董汝宁,段宏兵,韩明兴,等.双层摆动式贝母药土分离装置设计与试验[J].华中农业大学学报,2026,45(1):319-330.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.01.029

双层摆动式贝母药土分离装置设计与试验

董汝宁[1],段宏兵[1,2],韩明兴[1,3],张粉[1],李彦龙[4]

1.华中农业大学工学院,武汉 430070; 2.农业农村部马铃薯生物学与生物技术重点实验室,武汉 430070;
3.农业农村部长江中下游农业装备重点实验室,武汉 430070; 4.定西市三牛农机制造有限公司,定西 743022

摘要 针对贝母收获机在药土分离方面存在相近粒径药土分离困难、收净率较低的问题,设计一种高效碎土的贝母药土分离装置。基于运动学和动力学分析,确定影响工作性能的关键参数和取值范围,构建DEM-MBD耦合仿真模型,以筛面倾角、曲柄半径、曲柄转速和碎土辊转速为试验因素,以收净率和分离效率为试验指标,开展中心复合设计试验,建立收净率和分离效率与各显著因素之间的回归模型。结果显示:曲柄半径和曲柄转速的增大均使收净率和分离效率增大;筛面倾角的增大则使二者呈现相反的趋势,过大的倾角导致物料堵塞在前端,无法向后运动,但随着摆动筛的运行,土壤不断向下筛分。基于多目标灰狼优化算法(multi-objective grey wolf optimizer,MOGWO),对模型进行求解,获得最优解组合:筛面倾角为1.6°、曲柄半径为39.7 mm、曲柄转速为332 r/min、碎土辊转速为284 r/min,此时收净率达到93.72%,分离效率达到92.09%。在相同条件下的台架验证试验结果显示,收净率为91.05%,分离效率为90.17%;台架试验结果与仿真优化后的结果基本保持一致,相对误差小于3%,满足贝母药土分离要求。

关键词 贝母; 收获机; 药土分离; 耦合仿真; 多目标灰狼算法

中图分类号 S225.7 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2026)01-0319-12

贝母(*Fritillaria*)是一种珍贵的根茎类中药材,其药用部位为地下鳞茎,具有润肺止咳、散结消痈等功效[1]。在贝母的种植全流程中,收获环节劳动强度大、作业效率低,是劳动力成本占比最高的阶段,伴随农村劳动力结构改变,对机械化装备需求急剧增长。市场上现有的贝母收获机具普遍存在作业效率低下、对不同种植环境适应性欠佳、相近粒径药土分离困难等一系列问题[2]。

分离装置作为根茎类收获机的核心组件,位于初级输送装置之后、收集装置之前,负责接收含杂物料并进行精细分离,其性能优劣直接关乎收获质量的高低、作业过程的稳定性以及设备的使用寿命。

目前,针对贝母分离技术的研究尚处于起步阶段,相关成果较少。卢松卓等[3]精确测定收获期平贝母的物理力学特性与接触参数,据此设计出平贝母等级筛分机的主要参数,敲定筛孔尺寸以及筛分物速度、加速度的取值范围。宋江等[4-5]以及王密等[6]针对山区丘陵平贝母传统收获困境,成功研发出适配手扶拖拉机的4B-1200型收获机,其集刮土、挖掘、筛分等多功能于一体。后续针对该收获机在实际作业中暴露的转弯不便、分土铲易堆土等问题,对分土机构、振动筛优化升级,增设提升机构,经正交试验明确振动筛最佳参数组合,还设计出链条刮板式反向升运器,使升运效率大幅提升。阮烨亮等[7]提出浙贝母机械化收获的二级弧形摆动式碎土机构设想,点明影响碎土性能的关键因素。宋江等[8]针对平贝母筛净率低难题,经物理力学特性试验,提出筛揉分离方案,确定关键参数范围,室内及田间试验证实该方案满足农艺要求。李三平等[9]借助离散元软件构建振动筛仿真模型,优化参数,通过搭建试验平台验证其合理性,为提升平贝母收获效率助力。综上所述,当前贝母分离技术研究多聚焦平贝母、浙贝母等品种。

农业机械存在着“区域性”的特点,有必要对湖北贝母收获关键装置即药土分离装置的结构形式、运动参数等开展研究,为湖北贝母机械化收获机的

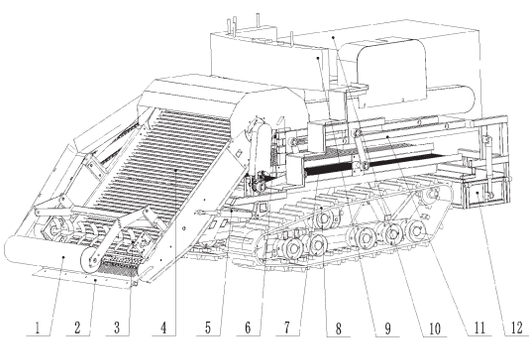
收稿日期:2025-03-17
基金项目:湖北省农机创新发展专项(HBSNYSXZY202336);中央高校基本科研业务费专项(2662024GXPY007)
董汝宁,E-mail:2598827441@qq.com
通信作者:段宏兵,E-mail:duanhb@mail.hzau.edu.cn

研制作出贡献。本研究以湖北贝母为收获对象，重点研究黏壤土环境下粒径相近的药土混合物分离问题，通过理论分析、DEM-MBD耦合仿真、响应面分析和多目标灰狼优化算法确定关键部件的结构和工作参数，求解出分离装置最优工作参数组合，对优化后的数据在相同条件下进行台架试验，验证本研究理论分析与耦合仿真的准确性，以期为提升贝母收获机工作性能提供技术参考，从而为湖北贝母收获机的整机创制提供关键技术参数。

1 材料与方法

1.1 结构及工作原理

1)贝母收获机整机结构与工作原理。贝母收获机由挖掘输送部分、药土分离部分、收集部分和行走底盘部分组成。挖掘输送部分在机具的最前方，由挖掘装置和输送装置组合而成；药土分离部分在机具的后半部，由碎土辊、双层摆动筛等组成；收集部分位于机具的尾部，由收集箱和液压驱动元件等组成；行走底盘部分在机具的下半部，由机架、发动机、变速箱、行走轮系和履带等组成，如图1所示。



1. 限深轮 Depth limiting wheel；2. 挖掘装置 Excavation device；3. 旋转耙齿 Rotating rake teeth；4. 输送装置 Conveying devices；5. 液压缸 Hydraulic cylinders；6. 碎土辊 Crushed soil roller；7. 双层摆动筛 Double-deck swinging screen；8. 行走底盘 Walking chassis；9. 驾驶舱 Cockpit；10. 发动机舱 Engine compartment；11. 机架 Rack；12. 收集箱 Collection box.

