

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.11.009

# 弹性短纹杆-板齿组合式大白菜种子脱粒装置研究

王升升<sup>1</sup> 卢梦晴<sup>1</sup> 胡金鹏<sup>2</sup> 陈盼<sup>1</sup> 姬江涛<sup>1</sup> 王福民<sup>1</sup>

(1. 河南科技大学农业装备工程学院, 洛阳 471003; 2. 江苏大学农业工程学院, 镇江 212013)

**摘要:** 大白菜种子市场规模发展迅速,其大面积、产业化种植使得机械化收获需求日益增长。针对人工收获效率低、常规脱粒方式下种子破碎率高问题,设计了一种由弹性短纹杆-板齿、柔性圆头钉齿等脱粒元件与圆管凹板组合的大白菜种子脱粒装置。利用 ANSYS Workbench 对脱粒滚筒进行有限元模态分析,验证脱粒滚筒结构的合理性。选取喂入量、滚筒转速及脱粒间隙为试验因素,以种子损失率和破碎率为试验指标开展了响应面优化及田间对比试验,建立各试验因素与试验指标之间的数学模型,分析各因素对指标的影响并对装置的结构及工作参数进行了优化。试验结果表明,当滚筒转速为 726 r/min、脱粒间隙为 22.3 mm、喂入量为 1.73 kg/s 时,种子损失率为 0.68%,破碎率为 0.39%。试验结果满足设计要求,能够实现对收获期大白菜种子的低破碎率机械化脱粒作业。

**关键词:** 大白菜种子; 脱粒装置; 弹性短纹杆-板齿; 柔性圆头钉齿

中图分类号: S226.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)11-0086-09

OSID:



## Design and Experiment of Chinese Cabbage Seed Threshing Device Combined with Elastic Short-rasp-bar Tooth

WANG Shengsheng<sup>1</sup> LU Mengqing<sup>1</sup> HU Jinpeng<sup>2</sup> CHEN Pan<sup>1</sup> JI Jiangtao<sup>1</sup> WANG Fumin<sup>1</sup>

(1. College of Agricultural Equipment Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China

2. College of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** The Chinese cabbage seed market is developing rapidly, and the demand for mechanized harvest is increasing day by day due to the large area and industrial planting. Aiming at the technical problems of low efficiency of artificial harvest and high seed breaking rate by conventional threshing method, a threshing device for Chinese cabbage seed was designed, which was composed of threshing elements such as elastic short-rasp-bar tooth, flexible round head spike tooth and circular tube concave plate. The finite element modal analysis of threshing cylinder was carried out with ANSYS Workbench, and the rationality of structure of threshing cylinder was verified. The feeding amount, cylinder speed and threshing clearance were selected as experimental factors, and the response surface optimization and field comparison experiments were carried out based on the experimental indicators of seed loss rate and breaking rate. Through experiments, the mathematical model between each experiment factor and experiment index was established, the influence of each factor on the index was analyzed, and the structure and working parameters of the device were optimized. The experimental results showed that when the cylinder speed was 726 r/min, the threshing clearance was 22.3 mm, and the feeding amount was 1.73 kg/s, the seed loss rate was 0.68% and the breaking rate was 0.39%. The experimental results met the design requirements, and it can realize the mechanized threshing operation of Chinese cabbage seeds with a low breaking rate during the harvest period.

**Key words:** Chinese cabbage seed; threshing device; elastic short-rasp-bar tooth; flexible round head spike

## 0 引言

大白菜食用价值高,其种植面积、产量及消费量

在中国居各类蔬菜之首<sup>[1]</sup>。随着大白菜育种产业不断发展,种用大白菜的种植面积迅速增加,大白菜种子的收获难题日益凸显。采用人工收获效率较

收稿日期: 2021-08-10 修回日期: 2021-09-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(52005163)和国家级大学生创新创业训练计划项目(202110464010)

作者简介: 王升升(1986—),男,讲师,博士生,主要从事农作物收获理论与装备研究,E-mail: wangsheng5288@126.com

通信作者: 姬江涛(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械理论和智能化农业装备技术研究,E-mail: jjt0907@163.com

低,无法满足育种基地的大面积收获需求;采用市场上现有的稻麦收获机进行作业时,因结构或工作参数配置不佳,易造成种子损失率与破碎率高等问题<sup>[2-3]</sup>。脱粒装置作为联合收获机的核心工作部件,降低脱粒过程中的种子损失及损伤已成为大白菜种子联合收获装备发展的关键问题。

当前,国内外学者对脱粒分离装置的研究较多。PETKEVICHUS 等<sup>[4]</sup>设计了纹杆式脱粒装置,研究了籽粒含水率、滚筒转速和凹板间隙对脱粒损失的影响;师清翔等<sup>[5]</sup>引入柔性脱粒的概念,通过耐磨橡胶代替传统的钢制脱粒元件,降低了对小麦、水稻等作物的作用强度;谢方平等<sup>[6-7]</sup>设计了一种柔性钉齿脱粒滚筒,有效降低了水稻籽粒的破碎率;文献<sup>[8-11]</sup>设计了柔性钉齿和短纹杆组合式脱粒滚筒,解决了黄淮海地区高含水率玉米收获破碎率和未脱净率高的问题;李耀明等<sup>[12-13]</sup>设计了一种短纹杆与板齿组合式脱粒滚筒,可显著降低脱出物含杂率。

上述研究大多通过结合不同作物物料特性,在传统脱粒形式的基础上,对脱粒元件的材料、结构等方面进行改良并开展脱粒性能研究。虽然取得了一些阶段性成果,但主要研究对象为小麦、水稻、玉米等粮食作物,并不适用于大白菜种子这种小籽粒蔬菜种子的脱粒分离。目前国内外尚未有专门的大白菜种子收获装置,对于大白菜种子低破碎率脱粒的研究更是属于空白领域。因此,为解决大白菜种子脱粒难题,本文基于组合式脱粒及柔性脱粒原理,设计弹性短纹杆-板齿、柔性圆头钉齿与圆管凹板组合的脱粒装置,以期实现对适收期大白菜种子的机械化收获作业。

