

油菜分段收获捡拾脱粒机捡拾损失响应面分析*

吴崇友^{1,2} 丁为民² 石磊¹ 王利强³ 金诚谦¹

(1. 农业部南京农业机械化研究所, 南京 210014; 2. 南京农业大学工学院, 南京 210031;

3. 江南大学机械工程学院, 无锡 214122)

【摘要】 为降低捡拾脱粒机捡拾损失, 采用响应面分析方法对捡拾部件的参数进行试验。试验结果和分析表明: 影响捡拾损失的重要因素是机组前进速度、输送带速和输送倾角; 3个影响因素按重要性排序为: 机组作业速度、输送带速、输送倾角。确定了一组最优的参数组合: 机组前进速度 0.80 m/s, 输送带速 0.78 m/s, 输送倾角 11.19°, 优化后捡拾损失率的理论值为 2.91%。考虑实际机械作业过程中的参数调整问题, 推荐参数组合为: 机组前进速度 0.71 m/s, 输送带速 0.80 m/s, 输送倾角 12°。

关键词: 油菜 分段收获 捡拾脱粒机 损失率 响应面分析

中图分类号: S225.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)08-0089-05

Response Surface Analysis of Pickup Losses in Two-stage Harvesting for Rapeseed

Wu Chongyou^{1,2} Ding Weimin² Shi Lei¹ Wang Liqiang³ Jin Chengqian¹

(1. *Nanjing Research Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China*

2. *College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China*

3. *School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China*)

Abstract

In order to reduce the loss rate in picking up, parameters of pickup device with response surface analysis methods was studied. The results showed that main factors of impacting pickup loss rate were the moving speed, belt speed and conveyor inclination. The three factors gradation of importance was the moving speed, belt speed and conveyor inclination. Optimal group of parameters was the moving speed of 0.80 m/s, the belt speed of 0.78 m/s, the conveyor inclination of 11.19°, the optimal loss rate of 2.91%. Considering of parameters adjusting in actual conditions, recommended parameters were that the moving speed of 0.71 m/s, the belt speed of 0.80 m/s, the conveyor inclination of 12°.

Key words Rapeseed, Two-stage harvesting, Pickup thresher, Loss, Response surface analysis

引言

我国南方油菜为越冬油菜, 当年秋种而次年夏收, 成熟期和收获期气温逐渐升高, 角果易开裂, 给机械联合收获带来了难度。我国南方油菜种植区均为两熟或三熟的多作物轮作区, 由于种植茬口紧, 大部分地区不得不采用育苗移栽方式种植, 种植密度

低、植株高大、分支多、收获期茎秆含水率高、角果成熟度差异大、联合收获损失率高, 且难以有效控制。分段收获利用油菜后熟作用, 在完熟期前先割倒晾晒, 之后捡拾脱粒, 两次作业完成收获过程, 分段收获比联合收获适收期长。由于提前割晒, 其割晒损失率低。油菜晾晒后茎秆、角果等含水率以及植株之间、角果层上下之间的成熟度差异性均显著降低,

收稿日期: 2010-08-02 修回日期: 2010-09-05

* “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2010BAD01B06)和公益性行业(农业)科研专项经费项目(nyhyzx07-058)

作者简介: 吴崇友, 博士生, 农业部南京农业机械化研究所研究员, 主要从事耕作与收获机械研究, E-mail: cywu59@sina.com

通讯作者: 丁为民, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机械理论与设计研究, E-mail: wmding@njau.edu.cn

从而使捡拾脱粒作业的损失率也降低,并且可以控制^[1-5]。

我国南方冬油菜的机械化分段收获技术研究尚处于起步阶段,对分段收获捡拾、脱粒、清选等各环节对损失率的影响研究较少,采用的研究手段多为对比试验和正交试验^[6]。目前,响应面方法由于其合理的设计和优良的效果,已被各行业采用^[7-9],但在作物机械化收获、捡拾、脱粒作业的研究中还鲜有报道。本文采用响应面方法(response surface methodology,简称 RSM)对油菜捡拾脱粒机捡拾损失率进行研究。

1 捡拾试验方案设计

试验时间:2009 年 5 月 28 日至 6 月 2 日,测定日期:5 月 31 日。

试验地点:江苏省江都市小纪镇。

试验条件:田块面积 1.5 hm²,作物品种宁油 10 号,播种方式撒播,密度 18.3 株/m²,作物自然高度 167 cm(平均),产量 3 130.5 kg/hm²。捡拾作业时,油菜已经晾晒 3 d,至黄熟后期,茎秆含水率 52.9%,籽粒含水率 12.8%,草谷比 4.52。

