

# 油菜轴流脱粒装置作业参数对损失率及产尘浓度的影响

田 伟<sup>1</sup>, 马丽娜<sup>1,2</sup>, 宗望远<sup>1,2\*</sup>, 魏俊逸<sup>1</sup>

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

**摘 要:** 针对油菜收获机械在工作过程中产生大量粉尘, 危害人体健康、污染环境等问题, 对油菜轴流脱粒装置作业参数对脱粒损失率和呼吸性粉尘浓度峰值的影响进行了试验研究。以滚筒转速、脱粒间隙、钉齿间距为试验因素, 以脱粒损失率、呼吸性粉尘浓度峰值为试验指标, 进行二次回归正交旋转组合试验, 建立了各因素与脱粒损失率、呼吸性粉尘浓度峰值之间的回归模型, 分析了各因素对指标的影响并对各因素进行优化。结果表明: 各因素对脱粒损失率的影响大小顺序为: 脱粒间隙>滚筒转速>钉齿间距; 各因素对呼吸性粉尘浓度峰值的影响大小顺序为: 钉齿间距>脱粒间隙>滚筒转速。对试验所得最优参数进行验证试验, 结果显示, 当滚筒转速 548 r·min<sup>-1</sup>、脱粒间隙 19.4 mm、钉齿间距 150 mm 时, 脱粒损失率为 0.47%, 呼吸性粉尘浓度峰值为 31.62 mg·m<sup>-3</sup>, 脱粒损失率相对误差为 2.13%, 呼吸性粉尘浓度峰值相对误差为 4.59%。相对误差较小, 优化模型可靠。研究结果可为农作物收获机械的降尘、除尘方案设计提供参考。

**关键词:** 油菜机械收获; 脱粒装置; 脱粒损失率; 呼吸性粉尘浓度; 参数优化

中图分类号: S226.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2020)06-1038-07

## Effects of operating parameters of rapeseed axial flow threshing device on loss rate and dust production concentration

TIAN Wei<sup>1</sup>, MA Lina<sup>1,2</sup>, ZONG Wangyuan<sup>1,2</sup>, WEI Junyi<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070;

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture, Wuhan 430070)

**Abstract:** When working, rape harvester machines produce plenty of dust, harming human health and polluting the environment. This paper carried out test investigations on the influences of operating parameters of the axial flow threshing device on threshing loss rate and peak respirable dust concentration. Taking drum speed, threshing gap and spike-tooth spacings as test factors, taking threshing loss rate and peak respirable dust concentration as test indexes, a quadratic regression orthogonal rotation combined test was carried out to build the regression model between test factors and threshing loss rate, peak respirable dust concentration indexes to analyze the influences of various factors on indexes. Moreover, test factors were optimized. The test results showed that the influences of various factors on the threshing loss rate are as follows: threshing clearance > drum speed > nail tooth spacing, and the influences of various factors on the peak respirable dust concentration are as follows: nail tooth spacing > threshing clearance > drum speed. The optimized parameters are as follows: the rotating speed of the drum is 548 r·min<sup>-1</sup>, and the threshing clearance is 19.4 mm, and the nail tooth spacing is 150 mm. Test was implemented to verify the parameters optimization results. The test results showed that the threshing loss rate is 0.47%, and the peak respirable dust concentration is 31.62 mg·m<sup>-3</sup>. The relative error of threshing loss rate of is 2.13% and the relative error of peak respirable dust concentration is 4.59%. The relative error is very small, so the optimized model is reliable. This paper can provide some research basis for the dust reduction and dedusting schemes of crop harvest machines.