## 1 整机结构与工作原理

### 1.1 整机结构

弹性短纹杆-板齿组合式大白菜种子脱粒装置整体结构如图 1 所示,主要由机架、顶盖、组合式脱粒滚筒、圆管凹板、集料箱等组成。其中组合式脱粒滚筒圆周表面设有螺旋分布的弹性短纹杆-板齿和柔性圆头钉齿,尾部设有刚性长钉齿;顶盖下表面设有螺旋导流板,方便物料轴向运输;为了便于收集脱出物,在脱粒装置下部设置集料箱。

### 1.2 工作原理

大白菜种子脱粒装置采用径向喂入、径向排出的脱粒工艺。装置的工作过程分为喂入、脱分和排杂 3 个阶段。工作时,电机带动脱粒滚筒旋转。大白菜植株在喂入口连续均匀地进入脱分空间内,随后受到物料不断喂入的推送、脱粒元件和顶盖上导

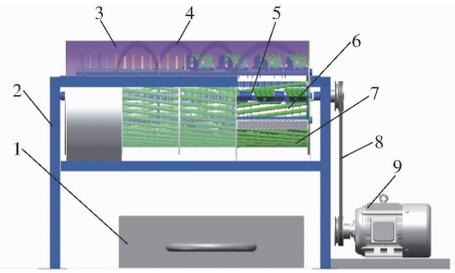


图 1 大白菜种子脱粒装置结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of Chinese cabbage seed threshing device

1. 集料箱 2. 机架 3. 顶盖 4. 导流板 5. 组合式脱粒滚筒  
6. 喂入口 7. 圆管凹板 8. 传动带 9. 电机

流板的共同作用,沿滚筒轴向螺旋运动,完成喂入过程;大白菜种子植株在脱粒元件与圆管凹板的循环冲击、揉搓作用及物料层内部之间的相互作用下实现脱粒;在此过程中,脱粒元件不断旋转搅动,并与圆管凹板相配合,实现种子与茎秆杂余的分离;脱粒后的茎秆杂余在滚筒尾部刚性长钉齿的作用下经排草口排出,完成排杂过程。在脱分过程中,弹性短纹杆-板齿和柔性圆头钉齿均具有变形能力,有效减弱了脱粒元件对种子的刚性冲击;圆管凹板表面没有棱角,减少了物料与凹板间的碰撞摩擦,可有效降低种子的机械损伤。

## 2 组合式脱粒滚筒设计与分析

### 2.1 脱粒方案

大白菜植株的生物学特性与油菜相似,根据已有研究<sup>[14-19]</sup>,开展大白菜植株各组分生物力学特性研究,得到不同破坏形式下各组分破坏载荷,如表 1 所示。由表 1 可知,大白菜种子的破坏峰值较低,且各部分破坏峰值差异较大。因此,为提高大白菜种子脱净程度,实现脱粒过程中种子低破碎率的需求,采用组合式、柔性脱粒方案开展研究。

表 1 大白菜植株各组分力学特性

Tab. 1 Mechanical properties of each component of Chinese cabbage plant

破坏形式	极限载荷/N
种子受压缩破坏	6. 887 ~ 12. 330
角果受压缩破坏	10. 732 ~ 32. 007
茎秆受压缩破坏	50. 172 ~ 121. 355
角果抗裂角力	1. 324 ~ 2. 475
茎秆受压弯破坏	36. 420 ~ 94. 116

### 2.2 脱粒滚筒设计

弹性短纹杆-板齿组合式脱粒滚筒结构如图 2 所示。前部采用弹性短纹杆-板齿组合式,通过扭簧的变形降低对物料的作用力,以降低该阶段的脱粒

损伤;中部圆头钉齿采用柔性聚氨酯材料替代钢材,以减小脱粒过程中对大白菜种子的刚性冲击,达到降低种子损伤的目的;尾部采用刚性长钉齿,有利于将运动至滚筒末端的茎秆及时排出。

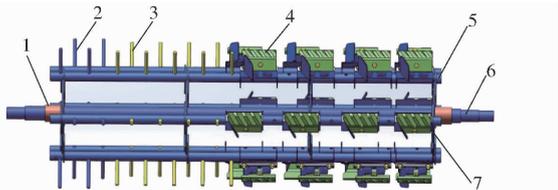


图2 弹性短纹杆-板齿组合式脱粒滚筒

Fig. 2 Elastic short-rasp-bar tooth combined threshing cylinder

1. 套筒 2. 刚性长钉齿 3. 柔性圆头钉齿 4. 弹性短纹杆-板齿  
5. 固定齿杆 6. 滚筒主轴 7. 辐盘

脱粒滚筒的长度与其自身的脱分能力密切相关,脱粒滚筒越长,物料的脱分时间越久,种子和茎秆的破碎率会随之增大。茎秆破碎会导致杂余率增大,大白菜种子小而轻,与杂余不易分离,杂余率的增大更会使清选负荷增大。脱粒滚筒长度计算式<sup>[20]</sup>为

$$L \geq q/q_0 \quad (1)$$

式中  $L$ ——脱粒滚筒长度, m

$q$ ——脱粒装置喂入量,取 2 kg/s

$q_0$ ——脱粒滚筒单位长度允许承担的喂入量,取 1.5 ~ 2.0 kg/(s·m)

计算得,脱粒滚筒长度  $L$  为 1 ~ 1.3 m,本设计取  $L = 1.15$  m。

脱粒滚筒直径太小容易缠绕作物,同时会减少凹板分离面积,但滚筒直径过大,脱粒功耗会增大。为避免上述问题,取滚筒周长大于大白菜植株长度,则脱粒滚筒直径<sup>[21]</sup>为

$$D_z \geq \frac{1.5L_1}{\pi} \quad (2)$$

式中  $D_z$ ——脱粒滚筒直径, mm

$L_1$ ——大白菜植株长度,取 880 ~ 1 200 mm

计算得,脱粒滚筒直径  $D_z$  为 420 ~ 573 mm,本设计取  $D_z = 460$  mm。

为进一步实现脱粒过程中物料的翻转和轴向运动,脱粒元件均采用螺旋排布方式,取螺旋头数  $K = 3$ ;为避免茎秆破碎严重及脱粒功耗的增加,取齿排数为 6,齿距  $l = 84$  mm<sup>[21]</sup>。