试验机具:4SJ-1.8 型履带自走式油菜捡拾脱粒机(样机),主要设计参数:作业幅宽 1 800 mm;生产率 0.27~0.4 hm²/h;总损失率不大于 5.5%;破损率不大于 0.5%;含杂率不大于 5%;配套动力 33~45 kW。

根据 Box-Benhknen 中心组合试验设计原理^[6-8],综合单因素试验结果选取对油菜捡拾损失率影响显著的机组前进速度、输送带速、输送倾角 3 个因素,进行三因素三水平的响应面分析,试验因素与水平设计如表 1 所示。

表 1 响应面分析因素与水平

Tab.1 Factors and levels of response surface analysis

水平	因素		
	机组前进速度	输送带速	输送倾角
	$Z_1/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$Z_2/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$Z_3/(\text{°})$
-1	0.46	0.70	9
0	0.71	0.80	12
1	0.96	0.90	15

2 响应面分析方案与结果

以 X_1 、 X_2 、 X_3 表示机组前进速度、输送带速和输送倾角编码值, Y 为捡拾损失率响应值,试验方案及试验结果如表 2 所示,回归方程的方差分析如表 3 所示。

表 2 响应面分析方案及试验结果

Tab.2 Experimental plan and results of response surface analysis

试验号	X_1	X_2	X_3	捡拾损失率 $Y/\%$
1	-1	-1	0	5.34
2	-1	1	0	4.58
3	1	-1	0	4.19
4	1	1	0	4.94
5	0	-1	-1	3.92
6	0	-1	1	5.21
7	0	1	-1	5.07
8	0	1	1	3.98
9	-1	0	-1	5.62
10	1	0	-1	3.36
11	-1	0	1	4.22
12	1	0	1	4.48
13	0	0	0	2.91
14	0	0	0	2.67
15	0	0	0	3.29

2.1 数学模型建立与显著性检验

采用三因素二次回归正交旋转组合试验设计方案对影响捡拾损失率的 3 个主要参数组合进行优化。利用 Design-Expert 7.0 软件对表 2 中的试验结果进行多元回归拟合,得出回归方程中的各项系数(表 3),并用 F 检验检验显著性^[10]。

表 3 回归系数及其显著性检验

Tab.3 Regression coefficient and significance test of response surface analysis

序号	回归项	回归系数	标准差	F 值	P 值 ($Pr > F$)
1	常数项	2.96	0.16	15.09	0.004 **
2	X_1	-0.35	0.1	11.93	0.018 2 *
3	X_2	-0.011	0.1	0.012	0.915 6
4	X_3	-0.01	0.1	0.009 8	0.925 0
5	X_1X_2	0.38	0.14	6.99	0.045 8 *
6	X_1X_3	0.63	0.14	19.46	0.006 9 **
7	X_2X_3	-0.6	0.14	17.36	0.008 8 **
8	X_1^2	0.84	0.15	31.97	0.002 4 **
9	X_2^2	0.97	0.15	42.18	0.001 3 **
10	X_3^2	0.62	0.15	17.56	0.008 6 **

注:***表示 $P < 0.001$ (极显著),**表示 $P < 0.01$ (很显著),*表示 $P < 0.05$ (显著)。

从表 3 可见,机组前进速度(X_2)和输送带速(X_3)的 P 值大于 0.1,说明机组前进速度和输送带速的一次项不显著,除此两项外其他各项的 F 检验均很显著,说明试验响应值的变化非常复杂,各个试

验因素对响应值的影响不是简单的线性关系,而存在二次关系,且三因素间存在明显的交互作用。由表 3 得出捡拾损失率 Y 的回归方程为

$$Y = 2.96 - 0.35X_1 - 0.01X_2 - 0.01X_3 + 0.38X_1X_2 + 0.63X_1X_3 - 0.6X_2X_3 + 0.84X_1^2 + 0.97X_2^2 + 0.62X_3^2$$

为了提高精度,剔除原方程中的不显著因子项,可得到关于捡拾损失率 Y 编码空间的二次回归模型

$$Y = 2.96 - 0.35X_1 + 0.38X_1X_2 + 0.63X_1X_3 - 0.6X_2X_3 + 0.84X_1^2 + 0.97X_2^2 + 0.62X_3^2$$

将二次回归方程模型变换为实际因素(非编码空间)对应方程为

$$Y = 79.3 - 42.64Z_1 + 15.1Z_1Z_2 + 0.84Z_1Z_3 - 1.98Z_2Z_3 + 13.44Z_1^2 + 96.54Z_2^2 + 0.07Z_3^2$$

对捡拾损失率 Y 编码空间的回归方程模型进行方差分析,结果如表 4 所示。

表 4 二次回归方程模型的方差分析

Tab.4 Variance analysis of quadratic regression model					
方差来源	平方和	自由度	均值	F 值	P 值 ($Pr > F$)
回归模型	11.08	9	1.23		
失拟项	0.21	3	0.071	0.72	0.624 2 (不显著)
纯误差	0.2	2	0.098		
残值	0.41	5	0.082		
综合	11.49	14			

