

基于响应面法的气吸式大豆高速精密排种器试验研究

苏 微,高筱钧,赖庆辉

(昆明理工大学 现代农业工程学院,云南 昆明 650500)

摘 要:以设计的气吸式大豆高速精密排种器为研究对象,采用响应面法试验设计方法,以吸孔直径、真空度、作业速度和吸孔数为影响因素,以合格指数、漏播指数、重播指数、变异系数为目标函数,运用 Design Expert 7.0 试验设计软件进行处理,建立排种器主要性能指标与试验因素之间的数学模型,分析试验诸因素对排种器性能指标影响规律及交互效应关系。优化得出最佳参数组合吸孔直径 4.5~5.0 mm、吸孔数 75~85 个、真空度 5 kPa、作业速度 9 km·h⁻¹ 时,此时合格指数大于 96,漏播指数小于 1.5,重播指数小于 2.5 和变异系数小于 20。

关键词:气吸式排种器;精密播种;响应面法;试验

中图分类号:S223.2 **文献标识码:**A **DOI:**10.11861/j.issn.1000-9841.2015.05.0894

Experimental Study of Soybean High-speed Precision Vacuum Seed Metering Based on Response Surface Method

SU Wei, GAO Xiao-jun, LAI Qing-hui

(Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In this study, we took the new type of soybean high-speed precision vacuum seed metering as the research object and used the response surface method, to tested its funciton. The seed cells diameter, vacuum degree, operating speed and seed cells number were as the influence factors and eligible index, rebroadcast index, omitting seeding index and variance index were as the objective functions. Design Expert 7.0 software was used to establish the regression model between the main performance index and the test factors and analyze the effect of the various factors on the performance index. The best combination of parameters were achieved, seed cells diameter was 4.5-5.0 mm, seed cells number was 75-85, vacuum degree was 5 kPa and the operating speed was 9 km·h⁻¹, under this conditon the eligible index was higher than 96, rebroadcast index was less than 2.5, omitting seeding index was less than 1.5 and variance index was less than 20.

Keywords: Vacuum seed metering; Precision seeding; Response surface method; Experiment

近年来随着运用大马力拖拉机进行耕种作业成为主要趋势,播种作业的速度最高可达 8 km·h⁻¹ 以上,从而对播种机部件的性能提出了更高的要求。高速精密排种器是高速播种机的核心部件,其工作性能好坏直接影响着精播质量^[1-2]。为此,国内外学者对排种器开展了广泛研究。2004 年 Kar-ayel^[3]建立种子千粒重、形状、密度、吸种区域对吸种真空度影响的数学模型,并通过播种柠檬、黄瓜、甜菜、大豆试验验证了此模型精度较高。2006 年谢宇峰等^[4]对 2QXP 高速气吸式排种器进行了大豆排种性能试验,分析了排种器排种盘转速及真空度对大豆排种性能的影响规律。2013 年赵佳乐等^[5]对设计的大豆播种机偏置双圆盘气吸式排种器进行了优化试验,得出最佳因素组合。2015 年贾洪雷等^[6]对设计的双凹面摇杆式排种器以排种器转速、清种环倾斜角为试验因素,单粒率为试验指标进行二次旋转组合试验,结果表明:清种环最佳倾斜角为 65°、排种器转速小于 110 r·min⁻¹ 时,可获得单粒

