

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.009

# 割前摘脱收获机立式离心分离复脱清选装置优化

孙伟<sup>1</sup> 那明君<sup>1</sup> 冯江<sup>2</sup> 蒋亦元<sup>1</sup>

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学电气与信息学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 针对水稻割前摘脱出物草谷比低和处理量大的特点, 为提高谷物脱出物的处理能力, 设计了一种可循环喂入的立式离心分离复脱清选装置并对其进行了响应面优化试验。以喂入速度和螺旋输送机转速为影响因素, 以分离率、复脱率和破碎率为试验指标, 通过二次正交旋转中心组合试验得到了其性能指标和工作参数的响应曲面模型。利用 Design-Expert 软件分析各参数对性能指标的交互作用可知, 输送机转速对分离率、复脱率和破碎率的影响较大, 而喂入速度则较小。通过多目标优化, 得到最佳工作参数: 输送机转速 541.4 r/min、喂入量 1.226 kg/s; 在该参数组合下的期望结果: 分离率为 90.4%、复脱率为 66.1%、破碎率为 0.77%; 在该参数组合下的验证性试验结果: 分离率为 89.4%、复脱率为 65.2%、破碎率为 0.83%。结果表明立式离心分离复脱清选装置处理效率高, 谷物损伤小, 能够适应对割前摘脱出物的处理要求。

**关键词:** 收获机; 割前摘脱; 复脱; 分离; 清选; 响应面法

中图分类号: S225.4; S225.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)07-0073-09

## Optimization of Centrifugal Separating – Rethreshing – Cleaning Apparatus for Stripper Combine Harvester

SUN Wei<sup>1</sup> NA Mingjun<sup>1</sup> FENG Jiang<sup>2</sup> JIANG Yiyuan<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. College of Electrical and Information, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency of separating, rethreshing and cleaning process of rice stripper threshed materials, the laboratory experiments were carried out on the separating components of a novel version of vertically centrifugal separating – rethreshing – cleaning apparatus that can recycle the threshed materials invariably. With feeding speed and auger rotating speed as influencing factors, separating rate, rethreshing rate and braking rate as experimental indexes, response surface models of performance indexes and working parameters were obtained through quadratic orthogonal rotation center combination experiments. By using the Design-Expert software, the interactions between each parameter and the performance indexes were analyzed. It can be seen that the auger rotating speed had a greater influence on the separating rate, the rethreshing rate and the breaking rate than the feeding speed. Multi-objective optimization results showed that the optimum working parameters were as follows: the feeding speed was 1.226 kg/s and the auger rotating speed was 541.4 r/min. The expected results of separating rate, rethreshing rate and breaking rate were 90.4%, 66.1% and 0.77%, respectively, and the verification experimental results were 89.4%, 65.2% and 0.83%, respectively. The results showed that the centrifugal separating – rethreshing – cleaning apparatus had the advantages of high processing efficiency, small breaking rate and the ability to meet the handling requirements of threshed materials of stripper combine harvester for paddy rice.

**Key words:** combine harvester; stripping prior to cutting; rethreshing; separating; cleaning; response surface methodology

收稿日期: 2018-04-04 修回日期: 2018-05-08

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2017YFD0700105-2)、黑龙江省自然科学基金面上项目(E2015021)、黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划项目(UNPYSCT-2016152)和黑龙江省教育厅科学技术研究面上项目(12531026)

**作者简介:** 孙伟(1984—),男,助理研究员,博士生,主要从事智能农业装备研究,E-mail: sun@neau.edu.cn

**通信作者:** 蒋亦元(1928—),男,教授,博士生导师,院士,主要从事农业机械化工工程研究,E-mail: yyjiang@neau.edu.cn

## 0 引言

割前摘脱是把生长在田间禾秆上的谷物籽粒直接摘脱下来,输送到复脱分离、清选装置进行后续作业<sup>[1-4]</sup>。割前摘脱收获工艺只针对作物的穗部进行摘脱,其脱出物组成成分中草谷比大大降低<sup>[5-6]</sup>,与传统的全喂入或半喂入式联合收获机进入脱粒装置的喂入物的组成有很大的差异<sup>[7]</sup>。因此开展割前摘脱收获工艺中的复脱、分离、清选装置等相关的理论研究与试验是非常必要的<sup>[8-11]</sup>。

刘大为等<sup>[12]</sup>探寻了旋风清选分离筒中气流和籽粒两相流动规律,以低损试验条件下谷粒清洁率为目标,进行了台架优化试验。刘正怀等<sup>[13]</sup>设计了一种气流式清选装置,并对其清选筒、吸风管、吸风机的结构参数和工作参数进行了优化和试验,降低了总损失率、破碎率和含杂率。唐忠等<sup>[14-15]</sup>针对影响联合收获机脱粒分离性能的参数进行了回归分析。李耀明等<sup>[7, 16-18]</sup>对脱出物复脱分离清选装置进行了深入的理论分析和试验研究,为相关领域的设计和试验提供了依据。PANASIEWICZ等<sup>[19]</sup>对谷物的清选分离过程进行了技术分析,并给出了气流清选过程中提高分离率和降低损失的建议。MONDOL等<sup>[20-21]</sup>对一种立式筛分装置进行了试验研究,获得了转速和喂入量的最佳匹配关系。衣淑娟等<sup>[22-24]</sup>对轴流脱粒分离装置的脱粒过程和脱出物性质进行了试验研究和高速摄像分析。

以上关于传统脱出物处理装置的相关研究已经较多,有的已经达到较高水平,但尚缺少针对割前摘脱脱出物的高效处理装置。东北农业大学蒋亦元团队针对割前摘脱脱出物的特点和收获机结构配置,设计了一种离心分离、复脱、清选复合装置,安装于4ZTL-2000型割前摘脱联合收获机上<sup>[2, 25-27]</sup>。田间初步试验表明,该处理装置处理效率较高,处理后的谷粒清洁率符合国家标准,但在喂入量与输送机转速匹配不佳时,会出现工作性能下降的现象。本研究借助响应曲面分析法,分析工作参数和性能指标之间的关系,以期优化其工作参数,并为割前摘脱脱出物分离复脱清选装置在田间作业时的参数调整提供依据。