**Key words:** rape harvest machines; threshing device; threshing loss rate; peak respirable dust concentration; parameter optimization

收稿日期: 2020-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(31671592)资助。

作者简介: 田 伟, 硕士研究生。E-mail: tzzyyx@163.com

\* 通信作者: 宗望远, 教授, 博士生导师。E-mail: zwy@mail.hzau.edu.cn

油菜是中国重要的油料作物, 其常年种植面积在 650 万  $\text{hm}^2$  以上, 是中国的优势农产品之一<sup>[1]</sup>。针对油菜机械化收获, 国内外科研工作者开展了大量研究, 这些研究工作主要集中在降低收获损失率、作业功耗<sup>[2-3]</sup>、含杂率<sup>[4-5]</sup>、籽粒损伤<sup>[6]</sup>, 以及提升作业效率等方面。而随着农业可持续发展理念的不断深入<sup>[7]</sup>, 高效绿色收获成为重要的研究方向。

中国油菜联合收割机目前多为中小型收割机<sup>[8-9]</sup>, 其开放式的驾驶环境使得在收获过程中产生的大量粉尘直接与作业人员接触, 危害人体健康, 同时逸散的粉尘也会造成环境污染。2019 年 5 月 16 号, 作者在湖北省天门市银丰农机合作社油菜种植基地对田间进行油菜收获作业的联合收割机进行了产尘浓度检测。检测结果显示: 呼吸性粉尘浓度(简称: 呼尘浓度) 峰值为  $68.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 均值为  $28.3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 总粉尘浓度峰值为  $144.3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 均值为  $60.9 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。根据中华人民共和国国家职业卫生标准<sup>[10]</sup>对职业性粉尘接触限值的规定, 作业环境粉尘浓度严重超标, 急需改善作业人员的作业环境。

脱粒装置是联合收割机重要工作部件, 也是粉尘主要产生源之一。脱粒损失率是评价脱粒装置作业效果的重要指标, 作业过程中脱粒元件与凹板筛相配合, 对油菜产生冲击、搓擦和碾压等作用<sup>[11-13]</sup>, 使得籽粒从果荚中脱出, 并通过脱出物空气动力学特性的不同进行清选<sup>[14-17]</sup>, 最终获得油菜籽粒。在获得油菜籽粒的同时, 强烈的冲击、搓擦以及碾压作用, 使得物料破碎, 部分较小粒径物料逸散到空气中形成粉尘。

粉尘浓度特性是开展防尘、抑尘工作的重要依据, 许多学者对粉尘特性及其危害开展了相关研究。Joseph 等<sup>[18-19]</sup>针对向日葵收获过程中沉积于机具表面的秸秆性粉尘来源、粒度分布、着火点等粉尘特性进行了研究, 但未对产尘机制及逸散粉尘浓度对人体、环境的危害开展研究。王立军等<sup>[20]</sup>设计并优化了玉米收获机清选室粉尘导流板, 其导流板能有效的改变粉尘气流及脱出物运动方向, 但并未对粉尘产生机制及产尘浓度等重要特性开展研究。徐峰等<sup>[21]</sup>针对农业可持续发展与农业机械化之间的关系, 提出为农业发展提供高效绿色的农具, 以促进农业的可持续发展。

本研究对油菜收获过程中粉尘产生机制进行了分析, 通过试验研究的方法, 对油菜脱粒装置主要作业参数与脱粒损失率、呼尘浓度峰值之间的关系, 秸秆含水率对产尘量的影响规律进行了研究。本研究可为后续降尘、除尘方案的制定, 开展低尘绿色

收获提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与设备

2019 年 5 月在华中农业大学油菜种植基地对同地块油菜进行人工收获, 分 A、B、C 三组油菜, 在挂藏库挂藏, 每组有 10 份样本, 每份质量为 4 kg, 挂藏样本通风良好, 可较好保持其生物学特性。

主要试验设备有试验台架、粉尘浓度检测设备, 除尘布袋(涤纶 741)包裹于脱粒装置凹板筛下, MB45 快速水分测定仪, 分层筛(12、40 目), 天平秤(精度 0.01 g), 智能型数字转速表(精度  $0.1 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ), 三项变频器(精度 0.1%), 卷尺(精度 1 mm), 计算机, 12 V 锂电池。