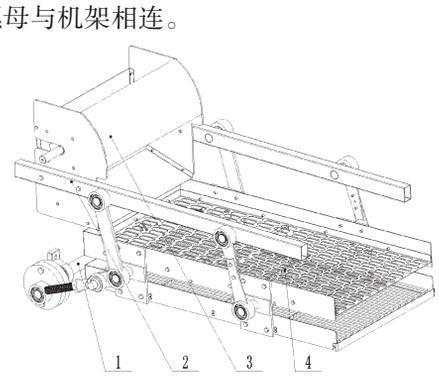
图1 贝母收获机整机结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of complete fritillary bulb harvester structure

在收获作业过程中，挖掘装置首先切入土壤直至限深轮与地表接触并达到所需挖掘深度，土壤团粒与贝母块茎的混合物在机器前进过程中，沿铲壁提升堆积；旋转耙齿破开土壤团粒并将混合物拨送至输送装置，在此实现土壤与块茎的初次分离；提升的混合物从升运装置末端以一定速度落下，经过碎土辊的进一步破碎后，落入双层摆动筛，比贝母块茎小的土壤团粒经过双层摆动筛筛下，落到地表。比贝母块茎较大的土壤团粒与贝母块茎一起落入收集箱，从而完成整个收获过程。

2)药土分离装置结构与工作原理。药土分离装置需满足高效稳定要求。针对收获时土壤易形成大团粒与贝母混杂的问题，通过参数调控碎土辊破碎大土块以减少混杂程度。筛分系统采用双层平筛式结构，相比滚筒式筛分装置其具有显著优势：筛面倾角小、设备高度低，更适合丘陵山地小地块作业；双层设计有效避免单层筛易漏筛的问题，提升筛分稳定性[10]；同时上筛筛面利用系数高，在保证足够筛分面积的前提下增强工艺布置的紧凑性与灵活性，下筛活动杆条的运动在一定程度上使得筛上物料来回运动，防止堵塞。

综合考虑，设计的药土分离装置结构如图2所示，主要由驱动机构、摆动筛机构、碎土辊机构和机架组成。摆动筛机构通过销轴和轴承固定在机架上；碎土辊机构位于摆动筛左上方，其两侧支撑板经螺栓螺母与机架相连。



1. 驱动机构 Drive mechanism；2. 机架 Rack；3. 碎土辊机构 Soil crushing roller mechanism；4. 摆动筛机构 Swing screen mechanism.

图2 药土分离装置结构图

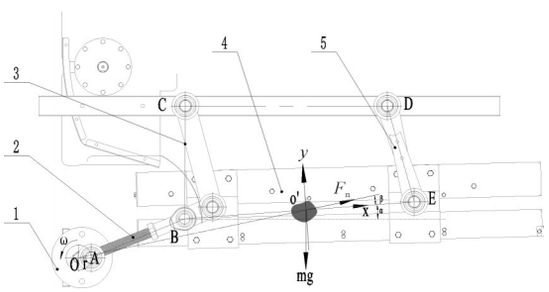
Fig.2 Structure diagram of screening device

药土混合物以一定速度落入碎土辊机构，碎土辊的旋转使土壤初步破碎，其后药土混合物落至摆动筛的筛面，在摆动筛机构中，摆动筛驱动轴带动曲柄连杆机构运转，使得筛面做往复摆动。贝母根茎和土壤在筛面上受到筛面的摩擦力、惯性力以及自身重力的作用，不断地跳动和翻滚。在这个过程中，较小的土壤颗粒和杂质会通过筛面上的筛孔落下，而贝母根茎则由于其尺寸较大，继续留在筛面上向后移动。随着筛面的摆动，贝母根茎逐渐向筛面的出料端移动。在移动过程中，贝母根茎与土壤进一步分离，大部分土壤被筛除。

1.2　关键部件设计

1)摆动筛设计。摆动筛主要由曲柄、筛网、前摆杆、后摆杆和连接板等构成。前后摆杆通过销轴与机架、筛网相连，销轴与机架固定，筛网角度通过后摆杆螺栓进行调节，以在不同工况下实现最佳分离效果。

筛面及药土混合物运动直接影响筛分性能与输送能力，因此需对其进行运动学分析，确定影响药土混合物相对筛面运动的主要参数，为组合摆动式根土分离装置参数选取提供理论依据。药土混合物相对筛面有滑移和抛掷2种状态[11]，为实现土壤破碎、保证筛分效果并及时输送分离物，确定其运动状态为抛掷运动(图3)。



1. 曲柄 Crank；2. 连杆 Connecting rod；3. 前摆杆 Front swing bar；4. 筛网 Screen mesh；5. 后摆杆 Rear swing rod.

图3　筛上物料做抛掷运动时受力分析图

Fig.3　Analysis diagram of force during throwing motion of screened materials

物料在筛面的运动形式和方向由筛子加速度的大小和方向决定，以曲柄最右位置为筛子位移和时间起始相位，规定逆时针角度为正，则筛子的位移、速度、加速度与时间的关系为：

$$x(t)=-r\cos\omega_1 t \tag{1}$$

$$v(t)=r\omega\sin\omega_1 t \tag{2}$$

$$a(t)=r\omega^2\cos\omega_1 t \tag{3}$$

式(1)～(3)中：r为曲柄半径，m；ω_1为曲柄角速度，rad/s；t为时间，s。

对筛面物料发生抛掷时的状态进行受力分析：

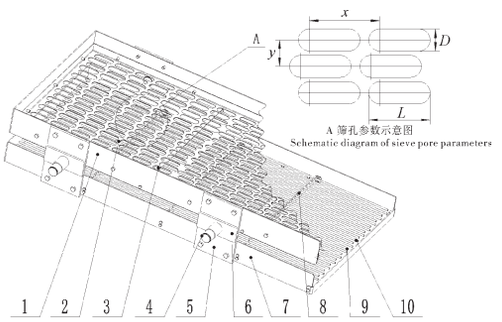
$$\begin{cases} F_x=F_n\cos\beta-mg\sin\alpha \\ F_y=F_n\sin\beta-mg\cos\alpha \\ F_n=m\omega_1^2 r\cos\omega t \end{cases} \tag{4}$$

式(4)中：F_x为物料在x轴上所受分力，N；F_y为物料在y轴上所受分力，N；F_n为摆动筛惯性力，N；α为筛面倾角，(°)；β为筛子摆动方向与筛面的夹角，(°)。

从上述公式可以看出，对筛面物料运动状态的影响因素有筛面倾角、曲柄半径、曲柄转速和筛子摆动方向与筛面的夹角。

2)筛网设计。针对贝母根茎不规则及运动随机性，筛面采用长方形结构，适配曲柄连杆机构实现稳定摆动。筛面的长度方向与贝母块茎的输送方向一致，有利于延长贝母根茎在筛面上的停留时间，使其与土壤充分分离；宽度方向则根据贝母收获机的整体结构和工作效率要求进行设计，确保在满足筛分需求的同时，不会增加过多的设备尺寸和质量。

摆动筛主要由上筛网、下筛网、筛面框架和筛网连接板等组成，如图4所示。其中，上层筛网由冲孔筛构成，筛孔呈长圆形，该部分主要利用去土能力强的优点，将药土混合物进行初步分离，便于后续筛分作业；下层筛筛面由平行等距且长短不同的杆条相间排列组成，长、短杆条长度相差8 mm，间隔固定在筛面横向固定架上的孔中，随着摆动筛的运动在物料输送方向移动，防止土壤和贝母根茎堵塞筛面。相邻2层筛网之间以筛网连接板连接。



1. 上筛网框架 Upper screen frame；2. 冲孔筛 Punching screen；3. 上筛网支撑架 Upper screen support frame；4. 连接轴头 Connecting shaft head；5. 筛网连接板 Mesh connection plate；6. 筛网连接加固板 Mesh connection reinforcement plate；7. 下筛网框架 Lower mesh frame；8. 杆条固定板 Rod fixing plate；9. 短杆条 Short rod；10. 长杆条 Long rod.