## 1 离心分离复脱清选装置原理

### 1.1 工作原理

图1所示为4ZTL-2000型割前摘脱稻(麦)联合收获机结构简图,所设计的离心分离复脱清选装置如图中点划线所示范围。由于该联合收获机采用了气流吸运<sup>[27]</sup>,机构较庞大;同时采用了板齿滚筒

摘穗装置<sup>[28]</sup>,分离、清选的处理量也较大。在图1所示的离心分离复脱清选装置中,内部装有一个立式螺旋输送机,其外套为一个圆筒筛,圆筒筛下段无筛孔,上段有筛孔。在有筛孔段的外面套有一个中间筒,从而形成一个环形沉降室,在无筛孔段的顶部装有一个三角带轮,轮缘装有螺旋桨式叶片。在环形沉降室的外围还设有另一外筒,与环形沉降室的外壳构成环形气流清选室。清选室的上端与具有负压的气流吸运管道相通,底部设置有进气孔,外筒的下端连接一个截顶圆锥面,在截顶圆锥面的下方围绕着无筛孔的圆筒设置一个倾斜的溜槽,排粮叶片刮下经过分离和清选的谷粒,在集粮口收集。未能筛出的谷粒与未脱净的断穗在排草轮的带动下,通过排草口进入联合收获机后部的沉降分离箱进行再次分离复脱和清选。

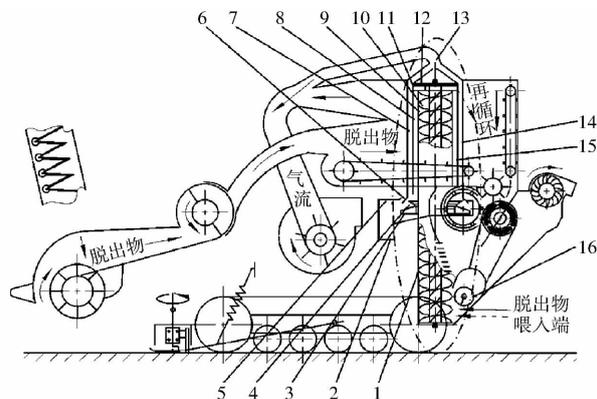


图1 安装有离心分离复脱清选装置的4ZTL-2000型割前摘脱稻(麦)联合收获机结构简图

Fig.1 4ZTL-2000 TPC stripper combine harvester of rice/wheat mounted with centrifugal separating-rethreshing-cleaning apparatus

1. 筒筛下段 2. 集粮口 3. 排粮叶片 4. 三角带轮 5. 进气孔
6. 螺旋叶片 7. 外筒 8. 中间筒 9. 筒筛上段 10. 输送机
11. 排草口 12. 排草轮 13. 吸运管道 14. 沉降室 15. 气流清选室 16. 喂入叶片

### 1.2 结构特点

田间初步试验结果表明,离心分离复脱清选装置分离出来的谷粒清洁度高,破碎率低,暂时分离不出的谷粒和未脱净的断穗可以通过循环再次分离与复脱,这种再循环流程不会使排草口排出的短茎秆和断穗等夹杂的谷粒排出机外,也就不会造成因裹夹的谷粒从筛尾排出所引起的损失,并省去了杂余输送机。

同时该装置由下端喂入,方式简单,结构紧凑,整体质量轻,体积小,适合在联合收获机上安装,所需的动力易于获得和控制,且对地面坡角不敏感。由于筒筛下半段为无孔圆筒,该段就自然成为立置螺旋升运筒,升运高度又不受限制,因而清选后的谷

粒可不经升运直接进入粮袋或粮箱,从而形成了分离、复脱、清选复合处理装置。离心分离复脱清选装置的工作流程如图2所示。

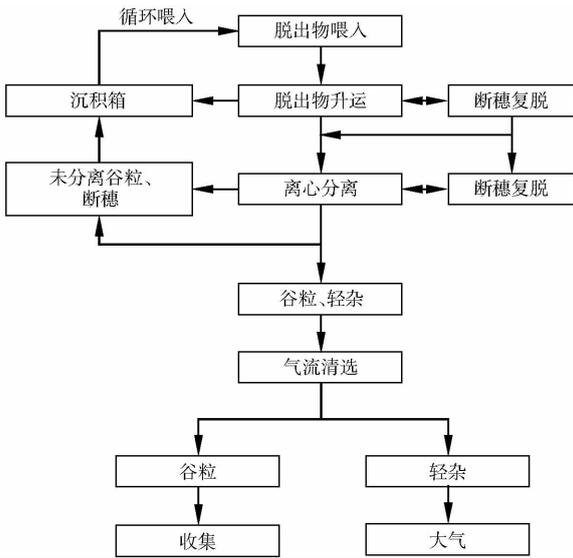


Fig. 2 Working flow chart of centrifugal separating - rethreshing - cleaning apparatus for threshed material

## 2 试验装置

试验装置主要由输送、处理和控制在部分组成,如图3所示。试验台的主要技术参数如表1所示。

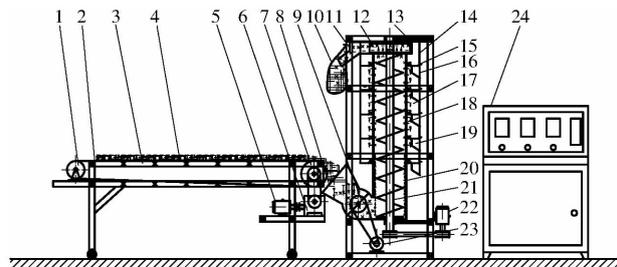


图3 试验装置示意图

Fig. 3 Schematic drawing of experimental system

1. 被动带轮 2. 传送带 3. 输送装置机架 4. 物料 5. 电动机I
6. 蜗轮蜗杆减速器 7. 主动带轮 8. 料斗 9. 喂入叶片
10. 茎杂收集袋 11. 排草口 12. 排草叶片 13. 处理装置机架
14. 外筒 15. 谷物隔板 16. 排粮口挡板 17. 谷物收集室
18. 筒筛上部 19. 排粮口 20. 筒筛下部 21. 立式输送机
22. 电动机II 23. 电动机III 24. 控制柜

