

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2025.06.003

李海, 曹晓庆, 宋学锋, 等. 基于Box—Behnken设计的韭菜收割机工作参数优化与田间性能验证[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(6): 13—19

Li Hai, Cao Xiaoqing, Song Xuefeng, et al. Optimization of working parameters and field performance verification of leek harvester based on Box—Behnken design [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(6): 13—19

基于 Box—Behnken 设计的韭菜收割机工作参数 优化与田间性能验证 *

李海¹, 曹晓庆², 宋学锋², 张仕林², 张武², 张锋伟²

(1. 甘肃交通职业技术学院汽车学院, 兰州市, 730207; 2. 甘肃农业大学机电工程学院, 兰州市, 730070)

摘要:针对韭菜机械化收获过程中存在的植株损伤率高、漏割损失大等关键问题,以手扶式韭菜收割机为作业机具,以韭菜为作业对象,基于作物—机械互作机理开展收获参数优化研究。采用 Box—Behnken 试验设计构建三因素三水平正交试验方案,系统分析前进速度(0.40~0.60 m/s)、割刀转速(1 800~2 200 r/min)和输送速度(0.48~0.72 m/s)对损失率与损伤率的影响规律。通过二次回归正交试验建立多因素交互作用的数学模型,并利用响应面分析法优化参数组合。验证试验表明,最佳参数组合:前进速度为 0.50 m/s、割刀转速为 2 000 r/min、输送速度为 0.60 m/s,此时损失率与损伤率分别为 4.71%、2.26%,研究揭示关键参数交互作用对收获性能的影响机制,可为韭菜收割装备的智能化控制系统开发提供理论支撑。研究结果可为韭菜收割机械的结构改进与参数优化提供理论依据,提出参数优化方法对叶菜类作物收获机械的农艺适配性提升具有普适性参考价值,有助于推动设施蔬菜生产全程机械化发展。对提升蔬菜收获装备的农艺适应性具有实际意义。

关键词:韭菜收割机;工作参数优化;损失率;损伤率;响应面分析

中图分类号:S233.4 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-5553 (2025) 06-0013-07

Optimization of working parameters and field performance verification of leek harvester based on Box—Behnken design

Li Hai¹, Cao Xiaoqing², Song Xuefeng², Zhang Shilin², Zhang Wu², Zhang Fengwei²

(1. Gansu Vocational College of Communications, College of Automotive, Lanzhou, 730207, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, 730070, China)

Abstract: In view of the key problems such as high plant damage rate and large loss of missed cutting in the mechanized harvesting process of Chinese chives, this study took the walking Chinese chives harvester as the working tool and Chinese chives as the working object, and carried out the optimization research on harvesting parameters based on the crop-machinery interaction mechanism. Box—Behnken experimental design was used to construct a three-factor and three-level orthogonal experimental scheme, and the effects of forward speed (0.40—0.60 m/s), cutter speed (1 800—2 200 r/min) and conveying speed (0.48—0.72 m/s) on loss rate and damage rate were systematically analyzed. The mathematical model of multi-factor interaction was established by quadratic regression orthogonal test, and the parameter combination was optimized by response surface analysis. The verification test shows that the optimal parameter combination is the forward speed of 0.50 m/s, the cutter speed of 2 000 r/min and the conveying speed of 0.60 m/s. At this time, the loss rate and damage rate are 4.71% and 2.26% respectively. The study reveals the influence mechanism of the interaction of key parameters on the harvesting performance, which can provide theoretical support for the development of intelligent control system for leek harvesting equipment. The research results can provide theoretical basis for the structural improvement and parameter optimization of leek harvesting machinery. The parameter optimization method proposed in this study has universal reference value for improving the agronomic adaptability of leafy vegetable

收稿日期:2025年2月24日 修回日期:2025年3月14日

* 基金项目:国家自然科学基金项目(32260432);甘肃省科技重大专项(21ZD4NA012)

第一作者:李海,男,1981年生,甘肃定西人,硕士,副教授;研究方向为机械工程。E-mail: 273921575@qq.com

通讯作者:张锋伟,男,1966年生,甘肃渭源人,博士,教授;研究方向为工程力学及农业机械与装备。E-mail: zhangfw@gsau.edu.cn

harvesting machinery and is helpful to promote the whole mechanization development of protected vegetable production. It is of practical significance to improve the agronomic adaptability of vegetable harvesting equipment.