### 2.2.1 弹性短纹杆-板齿设计

弹性短纹杆-板齿由纹杆座、压板、板齿、螺栓、短纹杆和扭簧组成,如图 3 所示。短纹杆一侧增加板齿,且安装方向与纹杆筋方向平行,一是为了实现成熟度较低、相对难脱角果的脱粒,同时有利于物料

的喂入和轴向运动;二是对短纹杆起到一定的限位作用,保证短纹杆仅能产生向下的扭转变形。压板与扭簧通过螺栓连接固定,短纹杆长度设为 100 mm。

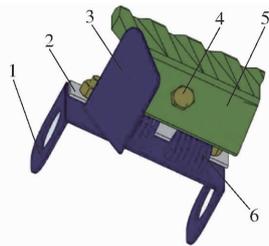


图3 弹性短纹杆-板齿结构简图

Fig. 3 Schematic of elastic short-rasp-bar tooth

1. 纹杆座 2. 压板 3. 板齿 4. 螺栓 5. 短纹杆 6. 扭簧

假设弹性短纹杆-板齿平均受力点为  $O_1$ ,扭簧中心点为  $O_2$ ,如图 4 所示。则扭簧所受初始扭矩  $T_1$  为

$$T_1 = Fh \quad (3)$$

式中  $F$ ——扭簧发生扭转的触发力, N

$h$ ——触发力  $F$  到扭簧中心的垂直距离, mm

触发力  $F$  应满足在完成脱下角果中种子的同时,尽量降低与体积较大的植株茎秆之间的相互作用强度。脱粒过程中,大白菜植株会出现物料积聚现象,为保证脱粒过程顺利进行且扭簧有合理的调节范围,结合文献[22-23]及前期力学特性试验,最终取  $F = 40$  N,此时  $h = 16$  mm,可得  $T_1 = 640$  N·mm。

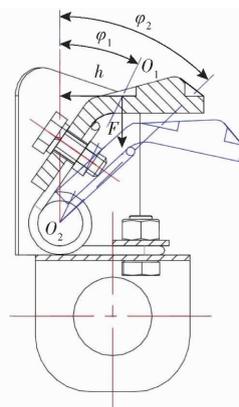


图4 弹性短纹杆-板齿受力分析

Fig. 4 Stress analysis of elastic short-rasp-bar tooth

扭簧初始扭转角  $\varphi_1 = 35^\circ$ ,考虑到整体结构强度问题,扭簧变形不宜过大,本设计取扭簧的极限扭转角  $\varphi_2 = 45^\circ$ ,则扭簧极限扭矩  $T_2$  为<sup>[24]</sup>

$$T_2 = \frac{T_1 \varphi_2}{\varphi_1} \quad (4)$$

扭簧为并列双扭系列,材料选择碳素弹簧钢,其弹性模量  $E = 1.97 \times 10^5$  MPa,扭簧有效圈数  $N$  为

$$N = \frac{Ed^4 \varphi_2}{3670D_1 T_2} \quad (5)$$

式中  $d$ ——扭簧钢丝直径,为 3.2 mm

$D_1$ ——扭簧中径, mm

扭簧中径  $D_1 = Pd$ , 根据《机械设计手册》<sup>[24]</sup>, 扭簧旋绕比  $P$  取 8.5, 最终计算得  $N = 12$ 。

### 2.2.2 柔性圆头钉齿设计

当大白菜种子与不同脱粒元件之间接触碰撞力相同时, 较大的接触面积能够弱化应力集中现象, 从而降低种子损伤。因此, 脱粒段采用材料为聚氨酯的圆头钉齿, 结合文献[25], 综合考虑圆头钉齿脱粒需求、结构尺寸和整机动平衡等因素, 最终取脱粒段钉齿直径为 8 mm, 工作高度为 70 mm。

### 2.3 滚筒模态分析

脱粒滚筒工作时高速旋转, 当旋转产生的频率与其固有频率一致时, 会产生共振现象。脱粒滚筒的共振会造成螺栓松动、部件的间隙变化及干涉碰撞等问题, 不仅影响脱粒效果, 严重时还会产生较大的安全危害<sup>[26-27]</sup>。因此, 对所设计的脱粒滚筒进行模态分析。

#### 2.3.1 有限元模型建立

采用 SolidWorks 软件建立脱粒滚筒三维模型, 后将模型导入 ANSYS Workbench 中进行分析。柔性圆头钉齿的材料为聚氨酯, 滚筒其余部分材料为 Q235B, 材料属性参数如表 2 所示。对弹性短纹杆-板齿采用 Sweep 扫略网格划分, 其余零件均采用自动网格划分, 最终产生网格单元数量为 86 340, 节点数为 246 950。

表 2 材料属性参数

Tab.2 Properties of materials

材料	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	泊松比	弹性模量/GPa
聚氨酯	1 400	0.42	0.59
Q235B	7 800	0.28	210

#### 2.3.2 有限元结果分析

选择脱粒滚筒主轴两侧端面, 分别添加固定约束。低阶共振现象的发生对机械结构的危害较大, 因此对脱粒滚筒的前 4 阶固有频率及振型进行分析, 结果如表 3 及图 5 所示。

表 3 脱粒滚筒前 4 阶模态分析结果

Tab.3 Deformation results of threshing cylinder

阶次	固有频率/Hz	最大变形量/mm	主要振型
1	69.213	10.755	整体扭曲
2	69.472	10.336	钉齿变形
3	88.123	11.948	钉齿及中部辐盘变形
4	97.343	17.108	扭簧及纹杆变形

由表 3 可知, 该脱粒滚筒 1、2 阶频率相近, 集中分布在 69 Hz 左右, 第 3、4 阶频率分别为 88.123、97.343 Hz, 固有频率呈现逐阶增长的趋势, 但对应