### 2.1 输送部分

输送部分主要由输送装置机架、主动带轮、被动带轮、传送带、电动机I、蜗轮蜗杆减速器组成。

试验时,将割前摘脱脱出物物料(谷粒、少量漏脱的断穗和短秸秆的混合物)均匀铺放于传送带上,启动电动机I,输出动力经过蜗轮蜗杆减速器减速,带动主动带轮旋转,传送带将物料喂入到处理部分。

表1 试验台主要技术参数

Tab. 1 Technical parameters of experimental system

参数	数值/型号
传送带尺寸(长×宽)/(mm×mm)	6 000×490
立式输送机(外径×内径)/(mm×mm)	250×60
减速器减速比	40
带轮工作面外径/mm	290
螺旋导程/mm	250
筒筛下部高度/mm	505
筒筛上部高度/mm	900
筒筛面净高/mm	860
筒筛内径/mm	264
额定功率/kW	3.0
电动机型号	Y100L2-4/Y132-6
变频器型号	F1000-G

### 2.2 处理部分

处理部分主要由处理装置机架、料斗、喂入叶片、立式输送机、下端壳、筒筛、外筒、谷物隔板以及电动机II和电动机III组成。

喂入叶片由电动机III带动。立式输送机螺旋方向为右旋,与筒筛内壁的间隙为7 mm。筒筛上部为冲孔筛,筛孔为长孔,筛孔的长轴方向与水平方向的夹角为40°,筛孔倾斜方向和输送机旋转方向一致,尺寸为7 mm×23 mm,筒筛壁厚1.5 mm,筒筛的活筛面积大于40%。外筒用于防止谷物在分离的过程中崩落。谷物隔板把谷物收集室分为5段,以防止谷物在底部集中堆积。

进行试验时,由输送带将物料喂入料斗。启动电动机III,带动喂入叶片旋转,将物料喂入无筛孔的筒筛下部。启动电动机II,立式输送机旋转,物料在立式输送机的推运力下实现升运。在升运过程中,物料中含有的断穗实现复脱,物料升运至筒筛上部后,在离心力作用下,比重较大的谷粒夹杂部分轻杂穿透筛孔,进入由筒筛上部和在其外围设置的外筒所构成的谷物收集室。不同长度部分筛出的谷物降落到不同的谷物隔板上。一次试验完毕后,打开不同位置的排粮口挡板,将谷物从谷物收集室排粮口取出,并将其分别装入编好号码的不同口袋中,方便进行数据处理。未被筛出的少量未脱净断穗、短秸秆和谷粒被立式输送机推到顶部,由排草叶片排出排草口,进入茎杂收集袋,进行数据处理。

### 2.3 控制部分

控制柜是本试验装置的电器控制系统,包含控制电动机I的空气开关,以及控制电动机II和电动机III转速的两个F1000-G系列变频器。为防止启动电动机时传送带打滑现象的出现,对传送装置中的主动带轮及被动带轮加装了防滑层。考虑传动过

程中的各种影响因素,对传送带的传送速度进行标定。为了获得变频器频率与电动机转速的对应关系,试验前先对电动机Ⅱ和电动机Ⅲ进行标定。

### 3 台架试验

#### 3.1 试验因素编码

试验影响因素分别为输送机转速  $n$  和喂入量  $q$ ,对应的因素编码值以  $x_1$  和  $x_2$  表示。各因素的变化范围根据理论分析和前期预备性试验确定。根据二次正交旋转组合设计的试验要求<sup>[29-30]</sup>,确定因素编码如表2所示。

表2 试验因素编码  
Tab.2 Coding of factors

编码	因素	
	喂入量 $q/(kg \cdot s^{-1})$	输送机转速 $n/(r \cdot min^{-1})$
-1.414	1.050	200.0
-1	1.226	258.6
0	1.650	400.0
1	2.074	541.4
1.414	2.250	600.0

#### 3.2 试验步骤

采用二次回归正交旋转试验设计方法安排试验,试验过程如图4所示。参考 GB/T 8097—2008《收获机械 联合收割机 试验方法》中的相关规定,并结合割前摘脱收获工艺的特点,参照试验方案表进行试验,主要试验步骤如下:

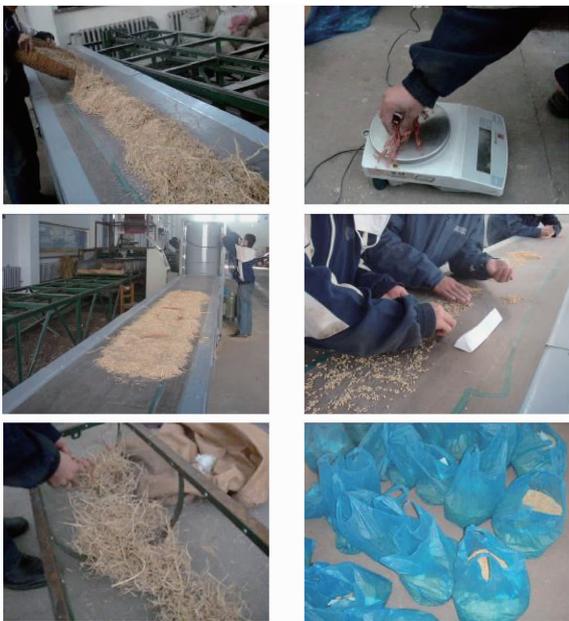


图4 主要试验过程

Fig.4 Main experimental process

(1)根据每个试验点所需要的喂入量和喂入时间确定物料质量。并根据所需要的输送机转速及标定结果计算变频器读数。

(2)试验所用物料由4ZTL-2000型割前摘脱联合收获机在田间试验过程中从脱出物喂入端采集获得,物料组成质量比为:谷粒:长草:轻杂约为9:0.6:0.4,其余性状如表3所示。每次试验加入预先染成红色并且已称量的5个稻穗,用于检验复脱率。