Keywords: leek harvester; working parameter optimization; loss rate; damage rate; response surface analysis

0 引言

蔬菜作为仅次于粮食的重要农产品,是我国居民膳食营养的核心来源之一。2023 年,全国蔬菜种植面积达 $2.24 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 全国蔬菜产量达 $7.91 \times 10^8 \text{ t}$ 。其中韭菜因抗寒、耐热、抗虫病等特性,种植范围广,是我国地域分布最广的绿叶蔬菜之一^[1, 2]。韭菜富含多种营养物质,具有抗氧化、抗炎、抗衰老等多种保健功效,是人类饮食中优良的维生素来源,富含维生素 C^[3]、膳食纤维^[4]及硫化物^[5]等活性成分,兼具抗氧化与促消化功能^[6]。但其收割环节面临严峻挑战:植株脆嫩(茎秆抗拉强度仅 6.32~18.56 N)、高含水率(89.83%),机械化收割易导致损伤率升高($>15\%$),严重制约生产效益^[7]。当前我国韭菜收割仍以人工为主,劳动强度大、效率低,难以匹配规模化种植需求,亟待通过机械化技术突破产业瓶颈。

近年来,随着国家政策对农业机械的大力支持和蔬菜种植面积的不断扩大,韭菜收割机的研发和应用显得尤为重要。机械化收获不仅可以显著提高作业效率,减少人力成本和劳动强度^[8],还能提升整体农业生产水平。然而,由于韭菜特殊的形态和脆弱的特性,在收获过程中极易损伤,这对机械化收获提出了更高的要求。因此,如何通过优化设计和技术创新,实现高效、低损的韭菜机械化收获,成为当前研究的重点。

国外在绿叶类蔬菜收获机械领域的研究已经取得了显著进展。许多国家的农业机械企业和科研机构致力于研发智能化、自动化和多功能化的收获设备,这些设备通常配备先进的传感器、图像识别系统和自动控制技术,能够实现自动导航、自动识别和自动收割等功能。这些设备具有较强的功能性和适用性,提高了整机的生产效率和质量。例如,欧美国家的大型蔬菜收获装备以高效率、大规模收割为特点;日本、韩国等更注重精细化和灵活性,适用于不同规模的农场^[9, 10];丹麦的 STM-100PU 型悬挂式韭菜收割机,整机功率大、效率高、适应性强^[11]。这些多元化的发展方向为国内绿叶类蔬菜收获机械的研究提供宝贵的借鉴经验和参考。

相比之下,国内关于绿叶菜收割机械的研究相对滞后^[12],但随着绿叶类蔬菜市场以及种植面积的不断扩大,对于绿叶菜收获机械化的需求也不断增加,越来越多的企业和科研机构开始关注并投入到绿叶类蔬菜的机械化收割设备的研发中,例如直流电动韭菜收割

机^[13]、4G-200 型韭菜收割机^[14]、4GCY-1200 型手扶式叶菜收获机^[15]、璟田 JT-200 型韭菜收割机、璟田 JT-200 型基础上优化设计新型韭菜收割机等。尽管目前已经有一些针对本土化的韭菜收割机械被开发出来,但整体研究水平仍有待提高。现有的问题主要包括:(1)种植农艺粗放、生产不规范;(2)大棚及小地块机械化收获灵活性低;(3)机械化收获损伤率高、机具难以推广。这些问题严重制约韭菜机械化收获的发展。

为解决上述问题,本文提出基于 Box-Behnken 设计与响应面分析的韭菜收割机多参数优化及田间验证的研究思路。通过科学试验设计和数据分析,旨在找到最优的收割机参数组合,以提高收割效率、降低损伤率,并最终实现韭菜机械化收获的技术突破。

1 试验与方法

1.1 试验条件

试验地点位于甘肃省定西市陇西县河那坡村温室大棚,韭菜品种为本地细叶韭菜。试验棚室温度为 $10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。试验韭菜生长状况较好,倒伏角小于 10° ,对大棚韭菜种植区进行检查,地面平坦、无障碍物,并将地垄两端的韭菜植株人工割掉 2 m,以便机器的下放收割及田间掉头,降低试验时对韭菜的损坏。试验时,详细记录试验过程中各条件下的试验数据,韭菜收割机作业现场情况如图 1 所示。



图 1 韭菜收割机田间试验

Fig. 1 Field experiment of leek harvester

依据 NY/T 3664—2020《手扶式茎叶类蔬菜收获机质量评价技术规范》^[16],选取损失率和损伤率作为试验评价指标,以评估手扶式茎叶类蔬菜收获机在工作过程中对作业对象的损失情况和损伤程度,从而判断机器的收获效果和性能质量。