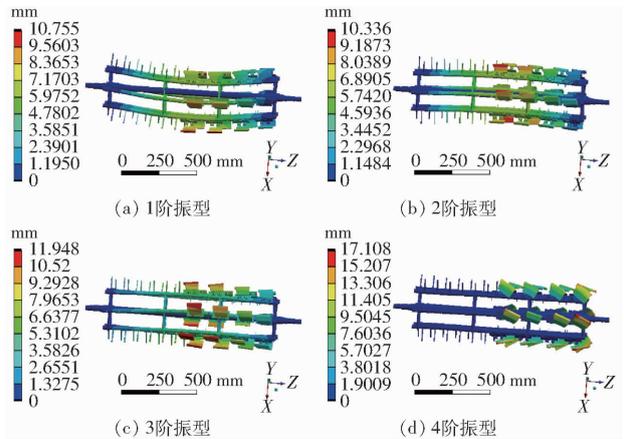


图 5 脱粒滚筒模态分析振型图

Fig.5 Modal analysis of threshing cylinder shape diagram

的最大变形量并不呈线性变化。

由图 5 可知, 1 阶振型表现为脱粒滚筒整体的扭曲, 且以固定齿杆的扭曲变形为主; 2 阶振型主要表现为柔性圆头钉齿的弯曲变形; 3 阶振型中, 钉齿变形量增大, 滚筒中部的辐盘与固定齿杆连接部位发生弯曲和扭转变形; 4 阶振型主要是扭簧及短纹杆的扭转变形。其中, 1 阶振型图中滚筒整体变形幅度最大, 变形量为 10.755 mm, 小于脱粒滚筒与圆管凹板的最小间隙设计值 15 mm, 表明脱粒滚筒与圆管凹板不会发生干涉现象。

脱粒滚筒在工作过程中, 激励来源主要来自发动机和滚筒自身的旋转激励。当激励频率超过固有频率时, 该结构存在失效风险。脱粒滚筒转速与激励频率的关系为

$$n = 60f \quad (6)$$

式中  $n$ ——脱粒滚筒转速, r/min

$f$ ——旋转激励频率, Hz

脱粒滚筒设计的最大工作转速为 950 r/min, 大白菜种子联合收获机上所用发动机额定转速为 2 200 r/min。计算得最高旋转激励分别为 15.83、36.67 Hz。在不考虑发动机和脱粒滚筒旋转所产生的频率叠加的条件下, 由发动机和滚筒工作所产生的激励频率均低于该脱粒滚筒 1 阶固有频率 69.213 Hz。因此, 所设计的脱粒滚筒在实际工作中可有效避免共振现象的发生。

### 2.4 圆管凹板设计

由于常规栅格式凹板存在棱角, 在脱粒过程中, 大白菜种子与栅格棱角的碰撞是造成种子破碎率高的原因之一。此外, 因大白菜种子尺寸较小(直径小于 2 mm), 脱粒过程结束后, 存在种子在横格板上滞留堆积的现象, 导致不同品种的大白菜种子混种的问题。针对上述问题, 设计一种圆管凹板如图 6 所示。

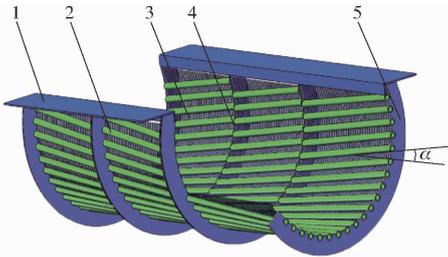


图6 圆管凹板结构简图

Fig.6 Schematic of circular tube concave plate

1. 固定板 2. 圆管 3. 筛条 4. 支撑架 5. 侧弧板

圆管凹板采用内径为 12 mm、厚度为 3 mm 的圆钢管代替常规栅格式凹板中的横格板。为保证圆管凹板的脱分能力<sup>[23]</sup>,设计各圆管间距为 30 mm,筛条间隙为 9 mm,凹板包角为 220°,长度与脱粒滚筒长度相等为 1.15 m。大白菜种子与圆管之间为点接触,很难停留在圆管表面,因此能够大大降低种子滞留在滚筒内部的概率。

为进一步提高脱粒过程中物料螺旋向后运动的能力,将圆管沿凹板轴线方向呈角度  $\alpha$  进行安装,圆管偏离轴线方向与脱粒滚筒工作时旋转方向一致,综合考虑取  $\alpha = 10^\circ$ 。

### 3 试验

#### 3.1 试验材料

脱粒试验所用物料为河南省济源市大白菜育种基地内成熟的种用大白菜植株,品种为晋菜三号,于试验田内随机选取待收获无倒伏植株,人工收割后带回实验室,并及时完成脱粒试验。试验开始前,测得大白菜植株各组分物料特性如表 4 所示。

表4 种用白菜植株物料特性

Tab.4 Plant material characteristics of Chinese cabbage

参数	数值
植株高度/mm	880 ~ 1 200
角果层直径/mm	560 ~ 860
角果含水率/%	8.28 ~ 13.16
种子含水率/%	18.39 ~ 24.25
茎秆含水率/%	40.12 ~ 44.38
种子千粒质量/g	3.08 ~ 3.25
谷草比	0.3 ~ 0.6

#### 3.2 试验方法

试验前将一定质量的大白菜植株均匀铺放到输送带一侧,并留有 5 m 的加速调整区。调整脱粒装置,待其稳定运转后,启动输送带,完成输送、喂入、脱粒和接料过程,试验现场如图 7 所示。

根据前期预试验,选取对脱粒质量影响较大的滚筒转速、脱粒间隙、喂入量为试验因素,并确定各因素范围,以种子损失率、破碎率为评价指标,进行



图7 室内试验现场

Fig.7 Indoor test site

响应面优化试验。因素编码如表 5 所示。

表5 因素编码

Tab.5 Coding value of factors

编码	因素		
	滚筒转速 A/ ( $r \cdot \min^{-1}$ )	脱粒间隙 B/ mm	喂入量 C/ ( $kg \cdot s^{-1}$ )
-1	650	15	1.2
0	750	20	1.6
1	850	25	2.0