率在 95% 以上。

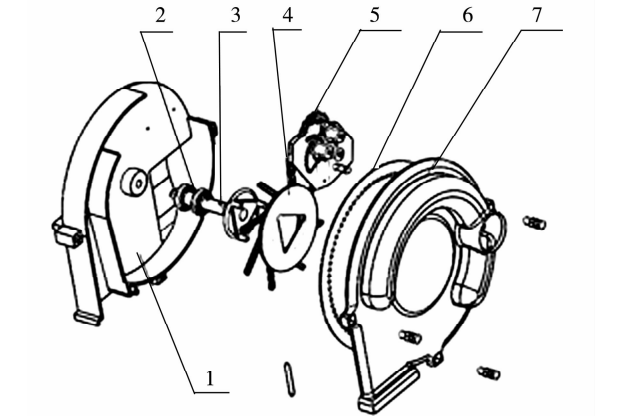
上述研究中未考虑因素对播种指标的交互作用影响。本文基于专利一种气吸式精密排种器^[7] (专利号:ZL 201420160979.4)开展研究,该排种器的特点是加大了排种盘直径,吸孔分布圆直径为 300 mm,降低排种器转速,有利于提高播种作业速度。为优化得到该气吸式大豆高速精密排种器的最佳排种性能,本文开展了吸孔直径、真空度、吸孔数和作业速度的参数优化试验研究,旨在分析试验诸因素对排种器性能指标影响规律及效应关系,得到最优结构与作业参数组合,为排种器结构改进和大豆播种作业提供依据。

1 气吸式精密排种器工作原理

排种器的总体结构如图 1 所示,主要由壳体、轴承、排种轴、搅种轮、刮种器、排种盘和气室壳体等组成。

收稿日期:2015-03-10
基金项目:国家自然科学基金(KKGC201323038);云南省级项目(人培)(KKS201323025,KKS201323067)。
第一作者简介:苏微(1979-),女,博士,讲师,主要从事农业机械化生产与管理研究。E-mail:laisubo@163.com。
通讯作者:赖庆辉(1980-),男,博士,副教授,主要从事精密播种机械研究。E-mail:laiqinghui007@163.com。

工作流程为:排种器工作时,种箱内的种子流入排种器储种室,排种盘一侧为真空气室,真空气室通过软管与风机相通,另一侧与储种室相接。风机工作时,使吸种室内形成一定真空度,真空气室形成负压,排种盘两侧产生压力差,排种盘转到吸种区时,种子依靠真空气室的内外压差被吸附在吸孔上,并与排种盘一起运动到刮种区。刮种区部位有设计的新型两侧刮种结构,可增加多吸附种子和刮种轮的接触次数,加强了刮种效果并可将来多吸附种子刮掉。排种盘继续转动将种子携带到投种区,投种区的排种盘两侧均与大气相通,真空度为零,由于种子失去了风压对其的吸附力,便依靠自身重力及离心力的作用下落,投入导种管进入种沟完成播种过程^[8]。



1:壳体;2:轴承;3:排种轴;4:搅种轮;5:刮种器;6:排种盘;7:气室壳体。

1:Case; 2:Bearing; 3:Seed shaft; 4:Stirring seed wheel; 5: Scraping seed device; 6:Seed disk; 7:Air chamber case.

图1 排种器结构示意图

Fig. 1 Overall structure of the vacuum seed metering

2 材料与方法

2.1 试验材料

试验材料为大豆种子,粒径为6~9 mm,千粒重为176.7 g,自然休止角25°。

2.2 仪器设备

试验在 JPS-12 计算机视觉排种器性能检测试验台上进行。检测系统如图2所示,左侧图为控制台,右侧图为检测试验台。

2.3 试验方法

试验按照国家标准 GB/T 6973-2005 单粒(精密)播种机试验方法进行排种器性能试验和检定^[9]。试验数据通过 Design Expert 7.0 进行回归分析,给出试验诸因素对排种器性能指标影响模型及规律。

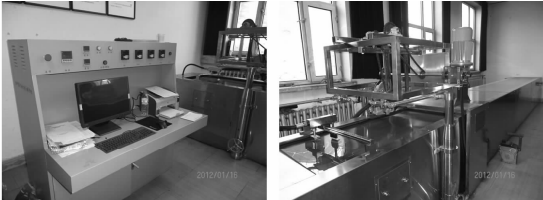


图2 JPS-12 排种器试验台

Fig. 2 JPS-12 seed-metering device test-bed

2.4 试验方案

根据前期预试验,选取吸孔直径、真空度、吸孔数和作业速度为影响因素,由 d 、 p 、 n 和 v 表示;合格指数、漏播指数、重播指数、变异系数为目标函数;利用响应面法进行试验设计及优化。影响因素水平域分别为 $d(3.5 \sim 5.5 \text{ cm})$ 、 $p(3 \sim 7 \text{ kPa})$ 、 $n(40 \sim 120 \text{ 个})$ 和 $v(7 \sim 11 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1})$,因素水平编码表如表1所示。理论株距为10 cm。

