



白济菘, 谢胜仕, 张玉凤, 郭亚萍, 路凯亮. 谷子根茬-膜-土复合体跌落破碎特性及其碰撞加速度响应[J]. 中国农业大学学报, 2026, 31(9): 355-365.
BAI Jisong, XIE Shengshi, ZHANG Yufeng, GUO Yaping, LU Kailiang. Analysis on drop breakage and collision acceleration characteristics of millet root stubbles-membrane-soil composite[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(9): 355-365.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.09.26

谷子根茬-膜-土复合体跌落破碎特性及其碰撞加速度响应

白济菘 谢胜仕* 张玉凤 郭亚萍 路凯亮

(内蒙古农业大学 机电工程学院, 呼和浩特 010018)

摘 要 针对谷子根茬-膜-土复合体跌落破碎与碰撞加速度响应机制不清晰, 导致现有残膜回收装备结构设计与作业参数调控缺乏理论依据的问题, 本研究开展了系统的室内台架试验。试验以田间采集的谷子根茬-膜-土复合体为对象, 选取复合体含水率、硬度、质量、跌落高度及筛面倾角为试验因素, 以土壤脱净率为试验指标, 首先通过正交试验筛选出关键影响因子, 再通过单因素试验方法深入探究土壤脱净率和碰撞加速度峰值随各显著因素的变化规律, 并对复合体的跌落破碎机理加以解析。正交试验结果表明: 各因素对土壤脱净率影响的显著性从高到低依次为: 复合体含水率、跌落高度、复合体硬度、复合体含水率与质量的交互作用、筛面倾角、复合体含水率与硬度的交互作用、复合体质量; 除复合体质量外, 其余因素均达到极显著水平($P < 0.01$)。单因素试验结果进一步表明, 土壤脱净率随复合体含水率、硬度的增大而递减, 随复合体质量的增加而先升后降, 随跌落高度和筛面倾角的增大而递增; 碰撞加速度峰值则随上述五因素取值的增加均呈单调上升趋势。本研究填补了谷子根茬-膜-土复合体跌落破碎与运动学特性方面的研究空白, 可为谷子残膜回收机结构优化设计与作业参数合理匹配提供理论及数据支撑。

关键词 复合体; 破碎特性; 碰撞加速度; 土壤脱净率; 残膜回收

中图分类号 S223.3

文章编号 1007-4333(2026)09-0355-11

文献标志码 A

Analysis on drop breakage and collision acceleration characteristics of millet root stubbles-membrane-soil composite

BAI Jisong, XIE Shengshi*, ZHANG Yufeng, GUO Yaping, LU Kailiang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract The unclearly understood mechanisms of drop breakage and collision acceleration response in millet root stubble-membrane-soil composites have led to a lack of theoretical basis for the structural design and operational parameter regulation of residual film recycling equipment. To address this, a systematic indoor bench test was conducted. Using field-collected composites as test specimens, moisture content, hardness, mass, drop height, and screen inclination were selected as experimental factors, with soil removal rate as the response variable. An orthogonal experimental design was first employed to identify the dominant influencing factors, followed by single-factor experiments to investigate the variations in soil removal rate and peak value of collision acceleration with each significant factor, and to elucidate the underlying drop breakage mechanism. The orthogonal results show that the significance of the factors affecting soil removal rate, in descending order, is:

收稿日期: 2026-02-06; 接受日期: 2026-06-10

基金项目: 内蒙古自治区科技计划项目(2023YFDZ0033); 内蒙古自治区一流学科科研专项项目(YLXKZX-NND-046)

第一作者: 白济菘(ORCID: 0009-0008-7098-382X), 硕士研究生, E-mail: 1523775634@qq.com

通讯作者: 谢胜仕(ORCID: 0000-0002-9991-9812), 副教授, 主要从事高寒干旱地区农业装备工程与技术研究, E-mail: xieshengshi@163.com

composite moisture content, drop height, composite hardness, interaction between moisture content and mass, screen sieve inclination, interaction between moisture content and hardness, and composite mass. All factors except composite mass were found to be highly significant ($P < 0.01$). The results of single-factor experiments further indicate that the soil removal rate decreases with increasing moisture content and hardness of the composite, first increases and then decreases with increasing composite mass, and increases with increasing drop height and screen inclination angle; the peak collision acceleration exhibits a monotonically increasing trend with the increase of all five factors. This study fills a research gap in the drop breakage and kinematic characteristics of millet root stubble-membrane-soil composites, and provides both theoretical and data support for the structural optimization and reasonable operational parameter matching of millet residual film recycling machines.

Keywords composite; breaking characteristics; peak value of collision acceleration; soil removal rate; residual film recycling

粟(*Setaria italica*)是世界上驯化栽培最古老的作物之一,在我国北方地区通称“谷子”,其籽实脱壳处理后即为小米^[1]。小米颗粒圆润,色泽金黄,烹饪后口感绵软醇香,且富含人体所需的蛋白质、维生素和微量元素,在保障区域粮食安全方面占据重要地位。

内蒙古赤峰市敖汉旗地处旱作农业区,该区域作物生长季光照充足、昼夜温差显著、雨热同期,为谷子的生长发育提供了优越的自然条件。已有研究资料显示,敖汉旗的谷子栽培历史超过8 000年,该地因此被认定为世界小米的发源地,享有“世界小米之乡”的美誉^[2]。近年来,敖汉旗谷子种植大部分采用全覆膜双垄沟播种技术,该技术应用于谷子种植后增产增收效果明显。然而,地膜覆盖技术在创造显著经济效益的同时,也引发了不容忽视的农田“白色污染”问题。

为解决农用地膜残留问题,国内外研究者围绕残膜回收装备开展了大量研发工作,相继推出了多种结构型式的机型。国外发达国家田间使用的地膜厚度普遍在0.015 mm以上,具备较高的抗拉强度,其残膜回收机多采用卷收作业原理。例如,Parry于1972年成功研制出了一种将残膜卷收在辊子上的回收装置^[3-5],但该机型在作业过程中难以有效清除混杂于膜间的秸秆和土壤等杂质,导致回收物含杂率较高。Rocca^[6]则设计了一种机型,其作业流程为先拾取地膜,再通过链式输送机构将其传送到机具后部的卷辊上进行卷集,以期在卷收环节同步实现膜土分离。反观我国农情,受制于节约成本与长期使用习惯的影响,谷子田间覆盖的地膜相对较薄,抗拉强度不够^[7]。这一现实差异导致了国外主流的卷集回收方案难以直接应用于我国的生产