通过排草口和接料口收集脱粒后的物料,经人工筛选、处理后,记录每组试验的损失率及破碎率,每组试验重复 3 次取平均值。参考国家标准 GB/T 5982—2017《脱粒机 试验方法》,损失率  $Y_1$  和破碎率  $Y_2$  计算式分别为

$$Y_1 = \frac{M_w + M_j}{M_z} \times 100\% \quad (7)$$

$$Y_2 = \frac{M_p}{M_0} \times 100\% \quad (8)$$

式中  $M_z$ ——损失率取样种子总质量, g

$M_w$ ——残留在角果内的未脱净种子质量, g

$M_j$ ——夹杂在杂余内部的种子质量, g

$M_p$ ——样品中破碎种子质量,包括机械损伤、裂纹和破皮的种子, g

$M_0$ ——破碎率取样种子总质量, g

#### 3.3 试验结果

试验结果如表 6 所示,  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  为因素编码值,对数据进行方差分析,结果如表 7 所示。从表 7 可知,失拟项  $P > 0.05$ ,表明模型拟合效果好,回归模型  $P < 0.01$ ,表明回归模型高度显著。

剔除方差来源中的不显著项,得到损失率  $Y_1$ 、破碎率  $Y_2$  优化后的回归方程,分别为

$$Y_1 = 0.82 + 0.58X_1 - 0.005X_2 - 0.28X_3 - 0.14X_1X_2 + 0.62X_1^2 + 0.15X_2^2 + 0.17X_3^2 \quad (9)$$

$$Y_2 = 0.13 + 0.035X_1 - 0.072X_2 - 0.13X_3 + 0.14X_1X_3 + 0.23X_1^2 + 0.03X_2^2 + 0.15X_3^2 \quad (10)$$

表 6 响应面试验设计与结果

Tab.6 Results of response surface test

试验号	因素			损失率 $Y_1/\%$	破碎率 $Y_2/\%$
	$X_1$	$X_2$	$X_3$		
1	0	-1	-1	0.99	0.57
2	0	1	1	0.49	0.18
3	-1	0	-1	0.92	0.81
4	1	-1	0	2.32	0.49
5	0	1	-1	2.02	0.20
6	-1	0	1	0.88	0.23
7	0	-1	1	1.06	0.17
8	0	0	0	0.82	0.16
9	-1	-1	0	1.10	0.34
10	-1	1	0	1.14	0.22
11	1	1	0	1.78	0.39
12	1	0	1	1.96	0.49
13	0	0	0	0.78	0.10
14	1	0	-1	2.66	0.51
15	0	0	0	0.86	0.13

表 7 方差分析

Tab.7 Analysis of variance

方差来源	损失率			破碎率		
	平方和	F	P	平方和	F	P
模型	1.35	73.06	<0.000 1**	0.41	323.69	<0.000 1**
$X_1$	0.44	214.99	<0.000 1**	0.058	410.41	<0.000 1**
$X_2$	0.009	4.43	0.049 1*	0.029	204.50	<0.000 1**
$X_3$	0.41	199.28	<0.001 **	0.018	128.17	<0.000 1**
$X_1X_2$	0.021	10.23	0.024 0*	0.000 05	0.40	0.555 2
$X_1X_3$	0.004	2.06	0.211 1	0.006	42.65	0.001 3**
$X_2X_3$	0.000 9	0.44	0.537 4	0.000 3	2.17	0.200 3
$X_1^2$	0.27	133.42	<0.001 **	0.29	2 052.40	<0.000 1**
$X_2^2$	0.045	21.74	0.005 5**	0.004	31.74	0.002 4**
$X_3^2$	0.20	99.23	0.000 2**	0.025	177.54	<0.000 1**
残差	0.010			0.000 7		
失拟	0.009	7.9	0.114 5	0.000 2	0.34	0.804 1
总和	1.36			0.41		

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

通过对回归模型的分析,得出各因素对损失率和破碎率影响由大到小为滚筒转速、喂入量、脱粒间隙。

### 3.4 试验因素交互作用分析

#### 3.4.1 因素交互作用对损失率的影响

因素交互作用对损失率  $Y_1$  的影响响应面如图 8 所示,分析可知:

(1) 损失率随滚筒转速的增大先减小后增大。随着滚筒转速的增大,脱粒元件对物料的冲击、碾压、揉搓和搅动作用增强,部分难脱种子被脱下,夹带种子被分离,因此损失率减小;当滚筒转速持续增大时,物料在脱粒滚筒内停留的时间及被作用次数越来越少,导致未脱净损失率增大;种子尚未分离就从排草口排出,导致夹带损失率增大,因此,总损失率增大。

(2) 随着脱粒间隙增大,损失率变化幅度不明显,整体呈先降低后升高的趋势。分析可知,脱粒间隙逐渐增大会在一定程度上增大脱粒空间,物料被脱

粒元件搅动的幅度更大,使茎秆和种子分离更加充分,进而夹带损失率降低;当脱粒间隙越来越大时,物料层过于蓬松,物料受碾压和揉搓的作用程度降低,导致未脱净损失率逐渐升高。

(3) 随着喂入量的增加,损失率先降低后升高。这是因为弹性元件具有可调节能力,在喂入量增加初期,滚筒内物料增多,物料层压实度增加,物料受脱粒元件及物料内部之间作用力增大,导致未脱净种子减少,损失率降低;随着喂入量不断增加,物料开始积聚,脱粒元件变形调节能力减弱,夹杂在物料内部的角果和种子增多,造成脱粒分离不完全现象,损失率升高。

#### 3.4.2 因素交互作用对破碎率的影响

因素交互作用对破碎率  $Y_2$  的影响响应面如图 9 所示,分析可知:

