



徐元宇, 陶桂香, 戴智博, 张紫恒, 程天龙. 大豆收获损失因素分析及机收参数试验研究——以北大荒集团黑龙江鹤山农场为例[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(11): 209-217.

XU Yuanyu, TAO Guixiang, DAI Zhibo, ZHANG Ziheng, CHENG Tianlong. Factor analysis of soybean harvest losses and experimental research on machine harvesting parameters: A case study of Beidahuang Group Heilongjiang Heshan Farm[J]. Journal of China Agricultural University, 2024, 29(11): 209-217.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.11.21

大豆收获损失因素分析及机收参数试验研究 ——以北大荒集团黑龙江鹤山农场为例

徐元宇¹ 陶桂香^{1*} 戴智博¹ 张紫恒¹ 程天龙²

(1. 黑龙江八一农垦大学 工程学院, 黑龙江 大庆 163319;

2. 北大荒集团黑龙江鹤山农场有限公司 第二管理区, 黑龙江 嫩江 161499)

摘要 针对目前黑龙江地区大豆收获环节机收损失较高的问题, 采用问卷调查分析、Tobit模型评估与田间试验等方法对收获环节机收损失相关性、影响因素以及机具最佳作业参数进行研究。结果表明: 1) 前进速度、作业机型、脱粒参数对机收损失质量具有极显著正向影响; 驾驶员培训、作业时间有显著的负向影响。2) 大豆机收损失率与作业日期和时刻之间存在二次函数变化规律; 损失率和破碎率随前进速度增大呈上升趋势; 随着滚筒转速的增大总损率呈逐渐升高的趋势, 破碎率呈先降低后升高的趋势; 随着脱粒间隙增大损失率呈先下降后上升的趋势, 破碎率呈逐渐降低的趋势。3) 当前进速度为4.5 km/h, 滚筒转速为560 r/min, 脱粒间隙为28 mm时, 损失率、破碎率分别为1.37%、1.21%, 机收损失较低。对作业参数调整后, 田间损失率、破碎率分别为1.35%、1.15%, 与调整前相比分别降低了0.43%、0.24%, 在此参数组合下机收作业质量较高。

关键词 大豆; Tobit模型; 机收损失; 作业参数

中图分类号 S23

文章编号 1007-4333(2024)11-0209-09

文献标志码 A

Factor analysis of soybean harvest losses and experimental research on machine harvesting parameters: A case study of Beidahuang Group Heilongjiang Heshan Farm

XU Yuanyu¹, TAO Guixiang^{1*}, DAI Zhibo¹, ZHANG Ziheng¹, CHENG Tianlong²

(1. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;

2. Beidahuang Group Heilongjiang Heshan Farm Co., Ltd., Second Management Zone, Nenjiang 161499, China)

Abstract To address the issue of high machine harvesting losses during soybean harvest in Heilongjiang, a study was conducted using questionnaire surveys, Tobit model evaluations, and field experiments to analyze the correlation, influencing factors, and optimal operating parameters of machinery in the harvest process. The results showed that: 1) The forward speed, type of machinery, and threshing parameters had high significant positive impacts on the machine harvesting loss while the driver training and operating time had significant negative impact. 2) There was a quadratic function relationship between the loss rate and operating date and time. The loss rate and crushing rate increased with higher forward speeds. As the rotate speed of the roller increased, the total loss rate gradually increased, and the crushing rate initially

收稿日期: 2024-01-02

基金项目: 大豆机械化收获技术试验示范(2022302); 黑龙江省高等教育教学改革研究项目(SJGY20220484)

第一作者: 徐元宇(ORCID: 0009-0004-1409-4893), 硕士研究生, E-mail: xuyuanyu2023@163.com

通讯作者: 陶桂香(ORCID: 0009-0004-7622-602X), 教授, 博士生导师, 主要从事农业机械化收获装备研究, E-mail: tgx1996@163.com

decreased and then increased. With the increasing of threshing gap, the loss rate initially decreased and then increased, while the crushing rate gradually decreased. 3) When the forward speed was 4.5 km/h, the rotate speed of the roller was 560 r/min, and the threshing gap was 28 mm, the loss rate and crushing rate were 1.37% and 1.21%, respectively, resulting in the lower machine harvesting losses. After the adjustment of the operation parameters, the field loss rate and breakage rate were 1.35% and 1.15%, respectively, representing the decreases of 0.43% and 0.24% compared to before the adjustment. Under above combination of parameters, the quality of the mechanical harvesting operation is high.