实践。

依据作业时段的不同,国内现有地膜回收机具可分为苗期回收、播前回收及秋后回收等类型^[7]。其中,秋后残膜回收机凭借其作业效率高、区域适应性强、结构相对简单等显著优势,已成为当前国内研究的重点,推广应用也最为普遍。根据结构型式和作业要求的不同,该类机型可进一步细分为弹齿式、耙齿式、轮齿式、齿链式、伸缩齿式和铲筛式等^[8-9]。铲筛式残膜回收机因结构简单、作业效率高,在敖汉旗谷子种植区广泛应用。但受地膜田间暴露时间长、自然风化降解严重以及杂草、秸秆残留量偏大等因素影响,该类机具在实际作业过程中存在膜茬缠绕、膜土分离不清、残膜拾净率低等问题^[10-15]。

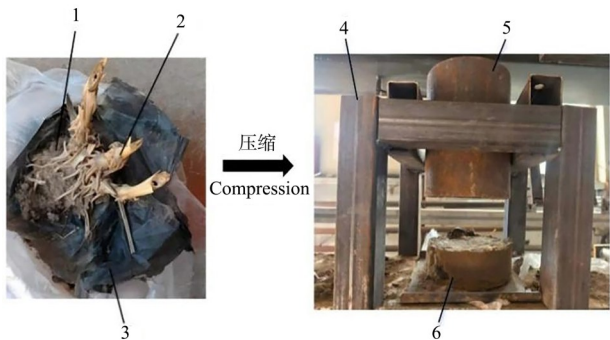
从作业机理来看,残膜回收过程中的膜土分离,实为谷子根茬-膜-土复合体在筛分过程中经历反复跌落、碰撞而逐步破碎离散的动态过程^[18]。当前,关于根土复合体物理机械特性和力学特性的研究,多侧重于通过直接剪切等准静态加载试验来开展,而基于跌落、碰撞等动态试验进行探究的报道相对较少。较具代表性的研究工作有:闫帅等^[16]对党参根-土复合体的跌落碰撞特性进行了试验研究,并据此优化了滚筒式分离装置的作业参数;刘月广等^[17]针对麻山药毛细根-土壤复合体,测试并回归分析了其极限剪切力,同时开展了复合体跌落破碎试验;李俊儒等^[18]开展了马铃薯-土壤团聚物的破碎分离特性研究,揭示了跌落高度对土壤破碎程度的影响规律。然而,截至目前,针对谷子根茬-膜-土复合体跌落破碎及其运动学特性的研究鲜有报道,这直接导致谷子残膜回收机在设计参数与工况调整过程中缺乏必要的理论依据。鉴于此,本研究通

过构建室内台架试验系统,获取谷子根茬-膜-土复合体的土壤脱净率和碰撞加速度的变化规律,深入剖析试验指标变化的内在机理及其关联性,并尝试建立土壤脱净率与碰撞加速度峰值之间的定量数学模型。研究结果可为谷子残膜回收装备的改进设计与作业参数优选提供数据支撑,为解决膜茬缠绕、土壤分离效果差、残膜拾净率低等瓶颈问题贡献理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用谷子根茬-膜-土复合体(图 1)的谷子品种为“金苗 K1”,于 2025 年 5 月自敖汉旗新惠镇谷子种植基地人工采挖获得。敖汉旗谷子种植普遍采用双垄沟播全覆膜精量播种模式,每公顷播种约 112 500~120 000 穴,每穴留苗 3 株左右。为确保试样的一致性,所采集的每个复合体均含附着于地表的部分残膜、3 株完整根茬及其所裹挟的土壤。所有样本均满足主根长度 (150 ± 10) mm、残膜面积 $(150\pm 10)\text{cm}^2$ 的要求。试验开展前,采用铁锹将各复合体单独从田间掘出,并立即置入独立塑料袋中密封保存,以最大限度减缓其水分变化。



1. 土壤试样;2. 作物根茬;3. 农田残膜;4. 支撑框架;5. 加载压头;6. 土壤-根茬-残膜复合体(压缩试样)
1. Soil samples; 2. Crop root stubble; 3. Farmland residual film; 4. Support frame; 5. Loading indenter; 6. Millet root stubble-membrane-soil composite (compressed specimen)

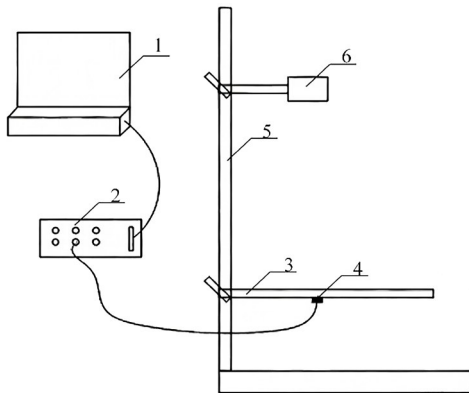
图 1 谷子根茬-膜-土复合体及试样制备过程

Fig. 1 Millet root stubbles-membrane-soil composite and specimen preparation process

1.2 试验设备

测试工作在自行搭建的谷子根茬-膜-土复合体跌落碰撞试验台(图 2)上完成。该试验台主要由计算机、数据采集分析仪、分离筛面、IEPE 压电

式加速度传感器、高度调节支架及跌落平台等单元构成。其中,分离筛面的杆条中心距参照通用的铲筛式残膜回收机中筛分滚筒的杆条参数确定,杆条直径为 10 mm,筛杆中心距为 50 mm。数据采集分析仪型号为杭州亿恒科技有限公司研制的 AVANT-MI7016 型;加速度信号由 1A102E 的 IEPE 压电式传感器采集,其轴向灵敏度为 $1.060\text{ mV}/(\text{m}/\text{s}^2)$,量程为 $\pm 500\text{ g}$,响应频率为 1~10 000 Hz。