1) 韭菜的损失率。损失率是衡量韭菜在收获过程中损失程度的重要指标,包括未能实现有序铺放及收割时遗漏的韭菜植株。在试验测试区内,通过收集并称量散落于地面的韭菜或遗漏收割的韭菜质量,与该测试区内总收割韭菜质量进行对比,可得出损失率 S_L 计算如式(1)所示。

$$S_L = \frac{G_L}{G} \times 100\% \quad (1)$$

式中： G_L ——田间试验过程中撒落在测试区地面和地面上漏收割的韭菜的质量，kg；

G ——田间试验过程中收获的韭菜总质量，kg。

2) 韭菜的损伤率。损伤率是评估韭菜在收获过程中受损程度的重要参数，主要包括收割过程中因机械作用导致的压伤、拉伤、切伤及挤压损坏等情况。完成收割后，需从收获的韭菜中挑选出茎叶明显受损的植株并进行称重，将其与同一测试区内收割的韭菜总质量进行比较，损伤率 S_s 计算如式(2)所示。

$$S_s = \frac{G_s}{G} \times 100\% \quad (2)$$

式中： G_s ——田间试验过程中韭菜被损伤的质量，kg。

1.2 试验设计

1.2.1 单因素试验设计

在分析韭菜收割机工作性能时，综合考虑韭菜植株的物理特性以及收获工作环境、工作要求和作业对象等因素，通过对各潜在因素的系统调研与分析，确定机器前进速度、割刀转速和输送速度为对本次试验结果影响较为显著的关键因素^[17]。深入探究这些因素对收割机工作性能的影响规律，对于优化设备参数、提升作业效率及收割品质具有重要意义。具体而言，机器前进速度 A 、割刀转速 B 和输送速度 C 是影响韭菜收割机工作效率和收割品质的 3 个核心要素。为全面评估这些因素的单独影响，设计单因素试验，通过对比不同水平下各因素对评价指标的影响程度，为韭菜收割机工作参数的进一步优化提供科学依据。

1) 机器前进速度对评价指标的影响。通过单因素试验来研究机器前进速度对评价指标的影响时，选取 0.20 m/s、0.30 m/s、0.40 m/s、0.50 m/s、0.60 m/s 五个水平作为机器前进速度的试验参数。在试验过程中，保持割刀转速为 2 000 r/min、输送速度为 0.60 m/s 不变。

2) 割刀转速对评价指标的影响。通过单因素试验来研究割刀转速对评价指标的影响时，选取 1 500 r/min、1 700 r/min、1 900 r/min、2 100 r/min、2 300 r/min 五个水平作为割刀转速的试验参数。在试验过程中，保持机器前进速度为 0.50 m/s、输送速度为 0.60 m/s 不变。

3) 输送速度对评价指标的影响。通过单因素试验来研究输送速度对评价指标的影响时，选取 0.30 m/s、0.40 m/s、0.50 m/s、0.60 m/s、0.70 m/s 五个水平作为输送速度的试验参数。在试验过程中，保持机器前进速度为 0.50 m/s、割刀转速为 2 000 r/min 不变。

1.2.2 二次回归正交试验设计

采用正交试验设计，能够高效地探究各因素对损失率和损伤率的作用，同时降低试验频次，提升试验效率。借助试验数据进行回归分析，可构建模型以预测损失率、损伤率与各因素间的关系，进而优化收割机工作参数，提高收割效率与作物品质。为全面了解各因素对损失率和损伤率的影响，设计三因素三水平二次回归正交试验，试验因素水平编码如表 1 所示。每组试验重复 3 次，结果取平均值。使用 Design—Expert 8.0 软件构建回归模型，进行方差分析与响应面优化。

表 1 韭菜收割试验因素水平编码表

Tab. 1 Horizontal coding table of leek harvest test factors

编码值	因素		
	前进速度 A /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	割刀转速 B /($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	输送速度 C /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
−1	0.40	1 800	0.48
0	0.50	2 000	0.60
1	0.60	2 200	0.72

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果分析

1) 机器前进速度对评价指标的影响。通过分析试验数据，可以得出前进速度对损失率和损伤率的变化趋势如图 2 所示。随着韭菜收割机前进速度的增加，损失率基本呈缓慢下降的趋势，但在前进速度为 0.60 m/s 时却略有上升；损伤率随机器前进速度的增加呈现缓慢上升的趋势。