(1) 随滚筒转速增加,破碎率呈先降低后升高的趋势。滚筒转速增加初期,物料在脱粒装置内停留时间减少,种子受到的冲击概率降低,破碎率变

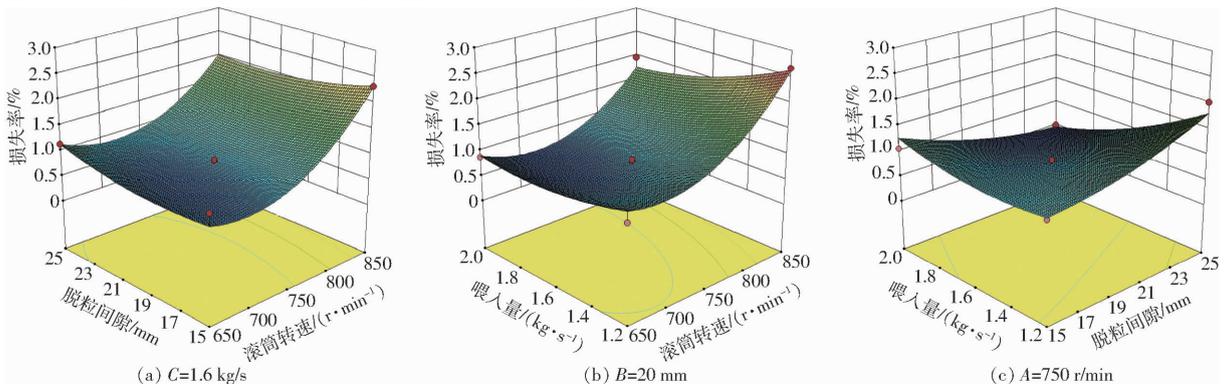


图 8 因素交互作用对损失率影响的响应面

Fig. 8 Influence of factors interaction on loss rate

小;随着滚筒转速越来越大,脱粒元件对物料的作用强度和频率均增大,因此破碎率逐渐升高。

(2)破碎率随脱粒间隙的增大整体呈下降趋势。脱粒间隙增加,物料层变得蓬松,脱粒元件对物料的碾压和揉搓作用减弱,物料受到冲击时有更大的缓冲空间,因此破碎率变小。

(3)随着喂入量逐渐增加,破碎率先减小后增

大,但增大幅度缓慢。随着喂入量的增加,脱粒滚筒内的物料增多,导致弹性脱粒元件发生变形,直接与脱粒元件作用的种子减少,通过物料内部之间摩擦作用完成脱粒过程的种子增多,因此破碎率降低;随着喂入量越来越大,物料层持续增厚,脱粒元件变形调节能力减弱,导致与脱粒元件直接接触的物料受到的碾压力增大,碾压作用增强导致破碎率升高。

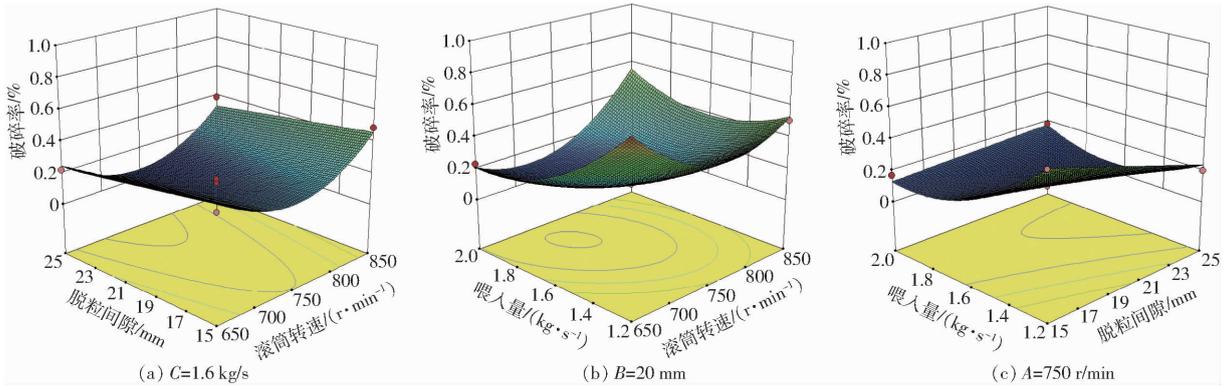


图9 因素交互作用对破碎率影响的响应面

Fig.9 Influence of factors interaction on breaking rate

### 3.5 脱粒装置参数优化

为得到该大白菜种子脱粒装置的最优工作参数,利用 Design-Expert 软件中自带的 Optimization 功能,分别设置各试验因素的边界条件为:滚筒转速 650 ~ 850 r/min,脱粒间隙 15 ~ 25 mm,喂入量 1.2 ~ 2.0 kg/s;破碎率 0 ~ 1%,权重为 0.6;损失率 0 ~ 3%,权重为 0.4。

在脱粒损失率、破碎率均最低的情况下,得到该脱粒装置的最优参数组合为:滚筒转速 726 r/min、脱粒间隙 22.3 mm、喂入量 1.73 kg/s,此时损失率为 0.56%,破碎率为 0.15%。

### 3.6 田间试验验证与对比

在最优工作参数组合下,对弹性短纹杆-板齿组合式脱粒装置及常规钉齿-栅格凹板式脱粒装置进行田间对比试验,试验于 2021 年 5 月在河南省济源市大白菜育繁种基地进行,试验对象为晋菜三号,种植方式为移栽,种植行间距为 90 mm,联合收获机一次收获两行,试验现场如图 10 所示。

根据 GB/T 8097—2008《收获机械 联合收割机 试验方法》的规定,选取长势均匀,植株高度、密度及产量水平一致性较好的大白菜植株进行收获试验,按照准备区 10 m、测定区 10 m、停车区 10 m 的作业方式对收割区域划分,试验过程中,每组试验均保持样机的满幅、匀速作业,且确保留茬高度一致。每次试验后采集经排草口及脱粒装置出口排出杂质中的夹带种子、未脱净种子,以及出粮口所有种子,并参照室内试验方法及时进行人工处理。



图10 田间试验现场

Fig.10 Field test site

田间试验结果表明,弹性短纹杆-板齿组合式脱粒装置的种子损失率为 0.68%,破碎率为 0.39%,与软件优化得到的结果接近,说明试验结果与软件预测的结果具有可靠性。钉齿-栅格凹板式脱粒装置损失率为 0.61%,两种收获方式相差不大,且弹性短纹杆-板齿组合式脱粒装置的种子破碎率降低了 48.7%,表明该脱粒装置能够在满足脱粒需求的前提下,显著降低种子破碎程度。

## 4 结论

(1)针对大白菜种子脱粒的要求,采用理论与试验相结合的方法,设计了一种弹性短纹杆-板齿组合式大白菜种子脱粒装置。该装置区别于常规钉齿式脱粒滚筒和栅格式凹板筛,采用弹性短纹杆-板齿和柔性圆头钉齿组合作为脱粒元件,凹板采用圆管凹板,可有效减弱对物料的刚性冲击,降低大白菜种子的破碎率。