图中下方白色水平条为试验台基座,高度调节支架上的白色方块为高度调节支架的固定卡扣。1. 计算机;2. 数据采集分析仪;3. 分离筛面;4. 加速度传感器;5. 高度调节支架;6. 跌落平台

The white horizontal bar below the picture is the base of the test bench, and the white square on the height adjustment bracket is the fixed buckle of the height adjustment bracket. 1. Computer; 2. Data and acquisition analyzer; 3. Screen sieve surface; 4. Accelerometer; 5. Height adjustment bracket; 6. Falling platform

图 2 谷子根茬-膜-土复合体跌落碰撞试验台

Fig. 2 Drop test bench for millet root stubble-membrane-soil composite

1.3 谷子根茬-膜-土复合体跌落碰撞试验方法

试验开始前,首先完成计算机和数据采集分析仪的连接调试。将制备好的复合体静置于地面,依照试验方案依次调整高度调节支架的预设位置及分离筛面倾角。参考谢胜仕等^[19]对马铃薯碰撞损伤^[21]与碰撞加速度特性的研究并结合预试验结果可知,复合体跌落碰撞瞬间的主要碰撞作用仅针对单根筛杆发生。为避免加速度传感器自身对复合体破碎状态产生干扰,试验中将加速度传感器固定安装于目标筛杆的底部。通过人工微调复合体的起始悬空位置,确保其自由下落时能够精确撞击该布设有传感器的筛杆。正式试验时,启动数据采集系统,设置采样频率、量程、工程单位及存储路径等参数。操作人员将复合体提升至规定跌落高度,保

持其底面与地面平行的姿态后无初速度释放,使其自由跌落撞击分离筛面。数据采集系统实时记录碰撞瞬间的完整加速度历程,完成一次数据采集。每次试验结束后,随即收集破碎物料以测算土壤脱净率指标。每个复合体样本仅用于单次试验。

2 正交试验

2.1 试验因素及水平

综合已有相关研究结果^[17-19]并结合谷子残膜回收机参数设计要求,初步判定复合体含水率、硬度、质量、跌落高度、筛面倾角等试验因素对谷子残膜回收机作业性能具有直接影响,因此选取上述5个因素作为试验因素,依次为A(复合体含水率)、B(复合体硬度)、C(复合体质量)、D(跌落高度)、E(筛面倾角)。整个试验设计分为正交试验和单因素试验2个阶段:正交试验的主要目的是筛选对土壤脱净率影响显著的因素;单因素试验则在正交试验基础上,进一步明确各显著因素对试验指标的影响规律。

复合体含水率水平设定,主要参照地方标准

DB15/T 315—2020《地膜回收起茬机作业技术规范》^[20]中关于适宜机械作业的含水率区间,取值范围确定为11%~19%。谷子残膜回收机作业时,挖掘铲入土深度通常稳定在100~200 mm区间,故借助土壤硬度测定仪对相应深度范围内的田间土壤硬度进行实测,进而将复合体硬度的取值范围标定在560~920 kPa。复合体质量水平的确定,基于对谷子根系分布范围及其与土壤结合程度的综合评估,取值范围设为700~1 100 g。跌落高度水平的选取,则源于对谷子根茬-膜-土复合体在回收机筛分滚筒内实际跌落距离的分析结果,取值范围设定为350~950 mm。另根据已有研究结果^[16],谷子残膜回收机筛分滚筒安装倾角处于3~11°时,可实现复合体的有效分离,因此确定筛面倾角的取值范围为3~11°。各试验因素及水平见表1。

为筛选影响试验指标的显著因素,本试验采用 $L_8(2^7)$ 正交试验表设计试验方案。鉴于含水率的变化对复合体硬度及质量会产生直接影响,试验设计中重点考虑复合体含水率分别与硬度、质量之间的交互作用。正交试验方案见表2。

表1 正交试验因素及水平表

Table 1 Table of factors and levels in orthogonal experiment

水平 Level	复合体含水率/% Composite moisture content	复合体硬度/kPa Composite hardness	复合体质量/g Composite mass	跌落高度/mm Dorp height	筛面倾角/(°) Screen sieve inclination
1	11	560	700	350	3
2	19	920	1 100	950	11

2.2 试验指标

在刘广月^[17]的研究中,土壤脱净率作为试验指标用来评价麻山药毛细根-土壤复合体的跌落破碎特性。基于此,本研究以土壤脱净率作为衡量谷子根茬-膜-土复合体在跌落碰撞作用下破碎特性的指标。为获取该指标数据,首先将若干独立袋装的复合体取出,用电子天平称重,分别制备700 g和1 100 g的2种试样,每种试样各40个。随后,通过微量注水与自然晾晒相结合的方法,将复合体含水率调至11%和19% 2个预设水平。在此基础上,将试样放入内径120 mm、高度200 mm的圆筒内,使用千斤顶式压缩机以5 mm/min的压缩速率对其进行压缩。经预试验标定,压头下行行程为18 mm时,样本内部可达到560 kPa的硬度;压头下行行程为32 mm时,则可达到920 kPa的硬度。达到目标

硬度后,保压30 s以确保形态稳定。试样在压缩后静置10 min,再采用土壤硬度测定仪对其进行硬度复核,以确保满足试验要求。

试样制备完毕后,即进行跌落试验。试验结束后,从已破碎的复合体中分离出所有符合定义的“碎土”,并用电子天平称其质量。本试验中,“碎土”是指在跌落冲击作用下从根茬-膜-土复合体中脱离且通过40 mm筛杆间隙的土壤颗粒或团聚体^[17]。此定义基于土壤力学及破碎理论,强调了颗粒的离散化和结构失效特性,即原有复合体结构发生破坏,土壤解体为较小颗粒,并失去了与根茬和地膜的粘结能力。土壤脱净率为“碎土”质量与复合体试样质量的比值^[17],计算公式为:

$$P = \frac{m}{M} \times 100\% \quad (1)$$

式中： P 为土壤脱净率，%； m 为“碎土”质量，g； M 为谷子根茬-膜-土复合体试样的质量，g。

2.3 试验结果与分析

正交试验采用 $L_8(2^7)$ 无空列设计方案^[22] (表 2)。为获取方差分析所需的重复试验数据与误差项，每个处理组均进行 20 次重复跌落试验；将 20 次试验结果随机均分为 2 小组，分别计算各组平均值，以此完成误差估计。全部试验数据采用 SPSS 20.0 软件进行统计分析。