Keywords soybeans; Tobit model; mechanical harvesting loss; operational parameters

大豆是我国重要的粮食作物之一^[1],我国大豆主产区主要集中在东北地区。2022年,黑龙江省的大豆播种面积占全国的48.1%,产量约953.5万t,占全国的47%^[2]。目前粮食作物产后减损对于提高粮食供给存在较大潜力^[3],而大豆生产全程机械化是大豆产业高效发展的重要保障^[4],因此加强对机收减损技术的研究和推广^[5],根据当地大豆机收环节损失原因提出相应的减损措施将极大促进黑龙江地区机收减损技术的发展,对提高大豆供给具有重要意义。

国内外对玉米、小麦收获损失影响因素分析表明:种植品种、农户收入占比、种植规模、机械使用年限、机收操作水平以及收获时间对收获损失存在显著影响^[6-8]。与传统割台相比,挠性割台可通过机构仿形减轻对豆枝打击力^[9],但割台损失仍是主要损失原因。对比不同参数滚筒和脱粒间隙进行试验发现滚筒转速过高和脱粒间隙过低均增加大豆籽粒机械损伤率^[10-11],但随着农机产品更新迭代,在不同作业环境下对脱粒滚筒和间隙参数配合要求不同。根据黑龙江省北安地区损失情况分析得出北安地区最佳收获日期为10月6日^[12],对产量变化情况进行分析得出最佳收获时间为成熟后14天内^[13],但由于大豆品种间的差异性对最佳收获日和成熟度的确定不能一概而论,在时间和空间上也存在一定局限性。同时大豆籽粒含水率也是影响机收损失的主要原因之一,在对比大豆每日产量情况发现最佳的大豆收获时机为大豆籽粒含水率第一次达到13%左右机收损失最小^[14],但在黑龙江地区大规模种植模式下无法短期完成大面积大豆收获。

目前针对收获损失的研究主要集中在探讨各环节不同因素对收获损失的影响,针对机收作业环节收获损失的相关研究较少。为将机收减损技术在黑龙江地区进行适应性推广和应用,本研究拟对

大豆机收环节损失进行问卷调查,应用Tobit模型进行影响因素分析得出主要影响因素,通过田间试验得出影响因素的变化规律,优化主要作业参数。旨在得到最佳机收效果,降低收获损失,以期为该地区大豆机收减损技术的研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 问卷设计及调研方法

调研问卷内容包括经营管理情况、收获作业情况以及作业环境情况3部分。其中经营管理情况包括驾驶员技术水平、作业日期和时刻、作业设备调试、行走路线等,收获作业情况包括作业机型、前进速度、脱粒参数、清选参数等指标,作业环境情况包括土壤温度、空气湿度、大豆籽粒含水率。

调研地点选定在黑龙江省嫩江市九三管理局及辖属鹤山农场、尖山农场、荣军农场、红五月农场开展调查,课题共发放问卷280份,剔除异常问卷,有效问卷261份,问卷回收有效率93.21%。

1.2 试验条件

试验地点为黑龙江省黑河市嫩江市双山镇(北纬48°46′、东经125°32′),该地区属于黑龙江省嫩江市九三管理局鹤山农场大豆北部主产区。试验品种为‘黑河43’,种植模式为45 cm等行距种植,密度为464 100株/hm²。联合收获机作业机型为迪尔S760型联合收获机。在调研过程以及试验开始前咨询农场工作人员和驾驶员了解当地农场机收作业参数结合已有研究后确定大豆联合收获机作业参数范围:前进速度为3~7 km/h、滚筒转速为300~700 r/min、脱粒间隙为24~32 mm。利用谷物水分测量仪(PM8188-A)进行测定大豆籽粒含水率,经测定大豆籽粒含水率平均值为14%。驾驶员技术水平成熟。

1.3 测定方法及指标计算

试验参照JB/T 11912—2014《大豆联合收割

机》^[15], 选取损失率 Y_1 和破碎率 Y_2 为评价大豆联合收获机作业质量的指标。

基于已有相关研究^[16-20], 依据嫩江市大豆种植方式, 为去除边界效应本试验将试验区四周距其他试验区保持 5 m 距离, 在试验区内采用五点取样法确定取样具体位置。在收获作业前对参试品种进行测产, 按照随机取点取出 1 m² 内所有大豆的株数, 通过捡拾地面上自然脱落的豆荚和豆粒, 人工脱粒后进行称重, 重复 5 次取平均值, 计算出 1 m² 内大豆实际产量和自然落粒量。随机收集 3 次取样区域内所有掉落或随豆枝、豆皮排出的籽粒和豆荚, 计算出收获后每平方米大豆籽粒总损失量, 去除自然落粒后的损失量, 获得收获后每平方米大豆籽粒机收损失量。试验完成后随机抽样 3 次粮箱内大豆籽粒共 1 500 g, 挑选出破裂的大豆籽粒, 称出破碎大豆籽粒质量, 指标计算公式^[21]为:

$$Y_1 = \frac{W_{ss}}{W_{ss} + W_{sh}} \times 100\% \quad (1)$$

$$Y_2 = \frac{W_{pz} - W_{pq}}{W_{pz}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: W_{ss} 为大豆籽粒损失量, g/m²; W_{sh} 为大豆籽粒实际产量, g/m²; W_{pz} 为清除杂质后样品质量, g; W_{pq} 为清除杂质和破碎籽粒后样品质量, g。