3 结果与分析

3.1 试验结果

如表2所示,所有试验的结果合格指数大于85、重播指数小于4.5、漏播指数小于14和变异系数小于24,高于JB/T10293-2001单粒(精密)播种机技术条件中的排种器各项评价标准^[10],已达到精密排种器优等品的要求,完全满足高速精密播种的技术要求。

表1 因素水平编码表

Table 1 Experimental variables and levels

吸孔直径 x_1		真空度 x_2	吸孔数 x_3	作业速度 x_4
Seed cells diameter d/mm		Vacuum degree	Seed cells number	Operating speed
		p/kPa	n	$v/\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$
(+γ)	5.5(2)	7(2)	120(2)	11(2)
(+1)	5.0(1)	6(1)	100(1)	10(1)
(0)	4.5(0)	5(0)	80(0)	9(0)
(-1)	4.0(-1)	4(-1)	60(-1)	8(-1)
(-γ)	3.5(-2)	3(-2)	40(-2)	7(-2)

表 2 试验结果
Table 2 Result of experiment

试验 序号	吸孔直径 Seed cells diameter d/mm	真空度 Vacuum degree p/kPa	吸孔数 Seed cells number	作业速度 Operating speed $v/\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	合格指数 Eligible index A	重播指数 Rebroadcast index D	漏播指数 Omitting seeding index M	变异系数 Variance index C
No.	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2	y_3	y_4
1	4.0	4.0	60	8.0	90.88	1.72	7.39	14.31
2	5.0	4.0	60	8.0	95.16	1.99	2.84	15.41
3	4.0	6.0	60	8.0	97.55	1.23	1.22	12.11
4	5.0	6.0	60	8.0	95.12	1.72	3.16	16.74
5	4.0	4.0	100	8.0	86.87	1.68	11.45	17.12
6	5.0	4.0	100	8.0	95.41	2.10	2.50	19.75
7	4.0	6.0	100	8.0	97.14	1.44	1.41	17.35
8	5.0	6.0	100	8.0	94.86	2.73	2.40	19.30
9	4.0	4.0	60	10.0	88.61	1.43	9.97	15.58
10	5.0	4.0	60	10.0	94.39	1.75	3.85	14.89
11	4.0	6.0	60	10.0	91.08	1.57	7.35	13.84
12	5.0	6.0	60	10.0	96.82	2.61	0.53	16.70
13	4.0	4.0	100	10.0	92.60	1.49	5.91	18.07
14	5.0	4.0	100	10.0	95.70	2.63	1.67	19.82
15	4.0	6.0	100	10.0	97.01	2.08	0.91	18.97
16	5.0	6.0	100	10.0	96.59	2.31	1.10	21.03
17	3.5	5.0	80	9.0	93.12	1.21	5.68	13.26
18	5.5	5.0	80	9.0	92.17	2.19	5.65	21.12
19	4.5	3.0	80	9.0	95.87	1.08	3.06	16.32
20	4.5	7.0	80	9.0	95.38	2.75	1.87	17.68
21	4.5	5.0	40	9.0	85.50	0.93	13.58	16.16
22	4.5	5.0	120	9.0	88.76	3.38	7.85	23.54
23	4.5	5.0	80	7.0	97.54	2.27	0.19	15.66
24	4.5	5.0	80	11.0	94.05	2.88	3.10	19.01
25	4.5	5.0	80	9.0	96.24	1.82	1.97	18.33
26	4.5	5.0	80	9.0	97.21	1.72	1.07	18.87
27	4.5	5.0	80	9.0	94.39	3.25	2.35	20.13
28	4.5	5.0	80	9.0	96.64	1.94	1.42	19.02
29	4.5	5.0	80	9.0	96.81	1.65	1.54	19.68
30	4.5	5.0	80	9.0	96.37	2.52	1.11	19.21
31	4.5	5.0	80	9.0	96.31	1.62	2.07	18.33
32	4.5	5.0	80	9.0	94.51	2.80	2.69	18.87
33	4.5	5.0	80	9.0	92.23	4.45	3.32	20.13
34	4.5	5.0	80	9.0	98.40	1.45	0.15	19.02
35	4.5	5.0	80	9.0	94.90	2.61	2.49	19.68
36	4.5	5.0	80	9.0	94.63	2.67	2.70	19.21