由极差分析结果 (表 2) 和方差分析结果 (表 3) 可知，各因素对谷子根茬-膜-土复合体土壤脱净率影响的主次顺序为：复合体含水率>跌落高度>复合体硬度>复合体含水率和复合体质量的交互作用项>筛面倾角>复合体含水率和复合体硬度的交互作用项>复合体质量。在显著性方面，除复合体质量一项外，其余各因素及交互项对土壤脱净率的影响均达到极显著水平 ($P<0.01$)。

表 2 $L_8(2^7)$ 正交试验设计方案及结果
Table 2 $L_8(2^7)$ orthogonal experimental design scheme and results

所在列/因素 Column/factor	1/A	2/B	3/A×B	4/C	5/A×C	6/D	7/E	土壤脱净率/% Soil removal rate/%	
								P_1	P_2
1	1	1	1	1	1	1	1	47.30	48.30
2	1	1	1	2	2	2	2	70.00	63.00
3	1	2	2	1	1	2	2	55.25	57.50
4	1	2	2	2	2	1	1	10.44	11.26
5	2	1	2	1	2	1	2	13.67	11.54
6	2	1	2	2	1	2	1	41.00	39.50
7	2	2	1	1	2	2	1	17.00	15.45
8	2	2	1	2	1	1	2	8.44	9.27
k_1	45.381	41.789	34.845	33.251	38.320	20.028	28.781		
k_2	19.484	23.076	30.020	31.614	26.545	44.838	36.084		
R	25.897	18.713	4.825	1.637	11.775	24.810	7.303		
因素主次顺序 The primary and secondary factors									
$A>D>B>A\times C>E>A\times B>C$									

注： A 为复合体含水率，%； B 为复合体硬度，kPa； C 为复合体质量，g； D 为跌落高度，mm； E 为筛面倾角，(°)； $A\times B$ 为复合体含水率与硬度的交互作用项； $A\times C$ 为复合体含水率与质量的交互作用项。 P_i 表示第 i ($i=1, 2$) 组的土壤脱净率； k_i 表示任一列上因素取水平 i ($i=1, 2$) 时所得试验结果的算术平均值； R 表示极差。下同。

Note: A is composite moisture content, %; B is composite hardness, kPa; C is composite mass, g; D is the drop height, mm; E is screen sieve inclination, (°); $A\times B$ is the interaction between moisture content and hardness; $A\times C$ is the interaction between moisture content and mass. P_i represents the soil removal rate of group i ($i=1, 2$); k_i represents the arithmetic mean of the experimental results obtained when the factor on any column is at level i ($i=1, 2$); R represents the range. The same below.

复合体含水率在体系中起着核心调控作用，其功能在于改变土壤颗粒之间以及土壤与根茬、残膜界面的黏结力，进而影响复合体硬度与质量的表现状态，最终通过干预碰撞能量的传递路径与耗散方式决定土壤脱净率的高低^[17]。

3 单因素试验

3.1 试验因素及水平

正交试验结果表明，复合体含水率、硬度、跌落高度及筛面倾角为影响土壤脱净率的显著因素。

此外，尽管复合体质量对试验指标影响不显著，但其与含水率的交互作用极显著。因此，将复合体质量一并纳入单因素试验变量。综合上述分析，最终确定复合体含水率、硬度、质量、跌落高度及筛面倾角为单因素试验因素。

依据第 2.1 节中确定的各因素水平范围，并遵循因素水平均匀间隔取值的原则，将各因素的水平数扩展至 5 个。具体为：复合体含水率分别取 11%、13%、15%、17%、19%；复合体硬度分别取 560、650、740、830、920 kPa；复合体质量分别取 700、800、

表3 方差分析表
Table 3 Analysis of variance

因素 Factor	平方和 Quadratic sum	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F (极值) F -Extreme value	P 值 P -value	显著性 Significance
A	2 682.722	1	2 682.722	654.191	0.000	**
B	1 400.631	1	1 400.631	341.548	0.000	**
A×B	93.122	1	93.122	22.708	0.001	**
C	10.726	1	10.726	2.615	0.144	
A×C	554.602	1	554.602	135.242	0.000	**
D	2 462.144	1	2 462.144	600.402	0.000	**
E	213.306	1	213.306	52.015	0.000	**
误差 Error	32.807	8	4.101			
总计 Total	24 279.933	16				

注:**表示差异极显著($P<0.01$)。下同。
Note: ** indicates a highly significant difference ($P<0.01$). The same below.

900、1 000、1 100 g; 跌落高度分别取350、500、650、800、950 mm, 筛面倾角分别取3、5、7、9、11°。

3.2 试验指标

3.2.1 土壤脱净率

其测试及计算方法与第2.2节相同, 各处理下的最终结果取10次有效重复试验的平均值。

3.2.2 碰撞加速度峰值

碰撞加速度峰值是跌落碰撞过程中的关键动力学参量, 能够直接量化复合体撞击筛杆瞬间的冲击作用强度^[19]。加速度峰值变化规律是解析物料碰撞特性的最佳参数依据, 因此, 本研究将其作为另一项试验指标。试验结束后, 将采集的加速度时域信号导入离线分析软件进行动态信号分析, 读取并记录加速度峰值。各处理下的最终结果取10次有效重复试验的平均值。

3.3 单因素试验结果分析

3.3.1 复合体含水率对试验指标的影响

固定复合体硬度为740 kPa、质量为900 g、跌落高度为650 mm、筛面倾角为7°, 考察复合体含水率变化对2项指标的影响(图3)。

由图3可知, 土壤脱净率随着复合体含水率的增大呈现下降趋势。这主要是因为水分增多使得土壤自身的宏观黏聚力增强, 土壤与根茬、残膜界面的黏结强度也随之上升; 在同等碰撞动能下, 团聚体更难破碎和剥离。与此形成对照的是, 碰撞加速度峰值随含水率升高而持续攀升。其原因在于