表3 脱出物物料性状

Tab.3 Physical properties of experimental materials

千粒质量/g	物料含水率/%			谷粒平均尺寸 (长×宽×厚)/ (mm×mm×mm)		茎秆长度/mm
	谷粒	轻杂	茎秆			
24.26	9.5	6.3	7.4	7.25×3.75×2.2		≤150

(3)物料喂入时间为5s,以预定长度将物料均匀铺放在喂入传送带上,传送带前方预留0.5m的缓冲区,用以缓冲传送带加速过程。

(4)首先启动喂入叶片和输送机电动机,根据试验计划调节变频器读数。待转速稳定后,启动传送带,脱出物物料被喂入处理装置。第  $k$  个排粮口 ( $k=1,2,\dots,5$ ) 的排出物及其对应的“排粮口卡片”分别用口袋  $k$  包装并标记。

(5)对试验结果进行数据处理,计算出试验指标,并对所获得的结果进行响应面分析和优化。

#### 3.3 试验指标

评价指标包括分离率  $y_1$ 、复脱率  $y_2$  和破碎率  $y_3$ ,其计算式分别为

$$y_1 = \frac{\sum_{k=1}^5 m_{sk}}{\sum_{k=1}^5 m_{sk} + m'_s} \times 100\% \quad (1)$$

$$y_2 = \left( 1 - \frac{m'_r}{\sum_{l=1}^5 m_{rl}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

$$y_3 = \left( \frac{m'_d}{m_d} - y_{03} \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中  $m_{sk}$ ——从第  $k$  个排粮口排出的全部谷粒质量, g

$m'_s$ ——排草口所排出的全部谷粒质量, g

$m_{rl}$ ——第  $l$  个染红稻穗的质量, g

$m'_r$ ——从排草口所排出的所有未被复脱的染红断穗的总质量, g

$m_d$ ——从排粮口所收集的谷粒中随机称取的样品质量, g

$m'_d$ ——样品中所挑出的破碎的或有损伤的谷粒质量, g

$y_{03}$ ——试验前物料的自然破碎率, %

#### 3.4 试验结果及数据处理

表4为试验安排及结果。根据所得的试验数

据,通过式(1)~(3)分别计算得到分离率  $y_1$ 、复脱率  $y_2$  和破碎率  $y_3$ 。应用 Design-Expert 软件进行分析,得出试验指标随各因素变化关系的二次回归方程模型<sup>[31-32]</sup>。

表4 二次旋转正交组合试验方案与结果

Tab.4 Scheme and result of quadratic rotation-orthogonal combination design

试验序号	喂入量 $x_1$	输送机转速 $x_2$	分离率 $y_1/\%$	复脱率 $y_2/\%$	破碎率 $y_3/\%$
1	1	1	79.9	58.3	0.94
2	1	-1	89.4	37.2	0.69
3	-1	1	90.8	66.3	0.72
4	-1	-1	96.0	45.5	0.68
5	1.414	0	80.3	49.3	0.73
6	-1.414	0	94.7	61.3	0.86
7	0	1.414	83.1	63.1	0.82
8	0	-1.414	98.7	38.1	0.66
9	0	0	86.7	53.0	1.25
10	0	0	89.3	56.6	1.29
11	0	0	83.8	49.4	1.36
12	0	0	83.1	48.0	1.23
13	0	0	86.9	55.8	1.26
14	0	0	87.3	58.2	1.25
15	0	0	84.7	48.3	1.32
16	0	0	88.5	51.1	1.23

### 3.4.1 分离率回归分析

分离率  $y_1$  随各因素变化关系的二次回归方程模型为

$$y_1 = 86.0 - 4.7x_1 - 4.6x_2 - 1.1x_1x_2 + 0.5x_1^2 + 2.3x_2^2 \quad (4)$$

转化得到以试验因素实际量表示的回归方程

$$y_1 = 132.5 - 14.3q - 9.4 \times 10^{-2}n - 1.8 \times 10^{-2}qn + 3.1q^2 + 1.1 \times 10^{-4}n^2 \quad (5)$$

通过对分离率二次响应曲面模型的方差分析可知(方差分析表略),模型  $F$  值为 18.24,  $p < 0.001$ , 说明模型显著。模型中  $x_1$ 、 $x_2$  和  $x_2^2$  是显著项,  $x_1x_2$  和  $x_1^2$  是不显著项。失拟项  $F$  值为 0.53, 与整个模型  $F$  值 18.24 相比很小, 表示失拟项相对于纯误差并不显著, 模型符合试验数据。由于干扰而产生该“失拟项  $F$  值”的可能性为 67.61%。本设计试验中变异系数为 2.37%, 说明试验操作可信。预测残差平方和为 0.010, 表明设计模型符合每个点的程度较好。预测决定系数为 0.764, 调整决定系数为 0.851, 预测决定系数与调整决定系数吻合得很好, 该模型能解释约 85% 的响应值的变化, 仅有总变异的 15% 不能用此模型来解释。本试验所得信噪比为 14.61, 说明该模型能较好地反映试验结果。决定系数  $R^2$  为 0.901, 表明此方程有较好的拟合度, 方