(2)通过响应面试验,建立了滚筒各因素与脱粒性能之间的回归模型,分析得到对损失率和破碎率的影响由大到小为:滚筒转速、喂入量、脱粒间隙。

(3)田间试验表明,对于种子含水率 18.39% ~ 24.25%、茎秆含水率 40.12% ~ 44.38%、谷草比 0.3 ~ 0.6 的大白菜种子植株,弹性短纹杆-板齿组

合式大白菜种子脱粒装置的最佳结构和工作参数组合为:滚筒转速 726 r/min、脱粒间隙 22.3 mm、喂入量 1.73 kg/s,此时种子损失率为 0.68%,破碎率为 0.39%。通过与常规脱粒装置对比试验,发现弹性短纹杆-板齿组合式脱粒装置的种子破碎率降低了 48.7%,能够有效提高脱粒质量。

### 参 考 文 献

- [1] 陈霖,张杰,薛一花,等. 大白菜(*Brassica campestris*)新品种‘秋白75’纯度的 SSR 鉴定[J]. 分子植物育种印刷版,2019,17(19):6378-6382.  
CHEN Lin, ZHANG Jie, XUE Yihua, et al. Purity identification of hybrid ‘Qiubai75’ (*Brassica campestris*) with SSR markers [J]. Molecular Plant Breeding Print, 2019, 17(19):6378-6382. (in Chinese)
- [2] 石增祥,吴明亮,杨文敏,等. 我国油菜分段收获机械研究现状与发展对策[J]. 农业工程,2015,5(5):1-4.  
SHI Zengxiang, WU Mingliang, YANG Wenmin, et al. Research status and development measures of rape segment harvester in China [J]. Agricultural Engineering, 2015, 5(5):1-4. (in Chinese)
- [3] 吴崇友,肖圣元,金梅. 油菜联合收获与分段收获效果比较[J]. 农业工程学报,2014,30(17):10-16.  
WU Chongyou, XIAO Shengyuan, JIN Mei. Comparison on rape combine harvesting and two-stage harvesting[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(17):10-16. (in Chinese)
- [4] PETKEVICHIUS S, SHPOKAS L, KUTZBACH H D. Investigation of the maize ear threshing process [J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(4):532-539.
- [5] 师清翔,刘师多,姬江涛,等. 控速喂入柔性脱粒机理研究[J]. 农业工程学报,1996,12(2):173-176.  
SHI Qingxiang, LIU Shiduo, JI Jiangtao, et al. Studies on the mechanism of speed controlled feeding and soft threshing[J]. Transactions of the CSAE, 1996, 12(2):173-176. (in Chinese)
- [6] 谢方平,罗锡文,卢向阳,等. 柔性杆齿滚筒脱粒机理[J]. 农业工程学报,2009,25(8):110-114.  
XIE Fangping, LUO Xiwen, LU Xiangyang, et al. Threshing principle of flexible pole-teeth roller for paddy rice [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8):110-114. (in Chinese)
- [7] 任述光,谢方平,罗锡文,等. 柔性齿与刚性齿脱粒水稻功耗比较分析与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(5):12-18.  
REN Shuguang, XIE Fangping, LUO Xiwen, et al. Analysis and test of power consumption in paddy threshing using flexible and rigid teeth [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(5):12-18. (in Chinese)
- [8] 陈美舟,徐广飞,王传旭,等. 纵轴流辊式组合玉米柔性脱粒分离装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(10):123-131.  
CHEN Meizhou, XU Guangfei, WANG Chuanxu, et al. Design and experiment of roller-type combined longitudinal axial flow flexible threshing and separating device for corn [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10):123-131. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20201014&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20201014&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.014. (in Chinese)
- [9] 邸志峰,崔中凯,张华,等. 纹杆块与钉齿组合式轴流玉米脱粒滚筒的设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(1):28-34.  
DI Zhifeng, CUI Zhongkai, ZHANG Hua, et al. Design and experiment of rasp bar and nail tooth combined axial flow corn threshing cylinder [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1):28-34. (in Chinese)
- [10] 耿端阳,何珂,王赛,等. 横轴流式玉米柔性脱粒装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(3):101-108.  
GENG Duanyang, HE Ke, WANG Qian, et al. Design and experiment on transverse axial flow flexible threshing device for corn [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3):101-108. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190310&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190310&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.010. (in Chinese)
- [11] 王传旭,陈美舟,王建祥,等. 轴流式玉米柔性脱粒装置设计与试验[J]. 农机化研究,2021,43(4):47-53.  
WANG Chuanxu, CHEN Meizhou, WANG Jianxiang, et al. Design and experiment of axial flow corn flexible threshing device [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(4):47-53. (in Chinese)
- [12] 李耀明,李洪昌,徐立章. 短纹杆-板齿与钉齿脱粒滚筒的脱粒对比试验研究[J]. 农业工程学报,2008,24(3):139-142.  
LI Yaoming, LI Hongchang, XU Lizhang. Comparative experiments on threshing performance between short-rasp-bar tooth cylinder and spike tooth cylinder [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3):139-142. (in Chinese)
- [13] 李耀明,李洪昌,徐立章,等. 短纹杆板齿式轴流脱粒分离装置性能试验[J]. 农业机械学报,2009,40(7):88-92.  
LI Yaoming, LI Hongchang, XU Lizhang, et al. Performance test of short-rasp-bar of axial flow threshing and separating unit [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7):88-92. (in Chinese)
- [14] BARAN M, DURGUT M, AKTAS T, et al. Determination of some physical properties of rapeseed [J]. International Journal of Engineering Technologies, 2016, 2(2):49-55.
- [15] SKUBISZ G. Development of studies on the mechanical properties of winter rape stems [J]. International Agrophysics, 2001, 15(3):197-200.
- [16] 孙静鑫,杨作梅,郭玉明,等. 谷子籽粒压缩力学性质及损伤裂纹形成机理[J]. 农业工程学报,2017,33(18):306-314.  
SUN Jingxin, YANG Zuomei, GUO Yuming, et al. Compression mechanical properties and crack formation law of millet grain [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(18):306-314. (in Chinese)
- [17] 马征,李耀明,徐立章. 油菜茎秆弹性力学特性试验研究[J]. 农机化研究,2016,38(5):187-191.  
MA Zheng, LI Yaoming, XU Lizhang. Experimental research of elastic mechanics of rape stalks [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(5):187-191. (in Chinese)
- [18] 任述光,陈赛,吴明亮,等. 成熟期油菜果角角裂极限应力的试验测定[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2018,44(5):559-564.  
REN Shuguang, CHEN Sai, WU Mingliang, et al. Limit stress at corner cracking of rape's pod in mature period measured by

