - 13\ 345.65X_2^2 - 5\ 481.15X_3^2 \quad (9)$$

$$Y_2 = 9.92 + 0.078\ 8X_1 - 1.15X_2 + 0.246\ 2X_3 + 1.25X_1^2 + 1.68X_2^2 + 0.531\ 7X_3^2 \quad (10)$$

表 5 方差分析
Tab.5 ANOVA

方差来源	土壤 Bond 键断裂数量					附土率				
	平方和	自由度	均方	F	P	平方和	自由度	均方	F	P
模型	2.17×10^9	9	2.41×10^8	32.68	$<0.000\ 1$	33.41	9	3.71	40.8	$<0.000\ 1$
X_1	5.29×10^6	1	5.29×10^6	0.718 6	0.424 6	0.049 6	1	0.049 6	0.545 3	0.484 3
X_2	3.09×10^8	1	3.09×10^8	41.97	0.000 3	10.53	1	10.53	115.78	$<0.000\ 1$
X_3	2.02×10^7	1	2.02×10^7	2.74	0.141 7	0.485 1	1	0.485 1	5.33	0.054 3
X_1X_2	2.56×10^7	1	2.56×10^7	3.47	0.104 7	0.136 9	1	0.136 9	1.5	0.259 6
X_1X_3	6.68×10^5	1	6.68×10^5	0.090 6	0.772 2	0.429	1	0.429	4.72	0.066 5
X_2X_3	4.47×10^6	1	4.47×10^6	0.606	0.461 8	0.260 1	1	0.260 1	2.86	0.134 7
X_1^2	7.62×10^8	1	7.62×10^8	103.42	$<0.000\ 1$	6.54	1	6.54	71.93	$<0.000\ 1$
X_2^2	7.50×10^8	1	7.50×10^8	101.79	$<0.000\ 1$	11.94	1	11.94	131.27	$<0.000\ 1$
X_3^2	1.27×10^8	1	1.27×10^8	17.17	0.004 3	1.19	1	1.19	13.09	0.008 5
残差	5.16×10^7	7	7.37×10^6			0.636 9	7	0.091		
失拟	2.03×10^7	3	6.76×10^6	0.864 5	0.528 8	0.215 4	3	0.071 8	0.681 3	0.608 1
误差	3.13×10^7	4	7.82×10^6			0.421 5	4	0.105 4		
总和	2.22×10^9	16				34.05	16			

4.2 参数优化

为最大化土壤破碎率(Bond 键破碎数量)和最小化附土率,对以上试验因素进行多目标优化,利用 Design-Expert 13 中 Optimization 模块进行试验因素优化,试验因素优化目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

经优化获得最佳参数组合:前进速度 0.33 m/s、土壤振动频率 5.4 Hz、挖掘铲与夹持装置倾角比 0.96。在此参数条件下,仿真记录到 95 223 次土壤颗粒间粘结破碎,表明土壤破碎效果显著。

为验证挖采夹拔装置的最优工作参数组合,以广泛种植生姜的安丘市为试验地点进行试验,试验地土壤含水率为 14.36% ~ 16.03%,土壤硬度为 673 ~ 763 kPa,种植深度为 30 ~ 35 mm,生姜茎秆自然长度为 900 ~ 1 400 mm,姜块成熟度高,种植密度为 5 ~ 6 株/m。收获作业期间,设备前进速度为 0.33 m/s,机器沿着 30 m 的核心测试段运行,前方有 10 m 的加速准备段,后方有 10 m 的减速调整段,形成一个完整的 50 m 行程单元。测试分为 3 次重

复,总共进行了 5 次试验。图 12 所展示的是代表性测试现场。为明确生姜在土壤中的空间生长特征,本研究对其地下部分的生长方向与尺寸进行了系统观测,并同步测定了土壤附土率。田间试验中,以铁管标示姜垄沟方向,观测结果表明,姜块在土壤中的生长方向与地上部分并排的枝叶方向一致。以前进速度 0.33 m/s、土壤振动频率 5.4 Hz、挖掘铲倾斜角与夹拔装置倾斜角之比为 0.96,进行田间试验,碎土效果较好,试验后人工分拣全部收获姜块,统计损伤姜块数量,测得生姜综合损伤率为 4.9%,附土率为 9.93%,满足生姜收获装置设计要求。