程与实际情况比较相符, 并能做出相对准确的预测。

剔除模型的不显著项, 可得分离率  $y_1$  随各因素变化关系的二次回归方程模型

$$y_1 = 86.0 - 4.7x_1 - 4.6x_2 + 2.3x_2^2 \quad (6)$$

转化得到以试验因素实际量表示的回归方程

$$y_1 = 132.5 - 14.3q - 9.4 \times 10^{-2}n + 1.1 \times 10^{-4}n^2 \quad (7)$$

### 3.4.2 复脱率回归分析

复脱率  $y_2$  随各因素变化关系的二次回归方程模型为

$$y_2 = 53.0 - 4.2x_1 + 9.6x_2 + 0.6x_1x_2 + 1.1x_1^2 - 1.3x_2^2 \quad (8)$$

转化得到以试验因素实际量表示的回归方程

$$y_2 = 48.3 - 30.1q + 0.1n + 9.6 \times 10^{-4}qn + 6.0q^2 - 6.4 \times 10^{-5}n^2 \quad (9)$$

通过对复脱率二次响应曲面模型的方差分析可知, 模型  $F$  值为 15.46,  $p < 0.001$ , 说明模型显著。模型中  $x_1$  和  $x_2$  是显著项,  $x_1x_2$ 、 $x_1^2$  和  $x_2^2$  是不显著项。失拟项  $F$  值为 0.17, 与整个模型  $F$  值 15.46 相比很小, 表示失拟项相对于纯误差并不显著, 模型比较符合试验数据。由于干扰而产生该“失拟项  $F$  值”的可能性为 91.40%。本设计试验中变异系数为 6.52%, 说明试验操作可信。预测残差平方和为 0.0198, 表明设计模型符合每个点的程度较好。预测决定系数为 0.8055, 调整决定系数为 0.8282, 预测决定系数与调整决定系数吻合得很好, 该模型能解释约 83% 的响应值的变化, 仅有总变异的 17% 不能用此模型来解释。本试验所得信噪比为 14.20, 说明该模型能较好地反映试验结果。决定系数  $R^2$  为 0.8855, 表明此方程有较好的拟合度, 方程与实际情况比较相符, 并能做出相对准确的预测。

剔除模型的不显著项, 可得复脱率  $y_2$  随各因素变化关系的二次回归方程模型

$$y_2 = 53.0 - 4.2x_1 + 9.6x_2 \quad (10)$$

转化得到以试验因素实际量表示的回归方程

$$y_2 = 48.3 - 30.1q + 0.1n \quad (11)$$

### 3.4.3 破碎率回归分析

破碎率  $y_3$  随各因素变化关系的二次回归方程模型为

$$y_3 = 1.300 + 0.006x_1 + 0.065x_2 + 0.053x_1x_2 - 0.241x_1^2 - 0.268x_2^2 \quad (12)$$

转化得到以试验因素实际量表示的回归方程

$$y_3 = -4.146 + 4.080q + 0.010n + 0.001qn - 1.338q^2 - 1.342 \times 10^{-5}n^2 \quad (13)$$

通过对破碎率二次响应曲面模型的方差分析可

知,模型  $F$  值为 56.96,  $p < 0.001$ , 说明模型显著。模型中  $x_2$ 、 $x_1^2$  和  $x_2^2$  是显著项,  $x_1$  和  $x_1x_2$  是不显著项。失拟项  $F$  值为 3.65, 由于干扰而产生该“失拟项  $F$  值”的可能性为 7.20%, 失拟项较差, 该概率值相对较低, 说明破碎率数值分布较为离散。本设计试验中变异系数为 6.06%, 说明试验操作可信。预测残差平方和小于 0.001, 表明设计模型符合每个点的程度较好。预测决定系数为 0.835, 调整决定系数为 0.949, 预测决定系数与调整决定系数吻合得较好, 该模型能解释约 95% 的响应值的变化, 仅有总变异的 5% 不能用此模型来解释。本试验所得信噪比为 16.63, 说明该模型能较好地反映试验结果。决定系数  $R^2$  为 0.966, 表明此方程有较好的拟合度, 方程与实际情况比较相符, 并能做出相对准确的预测。

剔除模型的不显著项, 可得破碎率  $y_3$  随各因素变化关系的二次回归方程模型

$$y_3 = 1.300 + 0.065x_2 - 0.241x_1^2 - 0.268x_2^2 \quad (14)$$

转化得到以试验因素实际量表示的回归方程

$$y_3 = -4.146 + 0.010n - 1.338q^2 - 1.342 \times 10^{-5}n^2 \quad (15)$$

## 4 结果分析与参数优化

### 4.1 各因素重要性分析

为了判断各因素对响应函数作用的程度, 对于二次回归方程, 通过方差分析得到各回归系数的  $F$  值, 定义贡献率

$$\delta = \begin{cases} 0 & (F \leq 1) \\ 1 - \frac{1}{F} & (F > 1) \end{cases} \quad (16)$$

可求出方程各因素对指标的贡献率, 对于第  $j$  个因素, 其贡献率为<sup>[30]</sup>

$$\Delta_j = \delta_j + \delta_{jj} + \frac{1}{2} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^m \delta_{ij} \quad (17)$$

式中  $\delta_j$ ——第  $j$  个因素一次项的贡献率

$\delta_{jj}$ ——第  $j$  个因素二次项的贡献率

$\delta_{ij}$ ——第  $j$  个因素与其他因素交互作用的贡献率

依据式(16)和式(17), 分别计算喂入量和输送机转速对分离率、复脱率以及破碎率的贡献率。比较每个因素的贡献率  $\Delta_j$ , 从而判断各因素对各试验指标的影响。

求得各因素对分离率  $y_1$  的贡献率分别为  $\Delta_1 = 0.10$ ,  $\Delta_2 = 1.89$ 。因此, 两个因素对指标的作用影响程度是  $x_2$  大于  $x_1$ , 即输送机转速对分离率的影响最大, 喂入量次之。

求得各因素对复脱率  $y_2$  的贡献率分别为  $\Delta_1 =$

0.92,  $\Delta_2 = 1.08$ 。因此, 两个因素对指标的作用影响程度是  $x_2$  大于  $x_1$ , 即输送机转速对复脱率的影响略大于喂入量。

求得各因素对破碎率  $y_3$  的贡献率分别为  $\Delta_1 = 0.33$ ,  $\Delta_2 = 2.21$ 。因此, 两个因素对指标的作用影响程度是  $x_2$  大于  $x_1$ , 即输送机转速对破碎率的影响较大, 喂入量则较小。