(1) 试验台架: 为探寻脱粒装置工作参数与呼尘浓度、脱粒损失率之间的关系, 针对目前应用较为广泛的纵轴流脱粒装置进行研究。根据前期通过高速摄影对特定油菜茎秆的追踪拍摄并结合已有的相关研究, 提出影响油菜物料破碎的主要参数为滚筒转速、脱粒间隙、钉齿间距。根据脱粒装置作业产尘分析, 设计并搭建纵轴流脱粒装置试验台架, 装置主要参数见表 1。据文献所述, 王刚等<sup>[6]</sup>, 宗望远等<sup>[12-13]</sup>对滚筒转速、脱粒间隙对脱粒效果的影响, 结合前期研究选取脱粒滚筒转速范围在  $400\sim 900 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 通过变频器对其转速进行调节。选取脱粒间隙在  $5\sim 30 \text{ mm}$  范围可调。钉齿间距在  $50\sim 150 \text{ mm}$  范围等距可调。

表 1 纵轴流脱粒分离装置主要参数

Table 1 Main parameters of vertical axial flow threshing and separating device

参数 Parameters	数值 Value
滚筒直径 Drum diameter/mm	620
滚筒长度 Drum length/mm	1 800
滚筒转速 Drum speed/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	>400
脱粒元件 Threshing element	钉齿
脱粒间隙 Threshing gap/mm	5~30
钉齿直径 Spike diameter/mm	12
齿杆排数 Number of racks	6
凹板包角 Concave plate angle/ $^{\circ}$	180

(2) 粉尘浓度检测设备: 为保证粉尘检测数据的实时记录, 将 GCG1000 粉尘浓度传感器与 DH5902 型信号采集分析仪配合使用。GCG1000 粉尘浓度传感器为青岛聚创环保设备有限公司生产, 可实现对总粉尘和呼尘的实时连续性监测, 测量范围  $0\sim 1\ 000 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , DH5902 型信号采集分析仪为

江苏东华测试技术股份有限公司生产。

GCG1000 粉尘传感器可将粉尘浓度转换成 4~20 mA 电流信号输出, 且电流值与粉尘质量浓度呈线性关系, 关系式为:

$$C=62.5I - 250 \quad (1)$$

式中  $C$  为粉尘质量浓度,  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $I$  为电流值, mA。

DH5902 信号采集仪, 采集电信号形式为 1 000~5 000 mV 电压信号, 需对 GCG1000 粉尘浓度传感器输出电信号进行转换, 对 DH5902 型信号采集分析仪采集的电压信号值与粉尘质量浓度值进行两点标定, 获取电压值与粉尘质量浓度的线性关系。

电信号转换: 粉尘浓度传感器电信号输出线并联 RX70-E 250R 高精密度电阻, 获得可被 DH5902 型信号采集分析仪识别采集的 1 000~5 000 mV 电压信号, 对应 GCG1000 粉尘浓度传感器测量范围 0~1 000  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

两点标定: 将 (1 000,0) (5 000,1 000) 带入线性关系式:

$$C=kU+b \quad (2)$$

获得:

$$C=0.25U - 250 \quad (3)$$

式中  $C$  为粉尘质量浓度,  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $k$  为比例系数;  $U$  为电压值, mV;  $b$  为常数项。

经检验 DH5902 型信号采集分析仪获得浓度与 GCG1000 粉尘传感器显示浓度误差在 1% 以内, 故装置可用。

## 1.2 试验方法

**1.2.1 产尘量检测** 本试验采用筛分法收集脱粒产尘, 分析油菜含水率、脱粒滚筒转速对粉尘产生量的影响。于 2019 年 5 月 11 号对 A 组油菜进行脱粒粉尘收集试验, 利用除尘布袋密封包裹在凹板筛下并使布袋与凹板筛之间留有一定空间来储存脱出物。脱粒台架仅留有物料喂入口和排出口, 以滚筒转速为变量, 分别在 460、560、660、760 和 860  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  下进行脱粒作业, 每份样本脱粒完毕后静置 5 min 使粉尘得到充分沉降, 取下除尘布袋通过 12 目和 40 目标准筛筛分布袋内的脱出物, 获得粉尘样品, 每组试验重复一次。B、C 两组样本分别于 14、18 号重复上述操作。三组试验油菜茎秆含水率分别为 64.62%、28.31%、10.52%。