图 12 田间试验
Fig.12 Field trial

5 结论

(1)设计了一种基于作物-土壤-农机互作机理

的分析方法,并据此研制了一种新型联合式生姜收获装备。通过动力学建模与理论计算相结合的手段,对核心工作部件的运动特性、载荷分布、结构参数及空间配置进行了系统优化。研究证实,采用挖采夹拔协同作业模式可显著改善收获质量,提高收获效率。

(2)利用 EDEM - RecurDyn 耦合仿真方法,建立了生姜-土壤-挖采夹拔装置接触模型,解析了生姜根系、土壤颗粒与挖采夹拔装置之间的相互作用,

采用协同收获机制,依靠仿真数据的计算,优化后的装置提高了土壤破碎效果。

(3)研究通过单因素试验确定参数范围;采用 Box - Behnken 设计构建二次回归模型。田间验证试验表明,当机器以前进速度 0.33 m/s、土壤振动频率 5.4 Hz、挖掘铲与夹持装置倾角比 0.96 的参数组合作业时,可实现 95 223 次土壤粘结破碎,土壤粘附率为 9.93%,挖掘、拔取效果良好。

参 考 文 献

[1] Li W, Li W, Cheng J, et al. Optimization design and experiment of ginger rhizome separation device based on EDEM - RecurDyn software[J]. Smart Agricultural Technology, 2025(12): 101382.

[2] Dash S K, Dwivedy S, Pal U S, et al. Post-harvest practices of ginger in odisha, india-present status and scope for development [J]. AMA-Agricultural Mechanization in Asia Africa and Latin America, 2015, 46(4): 28 - 38.

[3] Moreira S I, Dutra D D, Rodrigues A C, et al. Fungi and bacteria associated with post-harvest rot of ginger rhizomes in Espirito Santo, Brazil[J]. Tropical Plant Pathology, 2013, 38(3): 218 - 226.

[4] Zhang X X, Liu J, Zhang C L, et al. Design and experimentation of small potato harvester for heavy soil in hilly and mountainous areas[J]. Agronomy, 2024, 14(9):1 - 5.

[5] Yang X, Wu Y S, Wang L H, et al. Design and performance test of 4UJ - 180A potato picking and bagging machine[J]. Agriculture, 2024, 14(3):454.

[6] Zhang P C, Li F G, Wang F Y. Optimization and test of ginger-shaking and harvesting device based on EDEM software[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 213:108257.

[7] 魏忠彩, 王业炜, 李学强, 等. 弹性揉搓式马铃薯联合收获机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(14): 60 - 69. Wei Zhongcai, Wang Yewei, Li Xueqiang, et al. Design and test of elastic rubbing potato combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(14): 60 - 69. (in Chinese)

[8] 黄新平, 徐瑞华, 黄广杰, 等. 铲筛组合式生姜收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(5): 309 - 318. Huang Xinping, Xu Ruihua, Huang Guangjie, et al. Design and test of shovel-screen combined ginger harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(5): 309 - 318. (in Chinese)

[9] 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)

[10] Wang F Y, Qiu Z C, Pan Y F, et al. DEM-based parameter optimization and tests of digging green onions[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2023, 16(4): 126 - 133.

[11] Wan W L, Zhang D K, Wang X, et al. Parameter optimization and test of harvesting device for digging and pulling green onions based on discrete element analysis[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2025, 18(1): 165 - 172.

[12] Wu B, Huang T C, Qiu X X, et al. Design and experimental study of potato-soil separation device for sticky soils condition [J]. Applied Sciences, 2021, 11(22):110959.

[13] Ping Z, Guo R J, Jin T C, et al. Collision simulation of potato tubers for mechanized harvesting[J]. Journal of Food Process Engineering, 2023, 46(3):362 - 373.

[14] 侯加林, 刘鲁鹏, 赵桂洋, 等. 基于 EDEM - MFBD 的大蒜变刚度柔性夹持输送装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(6): 362 - 373. Hou Jialin, Liu Lupeng, Zhao Guiyang, et al. Design and test of variable-stiffness flexible clamping and conveying device for garlic based on EDEM - MFBD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(6): 362 - 373. (in Chinese)

[15] Zhou R D, Ding J X, Wang Y J, et al. Research on optimization of digging shovel parameters for a garlic harvester based on soil damage evolution[J]. Agronomy, 2025, 15(4):841.

[16] Wei Z, Li H, Sun C, et al. Experiments and analysis of conveying device for soil separation and clod-crushing condition[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2019, 35(6): 987 - 996.

[17] Fan J L, Li Y Y, Luo W W, et al. An experimental study of stem transported-posture adjustment mechanism in potato harvesting[J]. Agronomy, 2023, 13(1):234.