1.4 数据处理

采用 Excel 2019 进行数据处理, 运用 SPSS 26.0 进行信度及相关性分析, 通过 STATA 16 建立 Tobit 模型进行影响因素分析, 利用 Origin 2022 绘图。

2 结果与分析

2.1 信度检验

本研究使用克隆巴哈系数(α)进行信度检验确保调查问卷可靠性。 α 的取值范围为 0~1, $\alpha < 0.6$ 认为信度较低, $\alpha > 0.7$ 为信度较好, 计算公式如下:

$$\alpha = \frac{K}{K-1} \times \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^K S_i^2}{S^2} \right) \quad (3)$$

式中: K 为量表系数; S^2 为总方差; S_i^2 为目前测试项目方差。

依据式(3)计算分析大豆收获环节损失原因调查问卷中 3 个变量和问卷整体结果得出经营管理情况、收获作业情况、作业环境情况及整体的 α 值分别

为 0.776、0.704、0.715 以及 0.784。各变量 α 值均大于可信临界值 0.7, 问卷内部一致性较好。

2.2 相关性分析

皮尔逊相关系数(r)是衡量 2 个变量之间线性关系强度和方向的统计指标, r 的取值范围为 $-1 \sim 1$, $r > 0$ 表示正线性相关, $r < 0$ 表示负线性相关, 计算公式如下:

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

式中: x_i 和 y_i 分别为变量 x 和 y 的第 i 个观测值; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为变量 x 和 y 的平均值。

利用式(4)计算机收损失与各因素间的相关系数, 结果见表 1。机收损失与作业机型、收获时间、前进速度、脱粒参数、大豆籽粒含水率、驾驶员水平呈极显著正相关, 与作业设备调试呈显著负相关, 在大豆收获机作业参数中前进速度对机收损失的影响最大, r 值为 0.680, 其次分别为收获时间、作业机型、脱粒参数, 对机收损失影响显著。土壤湿度、空气湿度以及行走路线的 r 值较小, 影响不显著。

2.3 模型评估

2.3.1 模型确定

由于农户收获损失测算方法存在差异, 难以获取衡量大豆机收损失的连续数据, 因此, 反映大豆收获损失程度的数据主要以离散的分类数据为主。在分析离散分类数据时, 概率统计模型 (Probit、Tobit 和 Logistic) 是较为理想的估计方法。其中, Probit 模型一般假设变量需服从正态分布, Tobit 模型多用于分析因变量为受限变量问题, Logistic 模型仅需要随机变量服从逻辑概率分布, 不要求变量满足正态分布或等方差性应用最为广泛^[7-8]。由于大豆收获损失率取值存在连续和分类自变量问题, Probit 模型和 Logistic 模型不能具体对大豆机收损失原因进行精准观测, Tobit 模型运用最大似然估计方法, 通过引入截断过程的概率分布, 并对未观测到的数据进行建模, 能够更准确地估计出因变量的影响因素效应, 在因变量受到下限或上限约束时, 能更精准分析因变量与自变量的关系。

为解决机收损失数据存在连续和分类自变量问题, 本研究选取 Tobit 模型对大豆机收损失影响因素进行分析。模型如下:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_i X_i + \epsilon_i \quad (5)$$

表1 大豆机收损失与各影响因素间的相关系数

Table 1 The correlation coefficients between soybean mechanical harvest losses and various influencing factors

影响因素 Influencing factors	相关系数 Correlation coefficient	影响因素 Influencing factors	相关系数 Correlation coefficient
驾驶员水平 Driver skill level	0.391***	作业机型 Operating machine type	0.481***
作业日期和时刻 Operating date and time	0.456***	土壤湿度 Soil moisture	−0.07
空气湿度 Humidity of air	−0.058	行走路线 Walking route	−0.072
作业设备调试 Debugging equipment	−0.139**	脱粒参数 Threshing parameters	0.410***
清选参数 Cleaning and sorting parameters	0.062	大豆籽粒含水率 Soybean moisture content	0.421***
前进速度 Speed of advance	0.680***		

注:***、**、*分别表示在0.01、0.05、0.1水平差异显著。表2同。
Note: ***, **, and * indicate significant differences at the 0.01, 0.05, and 0.1 levels, respectively. The same as in Table 2.