**1.2.2 呼尘浓度检测点的选取** 为保证检测数据具有代表性, 能准确反映脱粒产尘情况, 对粉尘检测位置进行选取。首先建立如图 1a 所示的坐标系, 以滚筒轴线的作业起始点为坐标原点 O, 滚筒轴线为

X 轴, 垂直于 X 轴水平向外的方向为 Y 轴, 竖直向上方向为 Z 轴。经前期对筛下物料分布情况的研究得到  $X=700$  mm 处筛下脱出物料最多, 作业强度大, 故在  $X=700$  mm 处横切面上选取粉尘检测点。

如图 1b 所示, 在  $X=700$  mm 横切面上以滚筒轴为圆心, 分别以  $L=500$  mm、600 mm、700 mm 做四分之一圆弧与 Y 方向、-Z 方向以及  $\angle YO-Z$  的角平分线分别相交获得 A、B、C 系列点, 对所得点进行粉尘浓度检测试验, 进行分析获取最适检测点。

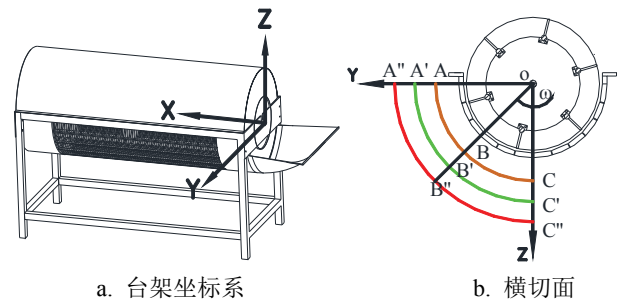


图 1 坐标点的选取

Figure 1 Selection of coordinate points

表 2 不同位置处呼尘浓度峰值分布

Table 2 Peak distribution of dust concentration at different locations  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$

检测半径/mm	Y 方向	45°角方向	Z 方向
Detection radius	Y direction	45° angle direction	Z direction
500	A (81.3)	B (108.4)	C (157.3)
600	A' (50.6)	B' (86.9)	C' (57.5)
700	A'' (90.1)	B'' (51.1)	C'' (30.3)

表 3 试验因素水平

Table 3 Test factor level

水平 Level	因素 Factor		
	滚筒转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ Drum speed $X_1$	脱粒间隙/mm Threshing gap $X_2$	钉齿间距/mm Spike-Tooth Spacing's $X_3$
1.682	660	25	150/100
1	620	21	130/100
0	560	15	100/100
-1	500	9	70/100
-1.682	460	5	50/100
$\Delta_i$	60	6	30

注: 中心点的试验次数为 6 次。

Note: Number of tests for the center point is 6 times.

本试验难以在短时间内完成, 为保证前后试验材料的一致性, 选用人工收获的挂藏油菜。设置脱粒台架作业参数: 转速为 560  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 脱粒间隙为 8 mm, 钉齿间距 70 mm 齿杆和间距 140 mm 齿杆交错排列。每次试验喂入量为 1 kg, 每个坐标点试验三次, 记录各点呼尘浓度变化情况。

各点粉尘浓度峰值如表 2 所示, 其分布规律: 在-Z 方向与 $\angle YO-Z$ 角平分线上粉尘浓度峰值随着检测半径的增大而减小, 这主要是远离尘源, 粉尘逸散造成粉尘浓度峰值降低; 在 Y 方向上粉尘浓度峰值先降低后上升, 主要是由于滚筒底部筛面逸出粉尘向上扩散汇入, 使其浓度由低升高。为验证 Y 方向粉尘浓度峰值变化趋势, 对 (700,800,0)、(700,900,0) 坐标点进行产尘检测试验, 获得两测尘点浓度峰值分别为  $62.3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $41.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 其粉尘浓度峰值持续降低, 故在 600~800 mm 距离范围内存在浓度极值点, 且进行粉尘检测时 Y 方向上点受筛下排出颖杂影响最小, 综合考虑选 A'' 点为产尘监测点。

**1.2.3 正交试验设计** 为探究脱粒装置作业参数与脱粒损失率、产尘浓度之间的关系, 依据中心组合试验设计 (Central Composite) 原理, 设计三元二次回归正交旋转组合试验。选定脱粒滚筒转速 (460~660  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )、脱粒间隙 (5~25 mm)、钉齿间距 (50~150 mm) 为影响因素, 鉴于呼尘对人体、环境的危害程度大并兼顾脱粒装置作业效果, 以脱粒损失率  $y_1$  (物料排出口排出籽粒占总籽粒重量的百分比)、呼尘浓度峰值  $y_2$  为评价指标, 开展响应面试验研究, 试验因素、水平如表 3 所示。