3.2 回归方程

3.2.1 合格指数 y_1 (A) 利用数据处理软件 Design-Expert Version 7.0 分析试验数据,得出合格指数与试验因素的编码值回归方程为:

$$y_1 = 95.72 + 0.85x_1 + 1.07x_2 + 0.55x_3 - 0.27x_4$$

$$-1.32 x_1 x_2 - 0.28 x_1 x_3 + 0.38 x_1 x_4 + 0.22 x_2 x_3 - 0.38 x_2 x_4 + 0.96 x_3 x_4 - 0.56x_1^2 + 0.19x_2^2 - 1.93x_3^2 + 0.27x_4^2$$

基于方差分析合格指数的回归方程显著性检验见表 3。

表 3 方差分析表
Table 3 The table of variance analysis

变异来源 Variation source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F 值 F value	临界值 F Critical value F
回归 Return	236.04	14	16.86	F ₂ = 3.51	F _{0.01} (14,21) = 3.07
剩余 Remain	100.98	21	4.81		
拟合 Fitting	71.23	10	7.12	F ₁ = 2.63	F _{0.05} (10,11) = 2.85
误差 Error	29.75	11	2.70		
总和 Sum	337.02	35			

F 检验的结果表明:

$F_2 > F_{0.01}(14,21) = 3.07$

$F_1 < F_{0.05}(10,11) = 2.85$

所以,由正交旋转组合试验所获得的合格指数回归方程与实际情况具有很好的拟合关系。

模型系数 t 检验如表 4 所示。根据“ t 分布双侧分位数(t_α)表”,以 $t_{0.4}(21) = 0.859$ 为限,剔除不显著项,可得试验因素与合格指数的编码值回归方程为:

$$y_1 = 95.72 + 0.85x_1 + 1.07x_2 + 0.55x_3 - 1.32x_1x_2 + 0.96x_3x_4 - 0.56x_1^2 - 1.93x_3^2$$

试验因素与合格指数的实际值回归方程为:

$$A = 16.84 + 30.27d + 13.63p + 0.44n - 2.64dp + 0.05nv - 2.22d^2 - 0.004n^2$$

表 4 模型系数 t 检验
Table 4 The t inspection of model coefficients

	0	x_1	x_2	x_3	x_4
0	140.76	1.90	2.38	1.22	0.61
x_1		1.43	2.41	0.51	0.69
x_2			0.49	0.40	0.70
x_3				4.97	1.76
x_4					0.69

3.2.2 重播指数 y_2 (D) 同理可得重播指数与试验因素的实际值回归方程为:

$$D = -4.20 + 0.73d + 0.18p + 0.02n + 0.10v$$

3.2.3 漏播指数 y_3 (M) 试验因素与漏播指数的实际值回归方程为:

$$M = 96.82 - 36.79d - 13.05p - 0.46n + 2.52dp - 0.05nv + 3.04d^2 + 0.005n^2$$

3.2.4 变异系数 y_4 (C) 试验因素与变异系数的实际值回归方程为:

$$C = -112.11 + 26.69d - 0.017n + 12.64v + 0.84dp - 0.008dv + 0.006pv - 2.62d^2 - 0.70p^2 - 0.62v^2$$

3.3 图形分析

以两因素对合格指数的影响为例,试验因素组合影响的响应曲面图如图 3。

3.3.1 吸孔直径与真空度对合格指数的影响 图 3a 为吸孔数为 80 个和作业速度为 9 km·h⁻¹时,吸孔直径与真空度对合格指数影响的响应曲面图。由图可知,随着吸孔直径和真空度的逐渐增大,合格指数逐渐增大,大吸孔直径和低真空度较小组合与小吸孔直径和高真空度组合所得到的合格指数较高。可知,吸孔直径 3.5 ~ 4.5 mm,真空度 6.5 ~ 7 kPa 时,可获得合格指数为 97 以上。