含水率高的复合体黏性更强, 碰撞瞬间落至筛面下方的土壤量更少, 留存于筛面上方的复合体质量增加, 由此激发出更强的冲击响应。这一变化规律表明, 复合体含水率能够显著改变复合体本身的物料特性及其跌落破碎特性。谷子残膜回收过程中, 合理控制复合体含水率对增加膜土分离效果具有重要作用。本研究结果进一步印证, 含水率是影响土壤脱净率的首要因素, 其通过增加土壤黏结力显著抑制复合体破碎分离。这一结论与刘广月^[17]在麻山药根土复合体上得到的结果吻合。

3.3.2 复合体硬度对试验指标的影响

固定复合体含水率为15%、质量为900 g、跌落

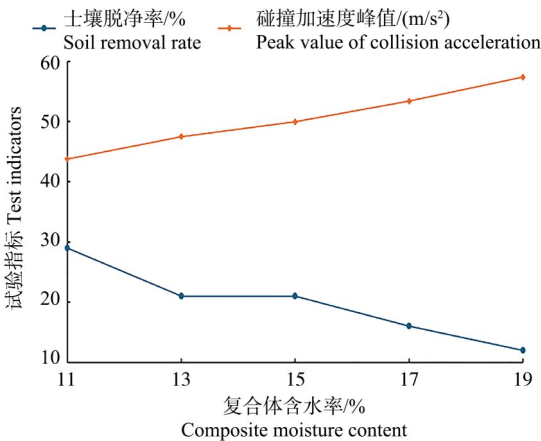


图3 复合体含水率对试验指标的影响

Fig. 3 The influence of composite moisture content on test indicators

高度为650 mm、筛面倾角为7°,分析硬度变化带来的影响(图4)。

图4显示,土壤脱净率随复合体硬度增大而下降。主要原因在于,硬度越大的复合体内部根茬-膜-土三相结构连接越紧密,遭受碰撞时应力难以局部集中,从而整体破碎程度反而降低。同时,碰撞加速度峰值随硬度的增加而上升。低硬度时,复合体结构疏松,跌落冲击下易发生大变形与破碎,能量耗散显著,故加速度响应较弱;高硬度时,土壤不易破碎,根土包裹更为紧实,复合体的结合力更强,碰撞瞬间土壤破碎减少,能量耗散更小,加速度峰值因此升高。可见,复合体硬度同样会显著影响残膜回收机作业过程中的膜土分离效果。

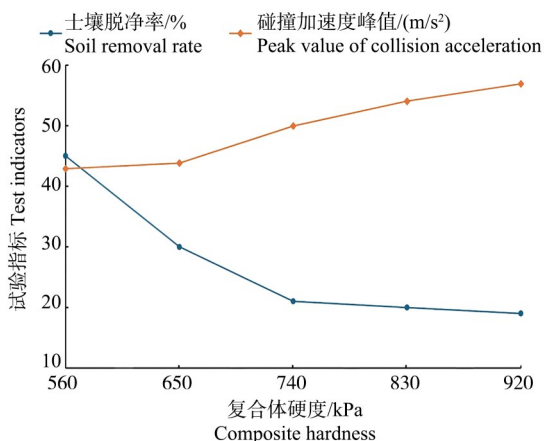


图4 复合体硬度对试验指标的影响

Fig. 4 The influence of composite hardness on test indicators

3.3.3 复合体质量对试验指标的影响

固定复合体含水率为15%、硬度为740 kPa、跌落高度为650 mm、筛面倾角为7°,考察质量变化对指标的影响(图5)。

如图5结果所示,土壤脱净率随着复合体质量的增加呈现先上升后下降的趋势。当复合体质量较小时,其内部主要是主根区周围被牢固抓持的土壤,结合力强,不易脱净。随着质量增大,更多处于根系末梢、结合力相对较弱的土壤被包裹进来,在冲击下较易破碎分离,脱净率因而上升。但当质量持续增加,根系总量增多且相互交织,连同地膜的缠绕作用将复合体束缚成一个整体,原先的局部强力结合逐渐转变为整体强力结合,土壤分离反而变得困难,脱净率回落。碰撞加速度峰值则始终呈上升态势,其解释比较直接:质量越大,总物料量越

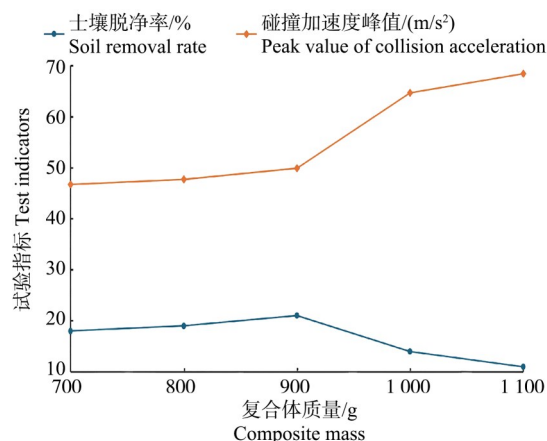


图5 复合体质量对试验指标的影响

Fig. 5 The influence of composite mass on test indicators

多,冲击瞬间的碰撞能量越大,加速度响应自然越强。

3.3.4 跌落高度对试验指标的影响

固定复合体含水率为15%、硬度为740 kPa、质量为900 g、筛面倾角为7°,分析不同跌落高度对试验指标的影响(图6)。

由图6可知,土壤脱净率和碰撞加速度峰值随着跌落高度的增加而上升。高度越高,碰撞前动能越高,冲击作用越强,自然会促使更充分的破碎和更强的加速度响应。然而,当跌落高度在较高区间时,两条曲线的上升速率均趋于平缓。其原因在于,跌落高度较高时碰撞作用时间极为短暂,部分土壤尚不及从复合体上彻底分离,冲击过程便已结束。李俊儒^[18]在土壤跌落破碎特性研究中发现,在土壤抗冲击性能一定的条件下,跌落高度越大,土壤在下落过程中由重力势能转化的动能越多,冲击载荷越容易超过土壤结构强度极限,破碎程度因而整体增加。可见,跌落高度是促进根茬-膜-土复合体破碎、提高土壤脱净率的关键外部因素。