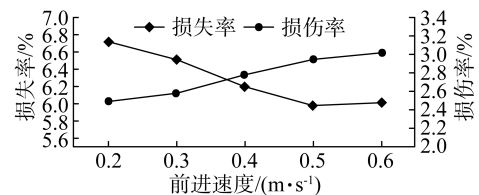


图 2 前进速度对损失率和损伤率的影响

Fig. 2 Influence of forward speed on loss rate and damage rate

2) 割刀转速对评价指标的影响。通过分析试验数据，可以得出割刀转速对损失率和损伤率的变化趋势如图 3 所示。

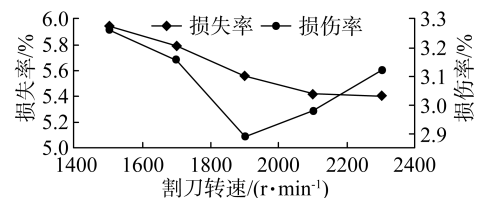


图 3 割刀转速对损失率和损伤率的影响

Fig. 3 Influence of cutter speed on loss rate and damage rate

由图 3 可知，随着割刀转速的增加，损失率总体上呈现下降的趋势，损伤率却出现先下降又上升的趋势。

势。通过分析损失率以及损伤率的变化情况可以得到,当割刀转速在 1 900 r/min 时,该状态下的损失率为 5.56%,损伤率为 2.89%。

3) 输送速度对评价指标的影响。通过分析试验数据,可以得出输送速度对损失率和损伤率的变化趋势如图 4 所示。随着输送速度的增加,损失率总体上呈现上升的趋势,损伤率却出现先下降又回升的趋势。通过分析损失率以及损伤率的变化情况可以得到,当输送速度在 0.50 m/s 时,该状态下的损失率为 6.27%,损伤率为 2.98%。

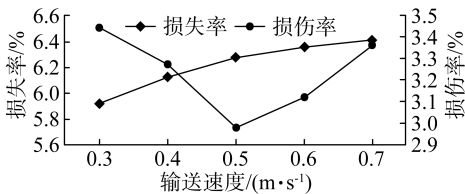


图 4 输送速度对损失率和损伤率的影响
Fig. 4 Influence of conveying speed on loss rate and damage rate

2.2 二次回归正交试验结果分析

以机器前进速度、割刀转速和输送速度为试验因素,以损失率和损伤率为评价指标,利用 Design—Expert 软件设计三元二次回归正交试验,通过分析试验结果,基于最小二乘法建立数学模型,得到回归方程的表达式,以预测不同试验因素对损失率和损伤率的影响程度,从而为优化收割机的作业参数提供理论依据,试验结果如表 2 所示。其中, *a*、*b*、*c* 为各因素编码值。

表 2 韭菜收割试验结果 Tab. 2 Test results of leek harvest					
试验序号	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	损失率/%	损伤率/%
1	−1	−1	0	5.57	2.48
2	1	−1	0	5.64	2.51
3	−1	1	0	5.61	2.62
4	1	1	0	5.68	2.66
5	−1	0	−1	5.62	2.58
6	1	0	−1	5.70	2.64
7	−1	0	1	5.73	2.68
8	1	0	1	5.82	2.74
9	0	−1	−1	5.64	2.47
10	0	1	−1	5.69	2.61
11	0	−1	1	5.75	2.57
12	0	1	1	5.77	2.71
13	0	0	0	5.52	2.53
14	0	0	0	5.55	2.50
15	0	0	0	5.56	2.52
16	0	0	0	5.53	2.50
17	0	0	0	5.54	2.49

2.3 回归模型的建立与响应面分析

使用 Design—Expert 软件进行回归分析,剔除回归方程中的不显著项,得到损失率(*Y*₁)和损伤率(*Y*₂)与前进速度(*A*)、割刀转速(*B*)、输送速度(*C*)之间的回归数学模型,并通过试验数据分析并生成响应曲面,直观反映出不同因素水平下损失率 *Y*₁和损伤率 *Y*₂的变化趋势,以及各因素之间的交互作用。

损失率回归方程如式(3)所示。

$$Y_1 = 13.333 - 4.112A - 3.906 \times 10^{-3}B - 10.604C + 4.5A^2 + 0.01B^2 + 9.201C^2 \quad (3)$$

回归方程的方差分析如表 3 所示。从表 3 方差分析可以得到,模型的 *P* 值小于 0.000 1,这意味着模型的显著性水平高,该回归方程有意义。模型的决定系数 *R*²=0.990 1,该回归方程拟合精度较高,试验误差比较小,可用于损失率的预测。失拟项的 *P*=0.741 0>0.05,说明损失率的模型没有失拟,回归方程模型整体上是正确的,并且可以用来可靠地评价韭菜收割机在实际作业中的性能效果。模型中前进速度(*A*)、割刀转速(*B*)、输送速度(*C*)以及二次项(*A*²、*B*²、*C*²)对损失率的影响均达到极显著水平,这说明这些参数对于预测损失率至关重要,其他各项对损失率的影响不明显,可以得出各因素对损失率 *Y*₁的影响主次顺序为输送速度、前进速度、割刀转速。