- mechanical test[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science)*, 2018, 44(5):559-564. (in Chinese)
- [19] 青苡任,李耀明,马征,等. 油菜角果抗裂角性二自由度碰撞测试方法研究[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(5):33-40. QING Yiren, LI Yaoming, MA Zheng, et al. Technology of 2-DOF collision testing for rape pod shatter resistance[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(5):33-40. (in Chinese)
- [20] 樊晨龙,崔涛,张东兴,等. 低损伤组合式玉米脱粒分离装置设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(4):113-123. FAN Chenlong, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Design and test of low-damage combined corn threshing and separating device[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(4):113-123. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190413&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190413&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.013. (in Chinese)
- [21] 李耀明. 谷物联合收割机的设计与分析[M]. 北京:机械工业出版社, 2014.
- [22] 蔡超杰,陈志,韩增德,等. 种子玉米生物力学特性与脱粒性能的关系研究[J]. *农机化研究*, 2017, 39(4):192-196. CAI Chaojie, CHEN Zhi, HAN Zengde, et al. Study on relationship of biomechanical characteristics of corn seed and threshing performance[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2017, 39(4):192-196. (in Chinese)
- [23] 耿端阳,谭德蕾,于兴瑞,等. 玉米柔性脱粒滚筒脱粒元件设计与试验[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2020, 50(5):1923-1933. GENG Duanyang, TAN Delei, YU Xingrui, et al. Design and test of corn flexible threshing cylinder element[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology)*, 2020, 50(5):1923-1933. (in Chinese)
- [24] 闻邦椿. 机械设计手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
- [25] 谢方平,罗锡文,苏爱华,等. 刚性弓齿与杆齿及柔性齿的脱粒对比试验[J]. *湖南农业大学学报(自科版)*, 2005, 31(6):648-651. XIE Fangping, LUO Xiwen, SU Aihua, et al. Contrastive experiment on threshing by using rigid wire-loop, rigid pole tooth and flexible pole tooth[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science)*, 2005, 31(6):648-651. (in Chinese)
- [26] TANG Z, ZHANG H, ZHOU Y. Unbalanced vibration identification of tangential threshing cylinder induced by rice threshing process[J]. *Shock and Vibration*, 2018: 1-14.
- [27] HOSTENS I, RAMON H. Descriptive analysis of combine cabin vibrations and their effect on the human body[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 266(3): 453-464.

## (上接第 85 页)

- [18] 张东速,韦朝坤,唐珊珊,等. 高压水射流靶物探测用喷嘴结构参数优化[J]. *流体机械*, 2014, 42(9):35-38, 18. ZHANG Dongsu, WEI Chaokun, TANG Shanshan, et al. Nozzle structure parameters of the optimal to high pressure water jet target detection[J]. *Journal of Fluid Machinery*, 2014, 42(9): 35-38, 18. (in Chinese)
- [19] 胡寿根,朱美洲,蒋澄. 淹没水射流冲刷性能试验研究[J]. *机械工程学报*, 1997, 33(3):44-48. HU Shougen, ZHU Meizhou, JIANG Cheng. Experimental study on erosion performance with submerged water jet[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 1997, 33(3): 44-48. (in Chinese)
- [20] 章梓雄,董曾南. 粘性流体力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2011.
- [21] 杨艳,陈华,黄宏亮,等. 水力分析与计算[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2016:10-13.
- [22] 李范山,杜嘉鸿,施小博,等. 射流破土机理研究及其工程应用[J]. *流体机械*, 1997(2):26-29.
- [23] 何煦,桑琦明,郑粉莉,等. 东北不同黑土厚度区多营力作用的坡面土壤侵蚀试验研究[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1):103-109, 115. HE Xu, SANG Qiming, ZHENG Fenli, et al. An experimental study on impact of multiples agent actions on sloping water erosion in different mollic thickness regions of Northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1):103-109, 115. (in Chinese)
- [24] 王子龙,常广义,姜秋香,等. 灰色关联及非线性规划法构建传递函数估算黑土水力参数[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(10):60-68. WANG Zilong, CHANG Guangyi, JIANG Qiuxiang, et al. Constructing pedo-transfer functions based on grey relational and nonlinear programming to estimate hydraulic parameters in black soil[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(10):60-68. (in Chinese)
- [25] 董明辉,赵步洪,陈培峰,等. 机插方式对杂交粳稻碳氮调节与颖花形成及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(13):65-73. DONG Minghui, ZHAO Buhong, CHEN Peifeng, et al. Effects of machine insertion on carbon and nitrogen metabolism of hybrid japonica rice and its relationship with spikelet and yield formation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(13):65-73. (in Chinese)
- [26] 张兆国,王一驰,李汉青,等. 液压控制履带自走式温室三七收获机设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2021, 52(6):127-135, 158. ZHANG Zhaoguo, WANG Yichi, LI Hanqing, et al. Design and test of hydraulic control tracked self-propelled greenhouse *Panax notoginseng* harvester[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(6):127-135, 158. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20210613&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210613&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.06.013. (in Chinese)
- [27] 郑乐,罗锡文,曾山,等. 水稻根茬-土壤复合体剪切特性试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(5):63-71. ZHENG Le, LUO Xiwen, ZENG Shan, et al. Shear characteristics of rice root-soil composite[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(5): 63-71. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170507&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170507&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.007. (in Chinese)
- [28] 刘定辉,李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(3):34-37, 117. LIU Dinghui, LI Yong. Mechanism of plant roots improving resistance of soil to concentrated flow erosion[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(3): 34-37, 117. (in Chinese)