式中: Y_i 为第 $i(i=1,2,\cdots,n)$ 个大豆收获环节机收损失; β_0 为常数项; β_i 为模型回归系数; X_i 为影响大豆机收环节损失的影响因素; ϵ_i 为随机扰动项。

2.3.2 模型评估结果分析

将问卷数据采用式(5)进行评估,结果见表2。驾驶员技术水平、作业机型、作业日期和时刻、脱粒参数、大豆籽粒含水率、前进速度等6个自变量通过了显著性检验($P<0.01$)。经营管理情况和

收获作业情况对大豆机收损失影响较大,其中前进速度、作业机型、脱粒系统存在极显著正向影响,收获损失系数分别为0.537、0.329、0.134,驾驶员技术水平、作业时间等对于机收损失存在显著负向影响,收获损失系数分别为0.197、0.169,对机收损失影响显著;土壤湿度、空气湿度、行走路线、作业设备调试、清选系统的机收损失系数较小,影响不显著。

表2 Tobit模型评估结果

Table 2 Evaluation results of the Tobit mode

变量名称 Variable names	系数 Coefficient	标准差 Standard deviation	检验值 Test value
驾驶员技术水平 Driver skill level	−0.197**	0.094	0.038
作业机型 Operating machine type	0.329***	0.096	0.001
作业日期和时刻 Operation date and time	−0.169**	0.074	0.023
土壤湿度 Soil moisture	−0.206	0.208	0.322
空气湿度 Humidity of air	0.147	0.195	0.452
行走路线 Walking route	−0.137	0.151	0.364
作业设备调试 Debugging equipment	−0.084	0.164	0.608
脱粒参数 Threshing parameters	0.134***	0.050	0.008
清选参数 Cleaning and sorting parameters	0.045	0.046	0.330
大豆籽粒含水率 Soybean moisture content	0.145*	0.080	0.073
前进速度 Speed of advance	0.537***	0.051	0.001

2.4 单因素试验结果及分析

控制其他变量保持不变,选取作业机型为迪尔 S760 型联合收获机进行单因素试验,验证作业日期和时刻、前进速度、脱粒参数(滚筒转速和脱粒间隙)对机收损失的影响。

2.4.1 不同作业日期和时刻对损失率的影响

不同作业日期和时刻对损失率有显著影响(图 1),大豆机收损失率与作业日期、作业时刻均符合

二次函数变化规律。损失率随作业日期增加呈先降低后上升的趋势(图 1(a)),主要原因是,机收作业前期大豆籽粒含水率相对较高,导致损失率增大;机收作业后期由于大豆籽粒含水率降低,豆荚受到外力易炸荚损失率相对增加。损失率随着作业时刻的改变呈先上升后下降的趋势(图 1(b)),主要原因是,在 12:00—14:00 时温度上升,大豆籽粒含水率降低导致机收作业中炸荚现象增加,因此损失率相对其他时刻较高。

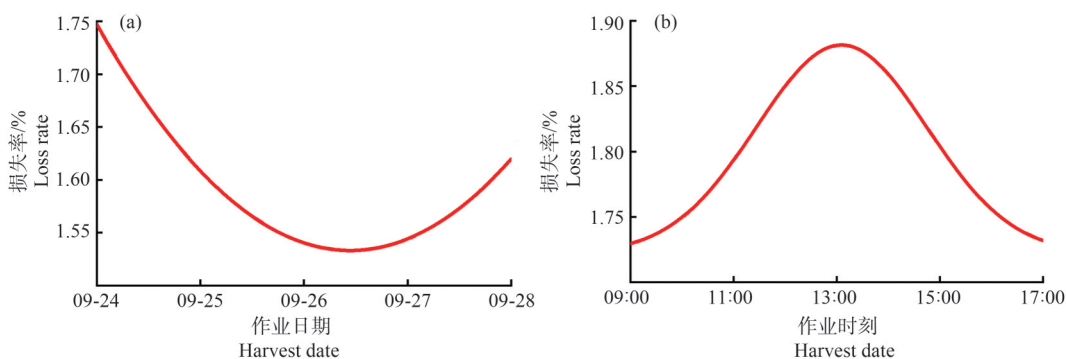


图 1 作业日期(a)和作业时刻(b)对损失率的影响

Fig. 1 Effects of operation date (a) and operation time (b) on loss rate

2.4.2 不同作业参数对机收损失的影响

前进速度、滚筒转速和脱粒间隙对机收损失有显著影响(图 2)。前进速度 ≥ 5 km/h 时损失率和破碎率明显上升(图 2(a)),主要原因是,随着前进速度的增大喂入量增加,脱粒系统工作效率下降机收损失增加。机收损失随着滚筒转速的增大呈先下降后上升的趋势(图 2(b)),滚筒转速为 480 r/min 时损失较少,滚筒转速 ≥ 600 r/min 时损失明显增加,主要

原因是,在滚筒转速较低时脱粒性能相对较差,滚筒转速增大对大豆籽粒有一定损伤,导致损失率和破碎率增加。随着脱粒间隙的增大损失率呈现先降低后上升,破碎率呈逐渐降低的趋势(图 2(c)),主要原因是脱粒间隙较小时,通过脱粒系统的谷物层变薄,脱粒滚筒的挤压揉搓性能增强导致损失率和破碎率增加;随着脱粒间隙的增大使谷物层变厚,脱粒系统工作效率相对降低,导致损失率增大、破碎率降低。