[18] Zhang X L, Qiu L Q, Sun Q, et al. Design and test of a single-row harvesting and cutting integrated handheld garlic harvester [J]. Applied Sciences, 2023, 13(12):7077.

[19] Zhang P, Xu H B, Zhuo X R, et al. Biotribological characteristic of peanut harvesting impact-friction contact under different

conditions[J]. *Agronomy*, 2022, 12(6):1256.

[20] Zhao Z X, Deng W G, Hu X, et al. Investigation of impact contact force testing and damage analysis on potatoes[J]. *Agriculture*, 2024, 14(10):1740.

[21] Li Z W, Sun W, Wang H C, et al. Study on the process of soil clod removal and potato damage in the front harvesting device of potato combine harvester[J]. *Agriculture*, 2024, 14(11):1047.

[22] Li J W, Li X Y, Hu B, et al. Analysis of the resistance reduction mechanism of potato bionic digging shovels in clay and heavy soil conditions[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 214:108315.

[23] Wang Q H, Yu Z Y, Zhang Y H, et al. Experimental study of a 4HLB－4 half-feed four-row peanut combine harvester[J]. *Agronomy*, 2022, 12(12):3094.

[24] Liu D Q, Liu L, Qian K, et al. Design and testing of a peanut roller digging harvester[J]. *Agriculture*, 2025, 15(3):265.

[25] Liu C C, Wu N, Cheng G S, et al. Design and optimization of a lightweight and simple self-propelled crawler potato combine harvester[J]. *Agronomy*, 2025, 15(1):65.

[26] Liu C C, Wu F, Gu F W, et al. Recent research progress on key technologies and equipment for mechanized potato harvesting [J]. *Agriculture*, 2025, 15(7):675.

[27] Wang B K, Hu Z C, Wu F, et al. Analysis and evaluation of harvest quality effectiveness of carrot clamping and conveying device[J]. *Agriculture*, 2025, 15(3):275.

[28] Liang Z W, Huang Y, Li D P, et al. Parameter determination of a viscoelastic-plastic contact model for potatoes during transient collisions[J]. *Biosystems Engineering*, 2023, 234: 156－171.

[29] Li Y Y, Fan J L, Hu Z C, et al. Calibration of discrete element model parameters of soil around tubers during potato harvesting period[J]. *Agriculture*, 2022, 12(9):1475.

[30] 侯加林, 张二鹏, 张康博, 等. 基于 DEM－MFBD 的辣椒移栽机取投苗装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(12): 46－57,87.

Hou Jialin, Zhang Erpeng, Zhang Kangbo, et al. Optimization design and test of seedling picking and throwing device of plug seeding transplanter based on DEM－MFBD [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(12):46－57,87. (in Chinese)

(上接第 178 页)

[34] Zhao L, Huang Y, Ran X, et al. Nitrogen transformation mechanisms and compost quality assessment in sustainable mesophilic aerobic composting of agricultural waste[J]. *Sustainability*, 2025, 17(2): 575.

[35] Aslam D, Horwath W, Vandergheynst J. Comparison of several maturity indicators for estimating phytotoxicity in compost-amended soil[J]. *Waste Management*, 2008, 28(11): 2070－2076.

[36] Kong Y, Zhang J, Zhang X, et al. Applicability and limitation of compost maturity evaluation indicators; a review[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 489: 151386.

[37] 辛荣斌. 生物质燃烧过程中挥发性有机物释放特性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.

[38] Shen B, Zheng L, Zheng X, et al. Insights from meta-analysis on carbon to nitrogen ratios in aerobic composting of agricultural residues[J]. *Bioresource Technology*, 2024, 413: 131416.

[39] Ji Z, Zhang L, Liu Y, et al. Evaluation of composting parameters, technologies and maturity indexes for aerobic manure composting: a meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 886: 163929.

[40] 熊劲鹏. 奶牛粪覆膜式好氧堆肥氮素转化及主要含氮气体产排机理[D]. 北京: 中国农业大学, 2024.

Xiong Jinpeng. Mechanisms of nitrogen transformations and main nitrogenous gas emissions during dairy manure membrane-covered aerobic composting[D]. Beijing: China Agricultural University, 2024. (in Chinese)

[41] Luo L, Shen Y, Sun H, et al. The pattern of greenhouse gas emissions by membrane-covered aerobic composting of vegetable waste: from microbial community composition and function standpoint[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2026, 14: 120874.