表 3 损失率模型的方差分析 Tab. 3 Variance analysis of loss rate model					
方差来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值
模型	0.130	9	0.015	78.06	<0.000 1
<i>A</i>	0.012	1	0.012	63.46	<0.000 1
<i>B</i>	2.813×10 ^{−3}	1	2.813×10 ^{−3}	14.86	0.006 3
<i>C</i>	0.022	1	0.022	116.49	<0.000 1
<i>AB</i>	0.000	1	0.000	0.00	1
<i>AC</i>	2.5×10 ^{−5}	1	2.5×10 ^{−5}	0.13	0.727 0
<i>BC</i>	2.25×10 ^{−4}	1	2.25×10 ^{−4}	1.19	0.311 7
<i>A</i> ²	8.526×10 ^{−3}	1	8.526×10 ^{−3}	45.04	0.000 3
<i>B</i> ²	6.737×10 ^{−3}	1	6.737×10 ^{−3}	35.59	0.000 6
<i>C</i> ²	0.074	1	0.074	390.53	<0.000 1
残差	1.325×10 ^{−3}	7	1.893×10 ^{−4}		
失拟项	3.25×10 ^{−4}	3	1.083×10 ^{−4}	0.43	0.741 0
误差	1.0×10 ^{−3}	4	2.5×10 ^{−4}		
总和	0.130	16			

注:*P*<0.01 为极显著水平,*P*<0.05 为显著水平。下同。

前进速度与割刀转速在输送带速度为 0 水平时,对损失率的影响情况如图 5(a)所示。在相同的前进速度下,随着割刀转速的增加,损失率呈先缓慢下降后上升

的趋势,可能是因为割刀转速增加使得割刀更快速地切割韭菜,减少对韭菜的拉扯,从而降低损失率;当割刀转速继续增加时,过高的转速导致韭菜被切割得过快或者因机械振动导致更多的韭菜掉落,损失率开始上升。在相同的割刀转速下,随着前进速度的增加,损失率也缓慢上升,可能是因为较快的前进速度导致收割机与地面的接触时间减少,从而减少对韭菜的收集效率。

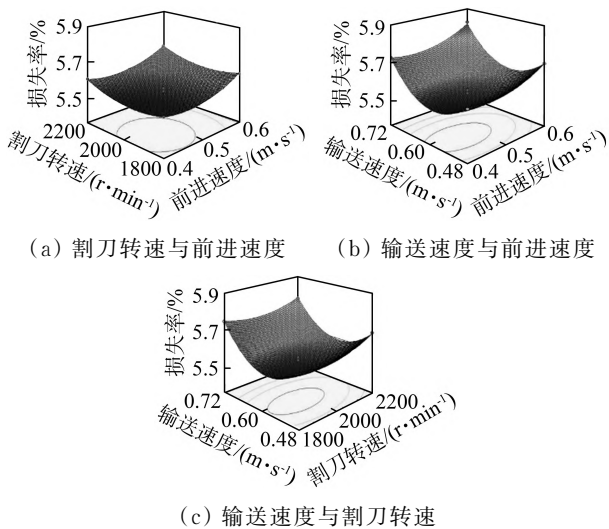


图 5 交互因素对损失率的影响

Fig. 5 Influence of interactive factors on loss rate

前进速度与输送速度在割刀转速为 0 水平时,对损失率的影响情况如图 5(b)所示,当前进速度保持不变时,随着输送速度的增加,损失率呈先下降后缓慢上升的趋势,可能是因为输送速度的增加有助于更快地将切割好的韭菜移出割刀区域,减少韭菜的损失;当输送速度过高时,过快的输送速度导致韭菜在输送过程中脱落或因为机械振动而增加了损失率。当输送速度保持不变时,随着前进速度的增加,损失率呈缓慢上升趋势,这与图 5(a)中的分析相似。

割刀转速与输送速度在前进速度为 0 水平时,对损失率的影响情况如图 5(c)所示。当割刀转速保持恒定时,随着输送速度的增加,损失率呈先下降后上升的趋势,这与图 5(b)中的分析相似。当输送速度保持恒定时,随着割刀转速的增加,损失率呈缓慢下降的趋势,是因为割刀转速的增加提高切割效率,从而减少损失率。

损伤率回归方程如式(4)所示。

$$Y_2=4.702-6.238A+0.088B-6.854C+6.475A^2-1.312\times10^{-3}B^2+6.059C^2 \quad (4)$$