### 4.2 响应面分析

#### 4.2.1 分离率响应面分析

根据所得回归方程, 绘制出喂入量和输送机转速对分离率影响的响应曲面图和等高线图, 如图 5a 所示。

由图 5a 可见, 喂入量和输送机转速对分离率的交互影响作用显著。响应变量的最大值在喂入量  $q = 1.23$  kg/s、输送机转速  $n = 258.58$  r/min 时取得, 而回归方程在图示定义区间内并未取得极大值点。响应变量的最小值在喂入量  $q = 2.07$  kg/s、输送机转速  $n = 541.42$  r/min 时取得。这可能是因为, 随着输送机转速的减小, 物料在输送机内的升运能力下降, 物料堆积在筒筛底部的分离时间增长。随着喂入量的增大, 分离率整体不断下降。当喂入量取值较小时, 输送机转速可以在较大范围内调整, 对分离率的影响范围较小。这可能是因为, 当喂入量较小时, 增大输送机转速虽然增大了物料的升运速度, 但喂入量尚不能满足输送器的升运需求, 单位质量的物料接触单位筛面的几率仍然很大, 因此不会导致分离率较大程度的降低。当喂入量取值较大时, 输送机转速的变化对分离率的影响较大。这可能是因为, 当喂入量较大时, 物料接触单位筛面的几率变小, 但输送机转速决定了物料的升运速度, 因此当输送机转速较小时, 物料在筒筛底部分离时间变长, 分离率较大。当输送机转速较大时, 物料接触单位筛面的几率急剧变小, 导致分离率迅速降低。

#### 4.2.2 复脱率响应面分析

根据所得回归方程, 绘制出喂入量和输送机转速对复脱率影响的响应曲面图和等高线图, 如图 5b 所示。

由图 5b 可见, 喂入量和输送机转速对复脱率的交互影响作用较大。响应变量的最大值在喂入量  $q = 1.23$  kg/s、输送机转速  $n = 541.42$  r/min 时取得, 而回归方程在图示定义区间内并未取得极大值点。响应变量的最小值在喂入量  $q = 2.07$  kg/s、输送机转速  $n = 258.58$  r/min 时取得, 而回归方程在图示定义区间内并未取得极小值点。这可能是因为, 当输送机转速较大时, 断穗在输送机内所受到的复脱作用力较大, 复脱的概率增加, 特别是当喂入量较小时,

每个稻穗接触输送器和筒筛的几率增大,因此复脱的几率增大。随着输送器转速的减小,断穗在输送器内所受到的复脱作用力比较缓和,增大喂入量使得每个稻穗在输送器和筒筛的作用力下被复脱的几率进一步降低。随着喂入量的增大,复脱率整体不断下降。这可能是因为,喂入量的增大引起稻穗在物料中所占的比重变小,接触输送器和筒筛的几率降低。当喂入量不变时,改变输送器转速对复脱率

的影响较大。此时随着输送器转速的不断变大,复脱率显著增大。这可能是因为,当喂入量固定时,增大输送器转速的同时就增大了输送器和筒筛对断穗的作用力,从而提高了复脱能力。