选取人工收获的挂藏油菜为试验材料, 每次喂入量为 1 kg, 试验前调试好粉尘浓度检测设备并安放到测尘点, 在各设备正常运转后喂入油菜记录呼尘浓度变化情况。

## 2 结果与分析

### 2.1 产尘量检测

粉尘样品收集量如表 4 所示, 分析可得油菜样本含水率对脱粒产尘量影响较大, 含水率与产尘量呈负相关性, 随着含水率的降低其产尘量呈倍数上升。随着油菜茎秆含水率的降低, 茎秆物理特性改变, 韧性降低, 脆性增加, 受到脱粒元件冲击后更容易破碎; 滚筒转速与产尘量之间非正相关, 随着滚筒转速的增加产尘量先上升后降低, 根据能量理论与加载理论, 滚筒转速越快脱粒元件与秸秆碰撞能量越高, 秸秆越容易破碎, 粉尘生成量越多, 同时随着滚筒转速的提升, 破碎秸秆越快排出, 冲击时间、次数减少造成粉尘产生量下降, 具体关系需进一步研究, 本试验条件下转速为 660  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  时产尘量最高。

### 2.2 脱粒参数与呼尘浓度关系

(1) 试验结果。依据中心复合试验设计原理,

试验方案共有 20 个试验点, 试验结果如表 5 所示。

(2) 回归方程与方差分析。利用 Design Expert 软件对试验所得数据进行分析处理, 建立脱粒损失率、呼尘浓度峰值的回归模型, 方差分析如表 6 所示。结果表明, 各因素对脱粒损失率的影响由大到小为: 脱粒间隙>滚筒转速>钉齿间距; 各因素对呼尘浓度峰值的影响由大到小为: 钉齿间距>脱粒间隙>滚筒转速。

表 4 秸秆粉尘样品收集量

含水率/% Moisture content	转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ Rotating speed	收集量/g Collected
64.62	460	0.74
	560	0.83
	660	0.91
	760	0.85
	860	0.81
28.31	460	2.21
	560	2.52
	660	2.71
	760	2.56
	860	2.53
11.52	460	5.21
	560	5.85
	660	6.26
	760	5.71
	860	5.69

由表 6 可知, 两回归模型  $P$  值均小于 0.01, 表明两回归模型极其显著, 失拟项  $P$  值分别为 0.093 1、0.108 3 均大于 0.05, 表明两回归方程拟合度高方程可靠。在此基础上, 剔除不显著因素, 得到滚筒转速、脱粒间隙、钉齿间距三因素对脱粒损失率  $Y_1$ 、呼尘浓度峰值  $Y_2$  影响的回归方程为:

$$Y_1=0.4 - 0.036X_1+0.038X_1X_2+0.047X_2+0.054X_1^2+0.05X_2^2 \quad (4)$$

$$Y_2=71.59+4.32X_1 - 8.14X_2 - 13.13X_3 - 10.3X_2X_3 - 6.05X_1^2 \quad (5)$$

根据响应面回归方程分析结果, 绘制 3D 响应面图, 各因素对脱粒损失率与呼尘浓度峰值影响如图 2 所示。

由图 2a 可知当钉齿间距确定的情况下, 在脱粒间隙小于 12 mm 时, 脱粒损失率整体较低, 脱粒间隙超过 12 mm 后随着脱粒间隙的增加脱粒损失率逐渐增大, 这是由于脱粒间隙较小时脱粒物料层薄, 油菜物料受到脱粒元件与凹板筛的冲击、搓擦作用

较强,使得损失率较低,脱粒间隙的不断加物料层增厚冲击、搓擦作用减弱使得脱粒损失率上升;随着滚筒转速的增加脱粒损失率逐渐降低,当滚筒转速超过  $560 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  后,随着滚筒转速的增加脱粒损失率逐渐趋于稳定,这主要是由于滚筒转速增加,脱粒元件冲击作用增强,使得油菜脱净率提高脱粒损失率最终达到较低水平。