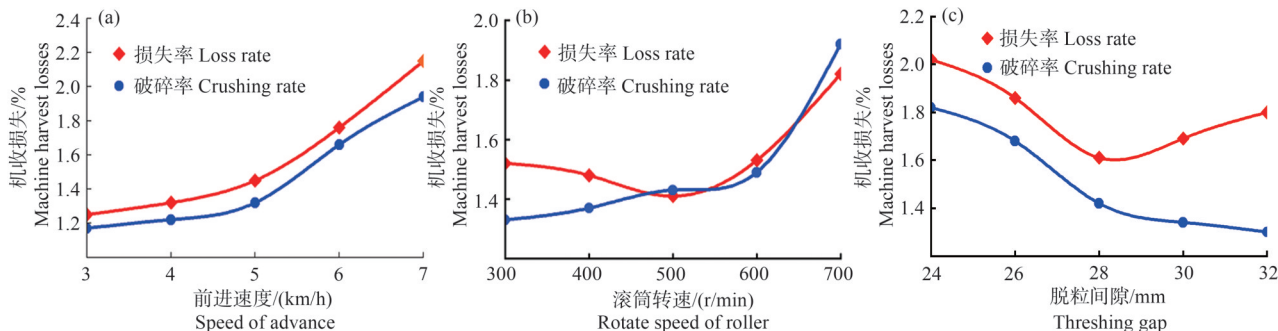


图 2 作业参数对机收损失的影响

Fig. 2 Effect of operating parameters on harvest losses

2.5 多因素试验及结果分析

2.5.1 多因素试验方案及结果

采用三因素三水平的正交试验研究机收参数对损失率和破碎率影响的最佳参数组合。根据前

期理论分析及机收作业要求,选取前进速度为 4~6 km/h、滚筒转速 450~650 r/min、脱粒间隙 25~31 mm,以损失率和破碎率为试验指标评价大豆机收作业质量,试验方案与结果见表 3。

表3 机收作业参数试验方案与结果

Table 3 Experimental plan and results of machine harvesting operation parameters

试验序号 Test number	试验因素 Experimental factors			性能指标 Performance index		试验序号 Test number	试验因素 Experimental factors			性能指标 Performance index	
	$X_1/$ (km/h)	$X_2/$ (r/min)	X_3/mm	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$		$X_1/$ (km/h)	$X_2/$ (r/min)	X_3/mm	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
1	5	450	25	1.48	1.82	10	5	450	31	2.76	1.53
2	4	650	28	1.49	1.41	11	5	550	28	1.59	1.31
3	6	650	28	2.15	2.84	12	4	550	25	1.62	1.54
4	5	550	28	1.45	1.25	13	6	450	28	2.88	1.32
5	5	650	31	1.58	1.59	14	5	550	28	1.42	1.39
6	5	650	25	1.48	2.78	15	5	550	28	1.23	1.29
7	4	550	31	1.84	1.46	16	4	450	28	1.57	1.38
8	5	550	28	1.51	1.32	17	6	550	31	2.83	1.37
9	6	550	25	2.18	2.69						

注： X_1 为前进速度； X_2 为滚筒转速； X_3 为脱粒间隙； Y_1 、 Y_2 分别为损失率和破碎率。表4、表5同。

Note: X_1 represents forward speed. X_2 represents drum speed. X_3 represents threshing gap. Y_1 and Y_2 represent loss rate and breakage rate , respectively. The same as in Table 4 and Table 5.

2.5.2 回归模型建立及显著性检验

对试验结果进行方差分析,结果见表4。

1)损失率回归模型建立与显著性分析。前进速度 X_1 、滚筒转速 X_2 、脱粒间隙 X_3 及 X_2X_3 对损失率 Y_1 影响极显著($P<0.01$)。将不显著的交互作用项的回归平方及自由度并入残差项,得到各因素对总损失率影响的回归方程为:

$$Y_1=19.62-4.05X_1+0.02X_2-1.04X_3-0.001X_2X_3 \tag{6}$$

式中: Y_1 为损失率,%; X_1 为前进速度, km/h; X_2 为滚筒转速, r/min; X_3 为脱粒间隙, mm。

对回归方程进行失拟检验,失拟 $P=0.383$, 不显著($P>0.1$), 证明不存在其他影响评价指标的主要因素。评价指标和试验因素存在显著的二次关系, 分析结果合理。各因素对损失率影响显著