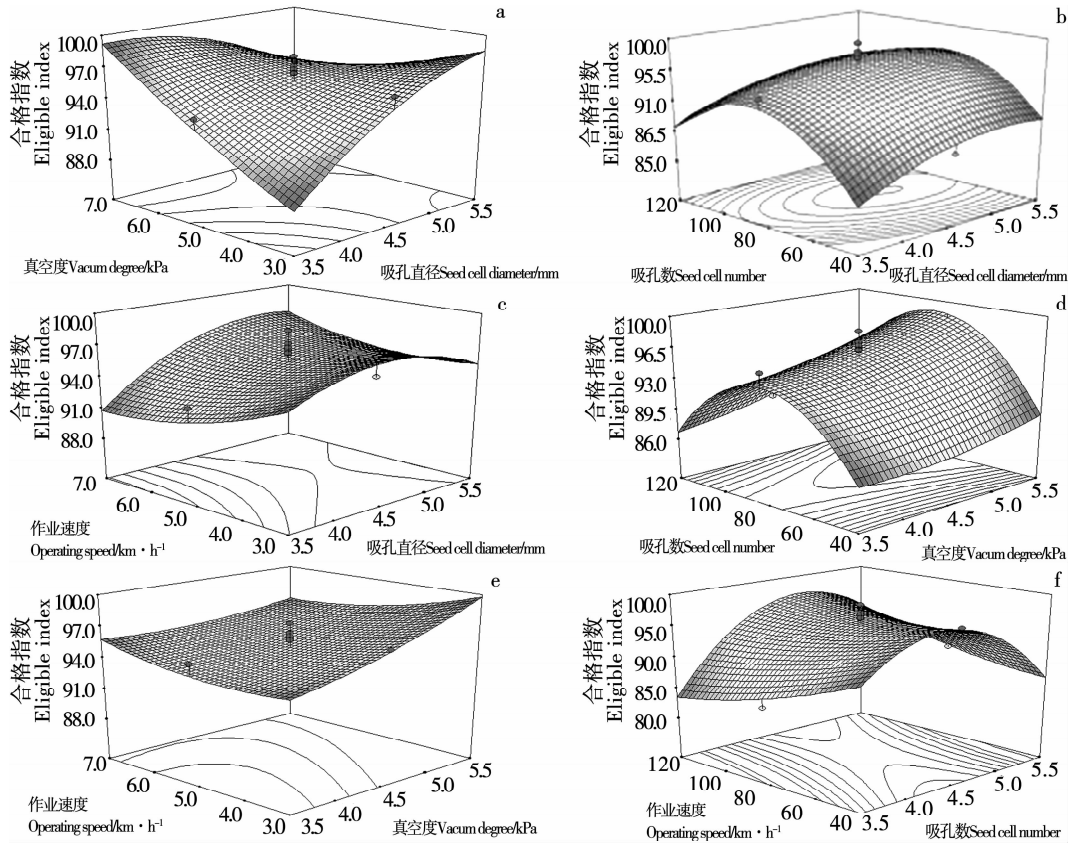


图 3 两因素对合格指数影响的响应曲面图

Fig. 3 The influence of two factors upon eligible index

3.3.2 吸孔直径与吸孔数对合格指数的影响 图 3b 为真空度为 5 kPa 和作业速度为 9 km·h⁻¹ 时,吸孔直径与吸孔数对合格指数影响的响应曲面图。由图可知,随着吸孔直径的增大和吸孔数的增多,合格指数呈先增大后减小的趋势。吸孔直径增大,在同一真空度下,吸孔吸附种子能力增强;吸孔数增多,在同一作业速度下,种盘的转速降低,吸附在吸孔的种子受到离心力变小;二者在开始阶段的增加同时促进了合格指数的升高。当吸孔直径大于 5 mm 和吸孔数大于 80 个时,二者继续增大,吸孔数增多且直径增大,使吸孔的距离变小,吸附能力继续增强,导致有些两个吸孔中间吸附了 3 个以上的种子,使合格指数降低。当吸孔直径为 5 mm 和吸孔数为 80 个时,合格指数达到最大。