3.3.5 筛面倾角对试验指标的影响

固定复合体含水率为15%、硬度为740 kPa、质量为900 g、跌落高度为650 mm,分析筛面倾角变化的影响(图7)。

图7显示,随着筛面倾角增大,土壤脱净率先缓慢上升,在9°处达到峰值后开始下降。倾角较小时(3~7°),复合体撞击筛面后多停留原位,以局部变形为主,整体破碎并不充分。倾角增大至9°左右时,复合体沿筛面滑动,筛杆对复合体施加的压-剪复合作用能有效破坏根土联结,使脱净率达到最大。当

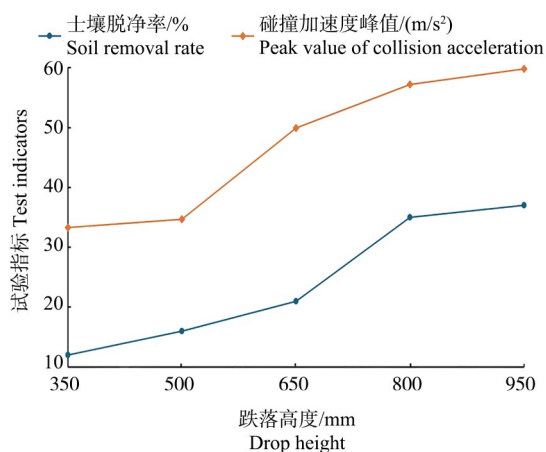


图6 跌落高度对试验指标的影响

Fig. 6 The influence of drop in height on test indicators

倾角增至 11° 时,复合体在分离筛面的滚落速度过快,滞留的时间显著缩短,部分土壤破碎不完全,脱净率降低。筛面倾角为 9° 时土壤脱净率最高,与闫帅等^[16]针对党参根土分离装置研究推荐的倾角范围是吻合的。

碰撞加速度峰值随筛面倾角增加总体呈上升趋势。倾角较小时,复合体近似垂直撞击筛面,筛杆主要承受垂直压力,水平分力小,加速度峰值较低。随着倾角增大,复合体沿筛面方向速度分量增加,碰撞形式转为压-剪复合作用,筛杆的弯曲与剪切应力显著增强,同时碰撞后复合体更易向远离筛杆前端固定横梁方向运动,加剧了筛杆弯转振动,加速度响应值因此显著升高。

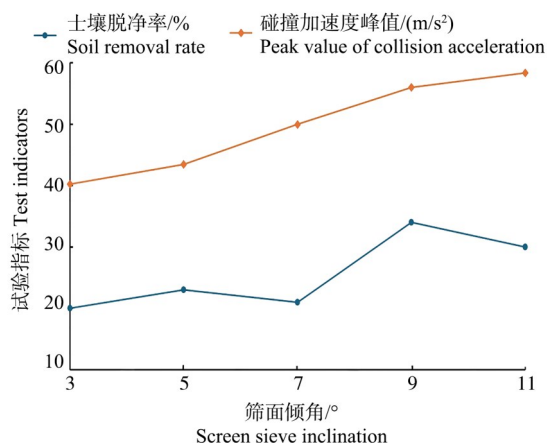


图7 筛面倾角对试验指标的影响

Fig. 7 The influence of screen sieve inclination on test indicators

3.3.7 试验指标的相关性分析

由前述分析可见,不同因素水平下土壤脱净率与碰撞加速度峰值之间具有一定的相互作用关系。为定量描述二者的相互关系,借助SPSS 20.0软件对2个试验指标进行Pearson双尾相关性检验,结果见表4。

由表4所列相关性检验结果可知,当试验变量为复合体含水率时,土壤脱净率与碰撞加速度峰值呈极显著负相关($r=-0.976, P<0.01$);当变量为复合体质量时,二者呈显著负相关($r=-0.917, P<0.05$);当变量为跌落高度时,二者则呈显著正相关($r=0.954, P<0.05$)。这一结果揭示了2项指标在不同因素下存在不同的线性关联。为了依据碰撞加速度峰值预测土壤脱净率的变化,对上述3个因素水平下2项指标的变化关系进行线性拟合,所建立数学方程及拟合曲线见图8。

回归分析结果显示,土壤脱净率与碰撞加速度峰值满足方程分别为:当试验因素为复合体含水率时, $y=-1.1877x+79.665 (R^2=0.953)$;当试验因素为复合体质量时, $y=-0.3612x+36.66 (R^2=0.841)$;当因素为跌落高度时,则有 $y=0.6531x-6.7824 (R^2=0.696)$ 。上述方程表明,试验因素分别为复合体含水率、复合体质量和跌落高度时,土壤脱净率随碰撞加速度峰值分别呈现出线性降低、线性降低和线性提升的变化趋势。基于此种定量关系,可利用碰撞加速度峰值预测土壤脱净率的变化规律,从而为谷子残膜回收机的设计与参数调整提供数据支撑。

4 结论

本研究通过正交试验与单因素试验,对谷子根茬-膜-土复合体在跌落碰撞工况下的破碎特性及加速度响应特性进行了研究,主要结论如下:

1)各因素对土壤脱净率的影响主次顺序为:复合体含水率>跌落高度>复合体硬度>复合体含水率与质量的交互作用项>筛面倾角>复合体含水率与硬度的交互作用项>复合体质量。显著性检验结果显示,除复合体质量一项外,其余因素及交互项对试验指标的影响均达到极显著水平($P<0.01$)。

2)土壤脱净率的变化趋势为:随复合体含水率与硬度的升高而单调下降;随复合体质量的增大呈

表 4 土壤脱净率与碰撞加速度峰值的相关性结果

Table 4 Correlation results between soil removal rate and peak value of collision acceleration