由表 4 看出,响应面的回归模型 F 检验呈很显著($P < 0.05$);模型的校正决定系数 $\text{Adj } R^2 = 0.900\ 6$,说明该模型能够解释 90.06% 响应值变化,仅有总变异的 9.94% 不能用此模型来解释;失拟项的 F 值为 0.72, P 值为 $0.624\ 2 > 0.05$,不显著,而复相关系数达到 0.964 5,说明回归模型相对于纯误差失拟不显著,试验的误差小。分析表明可以用二次回归方程模型代替试验点对试验结果进行分析。

2.2 因素重要性分析

由表 5 的分析结果可知:机组前进速度在试验过程中起作用最大,而输送带速和输送倾角相对来说作用小些,对损失率的影响效果由大到小为: X_1 、 X_2 、 X_3 ,即影响因素重要性顺序为:机组前进速度、输送带速、输送倾角。

表 5 影响因素的重要性分析

Tab.5 Importance analysis of factors			
因素	自由度	SS	MS
X_1	1	0.973 0	0.973 0
X_2	1	0.001 0	0.001 0
X_3	1	0.000 8	0.000 8

2.3 单因素效应分析

固定两因素于零水平,求第 3 个因素与捡拾损失率的降维回归方程:

机组前进速度 $Y = 2.96 - 0.35X_1 + 0.84X_1^2$

输送带速 $Y = 2.96 + 0.97X_2^2$

输送倾角 $Y = 2.96 + 0.62X_3^2$

根据这些方程得到 3 个因子对捡拾损失率影响的关系曲线如图 1 所示。

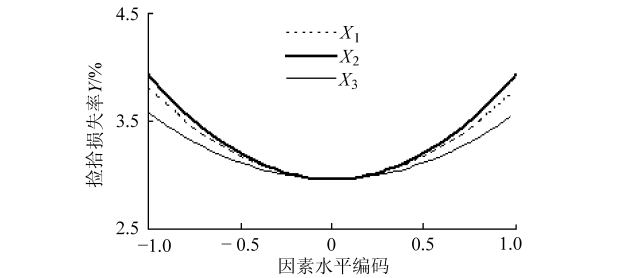


图 1 单因素与捡拾损失率关系图
Fig.1 Relations of single factor and loss rate

从图 1 可以看出,在存在交互作用的情况下,随着机组前进速度、输送带速和输送倾角 3 个因素水平的不断增大,捡拾损失率呈先降后升的趋势,且 3 个因素均在零水平附近时捡拾损失率达到最小,这与单因素预试验结果一致,试验范围选择恰当。

2.4 双因素效应分析

在式(1)中,固定任意 1 个因素在零水平,研究其余两因素间的交互效应。应用 SAS 统计分析软件作响应曲面与等值线图,分析机组速度、输送带速、输送倾角的交互作用对捡拾损失率的影响。

2.4.1 机组前进速度和输送带速的影响

将建立的回归方程中 X_3 固定在零水平,即可得到 X_1 、 X_2 对指标值 Y 影响的子模型

$$Y = 2.96 - 0.35X_1 + 0.38X_1X_2 + 0.84X_1^2 + 0.97X_2^2$$

所得回归方程对应的响应曲面和等值线如图 2 所示。

由图 2a 可以看出,捡拾损失率随着机组前进速度的增加先减小后增大,要使捡拾损失率最小,最优的机组前进速度范围应在 0 ~ 1 水平(实际值 0.71 ~ 0.96 m/s)之间。捡拾损失率随着输送带速的增加先逐渐减小,但是当捡拾损失率达到最小值时继续增大输送带速,捡拾损失率又呈上升的趋势。说明输送带速过小时,损失率反而会增大,这是因为捡拾过程中输送带速过慢时增加了油菜茎秆与地面的摩擦时间,而且容易形成被输送的油菜茎秆之间离散、输送不连贯,使得部分籽粒和角果散落,形成损失;输送带速过大时,大大增加了输送带齿与油菜茎秆接触时的打击力度,这一打击力足以造成角果开裂,形成较大损失。对照图 2,最优的输送带速范围应