回归方程的方差分析如表 4 所示。从表 4 方差分析可以得到,模型的 P 值小于 0.000 1,这意味着模型的显著性水平高,该回归方程有意义。模型的决定系数 $R^2=0.988\ 2$,该回归方程拟合精度较高,试验误差比较小,可用于损伤率的预测。失拟项的 $P=$

0.760 5>0.05,说明损伤率的模型没有失拟,回归方程模型整体上是正确的,并且可以用来可靠地评价韭菜收割机在实际作业中的性能效果。模型中前进速度(A)、割刀转速(B)、输送速度(C)以及前进速度的二次项(A^2)、输送速度的二次方项(C^2)对损伤率的影响都达到极显著水平,这意味着这些参数对于预测损伤率非常重要,其他各项对损伤率的影响不明显,可以得出各因素对损失率 Y_2 的影响主次顺序为输送速度、前进速度、割刀转速。

表 4 损伤率模型的方差分析
Tab. 4 Analysis of variance of damage rate model

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	0.120	9	0.013	65.07	<0.000 1
A	0.012	1	0.012	22.48	0.002 1
B	0.041	1	0.041	202.34	<0.000 1
C	0.020	1	0.020	99.64	<0.000 1
AB	2.5×10^{-5}	1	2.5×10^{-5}	0.12	0.734 5
AC	0.000	1	0.000	0.00	1
BC	0.000	1	0.000	0.00	1
A^2	0.018	1	0.018	87.95	<0.000 1
B^2	1.161×10^{-4}	1	1.161×10^{-4}	0.85	0.471 8
C^2	0.032	1	0.032	159.69	<0.000 1
残差	1.405×10^{-3}	7	2.007×10^{-4}		
失拟项	3.25×10^{-4}	3	1.083×10^{-4}	0.40	0.760 5
误差	1.0×10^{-3}	4	2.5×10^{-4}		
总和	0.120	16			

前进速度与割刀转速在输送带速度为 0 水平时,对损伤率的影响情况如图 6(a)所示。当前进速度保持不变时,随着割刀转速的增加,损伤率呈缓慢上升的趋势,可能是因为割刀转速增加导致韭菜被割得过碎或因为机械振动导致韭菜损伤率增加。在相同的割刀转速下,随着前进速度的增加,损伤率呈先下降后缓慢上升的趋势,可能是由于前进速度适当增加有助于提高收割效率,减少对韭菜的损伤;然后过快的前进速度导致收割机与地面接触时间减少,从而减少对韭菜的收集效率,增加损伤率,所以损伤率开始缓慢上升。

前进速度与输送速度在割刀转速为 0 水平时,对损伤率的影响情况如图 6(b)所示。当前进速度保持不变时,随着输送速度的增加,损伤率呈先下降后上升的趋势,可能是因为合理的输送速度有助于更快地将切割好的韭菜移出割刀区域,减少二次损伤,然后输送速度过快时导致韭菜在输送过程中受到更多的冲击和摩擦,从而增加损伤率。当输送速度保持不变时,随着前进速度的增加,损伤率呈先下降后上升状态,这与

图 6(a)中的分析相似。

割刀转速与输送速度在前进速度为 0 水平时,对损伤率的影响情况如图 6(c)所示。当割刀转速保持恒定时,随着输送速度的增加,损伤率呈先下降后上升的趋势,这与图 6(b)中的分析相似。当输送速度保持恒定时,随着割刀转速的增加,损伤率呈逐渐上升的趋势,可能是因为割刀转速的增加导致韭菜被割得过快或机械振动导致韭菜损伤率增加。

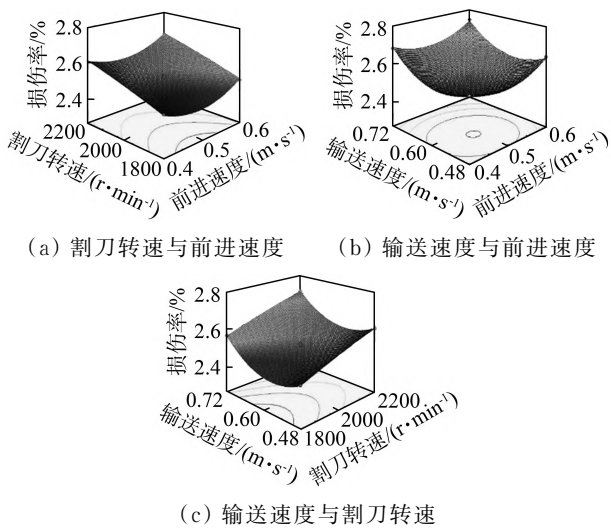


图 6 交互因素对损伤率的影响

Fig. 6 Influence of interaction factors on damage rate

2.4 最佳参数优化

通过 Box—Behnken 试验设计发现,韭菜的机械收获作业效果受到多个因素的影响,为获得满足评价指标的最优工作参数组合,利用 Design—Expert 软件对试验数据进行优化处理,求解找出 3 个因素的最佳参数组合,机组工作参数优化后,有效降低韭菜收割过程的损失率和损伤率,提高整机的工作性能。由于各因素对指标都有显著影响,因此需要进行全局多目标优化以平衡这些影响因素,并找到最佳的约束条件,如式(5)所示。