试验指标 Test indicator	因素 Factors	皮尔逊相关(r) Pearson correlation(r)	碰撞加速度峰值/(m/s^2) Peak value of collision acceleration
土壤脱净率 Soil removal rate	复合体含水率 Composite moisture content	皮尔逊相关性 Sig. (双尾)	-0.976^{**} 0.004
	复合体硬度 Composite hardness	皮尔逊相关性 Sig. (双尾)	-0.849 0.069
	复合体质量 Composite mass	皮尔逊相关性 Sig. (双尾)	-0.917^* 0.028
	跌落高度 Drop height	皮尔逊相关性 Sig. (双尾)	0.954^* 0.012
	筛面倾角 Screen sieve inclination	皮尔逊相关性 Sig. (双尾)	0.843 0.079

注： r 为皮尔逊相关系数，用于定量描述2个变量间线性相关程度与方向，取值范围为 $[-1, 1]$ ； $r > 0$ 为正相关， $r < 0$ 为负相关， $|r|$ 越接近1表示线性相关性越强。Sig. (双尾)为双尾检验显著性概率，*表示相关性显著($P < 0.05$)。

Note: r is the Pearson correlation coefficient, which is used to quantitatively describe the degree and direction of linear correlation between the two variables, and the value range is $[-1, 1]$; $r > 0$ is a positive correlation, $r < 0$ is a negative correlation, and the closer $|r|$ is to 1, the stronger the linear correlation. Sig. (two-tailed) is the significant probability of a two-tailed test. * indicates significant relation($P < 0.05$).

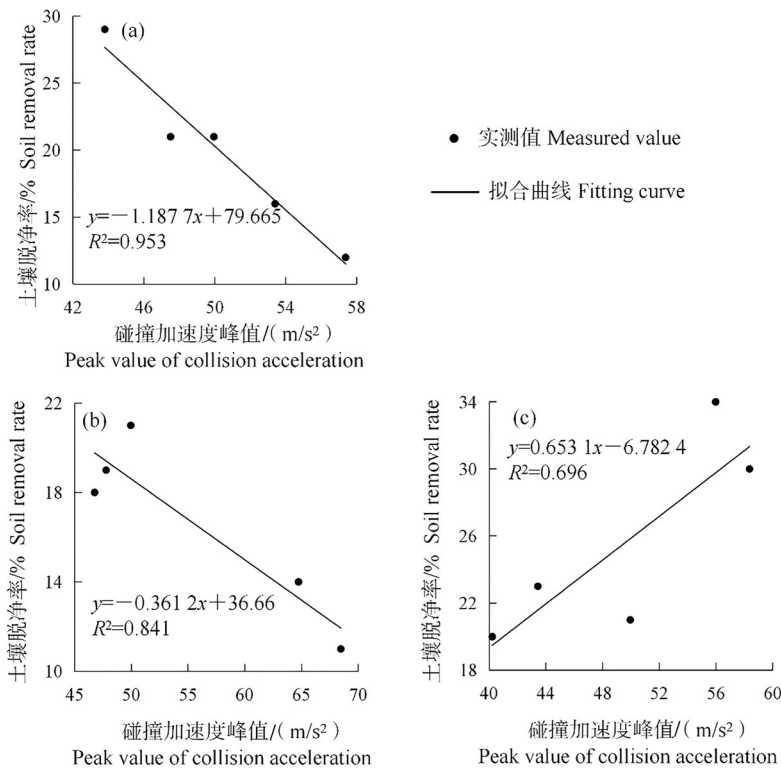


图 8 不同试验因素复合体含水率(a)、复合体质量(b)、跌落高度(c)下碰撞加速度峰值与土壤脱净率的拟合关系

Fig. 8 Different test factors composite moisture content (a), composite mass (b), drop height of the fitting (c) relationship between the peak value of collision acceleration and the soil removal rate

先升后降的非线性变化;随跌落高度的增加而持续上升,在筛面倾角为 9° 时达到最大值。碰撞加速度峰值的变化则较为统一,表现为随5个试验因素水平的升高均呈单调递增趋势。

3)在复合体含水率、复合体质量及跌落高度分别作为试验因素的条件下,土壤脱净率与碰撞加速度峰值之间的线性回归方程依次为: $y = -1.1877x + 79.665 (R^2 = 0.953)$ 、 $y = -0.3612x + 36.66 (R^2 = 0.841)$ 和 $y = 0.6531x - 6.7824 (R^2 = 0.696)$ 。