图4　筛网装置结构示意图

Fig.4　Schematic diagram of sieve device structure

为了解决药土混合物下落时筛面前端易堵塞问题，采用长圆形筛孔，前端大孔快速筛除大颗粒土壤，后端小孔精细分离贝母根茎与土壤，阶梯式结构减少堵塞。筛孔大小根据贝母的平均粒径进行设计，经过对大量贝母样本的测量和统计分析，得出其三轴尺寸概率分布如图5所示。以筛长方向为横向，筛宽方向为纵向，确定前端筛孔尺寸为长度L=70 mm、宽度D=25 mm、横向孔距x=80 mm、纵向孔距y=30 mm；后端尺寸设计为长度L=60 mm、宽度D=20 mm、横向孔距x=68 mm、纵向孔距y=25

mm，如图4中A所示。

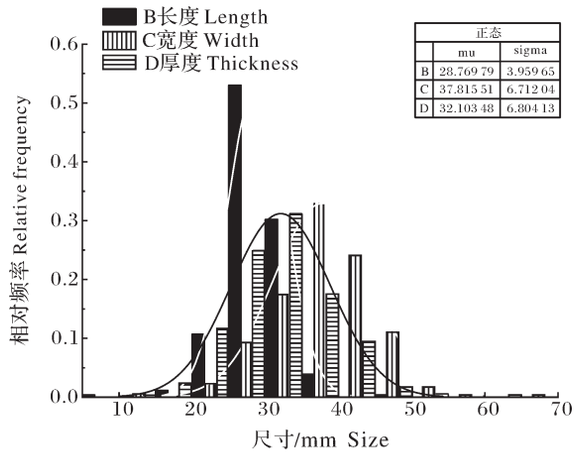


图5 贝母三轴尺寸分布图

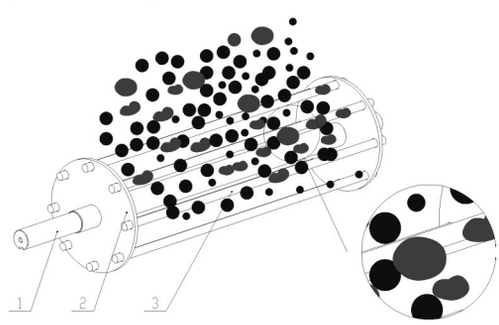
Fig.5 Fritillaria three-axis size distribution diagram

筛分效率与筛面利用系数正相关，选用交错排列方式可显著提升开孔率及有效筛分面积，在保证筛面强度的同时增大筛分效率。筛面利用系数K_d：

$$K_d=\frac{DL-(1-\frac{\pi}{4})D^2}{xy} \tag{5}$$

式(5)中：K_d为筛面利用系数；D为筛孔宽度，mm；L为筛孔长度，mm；x为横向孔距，mm；y为纵向孔距，mm。由公式(5)可得：前端筛面利用系数K_{d1}=0.67，后端筛面利用系数K_{d2}=0.66。

3)碎土辊设计。碎土辊不仅能促进贝母与土壤分离，还能提高土壤破碎率[12-13]。由此在摆动筛的上部设计碎土辊(图6)，该部件主要由旋转圆盘、杆条和驱动轴组成，杆条焊接在旋转圆盘表面，旋转圆盘焊接在驱动轴上。



1.驱动轴 Drive shaft；2.旋转圆盘 Rotating disc；3.杆条 Rod.

图6 碎土辊示意图

Fig.6 Crushed soil roller

贝母收获机械的碎土辊参数设计中，冲击力与碎土效果及贝母损伤呈现显著关联性[14]。虽然增大冲击力能够提升土壤破碎效率，但过大的动态载荷易导致贝母破碎。因此，基于动量定理的动力学建模成为确定最优转速的核心方法。以碎土辊-贝母接触碰撞模型为研究对象，建立坐标系(图7)。设贝母的入射速度为v_0，与碎土辊表面切向方向夹角为θ。

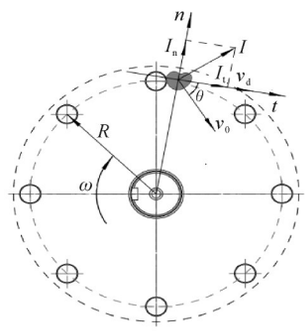


图7 贝母受力分析图

Fig.7 Force analysis diagram of fritillaria

$$\begin{cases} v_t=v_0\cos\theta \\ v_n=v_0\sin\theta \\ v_d=\omega_2 R \end{cases} \tag{6}$$

式(6)中：v_t为贝母与碎土辊碰撞前的切向速度，m/s；v_n为贝母与碎土辊碰撞前的法向速度，m/s；v_d为碎土辊线速度，m/s；v_0为贝母碰撞前速度，m/s；θ为贝母碰撞前速度方向与切向方向的夹角，(°)；ω_2为碎土辊角速度，rad/s；R为碎土辊半径，m。

根据动量守恒定律，碰撞过程可分解为：

$$\begin{cases} I_t=m(v_d-v_t) \\ I_n=mv_n(1+e) \\ \left|\vec{I}\right|=\sqrt{I_t^2+I_n^2}\leqslant F\cdot\Delta t \end{cases} \tag{7}$$

式(7)中：I_t为贝母与碎土辊碰撞过程的切向冲量，N/s；I_n为贝母与碎土辊碰撞过程的法向冲量，N/s；I为贝母与碎土辊碰撞过程的冲量，N/s；m为贝母质量，取0.03 kg；e为贝母与碎土辊碰撞恢复系数；F为贝母发生破碎临界力，N；Δt为碰撞时间，s。

将冲量分量代入约束条件，化简得：

$$\left(\frac{m(v_d-v_t)}{\Delta t}\right)^2+\left(\frac{mv_n(1+e)}{\Delta t}\right)^2\leqslant F^2 \tag{8}$$

根据单轴压缩试验[15]测得贝母破碎时所需的力为F=83.96 N，可得：

$$F\geqslant\frac{m}{\Delta t}\sqrt{(\omega_2 R-v_0\cos\theta)^2+{v_0}^2\sin^2\theta(1+e)^2} \tag{9}$$

由式(9)可知，贝母发生破碎临界力F主要与碎土辊角速度ω_2、碎土辊半径R、贝母发生碰撞前的速度v_0和贝母入射角θ等有关。由于土壤非均质性和喂入随机性扰动呈不可控性，因此主要聚焦于碎土辊半径和角速度的协同优化，碎土辊半径增大虽然

能够提升处理量，却导致能耗增长，同时也加剧与摆动筛的运动干涉并削弱设备机动性；为此将半径压缩至R=75 mm以降低惯性负载并提升空间紧凑性，同时将角速度限定至20～30 rad/s，对应转速为190.99～286.49 r/min，其既满足破碎临界力约束，又实现单位功耗降低。

4）主要参数范围选择。根据文献[16]及前期试验发现，曲柄转速、曲柄半径、筛子倾角显著影响筛分性能，而筛子倾角和筛子摆动方向与筛面的夹角对筛分性能的影响不大，因此不考虑筛子倾角和筛子摆动方向与筛面的夹角对筛分性能的影响。选定筛面倾角范围为0°～6°、曲柄半径范围为30～40 mm、曲柄转速范围为238.74～334.24 r/min、碎土辊转速范围为190.99～286.49 r/min。