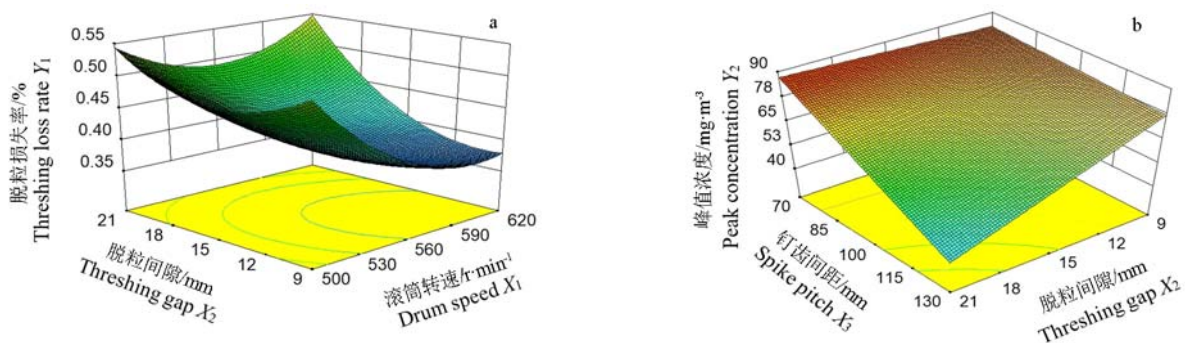
由图 2b 可知当滚筒转速确定的情况下,随着钉齿间距、脱粒间隙的增加,呼尘浓度峰值不断降低,

这是由于当脱粒间隙增大脱粒室内油菜物料层增厚,脱粒元件与凹板筛对油菜物料的冲击、搓擦作用减弱,脱粒过程对物料施加的能量降低,使得油菜秸秆破碎程度降低从而使粉尘产生浓度降低,同时钉齿间距的增加使得脱粒装置钉齿数目降低,在脱粒过程中油菜物料所受冲击次数减少,油菜秸秆所受的累积能量减少,造成油菜秸秆破碎程度降低,生成的粉尘浓度随之降低。

表 5 正交试验结果

Table 5 Orthogonal test results

序号 No.	滚筒转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ Drum speed $X_1$	脱粒间隙/mm Threshing gap $X_2$	钉齿间距/mm Spike pitch $X_3$	损失率/% Loss rate $Y_1$	浓度峰值/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ Peak concentration $Y_2$
1	0	0	-1.682	0.42	87.91
2	0	0	0	0.41	73.97
3	-1	-1	-1	0.49	75.57
4	1	-1	-1	0.34	85.47
5	-1	1	-1	0.52	76.64
6	1.682	0	0	0.52	60.94
7	1	-1	1	0.37	78.58
8	0	0	0	0.39	70.24
9	-1	-1	1	0.53	68.96
10	1	1	-1	0.5	82.88
11	1	1	1	0.56	35.33
12	0	0	0	0.41	70.53
13	-1	1	1	0.55	28.27
14	0	-1.682	0	0.49	79.02
15	-1.682	0	0	0.62	45.41
16	0	0	0	0.36	69.89
17	0	0	0	0.38	78.01
18	0	0	0	0.36	71.53
19	0	1.682	0	0.63	63.73
20	0	0	1.682	0.47	46.34



a.  $Y_1=(X_1, 100, X_2)$ ; b.  $Y_2=(X_2, 560, X_3)$ .