性由大到小依次为前进速度、脱粒间隙、滚筒转速。

2)破碎率回归模型建立与显著性分析。前进速度 X_1 、滚筒转速 X_2 、脱粒间隙 X_3 及 X_1X_2 、 X_1X_3 、 X_2X_3 对破碎率影响极显著($P<0.01$)。将不显著的交互作用项的回归平方及自由度并入残差项,得到各因素对破碎率影响的回归方程为:

$$Y_2=25.9-0.15X_1-0.03X_2-1.2X_3+0.004X_1X_2-0.103X_1X_3-0.001X_2X_3 \tag{7}$$

式中: Y_2 为破碎率, %。

对回归方程进行失拟检验,失拟 $P=0.057$, 不显著($P>0.1$), 证明不存在其他影响评价指标的主要因素。评价指标和试验因素存在显著的二次关系, 分析结果合理。各因素对破碎率影响显著性由大到小依次为脱粒间隙、滚筒转速、前进速度。

表 4 损失率和破碎率回归模型的方差分析结果

Table 4 Analysis of variance results for the regression model of loss rate and breakage rate

方差来源 Source	Y ₁				Y ₂			
	平方和 Square sum	自由度 Degrees of freedom	F	P	平方和 Square sum	自由度 Degrees of freedom	F	P
模型 Model	4.42	9	23.91	0.000 2**	4.71	9	62.69	0.000 1**
X ₁	1.55	1	75.46	0.000 1**	0.74	1	88.46	0.000 1**
X ₂	0.50	1	24.12	0.001 7**	0.83	1	98.95	0.000 1**
X ₃	0.63	1	30.83	0.000 9**	1.04	1	124.26	0.000 1**
X ₁ X ₂	0.11	1	5.15	0.057 6	0.56	1	66.52	0.000 1**
X ₁ X ₃	0.05	1	2.25	0.177 1	0.38	1	46.07	0.000 3**
X ₂ X ₃	0.35	1	16.96	0.004 5**	0.20	1	24.27	0.001 7**
X ₁ ²	0.81	1	39.27	0.000 4*	0.07	1	8.56	0.022 2
X ₂ ²	0.09	1	4.31	0.076 4	0.37	1	43.99	0.000 3**
X ₃ ²	0.24	1	11.82	0.010 9	0.44	1	52.57	0.000 2**
残差 Residual	0.14	7			0.06	7		
失拟项 Lack of fit	0.07	3	1.33	0.383	0.05	3	6.10	0.057
误差 Pure error	0.07	4			0.01	4		
总和 Total	4.56	16			4.77	16		

注：**和 * 分别表示在 0.01、0.05 水平上差异显著。
Note: ** and * indicate significant differences at the 0.01 and 0.05 levels, respectively.

3 参数优化与试验验证

3.1 参数优化

采用多目标变量优化方法,对 2 个回归模型(式(6)和式(7))进行优化求解。遵循损失率和破碎率最低的原则,结合各试验因素的边界条件,构建非线性规划参数模型如下:

$$\begin{cases} \min Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ 4\text{ km/h} \leq X_1 \leq 6\text{ km/h} \\ 450\text{ r/min} \leq X_2 \leq 650\text{ r/min} \\ 25\text{ mm} \leq X_3 \leq 31\text{ mm} \end{cases} \quad (8)$$

通过优化求解,得出当前进速度为 4.5 km/h,滚筒转速 560 r/min,脱粒间隙 28 mm 时,损失率和破碎率最低,在此最优参数组合下对应的损失率为 1.3%,破碎率 1.25%。根据优化结果进行试验验证,损失率为 1.37%,破碎率 1.21%,与优化结果基本一致,误差在可接受范围内。

3.2 田间试验验证

控制其他因素不变,根据三因素三水平正交试

验结果,将迪尔 S760 型联合收获机作业参数调整为前进速度 4.5 km/h,滚筒转速 560 r/min,脱粒间隙 28 mm,以损失率和破碎率为评价指标,各进行 5 次重复试验,取平均值,获得其机收后的损失率和破碎率,并与调整前的损失率和破碎率进行对比(表 5)。调整后的机收损失率、破碎率分别为 1.35%、1.15%,与调整前比,损失率降低了 0.43%,破碎率降低了 0.24%。

表 5 参数调整前后损失率和破碎率对比

Table 5 Comparison of loss rate and crushing rate before and after parameter adjustment %

试验序号 Test number	调整后 After adjustment		调整前 Before adjustment	
	Y ₁	Y ₂	Y ₁	Y ₂
1	1.35	1.04	1.69	1.44
2	1.41	1.11	1.74	1.36
3	1.36	1.14	1.78	1.42
4	1.33	1.19	1.81	1.39
5	1.32	1.25	1.86	1.35
均值 Average	1.35	1.15	1.78	1.39