1.3　基于DEM-MBD的药土分离装置性能仿真

1）颗粒模型建立及接触模型选择。在收获贝母时，药土混合物中除了贝母、土壤团粒以外还有少量的石块和杂草茎干。由于种植农艺及气候的影响，茎叶草在收获前期的药土混合物中占比甚少，因此在仿真过程中主要考虑药土分离。为了更好地模拟土壤破碎过程，采用可分裂的土壤模型，而EDEM中Bonding模型[17]常用于模拟颗粒间的粘结行为。该模型通过定义颗粒间的粘结强度，模拟在外力作用下粘结断裂的动态过程[18]，因此选择Hertz-Mindlin with Bonding V2模型作为EDEM仿真模型模拟土壤颗粒间的复杂相互作用。

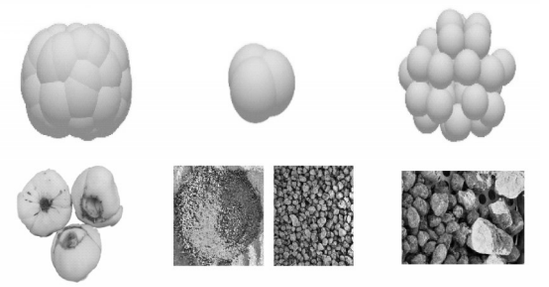
采用EDEM Bonding V2模型进行土壤模型的建立，即用多个小球通过Bond键的形式形成实际的土壤模型；采用多球聚合颗粒模型来表示贝母颗粒，三球聚合颗粒模型与Bond粘结模型分别表示不同粒径范围的土壤颗粒。试验所用土壤采自华中农业大学，选择与湖北贝母种植区土壤条件一致的黏壤土，其土壤类型在湖北贝母主产区具有广泛的代表性，其物理特性能够反映大多数湖北贝母种植区的实际情况。通过五点采样法对深度200 mm、面积为1 m^{2}的土壤颗粒的粒径尺寸和质量的测量，结合1 m^{2}内贝母的产量及粒径分布，得到如表1所示的贝母粒径与土壤颗粒粒径的分布情况，并以此构建贝母与土壤颗粒的离散元模型，如图8所示。

2）几何仿真模型建立。使用三维建模软件CREO建立模型，再将装配好的模型转化为stp.格式导入到RecurDyn中进行动力学仿真。如图9所示，RecurDyn可以实现药土分离装置中各部分的运动，

表1　颗粒粒径分布表

Table 1　Table of particle size distribution

颗粒类型 Particle type	粒径范围/mm Particle size range	比例/% Proportion
A贝母 Fritillarias	14～65	4.15
B土壤 Soil	＜14	28.75
C土壤 Soil	＞14	67.10



A:贝母模型 Fritillaria model　B:<14 mm土壤模型 <14 mm soil model　C:>14 mm土壤模型 >14 mm soil model

图8　颗粒模型

Fig.8　Particle model

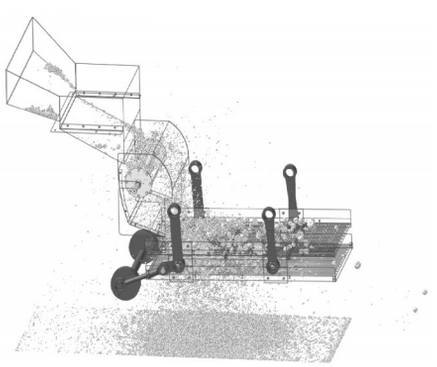


图9　RecurDyn 模型

Fig.9　RecurDyn model

虽然药土分离装置结构较为简单，但其中零件众多，因此，需要在不影响机构正常运行的前提下将模型简化处理，减少不必要的约束，提高建模效率和仿真效率。

3）仿真参数确定。采用Hertz-Mindlin no slip（无滑动接触模型）作为贝母间、土壤与贝母间、土壤与钢材间和贝母与钢材间的接触模型；Hertz-Mindlin with Bonding V2粘结模型作为大粒径土壤间的接触模型。

药土分离装置关键部件采用钢材，土壤和钢的材料物理参数参照表2[19-20]，以湖北主产区栽培的贝母块茎为试验材料，系统测定了其基本物理特性参数。通过接触特性测定装置，获取了贝母与钢板间的静摩擦系数、动摩擦系数、弹性碰撞参数，以及块茎间相互作用参数等重要数据。运用EDEM离散元

仿真软件开展数值标定试验，对所测参数的有效性进行验证，相关接触力学参数参照表3[21]，Bonding V2仿真参数如表4所示[22]。

表2 材料物理参数

Table 2 Physical parameters of materials

项目 Item	泊松比 Poisson's ratio	密度/(kg/m³) Density	剪切模量/MPa Shear modulus
钢 Steel	0.35	7.83×10^3	7.27×10^4
贝母 Fritillarias	0.46	1.10×10^3	2.53
土壤 Soil	0.30	2.65×10^3	1.30

表3 接触力学参数

Table 3 Contact mechanics parameters

项目 Item	碰撞恢复系数 Coefficient of restitution	静摩擦因数 Coefficient of static friction	动摩擦因数 Coefficient of rolling friction
土壤-土壤 Soil-soil	0.200	0.400	0.030
土壤-贝母 Soil-fritillarias	0.050	0.450	0.010
土壤-钢 Soil-steel	0.300	0.500	0.050
贝母-贝母 Fritillarias-fritillarias	0.591	0.655	0.042
贝母-钢 Fritillarias-steel	0.600	0.538	0.100

表4 Bonding V2参数表

Table 4 Bonding V2 parameter table

参数 Parameters	土壤-土壤 Soil-soil
单位面积法向刚度/(N/m³) Normal stiffness per unit area	4.37×10^7
单位面积切向刚度/(N/m³) Shear stiffness per unit area	1.46×10^7
临界法向应力/Pa Normal strength	4.52×10^5
临界切向应力/Pa Shear strength	3.24×10^5

1.4 药土分离装置工作过程模拟

为开展联合仿真，利用EDEM与RecurDyn之间的耦合接口，在RecurDyn的External SPI模块中将药土分离装置的各个部件导出为耦合文件Wall；在EDEM中导入药土分离装置模型，同时在碎土辊左上方建立一个料仓，用来储存土壤颗粒和贝母根茎离散元模型，模拟药土混合物要落入药土分离装置时的作业场景。按照碎土辊与摆动筛的幅宽以及挖掘深度，设置仿真时的药土混合物的总喂入量为31.3 kg，其中贝母的质量为1.3 kg，土壤颗粒总质量为30 kg。贝母粒径与土壤粒径比例按表1中数据随机生成。仿真时长为10 s，仿真数据保存间隔为0.01 s，仿真步长为16%，仿真过程如图10所示。

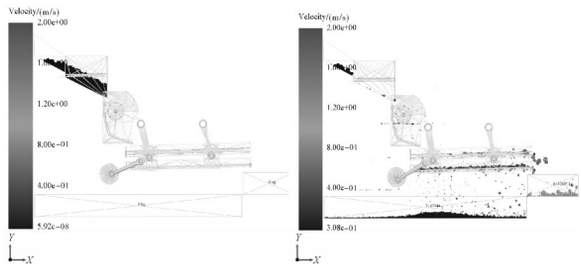


图10 耦合仿真过程图

Fig.10 Coupling simulation process diagram

1.5 耦合仿真试验设计与试验指标选取

参照NY/T3481—2019《根茎类中药材收获机质量评价技术规范》，主要技术指标包括挖净率、明茎率、挖松率和伤损率等。对于药土分离装置，实现块茎与土壤的分离，然后平铺在地表或收集装箱，因而确定收净率为指标之一。同时为提升整机工作效率，设置分离效率为指标之一。在仿真试验中，调取多组EDEM后处理中监测每个贝母与筛面的最大瞬时碰撞力，发现其远小于贝母压缩试验时所受到的最大压缩力（图11）。后期为提高仿真速率，未将伤损率作为试验指标。