图 2 各因素交互作用对损失率和呼尘浓度峰值的影响

Figure 2 Effects of the interaction of various factors on the loss rate and peak dust concentration

(3) 参数优化与试验验证。对试验参数进行优化,以降低脱粒损失率和呼尘浓度峰值为优化

目标,利用 Design-Expert 软件进行参数优化,其目标函数以及约束条件如式(6)所示。

$$\begin{cases} \min Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ 460 \leq X_1 \leq 660 \\ 5 \leq X_2 \leq 25 \\ 50 \leq X_3 \leq 150 \end{cases} \quad (6)$$

由试验结果可知, 脱粒损失率值较低, 基本满足脱粒要求, 其脱粒过程中产生呼尘浓度峰值高, 危害大, 故以粉尘浓度峰值为重, 设定油菜脱粒损失率和呼尘浓度峰值加权因子分别为 0.4 和 0.6, 最终求解得到脱粒滚筒转速 548 r·min<sup>-1</sup>, 脱粒间隙

19.4 mm, 钉齿间距 150 mm 时, 得到理论响应值脱粒损失率 0.46%, 呼尘浓度峰值 30.17 mg·m<sup>-3</sup>。

为验证优化结果的准确性, 在脱粒装置作业参数为滚筒转速 548 r·min<sup>-1</sup>, 脱粒间隙 19.4 mm, 钉齿间距 150 mm 时进行 3 次重复验证试验, 试验结果如表 7 所示。脱粒损失率均值为 0.47%, 呼尘浓度峰值均值为 31.62 mg·m<sup>-3</sup>, 试验验证值与理论优化值的相对误差分别为 2.13%、4.59%, 参数优化模型可靠。

表 6 回归方程方差分析

Table 6 Analysis of variance of regression equation

来源 Origin	脱粒损失率 Threshing loss rate $Y_1/\%$					浓度峰值 Peak concentration $Y_2/\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$				
	平方和 Sum of squares	自由度 <i>df</i>	均方 Mean square	<i>F</i> 值 <i>F</i> value	显著性 Significant	平方和 Sum of squares	自由度 <i>df</i>	均方 Mean square	<i>F</i> 值 <i>F</i> value	显著性 Significant
模型	0.14	9	0.015	12.9	**	492 8.98	9	547.66	25.94	**
$X_1$	0.017	1	0.017	14.88	**	254.36	1	254.36	12.05	**
$X_2$	0.03	1	0.03	25.22	**	905.02	1	905.02	42.87	**
$X_3$	0.004 363	1	0.004 363	3.72		235 4.86	1	235 4.86	111.54	**
$X_1X_2$	0.011	1	0.011	9.6	*	4.84	1	4.84	0.23	
$X_1X_3$	0.000 05	1	0.000 05	0.043		0.036	1	0.036	0.002	
$X_2X_3$	0.000 05	1	0.000 05	0.043		849.13	1	849.13	40.22	**
$X_1^2$	0.043	1	0.043	36.71	**	541.99	1	541.99	25.67	**
$X_2^2$	0.038	1	0.038	32.11	**	1.32	1	1.32	0.062	
$X_3^2$	0.001 575	1	0.001 575	1.34		20.77	1	20.77	0.98	
残差	0.012	10	0.001 172			211.12	10	21.11		
失拟	0.009 174	5	0.001 835	3.6		161.97	5	32.39	3.3	
误差	0.002 55	5	0.000 51			49.15	5	9.83		
总和	0.15	19				514 0.1	19			

注: \* ( $P < 0.05$ ) 为显著, \*\* ( $P < 0.01$ ) 为极显著。

Note: \* ( $P < 0.05$ ) means significant, \*\* ( $P < 0.01$ ) means highly significant.

表 7 试验验证结果

Table 7 Experiment verification results

序号 No.	脱粒损失率/% Threshing loss rate $Y_1$	浓度峰值/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ Peak concentration $Y_2$
1	0.49	33.56
2	0.47	32.92
3	0.45	28.39
平均 Average	0.47	31.62
相对误差 Relative error/%	2.13	4.59

### 3 结论

本研究针对油菜机械收获过程中产生粉尘的危害, 分析机械收获过程产生尘特性, 对收获作业粉尘主要产生源脱粒装置进行了试验研究。设计了脱粒

试验台架, 对脱粒装置参数、油菜植株含水率与产生粉尘量、呼尘浓度峰值之间的关系进行了研究。

通过脱粒产生尘试验, 以滚筒转速、脱粒间隙、钉齿间距为试验因素, 以脱粒损失率、呼尘浓度峰值为试验指标, 进行二次回归正交旋转组合试验, 建立了影响因素与试验指标的回归模型。获得各因素对脱粒损失率的影响由大到小为: 脱粒间隙 > 滚筒转速 > 钉齿间距; 各因素对呼尘浓度峰值的影响由大到小为: 钉齿间距 > 脱粒间隙 > 滚筒转速。获得最优工作参数为: 脱粒滚筒转速 548 r·min<sup>-1</sup>, 脱粒间隙 19.4 mm, 钉齿间距 150 mm。对优化参数进行台架试验, 试验结果显示, 脱粒损失率为 0.47%, 呼尘浓度峰值为 31.62 mg·m<sup>-3</sup>。