3.3.3 吸孔直径与作业速度对合格指数的影响 图 3c 为真空度为 5 kPa 和吸孔数为 80 个时,吸孔直径与作业速度对合格指数影响的响应曲面图。由图可知,随着吸孔直径和作业速度的逐渐增大,合格指数呈先升高后降低的趋势。当吸孔直径小于 5 mm,作业速度小于 9 km·h⁻¹ 时,随着吸孔直径和作业速度的增大,合格指数升高,吸孔直径增大,对大豆种子的吸附力增大,作业速度增大,排种盘的转速加快,种子离心力增大,有种子从种盘上脱落,使播种合格指数略有下降;当吸孔直径大于 5

mm,作业速度大于 9 km·h⁻¹ 时,随着吸孔直径和作业速度的增大,合格指数降低,吸孔直径继续增大,吸孔的吸附能力过强,与作业速度增大相比,吸孔直径起主要作用,吸附种子多于 1 粒,使合格指数下降。

3.3.4 真空度与吸孔数对合格指数的影响 图 3d 为吸孔直径为 4.5 mm 和作业速度为 9 km·h⁻¹ 时,真空度与吸孔数对合格指数影响的响应曲面图。由图可知,随着真空度和吸孔数的增大,二者的增大对合格指数有交互作用,合格指数呈先增大后减小之趋势。当吸孔数小于 80 个时,随着真空度和吸孔数的增大,合格指数不断升高,表明吸孔数小于 80 个时,真空度的增大促使合格指数升高;当吸孔数大于 80 个时,随着真空度和吸孔数的增大,合格指数降低,表明吸孔数大于 80 个时,真空度的增大反而使合格指数降低。

3.3.5 真空度与作业速度对合格指数的影响 图 3e 为吸孔直径为 4.5 mm 和吸孔数为 80 个时,真空度与作业速度对合格指数影响的响应曲面图。由图可知,随着真空度与作业速度的增大,合格指数呈增大趋势,真空度起主要作用,由于大豆种子为椭圆形,与吸孔的形状很接近,当大豆种子吸附到吸孔上时,基本将吸孔堵上了,即使真空度增大,吸附到吸孔上的种子绝大多数为 1 个,特别是当作业

速度较高时,虽有吸附了 2 个种子的可能,也会由于惯性力,且吸附得不牢固,多余的种子也会脱落,保持了较高的合格指数。

3.3.6 作业速度与吸孔数对合格指数的影响 图 3f 为吸孔直径为 4.5 mm 和真空度为 5 kPa 时,作业速度与吸孔数对合格指数影响的响应曲面图。由图可知,随着作业速度的增大和吸孔数的增多,合格指数先升高后降低的趋势,二者对合格指数的作用中,吸孔数起了主要作用,表明吸孔直径为 4.5 mm 和真空度为 5 kPa 时,吸孔所产生的吸附能力确保在 $11\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的作业速度下大豆种子不会脱落,但吸孔增多,吸孔距离越近,促使了合格指数下降。当吸孔数为 80 个和作业速度为 $9\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,合格指数最大。

3.4 参数优化

根据排种器的作业要求,应该获得较高的合格指数,较低的漏播指数、重播指数和变异系数,采用多目标优化的方法,利用数据分析软件 Design-Expert Version 7.0 进行优化求解;参数优化分析图如图 4 所示。当参数组合为:吸孔直径为 4.5 ~ 5.0 mm,吸孔数为 75 ~ 85 个,真空度为 5 kPa,作业速度为 $9\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,可获得合格指数大于 96,漏播指数小于 1.5,重播指数小于 2.5 和变异系数小于 20。