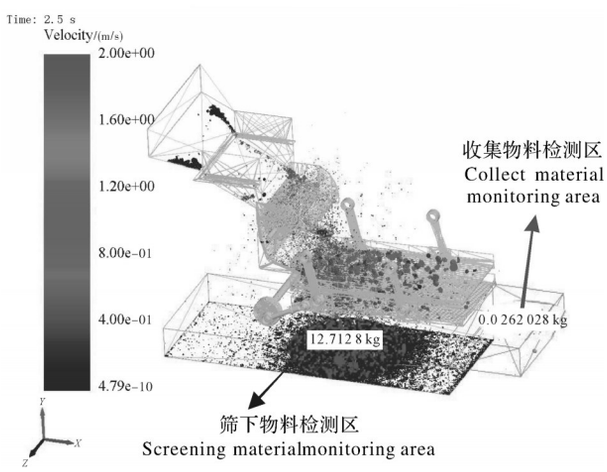


图11 EDEM模型

Fig.11 EDEM model

根据上述各关键部件的理论分析，确定药土分离装置的工作性能与筛面倾角、曲柄半径、曲柄转速和碎土辊转速有关，为探究各个因素对其工作性能的影响，设计中心复合试验，以收净率和分离效率作为试验指标，以此来考察药土分离装置的工作性能。参照NY/T3481—2019《根茎类中药材收获机 质量评价技术规范》，以收净率Y_1和分离效率Y_2作为评价指标。

定义贝母收净率为Y_1，其计算公式为：

$$Y_1=\frac{N_b}{N_z}\times 100\% \tag{10}$$

式(10)中：Y_1为收净率，%；N_b为收获箱中的贝母质量，kg；N_z为总的贝母质量，kg。

定义分离效率为Y_2，其计算公式为：

$$Y_2=\frac{W_1}{W_z}\times 100\% \tag{11}$$

式(11)中：Y_2为分离效率，%；W_1为筛下土壤质量，kg；W_z为总的土壤质量，kg。

2　结果与分析

2.1　响应面试验

为了获得最佳的结构与运行的参数组合，以筛面倾角X_1、曲柄半径X_2、曲柄转速X_3、碎土辊转速X_4为试验因素，以收净率Y_1和分离效率Y_2为试验指标进行四因素五水平的响应面试验(表5，表6)。

表5　响应面试验因素编码

Table 5　Coding of factors in response surface methodology

编码 Code	筛面倾角/(°) Screen surface inclination	曲柄半径/mm Crank radius	曲柄转速/(r/min) Crank speed	碎土辊转速/(r/min) Speed of soil crushing roller
−2	0.0	30.0	238.74	190.99
−1	1.5	32.5	262.61	214.87
0	3.0	35.0	286.49	238.74
1	4.5	37.5	310.36	262.61
2	6.0	40.0	334.24	286.49

运用Design-Expert软件对试验数据进行分析和拟合，由表7可知，模型均极显著($P<0.01$)，回归方程失拟项均不显著($P>0.05$)，说明回归模型拟合准确。其中X_1、X_2、X_3、X_1^2、X_2^2、X_3^2对Y_1的影响极显著，X_1X_3对Y_1的影响显著，各因素的影响主次顺序为X_1、X_3、X_2、X_4；X_1、X_2、X_3、X_4对Y_2的影响极显著，各因素的影响主次顺序为X_2、X_3、X_1、X_4；剔除不显著影响因素后，分别得到收净率Y_1和分离效率Y_2的回归方程：

$$\begin{aligned}Y_1=&52.27-17.94X_1+7.35X_2+16.59X_3+\\&2.26X_1X_3-2.28X_1^2-2.16X_2^2-2.29X_3^2\end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}Y_2=&86.13+1.12X_1+1.80X_2+\\&1.52X_3+0.46X_4\end{aligned} \tag{13}$$

2.2　交互作用对试验指标影响分析

由表7可知，筛面倾角和曲柄转速交互项对收净率影响极显著，其余交互作用项影响均不显著，故分析交互作用项曲柄转速和筛面倾角对试验性能指标的影响。通过Design-Expert软件得到此交互作用对收净率影响的响应曲面，如图12所示。由图12可知，当筛面倾角一定时，收净率随着曲柄转速的增加呈先上升趋势，该现象源于物料运动学特性的动态变化：较低转速下，物料抛射强度不足，导致其在筛面停留时间过长，碰撞频率增加，随着转速提升，物料获得更高的速度，抛射高度和水平位移增大，减少了物料与筛面的接触次数，物料未充分筛分就被收集，收净率显著提高。

当曲柄转速一定时，收净率随筛面倾角的增大呈负相关趋势。随着筛面倾角的逐渐增大，重力沿筛面的分力增大不利于物料向后输送，此外，过大的倾角会使物料在筛面入口处堆积，形成局部堵塞，进

表6　响应面试验方案与试验结果

Table 6　Response surface methodology design and experimental results

序号 Number	试验因素 Test factors				试验指标 Experimental indicators	
	X_1	X_2	X_3	X_4	Y_1/%	Y_2/%
1	0	0	2	0	72.87	87.68
2	1	−1	1	−1	37.47	86.35
3	1	−1	1	1	42.51	86.98
4	0	−2	0	0	26.99	80.73
5	1	−1	−1	−1	1.44	82.67
6	1	1	1	1	50.11	90.53
7	−1	1	−1	1	59.15	84.87
8	−1	−1	−1	−1	39.48	80.84
9	0	0	0	0	51.50	85.43
10	−1	−1	1	1	65.24	85.37
11	1	1	−1	1	72.87	87.68
12	1	1	1	−1	55.39	90.02
13	0	0	0	0	46.88	85.23
14	−1	1	1	−1	82.41	86.81
15	−1	−1	1	−1	74.25	84.05
16	−1	1	−1	−1	52.37	84.16
17	2	0	0	0	5.93	88.25
18	−2	0	0	0	79.94	84.08
19	0	0	0	−2	46.57	84.07
20	−1	−1	−1	1	36.63	82.56
21	0	0	0	0	54.42	86.74
22	0	0	0	2	47.25	85.51
23	0	0	0	0	54.04	86.64
24	0	0	0	0	54.42	86.74
25	0	0	−2	0	12.88	81.59
26	0	0	0	0	42.72	86.01
27	−1	1	1	1	86.77	88.36
28	1	1	−1	−1	8.51	87.34
29	1	−1	−1	1	2.62	84.04
30	0	2	0	0	59.79	88.90