$$\begin{cases} \min Y_1=f_1(A,B,C) \\ \min Y_2=f_2(A,B,C) \\ 0.40\text{ m/s}\leq A\leq 0.60\text{ m/s} \\ 1\,800\text{ r/min}\leq B\leq 2\,200\text{ r/min} \\ 0.48\text{ m/s}\leq C\leq 0.72\text{ m/s} \end{cases} \quad (5)$$

利用 Design—Expert 软件中的 Optimization 模块对试验结果进行优化分析,在 Numerical 中分别设定损失率、损伤率为最小值约束,经过分析求解,得出机具前进速度为 0.50 m/s、割刀转速为 2 000 r/min、输送速度为 0.60 m/s 时,韭菜收割机有最优的工作效率,此时,损失率和损伤率分别为 4.83%、2.42%。

2.5 验证试验

为验证模型的准确性和可靠性,对优化因子进行田

间试验,对比实际的收割效果与模型预测的效果。选定前进速度为 0.50 m/s、割刀转速为 2 000 r/min、输送速度为 0.60 m/s 进行 3 次重复试验,试验的结果如表 5 所示。3 次重复试验得到韭菜损失率和损伤率的平均值分别为 4.71%、2.26%,并与二次回归正交试验结果进行比较,最终确定机器前进速度为 0.50 m/s、割刀转速为 2 000 r/min、输送速度为 0.60 m/s 是较优的组合参数,收获性能较好,满足韭菜收获农艺要求。

表 5 验证试验结果分析表

Tab. 5 Analysis table of verification test results

序号	损失率	损伤率
1	4.98	2.38
2	4.53	2.26
3	4.62	2.14
平均值	4.71	2.26

3 结论

- 1) 韭菜收割机最佳工作参数:前进速度为 0.50 m/s、割刀转速为 2 000 r/min、输送速度为 0.60 m/s,可显著降低损失率(4.71%)与损伤率(2.26%)。Box—Behnken 试验结合响应面分析能有效解决多参数优化问题,为蔬菜收获机械的智能化设计提供方法论支持。
- 2) 未来研究需拓展至多品种蔬菜及复杂田间环境,进一步提升收割机的通用性与适应性。
- 3) “低速切割+中速输送”模式平衡效率与质量,适用于高含水率蔬菜收割场景。但试验仅针对温室内韭菜,未涵盖露天种植的复杂环境(如风力、土壤湿度差异)。未考虑刀具材质与振动对损伤率的影响,需进一步研究。

参 考 文 献

[1] 任艳娜,席磊,马新明. 基于 SQL Server 的无公害蔬菜病虫害查询系统[J]. 山西财经大学学报, 2010, 32(S2): 331—332.

[2] 王铁新,李汝莘. 韭菜力学特性及收获割台的研究[A]. 中国农业机械学会. 2012 中国农业机械学会国际学术年会论文集[C]. 山东农业大学机械与电子工程学院, 2012: 284—288.

[3] Anisimova O K, Seredin T M, Shchennikova A V, et al. Estimation of the vitamin C content and GDP-L-galactose phosphorylase gene (VTC2) expression level in leek (*Allium porrum* L.) cultivars [J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2021, 68: 85—93.

[4] 周新原,陶杰杰,刘明池,等. 不同栽培模式对韭菜采后贮藏品质及风味影响[J]. 食品科学, 2025, 46(2): 204—213.