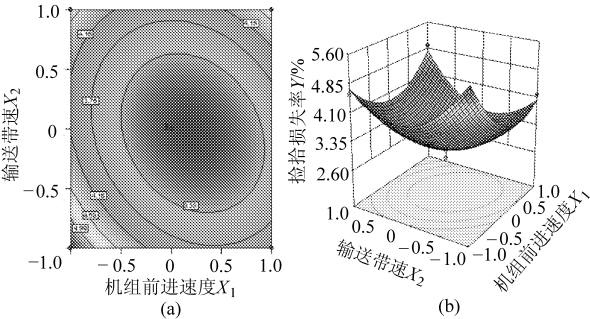


图2 机组前进速度和输送带速对
捡拾损失率的影响

Fig.2 Effects of moving speed and
speed to loss rate
(a) 等值线 (b) 响应曲面

在零水平(实际值 0.8 m/s)附近。

2.4.2 输送带速和输送倾角的影响

将建立的回归方程中 X_1 固定在零水平,即可得到 X_2 、 X_3 对指标值 Y 影响的子模型

$$Y=2.96-0.6X_2X_3+0.97X_2^2+0.62X_3^2$$

所得回归方程对应的响应曲面和等值线如图 3 所示。

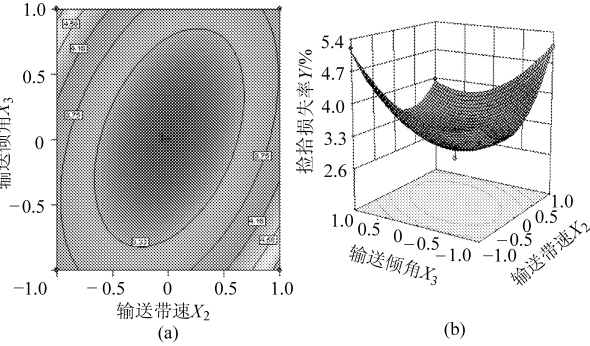


图3 输送带速和输送倾角对
捡拾损失率的影响

Fig.3 Effects of belt speed and conveyor inclination
to loss rate
(a) 等值线 (b) 响应曲面

由图 3 可以看出,当输送带速、输送倾角和机组前进速度均为零水平时,捡拾损失率出现极小峰值。还可以看出,在输送带速的各个水平下,其对应的捡拾损失率均随着输送倾角的增加呈先减小后增大的趋势。在输送倾角的各个水平下,捡拾损失率随着输送带速的增大呈相同的趋势。

2.4.3 机组前进速度和输送倾角的影响

将建立的回归方程中 X_2 固定在零水平,即可得到 X_1 、 X_3 对指标值 Y 影响的子模型

$$Y=2.96-0.35X_1+0.63X_1X_3+0.84X_1^2+0.62X_3^2$$

所得回归方程对应的响应曲面和等值线如图 4 所示。

由图 4 可以看出,在输送倾角的各个水平下,其

对应的捡拾损失率均随着机组前进速度的增加呈先减小后增大的趋势。在机组前进速度的各个水平下,捡拾损失率随着输送倾角的增大呈先降后升的趋势;在输送倾角的各个水平下,捡拾损失率随着机组前进速度的增大呈相同的趋势。同时,由图 4 可以看出,当输送带速为零水平时,捡拾损失率极小值点所对应的输送倾角范围应在 $-1\sim 0$ 水平(实际值 $9^{\circ}\sim 12^{\circ}$)之间,对应的机组速度在 $0\sim 1$ 水平(实际值 $0.71\sim 0.96\text{ m/s}$)之间。

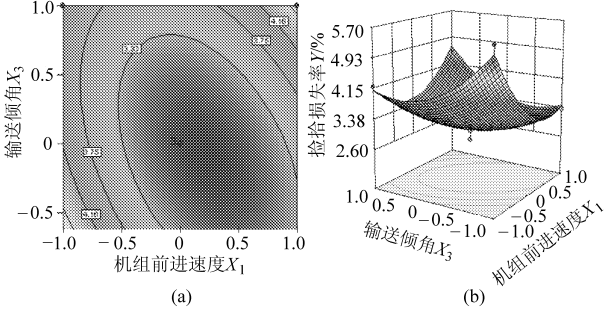


图4 机组前进速度和输送倾角对
捡拾损失率的影响

Fig.4 Effects of moving speed and conveyor
inclination to loss rate
(a) 等值线 (b) 响应曲面