表7 回归模型方差分析

Table 7 Analysis of variance for the regression model

方差来源 Source of variance	Y_1收净率Net profit margin				Y_2分离效率Separation efficiency			
	平方和 Square sum	自由度 Degrees of freedom	F	P	平方和 Square sum	自由度 Degrees of freedom	F	P
模型 Model	16 111.5	14	98.36	<0.000 1**	175.00	14	30.27	<0.000 1**
X_1	7 723.53	1	660.15	<0.000 1**	30.17	1	73.07	<0.000 1**
X_2	1 296.43	1	110.81	<0.000 1**	77.93	1	188.71	<0.000 1**
X_3	6 607.15	1	564.73	<0.000 1**	55.47	1	134.34	<0.000 1**
X_4	3.20	1	0.2739	0.608 4	5.06	1	12.25	0.003 2**
X_1X_2	23.52	1	2.01	0.176 6	1.07	1	2.59	0.128 1
X_1X_3	81.66	1	6.98	0.018 5*	0.00	1	0.000 1	0.993 1
X_1X_4	4.91	1	0.42	0.526 7	0.370 7	1	0.897 6	0.358 4
X_2X_3	0.008 3	1	0.000 7	0.979 1	0.056 4	1	0.136 5	0.716 9
X_2X_4	21.88	1	1.87	0.191 6	0.232 2	1	0.562 2	0.465 0
X_3X_4	18.52	1	1.58	0.227 6	0.001 3	1	0.003 2	0.955 3
X_1^2	142.22	1	12.16	0.003 3**	0.419 8	1	1.02	0.329 3
X_2^2	128.26	1	10.96	0.004 8**	1.26	1	3.05	0.101 3
X_3^2	144.00	1	12.31	0.003 2**	1.86	1	4.50	0.051 0
X_4^2	45.07	1	3.85	0.068 5	1.33	1	3.22	0.092 9
残差 Residual	175.49	15			6.19	15		
失拟 Lack of fit	133.47	10	1.59	0.318 1	3.87	10	0.835 5	0.623 2
误差 Pure error	42.02	5			2.32	5		
总和 Total	16 286.99	29			181.19	29		

注：*，表示影响显著（0.01<P<0.05）；**，表示影响极显著（P<0.01）。Note：* and ** indicate significant differences，P<0.05 and P<0.01，respectively.

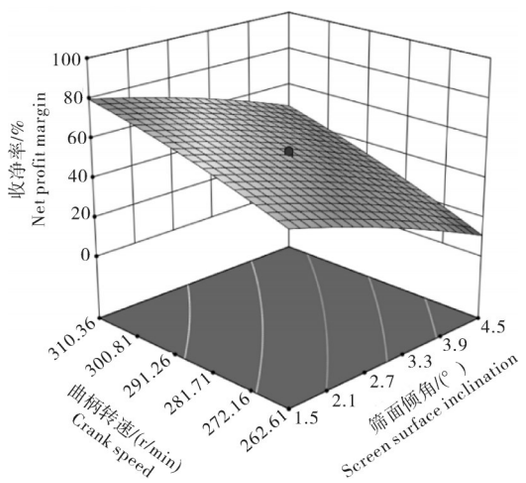


图12 试验因素交互作用对指标影响的响应曲面

Fig.12 Response surface of the effect of the interaction of experimental factors on the index

一步降低筛分效率。

2.3 基于多目标灰狼算法的性能优化

在贝母药土分离过程中，收净率和分离效率是衡量分离效果的重要指标，二者相互关联又相互制约。因此，将收净率Y_1和分离效率Y_2确定为优化目标，旨在不同的工作条件下，找到一组最优的参数组合，使2个目标同时达到最优或接近最优的状态。经过上述显著性分析可得：各个因素对收净率的影响更为复杂，故优化时设置收净率权重最大为0.7，分离效率权重为0.3，多目标优化模型如下：

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \max Y_2 \\ \max Y \\ Y=0.7Y_1+0.3Y_2 \\ -2\leqslant X_1、X_2、X_3、X_4\leqslant 2 \end{cases} \tag{14}$$

灰狼优化算法（GWO）是基于种群的元启发式算法，灵感源于灰狼群体行为与狩猎机制[23]。算法将搜索空间中的解看作灰狼，借模拟其行为找最优解。多目标优化时，MOGWO[24]维护外部存档存非支配解，迭代时更新。通过排序、选择引导向Pareto前沿靠近，用拥挤距离等法保证解的多样性，避免局部最优解，为贝母药土分离装置参数优化提供高效方法。

在Matlab中编写MOGWO的代码，在算法实现过程中，对种群规模、最大迭代次数等参数进行了合

理设置。种群规模设置为200，最大迭代次数设定为100，以确保算法有足够的迭代次数来搜索最优解。经过多次迭代计算，MOGWO算法成功求解多目标优化模型，得到了Pareto最优解集。Pareto最优解集包含了多个非支配解，这些解在收净率和分离效率之间达到了一种平衡，不存在1个解在2个目标上都优于其他解的情况。通过对Pareto最优解集的分析，发现不同的参数组合对应着不同的收净率和分离效率。

归一化处理可以从存档中选择最优解时，对目标函数值进行处理，将目标函数值限定在相对稳定的区间内，有助于算法更稳定地收敛到最优解或近似最优解，减少算法在搜索过程中陷入局部最优的风险，提高算法的全局搜索能力，避免因个别目标函数值的巨大波动而使搜索方向偏离最优解。通过归一化处理，筛选出满足实际生产需求的最佳参数组合。

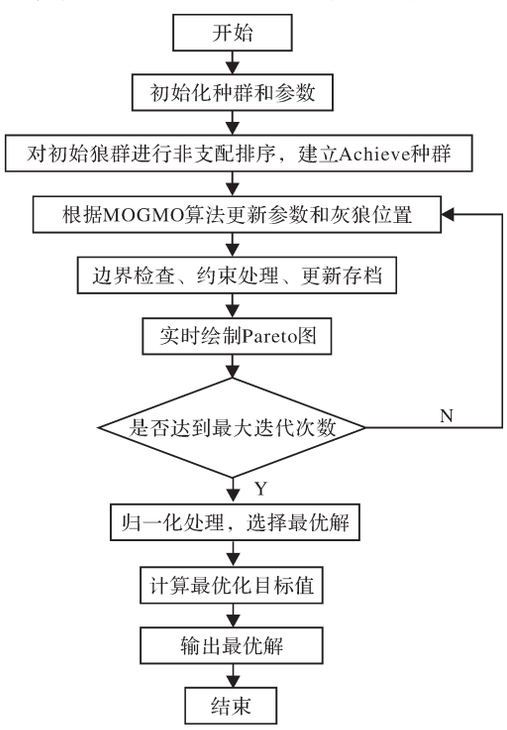


图13　多目标灰狼优化算法流程图

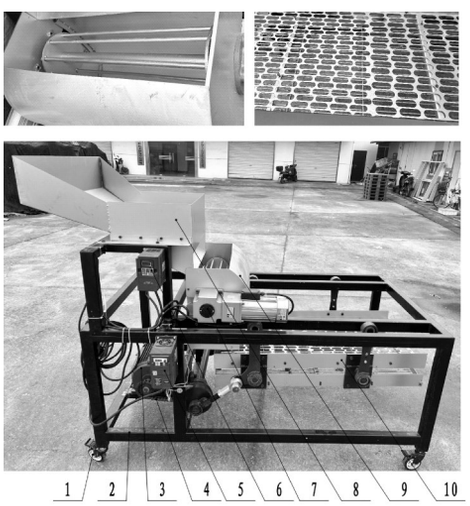
Fig.13　Flow diagram of multi-objective gray wolf optimization algorithm

根据实际生产中对收净率和分离效率的要求，综合考虑两者的平衡，确定在筛面倾角为1.6°、曲柄半径为39.7 mm、曲柄转速为332 r/min、碎土辊转速为284 r/min时，收净率达到93.72%，分离效率达到92.09%。此参数组合在保证较高收净率的同时，分离效率也处于合理范围内，能够满足贝母药土分离的实际生产需求。

2.4　台架验证试验

以采收后筛选去除病损的湖北贝母为试验对象。对照仿真时设置的土壤团粒直径范围，对土壤进行筛分，然后按照仿真时设置的团粒直径比例与贝母进行混合，模拟真实药土分离场景，保证仿真试验与台架试验的一致性，从而验证仿真选取的正确性以及试验结果的可靠性。

为了验证耦合仿真试验多目标优化的结果，按照最优的结构参数进行了样机试制，并在农业农村部马铃薯生物学与生物技术重点实验室搭建了性能检测台架，如图14所示。



1. 万向轮 Universal wheel；2. 机架 Frame；3. 摆动筛电机 Swing screen motor；4. 链传动 Chain drive；5. 摆动筛电机变频器 Swing screen motor frequency converter；6. 碎土辊电机变频器 Crusher roller motor frequency converter；7. 碎土辊电机 Crusher roller motor；8. 喂入装置 Feeding device；9. 碎土辊机构 Soil crushing roller mechanism；10. 摆动筛机构 Swing screen mechanism.