#### 4.2.3 破碎率响应面分析

根据所得回归方程,绘制出喂入量和输送器转速对破碎率影响的响应曲面图和等高线图,如图 5c 所示。

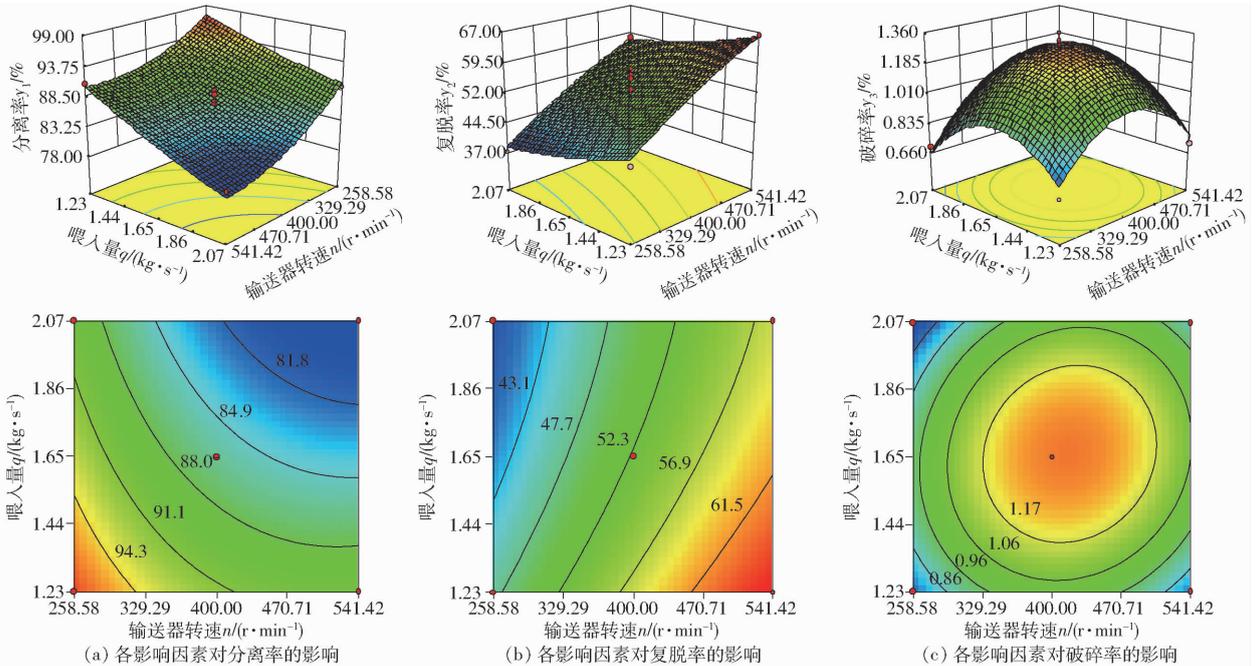


图 5 试验模型的响应曲面图和等高线图

Fig. 5 Response surface and contour maps of experiment

由图 5c 可见,喂入量和输送器转速对破碎率的交互影响作用较大。响应变量的最大值出现在喂入量和输送器转速的中心点附近,回归方程亦在图示定义区间内取得极大值。在二维变量定义区间内的 4 个端点处破碎率较小,响应变量的最小值在该 4 个端点之一处取得。这可能是因为,随着输送器转速的减小,物料在输送器内的升运能力下降,虽然物料堆积在筒筛底部的分离时间增长,但此时输送器和筒筛下部无筛孔部分对谷粒的作用力较为缓和。喂入量越小,物料越稀薄,引起谷粒破碎的程度也就很小。而当喂入量很大时,筒筛内物料分布密度较大,谷粒破碎的程度同样很小。破碎率最大值出现在喂入量和输送器转速中心点附近的原因可能是,当喂入量处于零水平附近并且输送器转速不太大时,输送器的升运能力较大,但同时物料在筒筛内的分布密度居中,2 个因素的相互作用下恰能使谷粒在筒筛内的破碎程度达到受力时间和受力大小的最大组合。

#### 4.3 参数优化

根据上述结论,采用多目标优化方法,应用

Design-Expert 软件进行优化求解。分别以分离率、复脱率、破碎率的回归方程作为响应变量函数并限定其取值范围,确定因子变量及相应的约束条件,进行模型优化,寻找到满足响应变量范围的因子最佳组合。

##### 4.3.1 因素变量

研究的因素变量分别为喂入量  $x_1$  和输送器转速  $x_2$ ,即设计因素变量为  $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$ 。

##### 4.3.2 响应变量函数

研究的响应变量为分离率、复脱率和破碎率,即  $\mathbf{y} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), f_3(\mathbf{x}))$ 。

根据响应面分析所得结论,及对响应变量和因素变量的要求,有

$$\begin{cases} f_1(\mathbf{x}) \in [80\%, 100\%] \\ f_2(\mathbf{x}) \in [60\%, 100\%] \\ f_3(\mathbf{x}) \in [0, 3\%] \\ -1 \leq (x_1, x_2) \leq 1 \end{cases} \quad (18)$$

##### 4.3.3 结果与验证

应用 Design-Expert 软件进行优化求解,得到满

足响应变量范围的因素优化参数组合方案为  $x^* = (-1, 1)$ , 此时响应变量的期望值为  $y^* = f(x^*) = (90.4\%, 66.1\%, 0.77\%)$ 。根据上述分析所得最佳参数组合方案进行了验证性试验。在最佳参数组合方案条件下获得的响应值为  $(89.4\%, 65.2\%, 0.83\%)$ 。验证结果显示, 得到的响应值接近理论值, 表明回归方程与实际情况符合较好, 模型可靠。

#### 4.3.4 应用建议

上述结果是针对装置的最佳工作参数所做的优化, 用于田间以定速作业或作为单独的处理部件时参考选用。若需确定田间不同作业速度时的最优工作参数, 可将喂入量固定在不同水平, 进行降维分析, 以确定不同喂入量与输送机转速之间的匹配关系。

由于暂时分离不出的谷粒和未脱净的断穗可以通过循环喂入进行再次分离与复脱, 故分离率和复脱率将会在循环处理中得以不断提升。关于多次循环处理过程对物料破碎率的影响程度, 以及谷物的流动模型, 尚需进一步研究。

## 5 结论

(1) 针对割前摘脱脱出物草谷比低和处理量大的特点, 提出一种集分离复脱清选为一体的立式脱出物处理装置。该装置喂入方式简单, 结构紧凑, 整体质量轻, 适合在割前摘脱联合收获机上安装, 并可作为单独的脱出物处理部件进行推广。

(2) 通过台架试验, 以输送机转速和喂入量为影响因素, 以分离率、复脱率、破碎率为试验指标, 分析了各因素对试验指标值的影响规律, 结果显示, 输送机转速对分离率、复脱率和破碎率的影响贡献率均大于喂入量。

(3) 根据试验所得数据, 应用响应面法优化, 得到最佳工作参数: 输送机转速为  $541.4 \text{ r/min}$ 、喂入量为  $1.226 \text{ kg/s}$ ; 在该参数组合下的期望结果: 分离率为  $90.4\%$ 、复脱率为  $66.1\%$ 、破碎率为  $0.77\%$ ; 在该参数组合下的验证性试验结果: 分离率为  $89.4\%$ 、复脱率为  $65.2\%$ 、破碎率为  $0.83\%$ 。