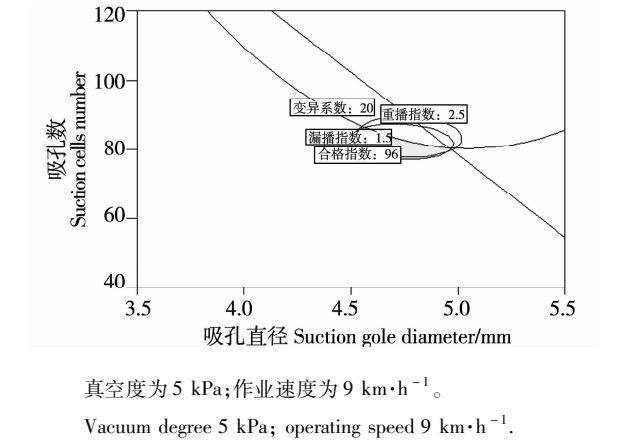


图 4 参数优化分析图

Fig. 4 Figure of parameters optimizing and analysis

4 结 论

获得此气吸式大豆高速精密排种器的合格指数大于 96,漏播指数小于 1.5,重播指数小于 2.5 和变异系数小于 20 的最优参数组合为吸孔直径为 4.5 ~ 5.0 mm,吸孔数为 75 ~ 85 个,真空度为 5

kPa,作业速度为 $9\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,为排种器结构改进和大豆播种作业提供依据。

参考文献

[1] 张德文,李林,王惠民. 精密播种机械[M]. 北京:农业出版社,1982;25,73. (Zhang D W, Li L, Wang H M. Precision seeding machinery[M]. Beijing: Agricultural Press,1982;25,73.)

[2] 陈立东,何堤. 论精密排种器的现状及发展方向[J]. 农机化研究,2006(4):16-18. (Chen L D, He D. Discussion on the current situation of the planting device and developing direction[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006 (4): 16-18.)

[3] Karayl D, Barat Z B, Ozmerzi A. Mathematical modeling of vacuum pressure on a precision seeder[J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(4): 437-444.

[4] 谢宇峰,林君堂,何堤. 排种器转速与真空度对大豆排种性能的影响[J]. 农机化研究,2006(2):48-50. (Xie Y F, Lin J T, He D. The effect of the rotate speed and vacuum of high-speed pneumatic feed for the drilling performance of soybean[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006(2): 48-50.)

[5] 赵佳乐,贾洪雷,姜鑫铭,等. 大豆播种机偏置双圆盘气吸式排种器[J]. 农业机械学报,2013,44(8):81-83. (Zhao J L, Jia H L, Jiang X M, et al. Suction type offset double disc seed metering device of soybean seeder[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 81-83.)

[6] 贾洪雷,赵佳乐,郭明卓,等. 双凹面摇杆式排种器设计与性能试验[J]. 农业机械学报,2015,45(1):60-65, 72. (Jia H L, Zhao J L, Guo M Z, et al. Design and performance experiment on double-concave surface rocker type seed metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 45(1): 60-65, 72.)

[7] 苏微,赖庆辉. 一种气吸式精密排种器:中国, ZL 2014 2 0160979. 4[P]. 2014-09-03. (Su W, Lai Q H. A precision vacuum seed metering; Chinese, ZL 2014 2 0160979. 4[P], 2014-09-03.)

[8] 苏微,赖庆辉,罗奎,等. 气吸式大豆高速精密排种器的设计与试验[J]. 大豆科学,2014,33(4):594-598. (Su W, Lai Q H, Luo K, et al. Design and experiment for soybean high-speed precision vacuum seed metering [J]. Soybean Science, 2014, 33(4): 594-598.)

[9] GB/T 6973-2005 单粒(精密)播种机试验方法[S]. 中国标准出版社,2005. (GB/T 6973-2005 Testing methods of single seed precision drills[S]. China Standard Press. 2005.)

[10] JB/T 10293-2001 单粒(精密)播种机技术条件[S]. 中国机械工业联合会. 2001. (JB/T 10293-2001 Specifications of single seed drill (precision) [S]. China Machinery Industry Federation. 2001.)