4 讨论与结论

近年来关于收获损失的研究逐渐增多,相关研究表明:种植品种、农户家庭情况、机械使用年限、驾驶员水平、作业日期等因素对收获损失存在不同程度的影响^[6-8,12]。本研究结合相关性分析和Tobit模型评估发现,机收损失与驾驶员培训和作业时刻相关,还与前进速度、脱粒参数等实际作业参数相关。在机收作业中损失率和破碎率是评定机收作业质量的主要指标。已有研究表明大豆收获损失随收获日期的延长呈抛物线规律变化^[12],最佳收获日期与大豆成熟度相关,但大豆的成熟度、籽粒含水率受日期、时刻和其他环境因素共同影响,本研究结果表明,在12:00—14:00时温度上升,大豆籽粒含水率发生降低,因此需要降低前进速度、增大脱粒间隙以降低损失;随着收获日期延长大豆趋于成熟,在机收作业中后期更需要降低前进速度,减少炸荚现象以此降低割台损失,但在实际作业过程中,驾驶员无法直接获取损失变化信息,因此需要管理人员对田间损失进行测算,并根据损失率和破碎率的变化情况对作业参数进行相应调整。已有研究认为对损失率影响较大的是风机转速^[21],而在本研究中表明,在当前试验条件下,黑龙江省大豆机收损失更多集中在割台损失,在试验中发现清选损失较少。对比试验发现,当前前进速度为4.5 km/h、滚筒转速560 r/min、脱离间隙28 mm时,与调整前相比机收损失明显降低,但考虑到黑龙江地区在收获环节需要抢时抢收,前进速度为4.5 km/h不利于实际收获作业,前进速度可以适当提高,而滚筒转速和脱粒间隙的配合应随着籽粒含水率变化及时调整,在早晚含水率相对较高时降低滚筒转速减小脱粒间隙,提高脱粒效果。

综上所述,收获损失受多种因素共同影响,需要结合当地生产实际情况进行具体分析,机收作业参数优化能明显降低机收损失,但更需要在复杂的作业环境中根据实际情况进行及时调整,如根据大豆籽粒含水率、成熟度、损失情况调整机收作业参数,对驾驶员进行培训,作业机械定期检修等综合措施优化降低收获损失,提高机收环节整体作业效率。

参考文献 References

[1] 郑洪林,付玲,王新刚,陈蔡隼,顾见勋,谭小莉. 推进湖北大豆种业高质量

- 发展的探讨[J]. 中国种业, 2024(3):23-26
- Zheng H L, Fu L, Wang X G, Chen C J, Gu J X, Tan X L. Discussion on promoting high quality development of soybean seed industry in Hubei Province[J]. *China Seed Industry*, 2024(3): 23-26(in Chinese)
- [2] 黑龙江省统计局,国家统计局黑龙江调查总队. 黑龙江统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023: 223-228
- Heilongjiang Provincial Bureau of Statistics, survey organization of Heilongjiang of the National Bureau of Statistics. *Heilongjiang Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2023: 223-228 (in Chinese)
- [3] 高利伟. 中国主要粮食作物供应链损失和浪费特征及其减损潜力研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019
- Gao L W. Characteristics and reduction potentials of losses and waste of major grains of the food supply chain in china, [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019 (in Chinese)
- [4] 刘基,金诚谦,梁苏宁,倪有亮. 大豆机械收获损失的研究现状[J]. 农机化研究, 2017, 39(7): 1-9,15
- Liu J, Jin C Q, Liang S N, Ni Y L. The research of soybean harvested by machine [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2017, 39(7): 1-9,15 (in Chinese)
- [5] 陈伟,张美芝,韩嫣,朱俊峰. 大豆机械收获环节损失调查: 以黑龙江、内蒙古为例[J]. 中国农业文摘:农业工程, 2017, 29(3): 16-20
- Chen W, Zhang M Y, Han Y, Zhu J F. Investigation on the mechanical harvest loss of soybean: a case study of soybean in Heilongjiang and Inner Mongolia [J]. *Agricultural Science and Engineering in China*, 2017, 29(3): 16-20 (in Chinese)
- [6] 徐英豪. 河北省夏玉米机械收获损失影响因素分析: 以辛集市为例[D]. 保定: 河北农业大学, 2019
- Analysis of factors affecting mechanical harvest loss of summer corn in Hebei province: A case study of Xinji city [D]. Baoding: Hebei Agricultural University (in Chinese)
- [7] 陈慧敏,陶佩君. 小麦收获损失主要影响因素的实证研究: 基于河北省小麦主产县的实证研究[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(8): 227-229,233
- Chen H M, Tao P J. An empirical study on the main influencing factors of wheat harvest loss: Based on the analysis of the main wheat producing counties in Hebei Province [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, 48(8): 227-229,233 (in Chinese)
- [8] 吴林海,胡其鹏,朱旋,王建华. 水稻收获损失主要影响因素的实证分析: 基于有序多分类Logistic模型[J]. 中国农村观察, 2015 (6): 22-33,95
- Wu L H, Hu Q P, Zhu D, Wang J H. Empirical analysis of main factors influencing harvest rice losses: Based on the ordered multinomial logistic model [J]. *China Rural Survey*, 2015(6): 22-33,95 (in Chinese)
- [9] 赵胜雪,张铁成,赵方臣,何少斌,孙福,董礼兴. 减少大豆收获损失的对策与措施[J]. 农机化研究, 1995(3): 50-52
- Zhao S X, Zhang T C, Zhao F C, He S B, Sun F, Dong L X. Countermeasures and measures to reduce soybean harvest loss [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 1995,17(3): 50-52 (in Chinese)
- [10] Young R E. Mechanical damage to soybeans during harvesting [D]. Iowa State University, *Master of Science*, 1968. DOI: 10.31274/rtd-180813-7486
- [11] Doddamani S S, Betageri S N. "Influence of stages of harvesting and threshing methods on soybean [Glycine max (L.) Merrill]" [J]. AkiNik Publications, 2021, 10(6):687—696
- [12] 乔金友,孙健,曲烽毓,马力,吴俊江,韩兆桢,陈海涛. 大豆收获适时性损失规律试验研究[J]. 东北农业大学学报, 2017, 48(6):76-81
- Qiao J Y, Sun J, Qu F Y, Ma L, Wu J J, Han Z Z, Chen H T. Study on regularities of timeliness loss changing with soybean harvesting date [J].