3 影响捡拾损失率试验参数的优化求解

参数优化理想的结果是在约束条件范围内尽可能减小损失的数值,因此将其作为评价指标,建立数学模型如下:

目标函数 $\min Y(X_1, X_2, X_3)$

约束条件 $-1\leq X_1\leq 1 \quad -1\leq X_2\leq 1 \quad -1\leq X_3\leq 1$

利用牛顿迭代法^[11~12]规划求解,得到在捡拾损失率最小时的最佳试验参数组合,如表 6 所示。

表 6 捡拾损失率组合参数优化表

Tab.6 Optimal parameters group of loss rate		
因素	编码值	编码值对应实际值
机组前进速度	0.36	0.80 m/s
输送带速	-0.1	0.78 m/s
输送倾角	-0.27	11.19°

经试验分析得出,影响捡拾损失率的因素优化组合为:机组前进速度 0.8 m/s,输送带速 0.78 m/s,输送倾角 11.19°,优化后的捡拾损失率理论值为 2.91%。但是,实际捡拾作业时机组参数很难调整到优化后的参数组合,当试验三因素均在零水平时,据试验回归方程模型可知此时油菜籽捡拾损失率为 2.96%,与优化值(2.91%)差别不大,这个差异在实际作业过程中影响甚微,故在实际作业过程中推荐参数组合为:机组前进速度 0.71 m/s,输送带速

0.80 m/s, 输送倾角 12°。

4 结论

(1) 分析了影响油菜机械化捡拾损失率的主要因素:机组前进速度、输送带速和输送倾角,并得出了 3 个因素对捡拾损失率影响的回归方程的数学模型。方差分析表明回归模型很显著、失拟不显著,即试验的误差小,完全可以用该二次回归方程模型代替试验点对试验结果进行分析。

(2) 通过对回归方程的响应曲面法分析,确定影响捡拾损失的因素重要性顺序为:机组前进速度、

输送带速、输送倾角,随着三因素水平的增大,捡拾损失率均呈先减小后增大的趋势,当固定任一因素在零水平时捡拾损失率存在极小值。

(3) 利用有约束非线性优化理论对回归方程的设计参数进行优化,确定了一组最优的参数组合:机组前进速度 0.80 m/s,输送带速 0.78 m/s,输送倾角 11.19°,优化后捡拾损失率的理论值为 2.91%。但是,考虑实际机械作业过程中的参数调整问题,推荐参数组合为:机组前进速度 0.71 m/s,输送带速 0.80 m/s,输送倾角 12°,该条件下对应的捡损损失率与优化后的理论最佳值相差很小。

参 考 文 献

1 吴崇友,易中懿. 我国油菜全程机械化技术路线的选择[J]. 中国农机化,2009(2):3~6.
Wu Chongyou, Yi Zhongyi. Selection of technology route of oilseed rape mechnization in entire production proceeding in China [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2009(2):3~6. (in Chinese)

2 Price J S, Hobson R N, Neale M A, et al. Seed losses in commercial harvesting of oilseed rape[J]. J. Agric. Engng. Res. , 1996,65:183~191.

3 卢晏,吴崇友,金诚谦,等. 油菜机械化收获方式的选择[J]. 农机化研究,2008,30(11):240~242,245.
Lu Yan, Wu Chongyou, Jin Chengqian, et al. The choice of rape mechanized harvest methods[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008,30(11):240~242, 245. (in Chinese)

4 Bruce D M, Farrenta J W, Morganb C L, et al. Determining the oilseed rape pod strength needed to reduce seed loss due to pod shatter[J]. Biosystems Engineering,2002,81(2):179~184.

5 Hobson R N, Bruce D M. Seed loss when cutting a standing crop of oilseed rape with two types of combine harvester header [J]. Biosystems Engineering, 2002,81(3):281~286.

6 吴崇友,丁为民,张敏,等. 油菜分段收获脱粒清选试验[J]. 农业机械学报,2010,41(8):70~76.
Wu Chongyou, Ding Weimin, Zhang Min, et al. Experiment on threshing and cleaning in two-stage harvesting for rapeseed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(8):70~76. (in Chinese)

7 田嘉海,王杰志,赵清华,等. 齿带式拾禾器基本参数的分析与计算[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,1994,7(4):59~63.

8 费荣昌. 试验设计与数据处理[M]. 无锡:江南大学出版社,2001:59~63.

9 Box G E P,Hunter W G. Statistics for experiments: an intro-duction to design, data analysis and 6 model building[M]. New York:Wiley,1990.

10 吴有炜. 实验设计与数据处理[M]. 苏州:苏州大学出版社,2002:58~74.