参考文献 References

- [1] 何红中, 赵博. 古代粟名演变新考[J]. 中国农史, 2010, 29(3): 12-19
He H Z, Zhao B. A new Study on the evolution of ancient names for millet [J]. *Agricultural History of China*, 2010, 29(3): 12-19 (in Chinese)
- [2] 刘红艳, 周宏辉, 迟琳, 马文倩, 斯钦孟和. 敖汉小米产业园建设现状与发展对策[J]. 现代农业, 2022, 47(6): 64-69
Liu H Y, Zhou H H, Chi L, Ma W Q, Si Q M H. Construction status and development strategies of Aohan millet industrial park [J]. *Modern Agriculture*, 2022, 47(6): 64-69 (in Chinese)
- [3] Picuno P. Innovative material and improved technical design for a sustainable exploitation of agricultural plastic film [J]. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2014, 53(10): 1000-1011
- [4] Lamers J, Bruentrup M, Buerkert A. The profitability of traditional and innovative mulching techniques using millet crop residues in the West African Sahe[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1998, 67(1): 23-35
- [5] Payyr J R. *Farm machine for removing protective ground covers form a cultivate field*. United States, US3687392[P]. 1972-08-29
- [6] Rooca A R. Device for retrieving plastic mulch used for growing crop. Italy, IT206428A[P]. 2016-05-18
- [7] 李明洋, 马少辉. 我国残膜回收机研究现状及建议[J]. 农机化研究, 2014, 36(6): 242-245, 252
Li M Y, Ma S H. Present situation of research on plastic film residue collectors in China and some suggestions [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2014, 36(6): 242-245, 252 (in Chinese)
- [8] 严伟, 胡志超, 周新星, 徐弘博, 游兆延, 吴努. 残膜回收机拾膜机构研究现状及展望[J]. 农机化研究, 2016, 38(10): 258-262, 268
Yan W, Hu Z C, Zhou X X, Xu H B, You Z Y, Wu N. Present situation of research and expectation on picking-up mechanism of plastic film collectors [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2016, 38(10): 258-262, 268 (in Chinese)
- [9] 周乐, 唐炜, 谢建华. 残膜回收机具研究现状及存在问题[J]. 新疆农机化, 2019(5): 13-15, 32
Zhou L, Tang W, Xie J H. Present research situation and existing problems of residual film collectors [J]. *Xinjiang Agricultural Mechanization*, 2019(5): 13-15, 32 (in Chinese)
- [10] 李强, 赵武云, 王久鑫, 王天福. 玉米全膜双垄沟残膜回收机的改进设计与试验[J]. 林业机械与木工设备, 2022, 50(9): 82-87, 91
Li Q, Zhao W Y, Wang J X, Wang T F. Improved design and test of collector for corn whole plastic film mulching on double ridges[J]. *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*, 2022, 50(9): 82-87, 91 (in Chinese)
- [11] 张海春, 龚冠豪, 郭红娟, 蒋永新, 刘旋峰, 牛长河. 铲筛式残膜回收机输膜机构参数优化与试验[J]. 现代制造技术与装备, 2018, 54(5): 68-69
Zhang H C, Gong G H, Guo H J, Jiang Y X, Liu X F, Niu C H. Parameter optimization and experiment of film transmission mechanism of spade screen recovery machine[J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2018, 54(5): 68-69 (in Chinese)
- [12] 王晓阳, 李强, 赵武云, 戴飞, 严兆荣, 王久鑫. 铲式青贮玉米起茬及残膜回收联合作业机设计与试验[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(9): 2132-2145
Wang X Y, Li Q, Zhao W Y, Dai F, Yan Z R, Wang J X. Design and experiment of shovel-type combined machine for silage corn root stubble plucking and residual plastic film collecting [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2024, 36(9): 2132-2145 (in Chinese)
- [13] Wei L, Liu X L, Sun W, Zhao W Y, Li H, Zhang H, Li H L, Liang J D, Li Y Z, Zhou Y H, Zhao N N. Design and testing of an integrated corn stubble residual film-recycling machine[J]. *Agriculture*, 2024, 14(10): 1809
- [14] Xue S K, Chen X G, Li J B, Wang X F, Zhang Z Y. Design of and experiment on a film removal device of an arc-toothed residual film recovery machine before sowing[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(18): 8551
- [15] 齐永宁, 赵永吉, 王建吉. 残膜捡拾机膜茬分离装置设计[J]. 农业机械, 2023, 4: 70-73
Qi Y N, Zhao Y J, Wang J J. Design of Film stubble separation device for residual film pickup machine [J]. *Farm Machinery*, 2023, 4: 70-73 (in Chinese)
- [16] 闫帅, 崔清亮, 张燕青, 李光, 赵志宏, 安楠. 党参收获滚筒式根土分离试验台的设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报, 2023, 58(2): 226-234
Yan S, Cui Q L, Zhang Y Q, Li G, Zhao Z H, An N. Design and testing of a drum-type root-soil for Codonopsis pilosula harvesting [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2023, 58(2): 226-234 (in Chinese)
- [17] 刘月广. 麻山药根土复合体模型构建及脱土试验研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2021
Liu Y G. Model construction of root-soil complex of yam and experimental study on de-soiling[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2021 (in Chinese)
- [18] 李俊儒. 马铃薯-土壤团聚物破碎分离特性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023
Li J R. Potato-soil aggregate fragmentation and separation characteristics investigation [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023 (in Chinese)
- [19] 谢胜仕, 王春光, 邓伟刚. 马铃薯碰撞损伤试验与碰撞加速度特性分析[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(1): 163-169
Xie S S, Wang C G, Deng W G. Collision damage test and acceleration characteristic analysis of potato [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(1): 163-169 (in Chinese)
- [20] DB15/T 315—2020. 地膜回收起茬机作业技术规范[S]. 呼和浩特市: 内蒙古自治区市场监督管理局, 2020
DB15/T 315—2020. Plastic film recovery stubble machine operation technical

- specifications[S]. Hohhot: Inner Mongolia Autonomous Region Market Supervision and Administration Bureau, 2020 (in Chinese)
- [21] 高占红. 马铃薯跌落损伤及运动学特性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021
- Gao Z H. Investigation of the dropping damage and the kinematic characteristics of potatoes [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021 (in Chinese)
- [22] 吴妍, 曹教育, 吴凤芝, 李民, 刘圣, 马旖旎, 唐琪. 正交试验优化注射用左卡尼汀调配条件[J]. 安徽医药, 2015, 19(9): 1642-1646
- Wu Y, Cao J Y, Wu F Z, Li M, Liu S, Ma Y N, Tang Q. Orthogonal optimization of the admixture technology for L-carnitine for injection[J]. *Anhui Medical and Pharmaceutical Journal*, 2015, 19(9): 1642-1646 (in Chinese)

责任编辑: 梁芷健



第一作者简介: 白济崧, 硕士研究生。主要从事高寒干旱地区农业装备工程与技术及农牧业机械智能化等方面的研究工作。



通讯作者简介: 谢胜仕, 博士, 副教授。主要从事高寒干旱地区农业装备工程与技术及农牧业机械智能化等方面的研究工作。现为内蒙古自治区马铃薯加工团队首席专家, 中国农业机械学会青年工作委员会委员、中国农业机械学会畜牧机械分会委员, 先后入选“内蒙古自治区新世纪321人才”和“内蒙古自治区新时代专业技术人才”; 现任《干旱地区农业研究》期刊青年编辑委员会委员, *Biosystems Engineering*, *Computers and Electronics in Agriculture*, *Journal of Food Process Engineering* 等期刊审稿人。主持国家自然科学基金2项, 内蒙古科技计划项目等省部级项目12项, 以第一(通讯)作者发表学术论文20余篇, 授权专利10余项, 出版学术专著3部, 获得第二届全国农业工程类青年教师教学技能竞赛一等奖等奖项10余项。