图14　台架试验结构图

Fig.14　Bench test structure diagram

在最优运行参数下进行验证试验，物料质量和粒径比例和仿真保持一致；同时增加损伤率为台架验证试验的试验指标，定义损失率为损伤贝母块茎质量与总贝母块茎质量的比值。使用变频器进行频率的调节，转速仪校准好驱动轴的转速，进行3次重复验证试验，试验结束后对试验数据进行统计，试验结果取平均值，如表8所示。

台架试验结果显示，贝母的平均收净率达到91.05%，平均分离效率为90.17%，且关键指标损伤率仅为3.84%。该损伤率显著低于NY/T 3481—2019《根茎类中药材收获机 质量评价技术规范》规定的≤7%的要求，充分验证了药土分离装置的作业性能。同时，台架试验结果与仿真优化后的结果高度

表8 台架试验结果

Table 8 Results of bench test %

序号 Number	收净率 Net profit margin	分离效率 Separation efficiency	损伤率 Damage rate
1	90.12	88.53	4.13
2	89.89	90.28	3.90
3	93.15	91.70	3.49
平均值 Mean	91.05	90.17	3.84

表9 仿真优化结果与台架试验结果比较

Table 9 Comparison of simulation optimization results with bench test results %

项目 Project	收净率 Net profit margin	分离效率 Separation efficiency
多目标优化值 Multi objective optimization value	93.72	92.09
台架试验值 Bench test values	91.05	90.17
相对误差 Relative error	2.93	2.13

一致，各项指标相对误差均小于3%，说明仿真模型中所选取的各类参数是合理的，并且后续采用的多目标灰狼优化算法结合归一化处理的方法，能够有效筛选出满足实际生产需求的最佳参数组合，仿真结果具有可靠性和指导意义。

3 讨 论

本研究设计了一种双层摆动式贝母药土分离装置，该装置主要由碎土辊机构和摆动筛机构等核心部件组成，通过动力学和运动学分析确定了影响工作性能的主要因素为筛面倾角、曲柄半径、曲柄转速和碎土辊转速，并确定取值范围。将数值模拟耦合仿真分析技术及响应面试验方法相结合，以筛面倾角、曲柄半径、曲柄转速和碎土辊转速为试验因素，收净率和分离效率为试验指标，进行响应面试验，得到了各试验指标与因素间的数学关系，分析了交互作用对试验指标的影响规律，运用多目标优化灰狼算法(MOGWO)确定最佳的结构与运行参数。根据实际生产中对收净率和分离效率的要求，综合考虑两者的平衡，确定在筛面倾角为1.6°、曲柄半径为39.7 mm、曲柄转速为332 r/min、碎土辊转速为284 r/min时，收净率达到93.72%，分离效率达到92.09%。自主搭建设计贝母药土分离装置试验台架进行性能试验，对优化后的数据在相同条件下进行台架验证试验，结果表明，收净率为91.05%、分离效率为90.17%，相对误差均小于3%，满足贝母药土分离要求。

本研究通过协同优化碎土辊几何尺度与旋转速度，在严格满足贝母破碎临界力约束的前提下，有效解决了传统设计中能耗、空间紧凑性与破碎效能的多目标冲突问题，为收获装备建立了普适性理论框架。本研究所获得的最优结构参数和运动参数以及详尽的台架性能数据，将为后续整机开发或现有收获机的改造升级提供直接、可靠的技术输入和设计依据，同时也明确了药土分离装置与整机的集成匹配及田间性能验证是下一阶段的关键工作。

参考文献 References

[1] 王淑慧，马旭冉，董慧雯，等.贝母属植物天然产物研究进展[J].中国中药杂志，2025，50(22)：6242-6246.WANG S H，MA X R，DONG H W，et al.Advances in natural products of *Fritillaria* plants[J].China journal of Chinese materia medica，2025，2025，50(22)：6242-6246(in Chinese with English abstract).

[2] 高波，祁玉卓，陈林，等.根茎类中药材收获机输送分离装置设计[J].农机化研究，2025，47(8)：52-60.GAO B，QI Y Z，CHEN L，et al.Design of conveying and separating device of rhizome Chinese medicinal materials harvesting machine[J].Journal of agricultural mechanization research，2025，47(8)：52-60(in Chinese with English abstract).

[3] 卢松卓，张伟，宋江.平贝母筛分物物理机械特性分析与等级筛分机设计[J].中国农机化学报，2013，34(5)：141-145.LU S Z，ZHANG W，SONG J.Analysis of mechanophysical properties of *Fritillaria ussuriensis* maxim and designing of grade sieve machine[J].Journal of Chinese agricultural mechanization，2013，34(5)：141-145(in Chinese with English abstract).

[4] 宋江，邱胜蓝，王新忠.4B-1200型平贝母药材收获机的设计与试验[J].农业工程学报，2015，31(8)：34-41.SONG J，QIU S L，WANG X Z.Design and test on 4B-1200 type bulbus *Fritillariae ussuriensis* medicinal material harvester[J].Transactions of the CSAE，2015，31(8)：34-41(in Chinese with English abstract).

[5] 宋江，刘丽华，王密，等.4B-1200型平贝母药材收获机的改进设计与试验[J].农业工程学报，2017，33(1)：45-51.SONG J，LIU L H，WANG M，et al.Improved design and test of 4B-1200 type bulbus *Fritillariae ussuriensis* medicinal materials harvester[J].Transactions of the CSAE，2017，33(1)：45-51(in Chinese with English abstract).

[6] 王密，庄卫东，宋江.平贝母收获机反向升运器的设计与试验[J].农机化研究，2018，40(8)：75-79.WANG M，ZHUANG W D，SONG J.Design and experiment of the reverse elevator of *Fritillaria* harvester[J].Journal of agricultural mechanization research，2018，40(8)：75-79(in Chinese with English abstract).

[7] 阮烨亮，倪忠进，倪益华，等.基于ADAMS的二级弧形摆动

式碎土机构碎土性能分析[J].中国农机化学报,2020,41(4):35-42. RUAN Y L,NI Z J,NI Y H,et al.Analysis of soil crushing performance of two-stage arc swing soil crushing mechanism based on ADAMS[J].Journal of Chinese agricultural mechanization,2020,41(4):35-42(in Chinese with English abstract).

[8] 宋江,田帅,张强,等.筛揉组合式平贝母高效分离装置设计与试验[J].中国农机化学报,2023,44(9):96-103.SONG J,TIAN S,ZHANG Q,et al.Design and experiment on high efficient separating device of screening and kneading combined type for *Fritillaria ussuriensis* Maxim[J].Journal of Chinese agricultural mechanization,2023,44(9):96-103(in Chinese with English abstract).