- Journal of Northeast Agricultural University*, 2017, 48(6): 76-81 (in Chinese)
- [13] Philbrook B D, Oplinger E S. Soybean field losses as influenced by harvest delays[J]. *Agronomy Journal*, 1989, 81(2): 251-258
- [14] Matthes R K. Parameters for optimal harvesting[J]. *Seed Technology Papers*, 2021, 115
- [15] JB/T 11912—2014. 大豆联合收割机[S]. 北京: 机械工业出版社, 2014
JB/T 11912—2014. Soybean combine harvester [S]. Beijing: China Machine Press, 2014 (in Chinese)
- [16] 王桂民, 易中懿, 陈聪, 曹光乔. 收获时期对稻麦轮作水稻机收损失构成的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 36-42
Wang G M, Yi Z Y, Chen C, Cao G Q. Effect of harvesting date on loss component characteristics of rice mechanical harvested in rice and wheat rotation area [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(2): 36-42 (in Chinese)
- [17] 乔金友, 张晓丹, 王奕娇, 陈海涛. 规模化大豆产区大豆联合收获机综合评价与优选[J]. 东北农业大学学报, 2014, 45(8): 124-128
Qiao J Y, Zhang X D, Wang Y J, Chen H T. Evaluation and selection on soybean combines in large-scale planting area [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2014, 45(8): 124-128 (in Chinese)
- [18] 乔金友, 孙健, 田园园, 王文富, 张玉良, 徐勇, 陈海涛. 北安地区大豆收获适时性损失规律研究[J]. 大豆科学, 2017, 36(5): 803-807
Qiao J Y, Sun J, Tian Y Y, Wang W F, Zhang Y L, Xu Y, Chen H T. Experiments on the regularities of timeliness loss changing with soybean harvesting date in Beian [J]. *Soybean Science*, 2017, 36(5): 803-807 (in Chinese)
- [19] 王金武. 三江平原地区水稻收获期适时性损失的研究[J]. 农业机械学报, 2004, 35(2): 175-177
Wang J W. Study on the timely loss of rice harvest in Sanjiang Plain [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2004, 35(2): 175-177 (in Chinese)
- [20] 李长占, 祁广云, 黄操军. 基于称重法的收割机谷物测产方法的研究[J]. 农机化研究, 2014, 36(3): 42-45
Li C Z, Qi G Y, Huang C J. Research on the measuring method of the harvester grain yield based on weighing [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2014, 36(3): 42-45 (in Chinese)
- [21] 金诚谦, 郭飞扬, 徐金山, 李庆伦, 陈满, 李景景, 印祥. 大豆联合收获机作业参数优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13): 10-22
Jin C Q, Guo F Y, Xu J S, Li Q L, Chen M, Li J J, Yin X. Optimization of working parameters of soybean combine harvester [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(13): 10-22 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 徐元宇, 黑龙江八一农垦大学工程学院在读硕士研究生。专业方向为农业工程与信息技术。在硕士期间注重提升自我, 广泛阅读高水平文章, 在《西北农林科技大学学报》以第二作者发表文章 1 篇, 获黑龙江八一农垦大学一等学业奖学金, 在 Triz 杯大学生创新方法大赛获奖。



通讯作者简介: 陶桂香, 黑龙江八一农垦大学工程学院教授, 博士研究生导师, 主要从事农业机械化收获装备研究。黑龙江省农机岗位体系专家, 先后主持省部级以上课题 4 项, 获黑龙江省科技进步二等奖 2 项, 发表论文 100 余篇, 检索 10 余篇, 获发明专利 3 项, 出版专著 2 部。现担任黑龙江省力学学会理事、黑龙江省农业工程学会理事、《农业机械》学报编委、《农机使用与维修》审稿专家等职务。