## 参 考 文 献

- 1 蒋亦元, 许家美, 涂澄海, 等. 摘脱后切割茎秆搂成条铺的稻(麦)联合收获机[J]. 农业工程学报, 1997, 13(1): 57-62. JIANG Y Y, XU J M, TU C H, et al. Rice (wheat) combine harvester with cutting and windrowing the straw immediately after stripping[J]. Transactions of the CSAE, 1997, 13(1): 57-62. (in Chinese)
- 2 蒋亦元. 摘脱后切割茎秆在中央集成条铺的收割方法及纵向搂集机构: 1762191[P]. 2006-04-26.
- 3 PRICE J S. Evaluation of an approach to early separation of grain threshed by a stripping rotor[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1993, 56(1): 65-79.
- 4 BHANAGE G B, SHAHARE P U, AWARE V V, et al. Development of stripper harvester for paddy[J]. Journal of Applied and Natural Science, 2017, 9(4): 1943-1948.
- 5 孙韬, 李耀明, 徐立章, 等. 草谷比对多滚筒脱粒分离装置性能影响的试验研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2013, 51(11): 13-17. SUN T, LI Y M, XU L Z, et al. Experimental study on effects of ratio of straw to rice on the performance of multi-cylinder threshing and separating device[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2013, 51(11): 13-17. (in Chinese)
- 6 原建博, 吴崇友, 李骅, 等. 我国南方两种水稻脱出物物理特性测定与分析[J]. 农机化研究, 2018, 40(2): 154-159. YUAN J B, WU C Y, LI H, et al. Determination and analysis of two kinds of threshed rice physical properties in south China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(2): 154-159. (in Chinese)
- 7 李耀明. 水稻梳脱混合物复脱分离、清选特性的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2004. LI Y M. Study on separation of rethreshed stripped mixtures and their cleaning characteristics for rice[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2004. (in Chinese)
- 8 徐立章. 水稻脱粒分离理论与关键技术研究及其应用[M]. 镇江: 江苏大学出版社, 2014.
- 9 CHEGINI G, MIRNEZAMI S V. Experimental comparison of combine performance with two harvesting methods: stripper header and conventional header[J]. Agricultural Engineering International CIGR Journal, 2016, 18(1): 192-200.
- 10 蒋亦元, 孙伟. 谷物脱出物箱式分离系统防止堵塞机构: 101785391A[P]. 2010-07-28.
- 11 蒋亦元, 孙伟. 谷物脱出物管道输送系统防止堵塞机构: 101779550A[P]. 2010-07-21.
- 12 刘大为, 卢伟, 谢方平, 等. 水稻脱出物旋风清选分离筒中籽粒分离效率分析[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(7): 55-65. LIU D W, LU W, XIE F P, et al. Separation efficiency analysis on rice extractions in the cyclone cleaning segregating cartridge[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 19(7): 55-65. (in Chinese)
- 13 刘正怀, 郑一平, 王志明, 等. 微型稻麦联合收获机气流式清选装置研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 102-108. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150716&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150716&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.016. LIU Z H, ZHENG Y P, WANG Z M, et al. Design on air-flowing cleaning unit of micro rice-wheat combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 102-108. (in Chinese)
- 14 唐忠, 何俊增, 周跃鹏, 等. 多滚筒脱粒分离装置脱粒参数试验与分析[J]. 农机化研究, 2017, 39(2): 153-157.

- TANG Z, HE J Z, ZHOU Y P, et al. Test and analysis of best parameter of transverse multi-cylinder device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(2): 153 - 157. (in Chinese)
- 15 TANG Z, LI Y M, ZHAO Z, et al. Structural and parameter design of transverse multi-cylinders device on rice agronomic characteristics[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2015, 13(4): e0216.
- 16 李耀明,乔明光,徐立章,等. 纵轴流复脱分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 50 - 54.  
LI Y M, QIAO M G, XU L Z, et al. Development and performance experiments on axial-rethreshing with axial feeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 50 - 54. (in Chinese)
- 17 徐立章,于丽娟,李耀明,等. 双出风口多风道离心风机内部流场数值模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 78 - 86. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20141013&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141013&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.013.  
XU L Z, YU L J, LI Y M, et al. Numerical simulation of internal flow field in centrifugal fan with double outlet and multi-duct [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 78 - 86. (in Chinese)
- 18 徐立章,李耀明,唐忠,等. 切纵流脱粒分离清选装置: 102860182A[P]. 2013-01-09.
- 19 PANASIEWICZ M, SOBCZAK P, MAZUR J, et al. The technique and analysis of the process of separation and cleaning grain materials[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 109(3): 603 - 608.
- 20 MONDOL M R A, AKASE A. Separating characteristics of the down-flow vertical rotating screen separator for brown rice separation[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2002, 64(6): 118 - 127.
- 21 MONDOL M R A, AKASE A. Studies on the vertical rotating screen separator of brown rice (ii) [J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2000, 62(Supp.): 489 - 490.
- 22 衣淑娟,陶桂香,毛欣. 两种轴流脱粒分离装置脱出物分布规律对比试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 154 - 156.  
YI S J, TAO G X, MAO X. Comparative experiment on the distribution regularities of threshed mixtures for two types of axial flow threshing and separating installation[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 154 - 156. (in Chinese)
- 23 衣淑娟,蒋恩臣. 轴流脱粒与分离装置脱粒过程的高速摄像分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(5): 52 - 55.  
YI S J, JIANG E C. High-speed photography analysis on process of threshing of axial flow threshing and separating installation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5): 52 - 55. (in Chinese)
- 24 姜楠,衣淑娟,张延河. 钉齿式轴流装置脱粒过程高速摄像分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(增刊): 52 - 56.  
JIANG N, YI S J, ZHANG Y H. High-speed photography analysis of threshing process on axial flow device with nails teeth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 52 - 56. (in Chinese)
- 25 韩豹,蒋亦元,吴文福. 倒伏超级稻割前摘脱台试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 90 - 94.  
HAN B, JIANG Y Y, WU W F. Experiments on stripping header for harvesting lodging super rice [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6): 90 - 94. (in Chinese)
- 26 蒋恩臣,蒋亦元. 气吸式割前摘脱装置的研究[J]. 农业机械学报, 2000, 31(3): 46 - 48.  
JIANG E C, JIANG Y Y. Studies on the stripping unit with air suction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(3): 46 - 48. (in Chinese)
- 27 蒋恩臣,孙占峰,潘志洋,等. 基于 CFD-DEM 的收获机分离室内谷物运动模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 117 - 122. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20140418&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140418&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.018.  
JIANG E C, SUN Z F, PAN Z Y, et al. Numerical simulation based on CFD-DEM and experiment of grain moving laws in inertia separation chamber[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 117 - 122. (in Chinese)
- 28 KLINNER W E, NEALE M A, ARNOLD R E. A new stripping header for combine harvesters[J]. Agricultural Engineer, 1987, 42(1): 9 - 14.
- 29 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- 30 徐中儒. 回归分析与试验设计[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- 31 葛宜元. 试验设计方法与 Design-Expert 软件应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2015.
- 32 徐向宏,何明珠. 试验设计与 Design-Expert、SPSS 应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.