[9] 李三平,王琦宇,吴立国,等.平贝母收获机振动筛分过程仿真及试验[J].机械设计与研究,2023,39(5):184-190.LI S P,WANG Q Y,WU L G,et al.Simulation and experimental research of vibrating screening process of fritillary harvester[J].Machine design and research,2023,39(5):184-190(in Chinese with English abstract).

[10] 王锋.双层平筛式半夏收获机的设计与试验[D].兰州:甘肃农业大学,2022.WANG F.Design and experiment of double-layer flat screen tuber harvester for *Pinellia ternate*[D].Lanzhou: Gansu Agricultural University,2022(in Chinese with English abstract).

[11] 王之东.木薯块根收获机分离机构的设计与研究[D].北京:中国农业机械化科学研究院,2019.WANG Z D.Design and research on separation mechanism of cassava tubers harvester[D].Beijing:Chinese Academy of Agricultural Mechanization Science,2019(in Chinese with English abstract).

[12] 孟凤英,丁启朔,鹿飞,等.冲击作用下粘性土壤破碎体的分形维数与影响因素[J].农业机械学报,2009,40(3):108-111.MENG F Y,DING Q S,LU F,et al.Fragmentation fractal dimensions of cohesive soil under impact and its influencing factors[J].Transactions of the CSAM,2009,40(3):108-111(in Chinese with English abstract).

[13] 丁启朔,丁为民,潘根兴.多尺度多分辨率破碎方法评价土壤结构的原理及其应用[J].农业工程学报,2008,24(12):132-136.DING Q S,DING W M,PAN G X.Theory and application of multi-scale and multi-resolution fragmentation method for soil structure evaluation[J].Transactions of the CSAE,2008,24(12):132-136(in Chinese with English abstract).

[14] 魏忠彩,李洪文,孙传祝,等.基于多段分离工艺的马铃薯联合收获机设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(1):129-140.WEI Z C,LI H W,SUN C Z,et al.Design and experiment of potato combined harvester based on multi-stage separation technology[J].Transactions of the CSAM,2019,50(1):129-140(in Chinese with English abstract).

[15] 张国忠,李子涵,刘婉茹,等.荸荠冲击损伤有限元仿真分析及试验[J].农业工程学报,2025,41(4):40-49.ZHANG G Z,LI Z H,LIU W R,et al.Finite element simulation and experiment of impact damage of water chestnuts[J].Transactions of the CSAE,2025,41(4):40-49(in Chinese with English abstract).

[16] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007.Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences.Agricultural machinery design manual[M].Beijing:China Agricultural Science and Technology Press,2007(in Chinese).

[17] HU R,LIU H H,CHEN Y F,et al.A constitutive model for unsaturated soils with consideration of inter-particle bonding[J].Computers and geotechnics,2014,59:127-144.

[18] 曾百功,李敏,姚亮华,等.基于图像重建的黄连根系-土壤复合体力学特性仿真与试验[J].农业工程学报,2023,39(19):75-84.ZENG B G,LI M,YAO L H,et al.Simulation and experiment on the mechanical properties of *Coptis chinensis* root-soil composites based on image reconstruction[J].Transactions of the CSAE,2023,39(19):75-84(in Chinese with English abstract).

[19] 宋少龙,汤智辉,郑炫,等.新疆棉田耕后土壤模型离散元参数标定[J].农业工程学报,2021,37(20):63-70.SONG S L,TANG Z H,ZHENG X,et al.Calibration of the discrete element parameters for the soil model of cotton field after plowing in Xinjiang of China[J].Transactions of the CSAE,2021,37(20):63-70(in Chinese with English abstract).

[20] 王宪良,钟晓康,耿元乐,等.基于离散元非线性弹塑性接触模型的免耕土壤参数标定[J].农业工程学报,2021,37(23):100-107.WANG X L,ZHONG X K,GENG Y L,et al.Construction and parameter calibration of the nonlinear elastoplastic discrete element model for no-tillage soil compaction[J].Transactions of the CSAE,2021,37(23):100-107(in Chinese with English abstract).

[21] 戴飞,宋学锋,赵武云,等.全膜双垄沟覆膜土壤离散元接触参数仿真标定[J].农业机械学报,2019,50(2):49-56.DAI F,SONG X F,ZHAO W Y,et al.Simulative calibration on contact parameters of discrete elements for covering soil on whole plastic film mulching on double ridges[J].Transactions of the CSAM,2019,50(2):49-56(in Chinese with English abstract).

[22] 周华,车海龙,耿端阳,等.玉米田耕层典型土壤离散元模型建立与参数标定[J].农业机械学报,2023,54(11):49-60.ZHOU H,CHE H L,GENG D Y,et al.Discrete element modeling and parameter calibration of typical soil in maize field tillage layer[J].Transactions of the CSAM,2023,54(11):49-60(in Chinese with English abstract).

[23] MIRJALILI S,MIRJALILI S M,LEWIS A.Grey wolf optimizer[J].Advances in engineering software,2014,69:46-61.

[24] MIRJALILI S,SAREMI S,MIRJALILI S M,et al.Multi-objective grey wolf optimizer:a novel algorithm for multi-criterion optimization[J].Expert systems with applications,2016,47:106-119.

Design and experiment of a dual-layer oscillating medicinal-soil separation device for fritillary bulbs

DONG Runing[1], DUAN Hongbing[1,2], HAN Mingxing[1,3], ZHANG Fen[1], LI Yanlong[4]

1.*College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*;
2.*Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Potato Biology and Biotechnology, Wuhan 430070, China*;
3.*Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Agricultural Equipment in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Wuhan 430070, China*;
4.*Dingxi Sanniu Agricultural Machinery Manufacturing Co., Ltd., Dingxi 743022, China*

Abstract A high-efficiency medicinal-soil separation device was designed to address the challenges of separating fritillary bulbs from soil particles with similar sizes and the low recovery rate in existing fritillary bulb harvesters. Key parameters affecting performance and their value ranges were determined based on kinematic and dynamic analyses. A discrete element method and multi-body dynamics (DEM-MBD) coupling-simulation model was constructed. Central composite design (CCD) experiments were conducted with sieve inclination angle, crank radius, crank speed, and medicinal-soil roller speed as experimental factors, and recovery rate and separation efficiency as evaluation indexes. Analysis of variance (ANOVA) was performed on the results of CCD experiments to establish regression models between recovery rate/separation efficiency and significant factors. The model was solved with the multi-objective grey wolf optimization (MOGWO) algorithm to obtain the optimal combination. Results showed that increasing crank radius and crank speed improved both recovery rate and separation efficiency, while increasing sieve inclination angle had opposite effects. Excessive inclination caused material blockage at the front end, hindering rearward movement, though soil continuously sifted downward during operation. The optimal combination of parameters was the sieve inclination angle of 1.6°, crank radius of 39.7 mm, crank speed of 332 r/min, and soil-crushing roller speed of 284 r/min, achieving a recovery rate of 93.72% and separation efficiency of 92.09%. The results of bench verification under identical conditions showed that the recovery rate and separation efficiency was 91.05% and 90.17%, closely align with the simulation-optimized outcomes with a relative error of less than 3%, meeting the requirements for fritillary bulb-soil separation and fully validating the practicality of the dual-layer vibrating separation device designed.

Keywords fritillaria; harvester; medicinal-soil separation; coupling simulation; multi-objective grey wolf optimizer (MOGWO) algorithm

(责任编辑:陆文昌)