[5] Praticò G, Gao Q, Manach C, et al. Biomarkers of food

- intake for Allium vegetables [J]. *Genes & Nutrition*, 2018, 13(1): 1—12.
- [6] Baiano A, Viggiani I, Terracone C, et al. Physical and sensory properties of bread enriched with phenolic aqueous extracts from vegetable wastes [J]. *Czech Journal of Food Sciences*, 2015, 33(3): 247—253.
- [7] 冯雨龙. 韭菜收割机关键部件设计及试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
- [8] 邹亮亮, 刘雪美, 苑进, 等. 叶菜机械化收获技术与装备研究进展[J]. *中国农机化学报*, 2022, 43(6): 15—23.
- Zou Liangliang, Liu Xuemei, Yuan Jin, et al. Research progress in mechanized harvesting technology and equipment of leafy vegetables [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2022, 43(6): 15—23.
- [9] Zuo Z, Wu S, Qi X, et al. Performance enhancement of leaf vegetable waste in two stage anaerobic systems under high organic loading rate: Role of recirculation and hydraulic retention time [J]. *Applied Energy*, 2015, 147(6): 279—286.
- [10] 糜南宏, 赵映, 秦广明, 等. 蔬菜全程机械化研究现状与对策[J]. *中国农机化学报*, 2014, 35(3): 66—69.
- Mi Nanhong, Zhao Ying, Qin Guangming, et al. Vegetables full-mechanization research present situation and the countermeasures [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2014, 35(3): 66—69.
- [11] Leach T E, Degroot P. Apparatus and method for harvesting and processing celery [P]. US Patent: 7966796, 2011—06—28.
- [12] 肖体琼, 何春霞, 曹光乔, 等. 机械化生产视角下我国蔬菜产业发展现状及国外模式研究[J]. *农业现代化研究*, 2015(5): 857—861.
- [13] 赵晋冀. 直流电动韭菜收割机研制[J]. *农业机械*, 2021(6): 88—89, 96.
- [14] Nang V N, Yamane S. Development of prototype harvester for head lettuce [J]. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2015, 8(1): 18—25.
- [15] 肖宏儒, 金月, 宋志禹, 等. 茎叶类蔬菜生产技术装备应用与发展趋势分析[J]. *中国蔬菜*, 2018(6): 17—21.
- [16] NY/T 3664—2020, 手扶式茎叶类蔬菜收获机质量评价技术规范[S].
- [17] 刘娜, 张健飞, 金海榕, 等. 蒙古韭收割机设计与试验[J]. *中国农机化学报*, 2023, 44(7): 33—39.
- Liu Na, Zhang Jianfei, Jin Hairong, et al. Design and experiment on Allium mongolicum Regel harvester [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2023, 44(7): 33—39.
- (上接第12页)
- [20] Yang Y M, Liu X J, Li W Q, et al. Effect of different mulch materials on winter wheat production in desalinized soil in Heilonggang region of North China [J]. *Journal of Zhejiang University Science (Life Science)*, 2006, 7(11): 858—867.
- [21] 耿爱民, 武利峰, 刘渤, 等. 一种小麦高低畦种植方法[P]. 中国专利: CN104718937B, 2017—06—20.
- [22] 王金武, 唐汉, 王金峰, 等. 1DSZ—350型悬挂式水田单侧旋耕镇压修筑埂机的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(1): 25—37.
- Wang Jinwu, Tang Han, Wang Jinfeng, et al. Design and experiment on 1DSZ—350 type hanging unilateral rotary tillage compacting ridger for paddy field [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(1): 25—37.
- [23] 杨文武, 罗锡文, 王在满, 等. 轮式拖拉机水田轮辙覆土装置设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(16): 26—31.
- Yang Wenwu, Luo Xiwen, Wang Zaiman, et al. Design and experiments of track filling assembly mounted on wheeled-tractor for paddy field [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(16): 26—31.
- [24] 胡建平, 郑昌华, 贾兆仪, 等. 螺旋输送机、斗式提升机和振动输送机[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [25] 田辛亮, 赵岩, 陈学庚, 等. 4JSM—2000A型棉秆粉碎及搂膜联合作业机的研制[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(10): 25—35.
- Tian Xinliang, Zhao Yan, Chen Xuegeng, et al. Development of 4JSM—2000A type combined operation machine for cotton stalk chopping and residual plastic film collecting [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(10): 25—35.
- [26] 刘艳芬, 林静, 李宝筏. 轻量化玉米垄作免耕播种机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(11): 60—69.
- Liu Yanfen, Lin Jing, Li Baofa. Design and experiment on lightweight maize ridge planting no-tillage planter [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(11): 60—69.
- [27] 刁培松, 赵殿报, 姚文燕, 等. 玉米播种机滴灌带浅埋铺设装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(2): 88—97.
- Diao Peisong, Zhao Dianbao, Yao Wenyan, et al. Design and experiment of shallow buried laying device for drip irrigation belt of corn seeder [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(2): 88—97.
- [28] 蒋金琳, 龚丽农, 王明福. 免耕播种机单体工作性能试验研究[J]. *农业工程学报*, 2000(5): 64—66.
- [29] GB/T 2089—2009, 普通圆柱螺旋压缩弹簧尺寸及参数(两端圈并紧磨平或制扁)[S].