为保证试验材料前后的一致性, 本研究正交试



验材料为当季挂藏油菜, 试验结果与实际收获作业结果会存在一定偏差, 需后续用适收期油菜进一步验证。鉴于粉尘对机手的危害, 后续可利用清选风机气流改变粉尘逸散轨迹, 以改善机手作业环境。

### 参考文献:

- [1] 左青松, 黄海东, 曹石, 等. 不同收获时期对油菜机械收获损失率及籽粒品质的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(4): 650-656.
- [2] 金小亮, 朱晓星, 金诚谦, 等. 谷物脱粒滚筒的功耗模型研究[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(3): 30-33.
- [3] 廖庆喜, 徐阳, 袁佳诚, 等. 油菜联合收获机切抛组式纵轴流脱粒装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 140-150.
- [4] 张敏, 金诚谦, 梁苏宁, 等. 风筛选式油菜联合收割机清选机构参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 8-15.
- [5] 王金双, 熊永森, 徐中伟, 等. 纵轴流联合收获机关键部件改进设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 25-31.
- [6] 王刚, 关卓怀, 沐森林, 等. 油菜联合收获机种子籽粒脱粒装置结构及运行参数优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 52-57.
- [7] 罗锡文, 廖娟, 胡炼, 等. 提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 1-11.
- [8] 陈旭, 吴崇友, 张敏. 我国油菜联合收割机发展现状及趋势分析[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(10): 28-31.
- [9] 黄小毛, 宗望远. 油菜联合收获的研究现状及发展趋势[J]. 农业工程, 2012, 2(1): 14-19.
- [10] 全国职业卫生标准委员会. 工作场所有害因素职业接触限值 第1部分: 化学有害因素: GBZ 2.1-2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [11] 宗望远, 黄鹏, 李海同, 等. 完熟期油菜的脱粒特性与分析[J]. 华中农业大学学报, 2013, 32(2): 128-133.
- [12] 宗望远, 廖庆喜, 黄鹏, 等. 组式油菜脱粒装置设计与物料运动轨迹分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(S2): 41-46.
- [13] 宗望远, 廖庆喜, 陈立, 等. 完熟期油菜果荚不同脱粒方式的脱粒效果[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 29-34.
- [14] 马征, 李耀明, 徐立章. 油菜脱出物漂浮速度及摩擦与浸润特性的测定与分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 13-17.
- [15] 陈立, 廖庆喜, 宗望远, 等. 油菜联合收获机脱出物空气动力学特性测定[J]. 农业机械学报, 2012, 43(S1): 125-130.
- [16] 廖庆喜, 陈立, 李海同, 等. 油菜联合收获机脱出物清选试验台[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 80-85, 79.
- [17] 廖庆喜, 万星宇, 李海同, 等. 油菜联合收获机旋风分离清选系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 24-31.
- [18] JOSEPH P P, GU Z R, DANIEL H, et al. Source of airborne sunflower dust generated during combine harvester operation[J]. Biosystems Engineering, 2014(126): 23-29.
- [19] JOSEPH P P, GU Z R, DANIEL H, et al. Sunflower dust properties that contribute to increased fire risk during harvest and biorefinery operations[J]. Industrial Crops & Products, 2013, 50(10): 227-231.
- [20] 王立军, 李兴星, 丁振军, 等. 玉米收获机清选室粉尘导流板设计及优化[J]. 东北农业大学学报, 2016, 47(6): 89-96.
- [21] 徐峰, 储为文, 程俊男. 农业可持续发展和农业机械化相互促进[J]. 世界农业, 2018(4): 51-54.